

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ  
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«НИЖЕГОРОДСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ  
УНИВЕРСИТЕТ им. Р. Е. АЛЕКСЕЕВА»

**ПРОГРАММА РАЗВИТИЯ ОПОРНОГО УНИВЕРСИТЕТА**

---

***ОБРАЗОВАТЕЛЬНО-НАУЧНЫЙ ИНСТИТУТ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКИ***

---

**АКТУАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ  
ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКИ**

***СБОРНИК НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИХ СТАТЕЙ***

Нижний Новгород 2019

**УДК 550.534.524**

**А 437**

**А 437 Актуальные проблемы электроэнергетики:** сборник научно-техн. статей / Нижегород. гос. техн. ун-т им. Р.Е. Алексеева. – Нижний Новгород, 2019. – 272 с.

В сборник включены материалы V Всероссийской (XXXVIII Региональной) научно-технической конференции «Актуальные проблемы электроэнергетики». В статьях изложены проблемные вопросы современных преобразователей параметров электрической энергии, элементов электрооборудования промышленных установок и систем автоматизированного электропривода, а также эффективности систем электроэнергетики.

Сборник содержит научно-технические результаты и разработки регионального центра развития распределенной энергетики на основе возобновляемых источников энергии НГТУ им. Р.Е. Алексеева и предназначен для научных и инженерно-технических работников, занимающихся проблемами соответствующих направлений.

Конференция проведена в рамках Программы развития опорного университета.

#### **РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ:**

доц. **А.Б. Дарьенков** (отв. редактор), проф. **А.Б. Лоскутов**,  
проф. **В.Г. Титов**, проф. **А.И. Чивенков**,  
доц. **Е.В. Бычков**, доц. **А.А. Кралин**

**УДК 550.534.524**

**ISBN 978-5-502-01219-5**

© **Нижегородский государственный  
технический университет  
им. Р.Е. Алексеева, 2019**

## СОДЕРЖАНИЕ

<b>Секция 1. ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ ПАРАМЕТРОВ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ .....</b>	<b>6</b>
<b>Вахнина В.В., Горохов И.В.</b> Разработка методики расчета тангенциальной компоненты магнитного поля на поверхностях бака силового автотрансформатора.....	6
<b>Вихорев Н.Н., Алешин Д.А., Борисов А.С.</b> Способ повышения качества выходного напряжения инвертора при глубоком регулировании.....	11
<b>Вихорев Н.Н., Алешин Д.А., Борисов А.С., Загляднов А.С.</b> Способ стабилизации выходного напряжения полумостового инвертора при несимметрии питающего напряжения.....	17
<b>Гордеев Б.А., Охулков С.Н., Плехов А.С., Ермолаев А.И., Титов Д.Ю.</b> Определение зависимости динамической жёсткости магнитоуправляемых гидропор от частоты.....	21
<b>Рогинская Л.Э., Горбунов А.С.</b> Исследование влияния схем многомостовых трансформаторно-выпрямительных преобразователей на величину их установленной мощности.....	27
<b>Рогинская Л.Э., Горбунов А.С.</b> Моделирование резонансных инверторов с дросселями насыщения в программном комплексе <i>MATLAB</i> .....	33
<b>Севастьянов В.В., Чивенков А.И., Гребенщиков В.И., Алешин Д.А.</b> Активный выпрямитель напряжения с параметрическим управлением.....	39
<b>Сугаков В.Г., Варламов Н.С., Малышев Ю.С.</b> Использование цифрового фазосдвигающего устройства в регуляторах переменного напряжения.....	48
<b>Шилов М.П.</b> Широтно-импульсная модуляция с трапецеидальной формой управляющего сигнала для автономного инвертора.....	52
<b>Секция 2. АВТОМАТИЗИРОВАННЫЙ ЭЛЕКТРОПРИВОД .....</b>	<b>56</b>
<b>Абузьяров Т.Х., Плехов А.С.</b> Исследование методов снижения пульсаций момента бесколлекторных двигателей постоянного тока.....	56
<b>Гордеев Б.А., Охулков С.Н., Ермолаев А.И., Титов Д.Ю.</b> Исследование влияния температуры на амплитудно-частотные характеристики магнитоуправляемой гидропоры.....	64
<b>Гордеев Б.А., Охулков С.Н., Осмехин А.Н., Титов Д.Ю.</b> Зависимость присоединённой массы рабочей жидкости в дроссельных каналах гидравлических вибропор от управляющего магнитного поля.....	77
<b>Гордеев Б.А., Охулков С.Н., Степанов К.С., Плехов А.С.</b> Построение электромагнитного эквивалента магнитоуправляемой гидропоры методом электромеханических аналогий.....	84
<b>Дарьенков А.Б., Варыгин И.А.</b> Способ скалярного управления матричным преобразователем частоты для электропривода турбомеханизмов.....	95
<b>Дарьенков А.Б., Серебряков А.В., Кочеганов Д.М.</b> Имитационная модель гибридного генераторного комплекса с дифференцированием нагрузки.....	102
<b>Кашканов А.О., Смирнов А.Ю.</b> Магнитоэлектрическая машина с преобразованием энергии на третьей гармонике.....	107
<b>Кашканов А.О., Смирнов А.Ю.</b> Определение оптимальной формы импульса тока в шаговом электроприводе с инвертором тока.....	110
<b>Саттаров Р.Р., Еременко В.В.</b> Замедление объектов с помощью управляемого электромагнитного демпфера.....	114

<b>Сафиуллин Р.А., Янгиров И.Ф., Ишмуратов Ю.Г., Ямалтдинов Р.А.</b> Проектирование дефектоскопа на основе спирального электропривода.....	121
<b>Синюков А.В., Синюкова Т.В.</b> Нечеткие регуляторы в системах управления объектами металлургических предприятий.....	129
<b>Смирнов А.Ю., Зимин А.Ю.</b> Оптимизационные расчёты электродвигателей в составе шагового электропривода.....	134
<b>Шишлин Д.И., Белокопытов Р.Н., Лютова Е.В.</b> Создание модели испытываемого стенда для машин переменного тока в программной среде <i>Simulink</i> .....	139
<b>Шишлин Д.И., Белокопытов Р.Н., Новик М.М.</b> Моделирование электрической передачи переменного тока, используемой на тяговом транспорте, в программной среде <i>Simulink</i> .....	144
<b>Секция 3. ЭФФЕКТИВНОСТЬ СИСТЕМ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКИ И ЭКОНОМИЯ ЭНЕРГОРЕСУРСОВ</b> .....	149
<b>Анищенко В.А., Писарук Т.В.</b> Достоверность измерений нагрузки промышленных предприятий.....	149
<b>Бирюлин В.И., Куделина Д.В.</b> Разработка модели оценки состояния изоляции кабельных линий на основе нечеткого логического вывода.....	156
<b>Вагин Г.Я., Севостьянов А.А., Юртаев С.Н.</b> Повышение качества электрической энергии на металлургических предприятиях.....	161
<b>Гатауллин А.М.</b> Интеллектуальная система энергоснабжения, учитывающая степень загрязнения изоляторов.....	166
<b>Гатауллин А.М.</b> Разработка экспресс-метода оценки состояния изоляции силовых кабелей.....	173
<b>Грачева Е.И., Алимова А.А.</b> Анализ потерь электроэнергии в системах цехового электроснабжения.....	179
<b>Грачева Е.И., Наумов О.В.</b> Анализ методов расчета электрических нагрузок промышленных объектов.....	186
<b>Дарьенков А.Б., Соколов В.В., Липужин И.А., Мельников В.Л., Бадугин Д.А.</b> Динамические режимы работы трансформаторного регулятора напряжения при компенсации продольных и поперечных возмущений в электрической сети.....	191
<b>Карпов И.П.</b> Запрет автоматического повторного включения выключателя контактной сети переменного тока двухпутного участка.....	198
<b>Кралин А.А., Асабин А.А., Крюков Е.В., Еременко В.В.</b> Имитационная модель блока формирования сигналов для системы управления второго уровня ТРВДН.....	203
<b>Крюков Е.В., Иванов А.В., Эрдили Н.И.</b> Разработка программной части имитационного комплекса виртуальной электростанции на базе возобновляемых источников энергии.....	208
<b>Куделина Д.В., Бирюлин В.И.</b> Метод диагностики и контроля состояния изоляции кабельных линий.....	213
<b>Куликов А.Л., Лоскутов А.А., Митрович М.</b> Определение параметров срабатывания измерительных органов многомерной релейной защиты с учетом допустимых и аварийных режимов.....	218
<b>Куликов А.Л., Шарыгин М.В., Ворошилов А.А.</b> Метод распознавания тренда графика нагрузки в автоматике отключения силовых трансформаторов.....	224
<b>Лоскутов А.Б., Демидова А.С., Пронина О.А., Чумарин К.Е.</b> Разработка алгоритма управления замкнутыми сетями с устройствами регулирования потоков мощности.....	229
<b>Маслеева О.В., Крюков Е.В., Эрдили Н.И.</b> Оценка экологической составляющей жизненного цикла возобновляемых источников энергии.....	235

---

<b>Палкин И.А., Монаков Ю.В.</b> Автоматизация расчетов токов короткого замыкания в типовых задачах.....	241
<b>Платонов Д.Ю., Голубева Н.Д., Степанов В.П.</b> Дополнительные потери электроэнергии в системах электроснабжения портов, вызываемые работой кранов.....	245
<b>Попкова Н.А., Зубарев А.А.</b> Влияние источников распределенной генерации на уровень потерь электроэнергии в распределительных электрических сетях.....	250
<b>Соснина Е.Н., Бедретдинов Р.Ш., Липужин И.А., Смирнов А.И.</b> Активно-адаптивная система управления твердотельного регулятора напряжения.....	254
<b>Соснина Е.Н., Шалухо А.В., Веселов Л.Е., Федорчатенко В.И.</b> Применение топливных элементов в системах электроснабжения сельскохозяйственных предприятий.....	260
<b>Фролов А.А., Павлюченко Д.А.</b> Влияние активных потребителей с собственной генерацией на режимные параметры MicroGrid.....	265

---

**Секция 1. ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ ПАРАМЕТРОВ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ**

---

УДК 621.314.222

**В.В. Вахнина, И.В. Горохов****РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ РАСЧЕТА ТАНГЕНЦИАЛЬНОЙ КОМПОНЕНТЫ МАГНИТНОГО ПОЛЯ НА ПОВЕРХНОСТЯХ БАКА СИЛОВОГО АВТОТРАНСФОРМАТОРА**

Тольяттинский государственный университет

Разработан метод расчёта тангенциальной компоненты поля рассеяния на поверхности бака автотрансформатора по реальной его геометрии. Для этого поверхность бака задаётся математической функцией от длины образующей корпуса и расстоянием от нижней поверхности. Расчёты распределения температуры по поверхности бака АОДЦТН-267000/500/220 позволили определить расположение наиболее нагретых точек и найти зависимость скорости роста температуры от квазипостоянного тока в обмотках.

A method for calculating the tangential component of the stray field on the autotransformer tank surface according to its real geometry was developed. The tank surface is set by a mathematical function of the tank body length generatrix and the distance from the bottom surface. Calculations of the temperature distribution over the surface of the AODCTN-267000/500/220 tank made it possible to determine the location of the most heated points and find the dependence of the temperature rise on the quasi-direct current in the windings.

**Ключевые слова:** автотрансформатор, квазипостоянный ток, магнитное поле рассеяния, нагрев бака, наиболее нагретая точка.

**Key words:** autotransformer, quasi-direct current, stray magnetic field, tank heating, most heated point.

При геомагнитных бурях в линиях электропередач протекают квазипостоянные токи (КПТ). Прямым объектом воздействия КПТ являются силовые трансформаторы подстанций. При значительных КПТ наблюдается насыщение магнитопроводов силовых однофазных автотрансформаторов (АТ), что вызывает рост потока рассеяния магнитного поля и тока намагничивания [1]. Это провоцирует развитие аварий, приводящих к прекращению электроснабжения на значительных территориях и повреждению оборудования [2]. Наблюдается рост температуры бака АТ и, как результат, снижение электрической прочности трансформаторного масла. Высокая стоимость АТ и требование обеспечения надёжного электроснабжения потребителей делает необходимым исследование механизмов воздействия КПТ на работу АТ.

Температура АТ определяется, в основном, мощностью потерь в проводниках обмоток, магнитопроводе и стенках бака. Мощность потерь на стенках бака определяется тангенциальной составляющей магнитного поля рассеяния и гармоническим составом тока. Методы расчёта и анализа тока намагничивания в АТ развиты в работе [3]. Однако при расчётах тепловых потерь в АТ используются упрощённые модели бака, как правило, в форме параллелепипеда, что не позволяет достоверно вычислить температуру бака и наиболее нагретых точек (ННТ). В связи с этим актуальной является разработка метода моделирования методики расчета тангенциальной компоненты магнитного поля на поверхностях бака реальной конфигурации.

Расчёт магнитного поля рассеяния в баке силового однофазного автотрансформатора выполнен методом, изложенным в [3]. Общая и последовательная обмотки АТ заменены одной тонкой обмоткой, по которой течёт приведенный ток намагничивания. При насыщении магнитной системы квазипостоянным током его вклад учитывался в заземлённых обмотках.

Для вычисления распределения на стенках возбуждаемых полей рассеяния токов разработана математическая модель бака. Расчёты выполнены для силового однофазного автотрансформатора АОДЦТН - 267000/500/220.

Распределение поля вычисляется в прямоугольной системе координат  $(x, y, z)$ , а поверхность бака АТ задается расстоянием по длине образующей корпуса и расстоянием от нижней поверхности  $(l, z)$ . На рис. 1 представлен профиль бака АТ в плоскости  $z = 0$ .

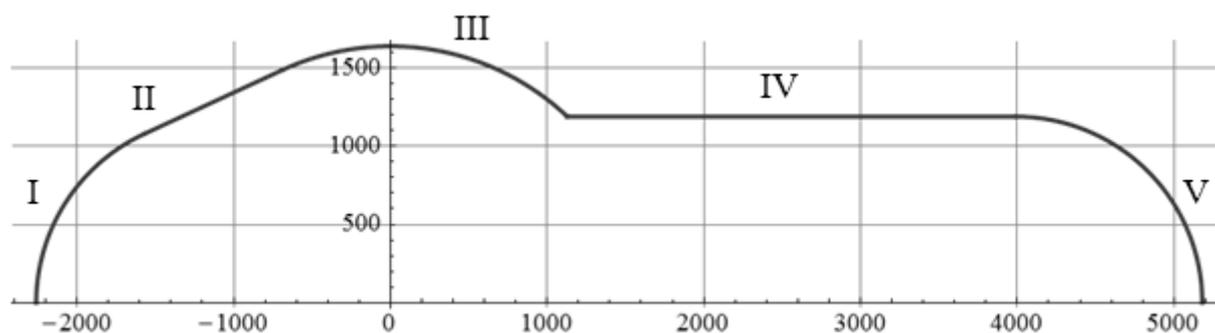


Рис.1. Профиль бака силового однофазного автотрансформатора большой мощности АОДЦТН-267000/500/220

На боковой поверхности АТ тангенциальная составляющая напряженности магнитного поля  $H_\tau$  рассчитывается по формуле [1,2]:

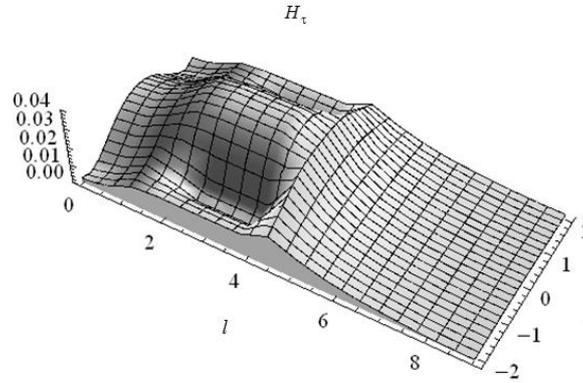
$$H_\tau(l, z) = \sqrt{(H_x(l, z) \cdot \cos \alpha_L(l, z) + H_y(l, z) \cdot \sin \alpha_L(l, z))^2 + (H_z(l, z))^2}, \quad (1)$$

где  $\alpha_L(l, z)$  – угол наклона касательной к профилю в точке с координатами  $(l, z)$ .

На верхней поверхности бака:

$$H_\tau(x, y) = \sqrt{(H_x(x, y))^2 + (H_y(x, y))^2}. \quad (2)$$

На рис. 2 представлена картина распределения  $H_\tau$  на боковой поверхности бака АТ. Наибольшее значение  $H_\tau$  достигает в плоскости  $z = 0$  при значениях  $l$  в диапазоне [1,5 м; 3,5 м].



**Рис.2. Распределение тангенциальной составляющей напряженности магнитного поля по длине образующей боковой поверхности бака АТ**

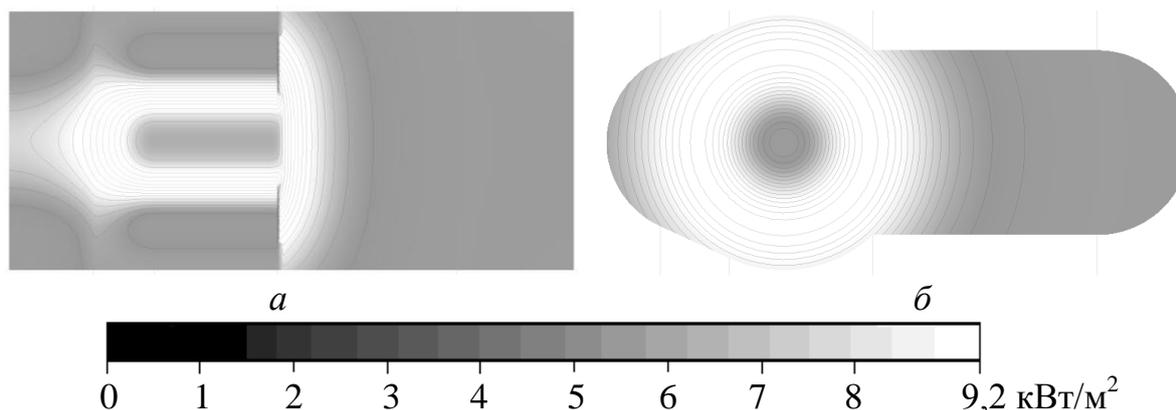
Удельные потери активной мощности в баке рассчитаны для каждой из гармонических составляющих тока намагничивания. Суммарные потери вычислялись интегрированием по поверхностям бака. В расчётах полагалось, что удельные потери пропорциональны квадрату тангенциальной составляющей напряженности магнитного поля на поверхности бака АТ:

$$p_{II} = \frac{1}{2} k_\phi r_{II(1)} \sqrt{n} \cdot k_H^2 \cdot H_\tau^2 = k \sqrt{n} \cdot H_\tau^2, \quad (3)$$

где  $k_\phi=1,15$  для конструкционной стали;  $r_{II(1)}=2,06 \cdot 10^{-4}$  Ом - поверхностное сопротивление стали при  $f=50$  Гц;  $n$  – номер гармоники;  $k_H=2$  – коэффициент влияния бака на поле обмоток;  $k = \frac{1}{2} k_\phi \cdot r_{II(1)} \cdot k_H^2 = 4,735 \cdot 10^{-4}$  Ом.

Исследование распределения функций двух переменных  $H_\tau(l,z)$ ,  $H_\tau(x,y)$  на боковой и верхней поверхностях бака АТ показало, что максимальное значение  $H_\tau$  достигается в плоскости  $z=0$  на участке III профиля бака (рис. 1) и представляют собой сегмент дуги окружности радиуса  $r_2=1,64$  м. На верхней поверхности бака геометрическое множество точек представляет собой окружность радиуса  $r_{ННТ} = 1,069$  м с центром на оси обмоток.

Расчёты распределения удельных потерь на боковой и верхней поверхностях бака АОДЦТН - 267000/500/220 выполнены при КПТ в заземлённых обмотках до  $I=120$  А. На рис. 3 приведены картины распределения удельных потерь активной мощности на боковой (рис. 3, а) и верхней (рис. 3, б) поверхностях бака АТ при  $I=65$  А.



**Рис.3. Распределение удельных потерь мощности на боковой (а) и верхней (б) поверхностях бака силового однофазного автотрансформатора АОДЦТН-267000/500/220 с линиями уровня при  $I=65$  А**

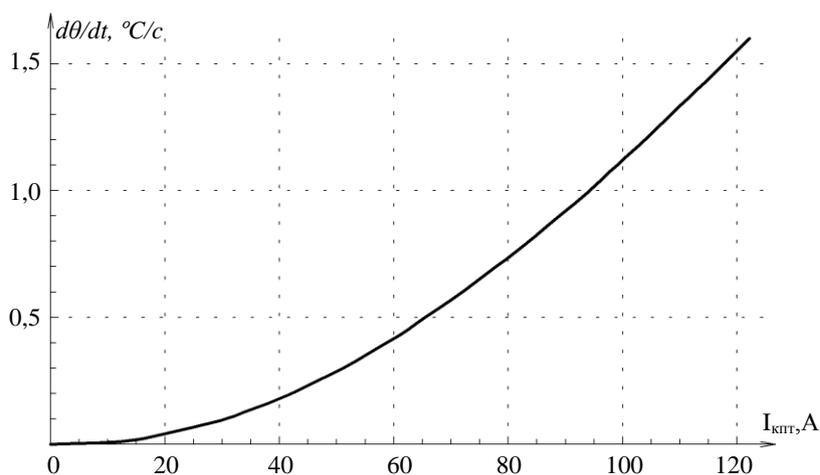
Суммарные потери мощности на боковой и верхней поверхностях бака и в целом в баке АТ, при насыщении его магнитной системы квазипостоянным током  $I=65$  А, протекающим по заземленным обмоткам, представлены в таблице.

**Удельные и суммарные потери на поверхностях бака однофазного силового автотрансформатора АОДЦТН-267000/500/220 при  $I=65$  А**

Поверхность	Боковая	Верхняя	Всего бака
Максимальные удельные потери, кВт/м <sup>2</sup>	9,20	4,79	9,20
Средние удельные потери, кВт/м <sup>2</sup>	1,78	2,19	1,91
Суммарные потери, кВт	66,58	39,37	211,90

Зависимость суммарных потерь в баке АТ АОДЦТН-267000/500/220 от постоянного тока практически линейная. При  $I=65$  А суммарные потери мощности в баке АОДЦТН-267000/500/220 составили 211,9 кВт, а при  $I=120$  А достигают 670 кВт.

Для определения допустимого уровня КПТ в обмотках АТ выполнены расчёты изменения температуры наиболее нагретой точки. Расчёты показали, что удельные дополнительные потери мощности от вихревых токов в наиболее нагретой точке бака АОДЦТН-267000/500/220 нелинейно зависят от величины КПТ. Скорость изменения температуры ННТ не остается постоянной при протекании квазипостоянного тока через обмотки автотрансформатора и максимальна при проявлении КПТ, а при увеличении температуры бака снижается. Зависимость скорости изменения температуры геометрического множества ННТ на боковой поверхности бака АТ АОДЦТН-267000/500/220 от величины постоянного тока приведена на рис. 4.



**Рис.4. Зависимость скорости изменения температуры ННТ боковой поверхности бака от величины квазипостоянного тока**

Расчёты показали, что скорость роста температуры ННТ растёт с увеличением квазипостоянного тока быстрее линейной функции (рис. 4). Так, при длительности  $t=3600$  с и более, КПТ амплитудой 120 А температура масла в верхних слоях бака АОДЦТН-267000/500/220 может превышать допустимое значение  $115^{\circ}\text{C}$  [5].

#### Библиографический список

1. **Тихомиров, П.М.** Расчет трансформаторов: учеб. пособие для вузов. / П.М. Тихомиров – М.: Ленанд, 2014. 528 с.
2. **Pulkkinen, A.** Solar shield: Forecasting and mitigating space weather effects on high-voltage power transmission systems / A. Pulkkinen [et al.] // Nat Hazards 53, 2010. – P. 333 345.
3. **Вахнина, В.В.** Моделирование режимов работы силовых трансформаторов систем электроснабжения при геомагнитных бурях: монография / В.В. Вахнина – Тольятти : Изд-во ТГУ, 2012. – 104 с.
4. **Лейтес, Л.В.** Электромагнитные расчёты трансформаторов и реакторов / Л.В. Лейтес – М. : Энергия, 1981. – 392 с
5. МЭК 354-91. Loading guide for oil – immersed power transformers. Межгосударственный стандарт. – Введ. 2002-01.01. Минск: Изд-во стандартов, 2001.

УДК 621.314

А.С. Борисов, Н.Н. Вихорев, Д.А. Алешин, В.И. Калинин

**СПОСОБ ПОВЫШЕНИЯ КАЧЕСТВА ВЫХОДНОГО НАПРЯЖЕНИЯ  
ИНВЕРТОРА ПРИ ГЛУБОКОМ РЕГУЛИРОВАНИИ**

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Предложен способ повышения качества электроэнергии полупроводниковых преобразователей при глубоком регулировании величины выходного напряжения посредством геометрического суммирования векторов напряжений двух и более синхронно работающих инверторов, объединяемых в общую энергосистему с помощью серийного трансформатора.

The article proposes a method for improving the power quality of semiconductor converters with deep regulation of the output voltage magnitude by geometrically summing the voltage vectors of two or more synchronously working inverters combined into a common power system using a serial transformer.

**Ключевые слова:** коэффициент нелинейных искажений, широтно-импульсная модуляция, векторное регулирование напряжения.

**Key words:** total harmonic distortion, pulse width modulation, vector control of voltage.

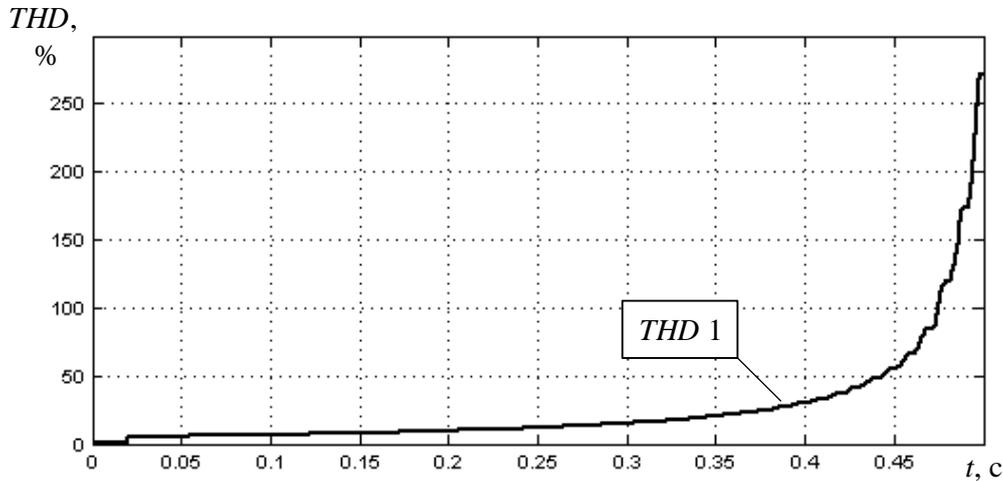
В настоящее время полупроводниковые инверторы напряжения применяются в составе разнообразных устройств: автономные источники переменного напряжения; стабилизаторы и регуляторы напряжения; регуляторы потоков мощности в линиях электропередачи и т.д.

подавляющее большинство полупроводниковых инверторов представляют собой импульсные (ключевые) преобразователи, в которых формирование выходного напряжения производится посредством применения одной из разновидностей импульсной модуляции. Широкое распространение получила широтно-импульсная модуляция (ШИМ), позволяющая задать постоянную частоту коммутации ключевых элементов, что упрощает расчет и схемотехнику выходных фильтров преобразователя [3].

Регулирование выходного напряжения инвертора с ШИМ производится путём изменения соотношения опорного (высокочастотного) и задающего сигналов. Снижение величины выходного напряжения приводит к увеличению суммарного коэффициента нелинейных искажений [4].

На рис. 1 приведена диаграмма изменения суммарного коэффициента гармонических искажений (*THD*) для полумостового инвертора, выполненного на *IGBT*-транзисторах. Действующее значение выходного напряжения преобразователя изменяется от 220 В до 0 В (50 Гц) в течение 0,5 сек. Частота коммутации силовых ключей – 5 кГц, сопротивление активной нагрузки – 10 Ом. Параметры выходного *LC*-фильтра: 650 мкГн; 40 мкФ.

$THD$  изменяется по квазиэкспоненциальному закону от 5% до 270%. Наибольшие искажения преобладают в зоне формирования малых напряжений, составляющих 10% от номинала.



**Рис. 1.** Диаграмма изменения коэффициента нелинейных искажений при уменьшении уровня выходного напряжения инвертора

Качество выходного напряжения может быть улучшено посредством увеличения частоты модуляции и изменением параметров выходного фильтра, однако в тех случаях, когда разрабатывается устройство большой мощности (100 кВт и более), в большинстве случаев применяются *IGBT*-транзисторы, способные коммутировать большие токи (100 А и более). Такие транзисторы неспособны работать на высоких частотах (свыше 20 кГц) без дополнительных средств смягчения процесса коммутации, а снижение частоты среза для выходного фильтра или увеличение его порядка приводит к значительному увеличению его массогабаритных показателей [6].

Повышение качества выходного напряжения при необходимости глубокого регулирования может быть достигнуто применением способа геометрического суммирования напряжений двух и более инверторов напряжения (И1, И2) посредством введения сериесного трансформатора  $T$  (рис. 2, а). Сущность предлагаемого способа регулирования заключается в изменении фазового угла  $\varphi_p$  между напряжениями преобразователей  $U_n'$ ,  $U_n''$  при неизменной амплитуде (рис. 2, б) при этом результирующий вектор напряжения  $U_n$  изменяется от нуля до удвоенного значения выходного напряжения одного из преобразователей (при соблюдении равенства амплитуды выходных напряжений) [2, 5].

Закон регулирования выходного напряжения описывается приведенными далее математическими соотношениями (1, 2).

При условии, что длины векторов  $\vec{U}_n'$  и  $\vec{U}_n''$  равны, их можно обозначить одной буквой  $\vec{U}_n$ . В соответствии с правилом параллелограмма, применяемым для сложения векторных величин, длина результирующего вектора  $\vec{U}_n$  определяется как:

$$U_H = 2 \cdot U_{\Pi} \cdot \cos\left(\frac{\varphi_p}{2}\right). \quad (1)$$

При этом фазовый угол  $\varphi_p$  определяется следующим математическим выражением и является функцией требуемого уровня выходного напряжения  $U_H$ :

$$\varphi_p = 2 \cdot \arccos\left(\frac{U_H}{2 \cdot U_{\Pi}}\right). \quad (2)$$

В соответствие со структурной схемой и векторной диаграммой, приведенными на рис. 2, разработана имитационная модель энергосистемы в среде *Matlab/Simulink*, включающая в себя два идентичных друг другу инвертора (объединенных в общий блок *Invertor2*), выходные напряжения которых синхронизированы (рис. 3) и равны по амплитуде и частоте, а фазовые углы могут изменяться по задающему сигналу. Параметры *LC*-фильтров и нагрузки выбраны аналогичными одноканальному инвертору, трансформатор - с коэффициентом 1:1.

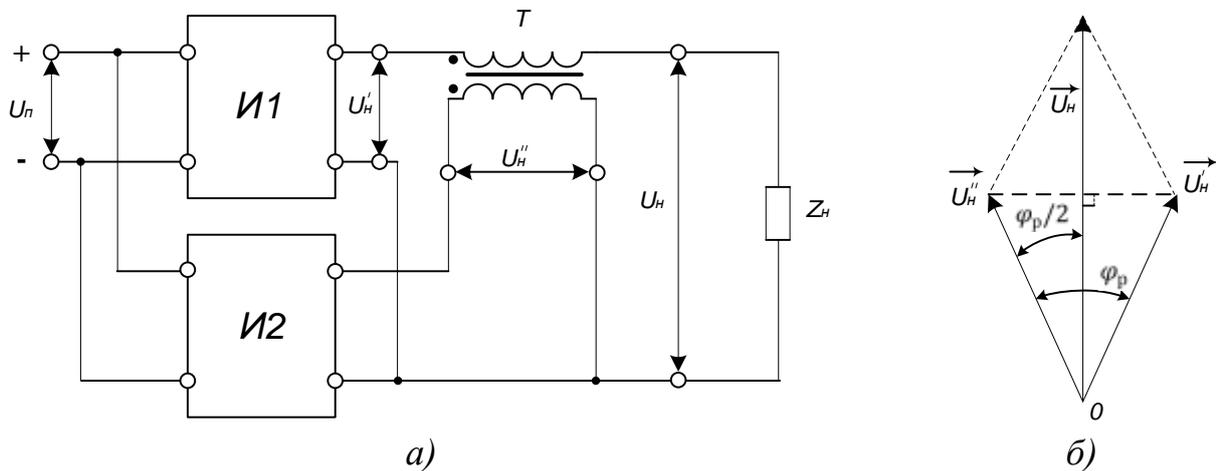


Рис. 2. Способ геометрического суммирования напряжений преобразователей: а) структурная схема энергосистемы, б) векторная диаграмма сложения напряжений

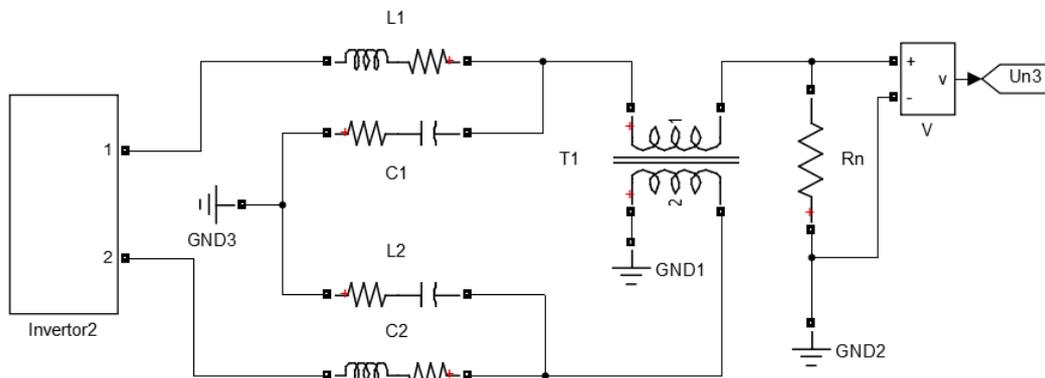
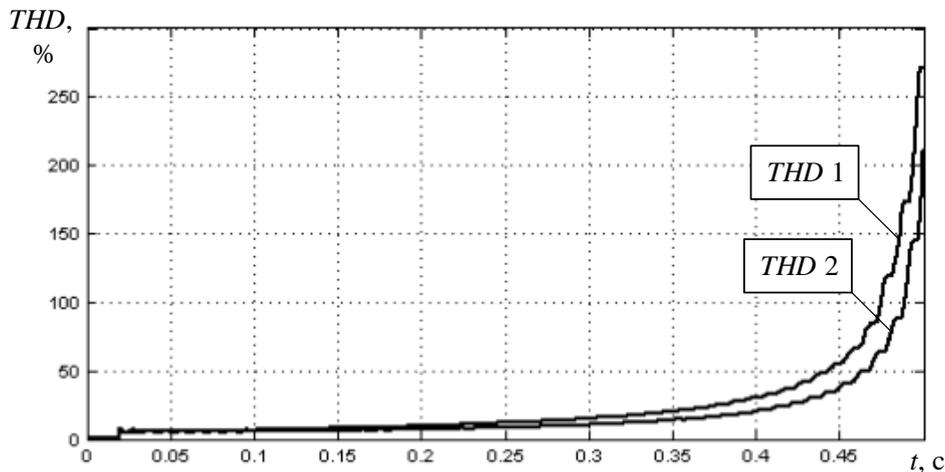


Рис. 3. Имитационная модель энергосистемы из двух инверторов напряжения и серийного трансформатора

Диаграмма изменения коэффициента нелинейных искажений результирующего напряжения при регулировании фазового угла между выходными напряжениями преобразователей приведена на рис. 4 (*THD 2*) в сравнении с диаграммой *THD 1* одноканального инвертора. При регулировании величины выходного напряжения длина векторов напряжений преобразователей остается неизменной, следовательно, искажения гармонического состава выходного напряжения менее выражены.

Следует отметить, что для достижения тех же уровней выходного напряжения, как в первом случае с одноканальным инвертором, преобразователи должны быть выполнены на половину результирующего выходного напряжения, что позволяет применить более низковольтные ключевые элементы, а также снизить рабочее напряжение в звене постоянного тока, где установлен источник питания инверторов напряжения.



**Рис. 4. Сравнительная диаграмма изменения коэффициента нелинейных искажений выходных напряжений**

Модификацией предлагаемого способа регулирования является введение фазового сдвига 180 эл. гр. между опорными высокочастотными сигналами ШИМ-генераторов инверторов напряжения [1].

На рис. 5 приведены диаграммы изменения коэффициента нелинейных искажений при изменении выходного напряжения  $U_n$  от 220 В (действующее значение) до нулевого значения, где:

- *THD 1* соответствует одноканальному инвертору напряжения;
- *THD 2* соответствует энергосистеме из двух инверторов напряжений без фазового сдвига ШИМ;
- *THD 3* соответствует энергосистеме из двух инверторов напряжений при введении фазового сдвига ШИМ.

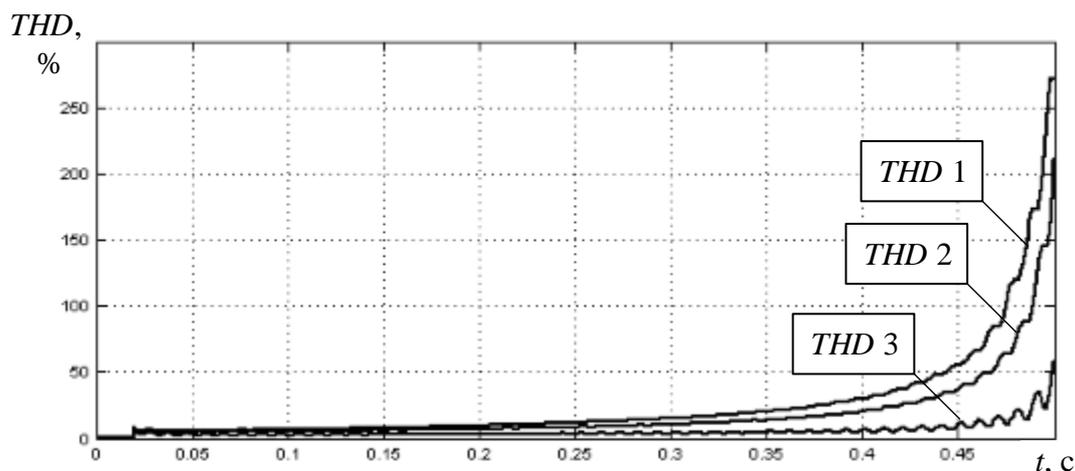


Рис. 5. Диаграммы изменения коэффициентов нелинейных искажений выходного напряжения

В третьем случае (при наличии фазового сдвига ШИМ)  $THD$  изменяется от 2% до 5% при регулировании выходного напряжения от 220 В до 22 В. При формировании напряжения ниже 10% от номинала  $THD$  не превышает 55%, что в пять раз ниже, чем в случае применения одноканального инвертора.

### Выводы

1. Применение способа геометрического суммирования напряжений позволяет снизить уровень гармонических искажений выходного напряжения практически вдвое при регулировании выходного напряжения в диапазоне от 100% до нуля.
2. Комбинирование способа геометрического суммирования напряжений и введение фазового сдвига между синхронно работающими ШИМ-генераторами преобразователей позволяет снизить искажения выходного напряжения в пять раз.
3. Регулирование выходного напряжения с помощью способа геометрического суммирования позволяет выполнить каждый из преобразователей на вдвое меньшее напряжение по отношению к требуемой величине выходного напряжения, а, следовательно, снизить требования к максимальному рабочему напряжению полупроводниковых ключей.

### Библиографический список

1. **Борисов, А.С.** Широтно-импульсная модуляция при параллельной работе инверторов напряжения на общую нагрузку / А.С. Борисов, Д.А. Алешин, Н.Н. Вихорев // Актуальные проблемы электроэнергетики: сборник научно-технических статей. Посвящается 80-летию со дня рождения проф. С.В. Хватова. – Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева; Образовательно-научный институт электроэнергетики. – 2018. – С. 62-65.

2. **Волович, Г.** Цифровой синтез выходного напряжения инвертора на основе троичной арифметики / Г. Волович, А. Евдокимов // Компоненты и технологии. – 2011 – № 6. – С. 119 – 124.
3. **Григораш, О.В.** Стабилизация напряжения автономных инверторов солнечных электростанций / О.В. Григораш, М.А. Попучиева // Политематический сетевой электронный журнал кубанского государственного аграрного университета. Краснодар. – 2017. – № 130 – С. 1019-1032.
4. **Зайкин, О.Л.** Схема инвертора напряжения с последовательным соединением двух трехфазных трёхуровневых инверторов // Новая наука: проблемы и перспективы. – 2016. – № 6-2(85) – С.173-176.
5. **Розанов, Ю.К.** Основы силовой электроники // Москва: издательство Энергоатомиздат, 1992. – 296 С.
6. **Усков, А.Е.** Статические преобразователи электроэнергии с улучшенными эксплуатационно-техническими характеристиками / А.Е. Усков, П.Г. Корзенков, А.П. Донсков // КубГАУ. – 2014. – № 97(03). – С. 1-12.

УДК 621.314

Н.Н. Вихорев, Д.А. Алешин, А.С. Борисов, А.С. Загляднов

**СПОСОБ СТАБИЛИЗАЦИИ ВЫХОДНОГО НАПРЯЖЕНИЯ  
ПОЛУМОСТОВОГО ИНВЕРТОРА ПРИ НЕСИММЕТРИИ  
ПИТАЮЩЕГО НАПРЯЖЕНИЯ**

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

В статье предложен способ стабилизации амплитуды, а также компенсации постоянной составляющей выходного напряжения полупроводникового полумостового инвертора напряжения в условиях дисбаланса питающих напряжений в звене постоянного тока. Приведены математические соотношения, определяющие поправочные параметры задающего сигнала, а также результаты моделирования имитационного моделирования.

The article proposes a method for stabilizing the amplitude and compensating for the constant component of the output voltage of a semiconductor half-bridge voltage inverter under unbalanced supply voltage in a DC link. Mathematical correlations determining the correction parameters of the master signal, the results of simulation modeling are presented.

**Ключевые слова:** постоянная составляющая, стабилизация выходного напряжения, обратная связь, коррекция, полумостовой инвертор.

**Key words:** constant component, output voltage stabilization, feedback, correction, half bridge inverter.

При разработке вторичных источников электропитания на базе полупроводниковых преобразователей может возникнуть необходимость стабилизации параметров электроэнергии. Например, отклонение питающего напряжения полумостового преобразователя приводит к формированию постоянной составляющей в выходном переменном напряжении, а также отклонении амплитуды от заданного значения.

Данное явление приводит к протеканию токов подмагничивания в цепях согласующих трансформаторов и другого электромагнитного оборудования, подключенного к полупроводниковому инвертору, а также усложняет или полностью исключает возможность физического соединения преобразователя с источником переменного напряжения (в случае, когда инвертор является частью ведомого сетью преобразователя или активного выпрямителя) [3].

Одним из способов стабилизации выходного напряжения преобразователя и компенсации постоянной составляющей является введение контура обратной связи по напряжению в звене постоянного тока в систему широтно-импульсной модуляции.

Для того, чтобы скомпенсировать постоянную составляющую напряжения на выходе преобразователя, необходимо ввести обратное смещение  $U_{cd}$  в задающий сигнал ШИМ-генератора на величину, численно равную

полуразности питающих напряжений положительной  $U_{c1}$  и отрицательной  $U_{c2}$  полярности:

$$U_{cd} = \frac{U_{c1} - U_{c2}}{2}. \quad (1)$$

Таким образом, формирование выходного напряжения будет осуществляться относительно такого уровня напряжения, который соответствует нулевому потенциалу в условиях возникшей несимметрии питающего напряжения.

После проведенных манипуляций с задающим сигналом процесс стабилизации амплитуды выходного напряжения значительно упрощается и требует лишь определения поправочного коэффициента  $U_{cav}$  по заданной амплитуде, который может быть вычислен как отношение полусуммы питающих напряжений к их номинальному уровню  $U_c$ :

$$U_{cav} = \frac{U_{c1} + U_{c2}}{2 \cdot U_c}. \quad (2)$$

Описанные принципы стабилизации выходного напряжения реализованы в имитационной модели полумостового инвертора, выполненной в среде *Matlab/Simulink* (рис. 1).

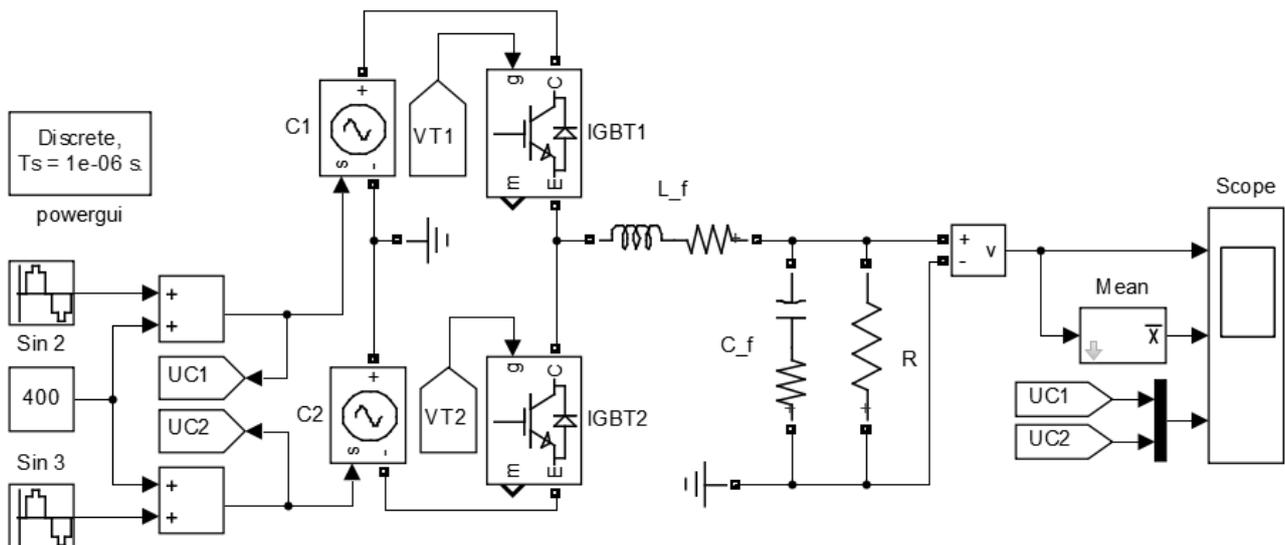
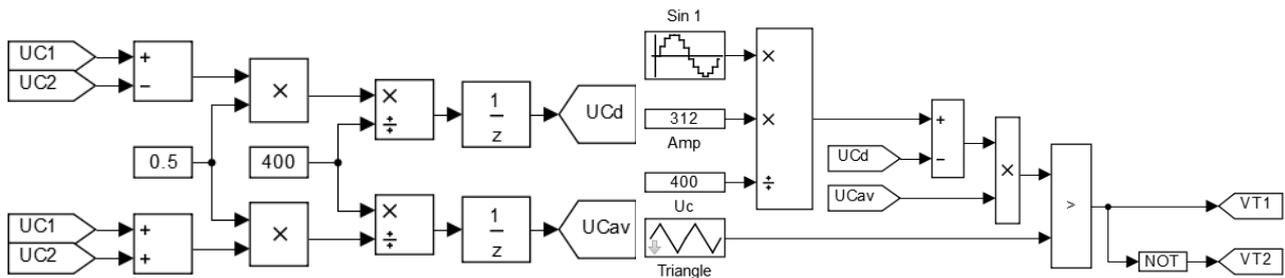


Рис. 1. Имитационная модель силовой части полумостового инвертора напряжения

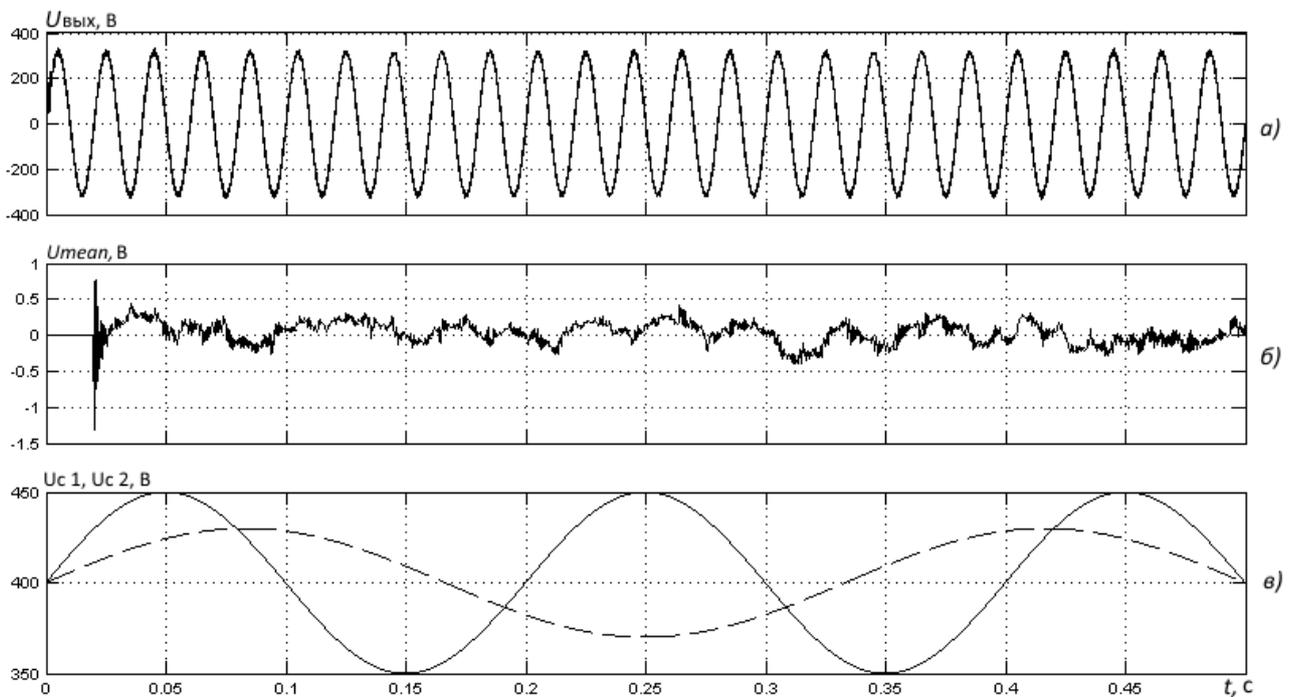
На рис. 1 в качестве силовых ключей применены модели транзисторов *IGBT1*, *IGBT2* со встроенными обратными диодами, выходной Г-образный фильтр образован индуктивностью  $L_f$  (1 мГн) и конденсатором  $C_f$  (20 мкФ), нагрузка – резистор с сопротивлением 10 Ом [1]. Источники питания представляют собой управляемые источники напряжения, сигналами для которых является сумма синусоидальных (*Sin 2* – 50 В, 5 Гц; *Sin 3* – 30 В, 3 Гц) и постоянного сигналов 400 В. Таким образом формируется несимметричное отклонение питающего напряжения.

Формирование импульсов управления транзисторами  $VT1$  и  $VT2$  осуществляется с помощью ШИМ-генератора (рис. 2). Опорный сигнал формируется с помощью источника треугольного сигнала *Triangle* (5 кГц), задающий сигнал с помощью источника синусоидального сигнала *Sin 1* (50 Гц) с амплитудой, равной единице [2, 4]. Максимальный коэффициент заполнения определяется отношением требуемой амплитуды ( $Amp$ ) к номинальному напряжению на плечах источников питания  $Uc$ . Поправочный коэффициент  $U_{cav}$  и смещение  $U_{cd}$ , определяемые в соответствии с выражениями 1 и 2, вводятся с помощью математических блоков в контур задающего синусоидального сигнала.



**Рис. 2. Имитационная модель контура формирования и стабилизации выходного напряжения инвертора**

Результаты имитационного моделирования приведены на рис. 3.



**Рис. 3. Осциллограммы входных и выходных напряжений инвертора**

Выходное напряжение инвертора стабилизировано и не отклоняется по амплитуде от заданного значения (312 В) на протяжении всего периода

моделирования (0,5 с) (рис. 3, а). Постоянная составляющая (рис. 3, б) выходного напряжения практически равна нулю и ее величина не превышает 1 В. Отклонение питающего напряжения каждого из плеч приведены на рис. 3, в (сплошная линия соответствует верхнему плечу, а пунктирная – нижнему).

Как следует из полученных осциллограмм, выходное напряжение остается неизменным даже при отклонениях питающего напряжения в диапазоне, превышающем 10%.

### Выводы

1. Применение способа стабилизации выходного напряжения и компенсации постоянной составляющей позволяет практически полностью устранить смещение и отклонение выходного напряжения инвертора в условиях значительной нестабильности питающего звена.

2. Приведенный в статье способ стабилизации прост в реализации и не требует значительного усложнения системы управления полупроводниковым преобразователем, одновременно улучшая параметры качества электроэнергии.

### Библиографический список

1. **Анисимова, Т.В.** Расчет параметров фильтров инверторов с синусоидальным выходным напряжением / Т.В. Анисимова, В.В. Крючков // Практическая силовая электроника, №3 (47), 2012. – С. 6-10.
2. **Вихорев, Н.Н.** Оптимизация пусковых режимов инвертора напряжения / Н.Н. Вихорев, А.И. Чивенков, С.Ю. Панфилов // Актуальные проблемы электроэнергетики: сборник научно-технических статей. – Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева Ответственный редактор Дарьенков А.Б, 2016. – С.13-16.
3. **Григораш, О.В.** Стабилизация напряжения автономных инверторов солнечных электростанций / О.В. Григораш, М.А. Попучиева // Политематический сетевой электронный журнал кубанского государственного аграрного университета. Краснодар, №130, 2017. – С. 1019-1032.
4. **Зиновьев, Г.С.** Основы силовой электроники, 2-е изд., испр. и доп. / Г.С. Зиновьев – Новосибирск: НГТУ, 2003. – 664 с.

УДК 621.752.3

Б.А. Гордеев<sup>1,2</sup>, С.Н. Охулков<sup>1,2</sup>, А.С. Плехов<sup>2</sup>, А.И. Ермолаев<sup>2</sup>, Д.Ю. Титов<sup>2</sup>

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЗАВИСИМОСТИ ДИНАМИЧЕСКОЙ ЖЁСТКОСТИ МАГНИТОУПРАВЛЯЕМЫХ ГИДРООПОР ОТ ЧАСТОТЫ

Институт проблем машиностроения Российской академии наук<sup>1</sup>,  
Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева<sup>2</sup>

В статье рассматривается построение демпфирующей характеристики магнитоуправляемых гидроопор и их корреляционная связь с динамической жесткостью. К демпфирующим характеристикам гидроопор относятся, прежде всего, их амплитудно-частотные характеристики (АЧХ). Построение демпфирующих характеристик магнитоуправляемых гидроопор без действия магнитного поля выполнено по результатам данных, полученных в результате виброиспытаний на вибростенде Star28, генерирующем широкополосную случайную вибрацию (ШСВ) с целью определения их резонансных частот при входном среднеквадратичном виброускорении (СКО) в  $50 \text{ м/с}^2$ .

The article provides for the damping characteristics of a magnetically controlled hydromount and their correlation with dynamic rigidity. The characteristics of the hydromount are their amplitude-frequency characteristics (AFC). Construction of the damping characteristics of magnetically controlled hydromount elements without the action of a magnetic field, made according to the results of data obtained because of vibration tests on the Star28 vibrating table, generating broadband random vibration to determine their resonant frequencies at an input root-mean-square vibration acceleration of  $50 \text{ m/s}^2$ .

**Ключевые слова:** амплитудно-частотные характеристики, динамическая жесткость, корреляционная связь, широкополосная случайная вибрация, среднеквадратичные виброускорения.

**Key words:** amplitude-frequency characteristics, dynamic stiffness, correlation, broadband random vibration, root-mean-square vibration accelerations.

### Введение

Разработка принципиально новых активных средств виброзащиты металлорежущих станков с прецизионным оборудованием, управляющим рабочим процессом, неразрывно связана с проведением их виброиспытаний на ШСВ, максимально приближенных к условиям эксплуатации данного станка или обрабатывающего центра [1, 2, 3].

Целью испытаний на ШСВ является максимальное приближение испытаний к реально существующим условиям работы гидроопор.

Применение этого вида испытаний дает возможность сократить время диагностирования гидроопор по сравнению с другими видами виброиспытаний. Это происходит за счет ужесточения условий, обуславливающих возбуждение резонансов в испытуемых изделиях, при изменении спектра входного

вибросигнала во времени случайным образом [4]. Поэтому возбуждение всех резонансов испытуемых гидроопор позволяет выявить их взаимное влияние, что невозможно при других видах испытаний.

Исследование АЧХ магнитоуправляемых гидроопор (далее гидроопор) проводилось с целью выявления их связи с их динамической жёсткостью. На испытательном вибростенде Star28, генерирующем ШСВ, были испытаны гидроопоры ОГМ-95 с рабочей МРЖ MR Flujd MRF-132DG без действия на магнитореологический трансформатор (МРТ) магнитного поля.

При настройке гидроопор с МРТ на заданные резонансные частоты необходимо знать и рассчитать их вибрационные АЧХ без активного воздействия обратной связи, т.е. в разомкнутой системе регулирования [1, 2-8].

Для того чтобы проанализировать связь жёсткости гидроопор с их АЧХ, необходимо получить зависимость динамической жесткости гидроопор от их частоты возбуждения. Такую зависимость можно получить при помощи экспериментально полученных АЧХ гидроопор ОГМ-95 при входных СКО в  $50 \text{ м/с}^2$  и знании о минимальном значении динамической жесткости на собственной частоте резонанса гидроопор. Предполагается, что минимальное значение динамической жесткости на собственной частоте резонанса гидроопор соответствует их статической жёсткости.

Здесь же для понимания динамических свойств гидроопор необходимо дать определения динамических жесткости и податливости [1, 5-8].

Динамическая жесткость  $D(\eta)$  механической системы есть отношение амплитуды внешней гармонической силы  $F(j\omega)$  к комплексной амплитуде колебаний  $x(j\omega)$ .

Для системы с одной степенью свободы динамическая жесткость:

$$D(\eta) = F(j\omega) / x(j\omega) = F_0 / \tilde{A}.$$

Динамической податливостью системы  $f(\eta)$  называют величину, обратную динамической жесткости:

$$f(\eta) = 1 / D(\eta). \quad (1)$$

В окрестностях резонанса динамическая податливость механической системы оказывается наибольшей. При значениях коэффициента потерь -  $\eta$ , малых по сравнению с единицей, функция  $f(\eta)$  мало отличается от статической податливости.

Так как гидроопоры ОГМ-95 предназначены для демпфирования вибраций в полосе частот до 100 Гц, то достаточно рассмотреть их АЧХ именно в полосе частот, и затем по ним построить зависимости переходной жёсткости гидроопор от их частоты возбуждения.

На рис. 1 представлена АЧХ гидроопор ОГМ-95 до частоты 100 Гц при входном СКО  $50 \text{ м/с}^2$ . АЧХ получена на основе экспериментальных данных.

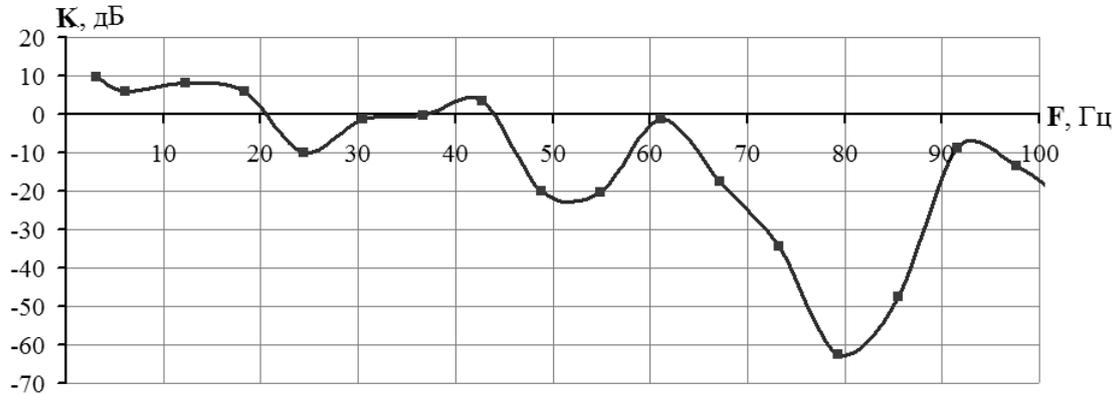


Рис. 1. АЧХ системы из 4-х гидроопор ОГМ-95 до частоты 100 Гц при массе нагрузочной плиты в 108 кг и входном СКО  $50 \text{ м/с}^2$

Из этой АЧХ видно, что до частоты 20 Гц вибропроцессы неустойчивые, и демпфирование вибрации не происходит. При повышении частоты происходит эффективное гашение гидроопорами на частотах 25 Гц, 52 Гц и 80 Гц - входной белый шум демпфируется в 10 дБ, 22 дБ, 63 дБ соответственно.

Ординаты АЧХ определяются через разность десятичных логарифмов для каждого исследуемых выходных и входных гармоник в децибелах по [5-10]:

$$K(\text{дБ}) = 20 \lg(U_{\text{ВЫХ}}/U_{\text{ВХ}}) = 20 \lg U_{\text{ВЫХ}} - 20 \lg U_{\text{ВХ}}, \quad (2)$$

то нахождение отношения входных и выходных гармоник по их десятичным логарифмам сводится к решению уравнения  $a^x = N$ , т.е. логарифм  $x = \log_a N$  числа  $N$  при основании  $a$  можно определить как решение уравнения  $a^x = N$  [10,11].

В результате проведенных вычислений получаем выражение для нахождения максимальной динамической жесткости  $D_{\text{max}}(j\omega)$  гидроопоры через её минимальную динамическую жесткость  $D_{\text{min}}(j\omega)$ :

$$D_{\text{max}}(j\omega) = D_{\text{min}}(j\omega) \cdot 10^{K(\text{дБ})/20}. \quad (3)$$

Заменяя максимальную и минимальную динамические жесткости на  $i$ -е (текущие) динамические жесткости  $D_i(j\omega_i)$  и на динамическую жесткость  $D_0(j\omega_0)$  при резонансе гидроопоры получаем выражение для текущих значений  $D_i(j\omega_i)$  по которому строится зависимость динамической жесткости  $D_i(j\omega_i)$  гидроопоры от частоты возбуждения:

$$D_i(j\omega_i) = D_0(j\omega_0) \cdot 10^{K(\text{дБ})/20}, \quad (4)$$

где  $D_0(j\omega_0)$  – минимальная динамическая жесткость на основной резонансной частоте для системы из четырёх гидроопор под общей массой нагрузки в 108 кг.

Далее по АЧХ до 100 Гц для системы из четырёх гидроопор ОГМ-95 с массой нагрузочной плиты в 108 кг проводим построение зависимости динамической жесткости для всей системы.

Так, при входных СКО в  $50 \text{ м/с}^2$  и массе нагрузочной плиты в 108 кг сила, действующая на систему из четырёх гидроопор будет равна:

$$F_{1,4} = m \cdot 5 \cdot g = 108 \text{ кг} \cdot 5 \cdot 9,81 \text{ м/с}^2 \cong 5300 \text{ Н.} \quad (5)$$

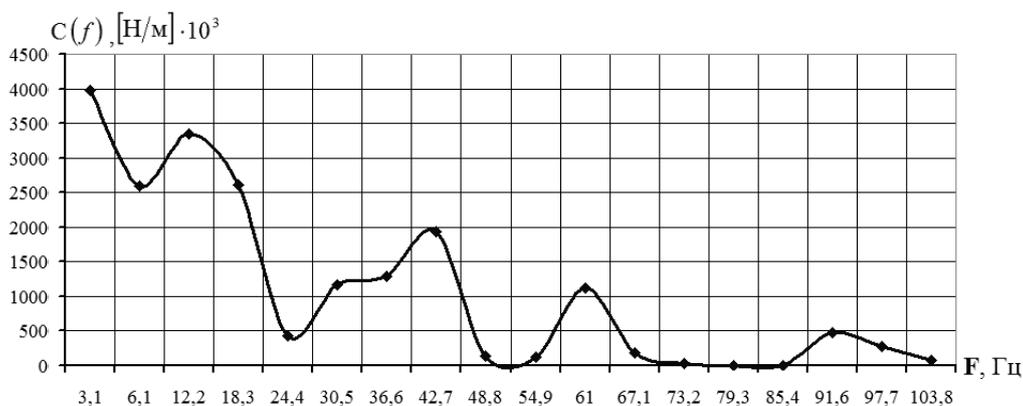
При входном СКО в  $50 \text{ м/с}^2$  максимальные перемещения примем равными  $\pm 4 \text{ мм}$ . Тогда минимальная динамическая жесткость на основных резонансных частотах для системы из четырёх гидроопор под общей нагрузкой в 108 кг при входном СКО в  $50 \text{ м/с}^2$  равна:

$$C_{01,4}(f_{01,4}) = F_{1,4} / 4 \cdot 10^{-3} = 5300 \text{ Н} / 4 \cdot 10^{-3} \text{ м} = 1325 \cdot 10^3 \text{ Н/м}, \quad (6)$$

где  $C_{01,4}(f_{01,4})$  – минимальная динамическая жесткость системы из четырёх гидроопор под общей нагрузкой в 108 кг на основной резонансной циклической частоте.

Подставляя минимальную динамическую жесткость четырёх гидроопор под общей нагрузкой в 108 кг (6) в выражение (4), для данной системы гидроопор при входном СКО в  $50 \text{ м/с}^2$  построим динамические жесткости от частоты возбуждения.

На рис. 2 представлены зависимости динамической жесткости  $C(f)$  для системы из четырёх гидроопор ОГМ-95 до частоты 100 Гц при входных СКО  $50 \text{ м/с}^2$ .



**Рис. 2.** Зависимость динамической жесткости системы из четырёх гидроопор ОГМ-95 до 100 Гц с массой нагрузочной плиты в 108 кг и входном СКО  $50 \text{ м/с}^2$

Сравнивая диаграммы зависимости динамической жесткости и АЧХ для системы из четырёх гидропор ОГМ-95 в диапазоне до 100 Гц с при входном СКО  $50 \text{ м/с}^2$ , приведенные на рис. 1 и рис. 2 соответственно, убеждаемся, что в диапазоне до 20 Гц никакой корреляции между ними нет, так как в этом диапазоне процесс демпфирования неустойчив. В диапазоне частот от 20 до 30 Гц корреляция между АЧХ и динамической жёсткостью составляет порядка 80%. Для диапазонов частот от 45 до 60 Гц и от 65 Гц и до 90 Гц корреляция между АЧХ и динамической жёсткостью составляет порядка 95%.

### Выводы

В результате проведённых испытаний магнитоуправляемых гидропор ОГМ-95 на ШСВ определена их динамическая жесткость на резонансных частотах. Найдена зависимость динамической жесткости от демпфирования. Построены АЧХ гидропор, по которым можно судить об их эффективности.

Далее по рассчитанной и построенной экспериментальной зависимости динамической жесткости магнитоуправляемых гидропор проводится расчет полюсов и нулей полиномов  $X(s)_i$  и  $Y(s)_i$ ; их передаточных функций  $T(s)_i$ ; с предварительным расчётом входящих в неё коэффициентов, что позволяет построить АЧХ магнитоуправляемых гидропор ОГМ-95 с учётом влияния температуры нагрева рабочей МРЖ и действия внешнего магнитного поля.

Работа выполнена за счет средств Российского научного фонда (проект №15-19-10026).

### Библиографический список

1. **Гордеев, Б.А.** Системы виброзащиты с использованием инерционности и диссипации реологических сред. / Б.А. Гордеев, В.И. Ерофеев, А.В. Синев, О.О. Мугин - М.: Физматлит, 2004. - 175 с.
2. **Берендеев, Н.Н.** Экспериментально-расчётная методика определения собственных частот конструкции / Н.Н. Берендеев, А.В. Жидков, А.К. Любимов // Вестник Нижегородского университета им. Н.И. Лобачевского. – 2010. - № 1. - С. 144–151.
3. **Любимов, А.К.** Определение собственных частот конструкции с использованием трёхмерного случайного воздействия // Вестник Нижегородского университета им. Н.И. Лобачевского. – 2011. - № 4 (2). - С. 214-216.
4. Вибрации в технике. Т.3. Колебания машин, конструкций и их элементов / Под ред. Ф.М. Диментберга, К.С. Колесникова - М.: Машиностроение, 1980. - 544 с.
5. **Охулков, С.Н.** Методы и устройства ослабления вибрации электромеханических комплексов: монография. / С.Н. Охулков, А.С. Плехов, Д.Ю. Титов, Ю.В. Шевырёв – Н.Новгород: Нижегород. гос. техн. у-т им. Р.Е. Алексеева, 2016. – 254 с.
6. **Айбиндер, Р.М.** Демпфирование вибрации на резонансных частотах электротехнических комплексов и систем / Р.М. Айбиндер, Б.А. Гордеев, С.Н. Охулков, А.Н. Осмехин, А.С. Плехов // Вестник машиностроения. – 2017. - № 1. - С. 7–14.
7. **Гордеев, Б.А.** Измерение вибрационных характеристик гидропоры / Б.А. Гордеев, В.А. Тихонов, А.Г. Чистяков // Проблемы машиностроения и надежности машин. -2004. - № 2. – С. 16-19.

8. **Асташев, В.К.** О количественных оценках эффективности вибромашин / В.К. Асташев, Л.К. Крупенин // Вестник научно-технического развития. – 2017. - № 4(116). - С. 3-10.
9. **Гордеев, Б.А.** Демпфирующие характеристики тросовых виброизоляторов и гидроопор / Б.А. Гордеев, С.Н. Охулков, П.А. Злобин // Вестник машиностроения. – 2016. – №11. – С. 18-23.
10. **Анго, А.** Математика для электро- и радиоинженеров / А.Анго - М.:Наука. - 1964. - 772 с.
11. **Полянин, А.Д.** Краткий справочник для инженеров и студентов: Высшая математика. Физика. Теоретическая механика. Сопротивление материалов / Полянин А.Д. [и др.]. – М.: Международная программа образования, 1996. – 432 с.

УДК 621.314.21

Л.Э. Рогинская, А.С. Горбунов

## ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ СХЕМ МНОГОМОСТОВЫХ ТРАНСФОРМАТОРНО-ВЫПРЯМИТЕЛЬНЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ НА ВЕЛИЧИНУ ИХ УСТАНОВЛЕННОЙ МОЩНОСТИ

Уфимский государственный авиационный технический университет

В статье рассмотрены особенности работы трансформаторно-выпрямительных преобразователей с различными схемами соединения вторичных обмоток многофазных выпрямительных трансформаторов для питания шести- и двенадцатипульсных выпрямителей. Определено влияние формы суммарной вторичной и первичной намагничивающей силы на величину установленной мощности преобразователя.

The article describes the features of the operation of transformer-rectifier converters with different schemes of connecting the secondary windings of multi-phase rectifier transformers for powering six- and twelve-pulse rectifiers. The influence of the shape of the total secondary and primary magnetizing force on the value of the installed converter power is determined.

**Ключевые слова:** выпрямитель, трансформатор, установленная мощность, типовая мощность, намагничивающая сила.

**Key words:** rectifier, transformer, installed power, typical power, magnetizing force.

### Особенности работы многомостовых источников постоянного тока с многофазными фазообразующими трансформаторами

Среди преобразователей параметров электрической энергии широкое распространение получили электромагнитные устройства – трансформаторы, преобразующие первичную систему переменных токов во вторичную систему, которая может отличаться от первичной системы не только напряжением и током, но и числом фаз, а также полупроводниковые устройства – выпрямители, преобразующие переменное напряжение в постоянное. В данной статье рассматривается совместная работа трансформаторных преобразователей числа фаз (ТПЧФ) с многомостовыми полупроводниковыми выпрямителями.

В настоящее время источники питания постоянного (или выпрямленного) тока, получаемого с использованием полупроводниковых выпрямителей, находят широкое применение в промышленности и в бытовых устройствах при больших и малых мощностях нагрузок благодаря высоким энергетическим показателям полупроводниковых выпрямителей, по сравнению с применяемыми ранее способами получения постоянного тока, например, путем использования машин постоянного тока.

В зависимости от имеющейся сети, параметров нагрузки, величины выпрямленного тока и напряжения и требований к качеству выходных параметров

могут использоваться различные схемы выпрямителей: однофазные однополупериодные, однофазные двухполупериодные, однофазные и трехфазные мостовые и др. При использовании трехфазных сетей при больших токах нагрузки и сравнительно малых выходных напряжениях источника питания преимуществами обладает вариант шестифазного выпрямителя трехфазного тока [1] (рис. 1), однако в целом наиболее широко используется схема трехфазного мостового выпрямителя (рис. 2) как обладающая наилучшими показателями использования вентилей и питающего выпрямительного трансформатора, а также показателями качества энергии, подаваемой на нагрузку.

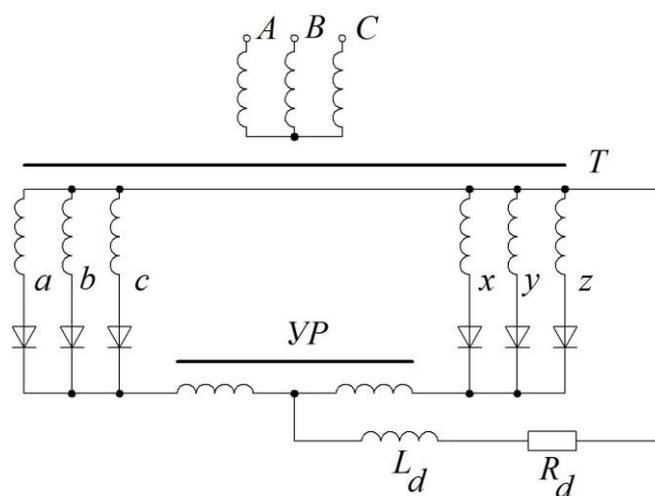


Рис. 1. Принципиальная схема шестифазного выпрямителя трехфазного тока

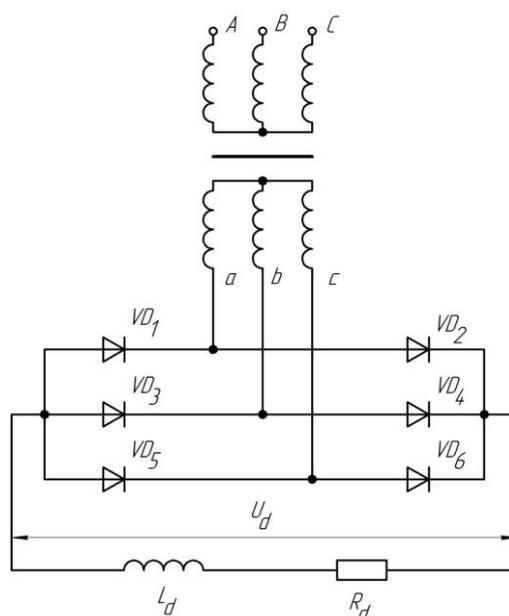


Рис. 2. Принципиальная схема трехфазного мостового выпрямителя

На рис. 3 приведена осциллограмма линейного тока вторичной обмотки трехфазного выпрямительного трансформатора (потребляемого тока выпрямителя), полученная для случая питания активно-индуктивной нагрузки при значении  $L_d \rightarrow \infty$  [2]. Кривая первичного тока при пренебрежении током холостого

хода и рассмотрении коэффициента трансформации  $k_T = 1$  имеет точно такой же вид, но с обратным знаком, и, как видно из рис. 3, далека от синусоидальной. В связи с этим установленная мощность такого трансформатора, то есть та мощность, на которую он должен быть рассчитан, по сравнению с заданной мощностью нагрузки  $P_d = U_d \cdot I_d$  составляет:

$$S_y^* = \frac{S_1 + S_2}{2 \cdot P_d} = \frac{3 \cdot U_{1\phi} \cdot I_{1\phi} + 3 \cdot U_{2\phi} \cdot I_{2\phi}}{2 \cdot U_d \cdot I_d} = \frac{3 \cdot \frac{U_d \cdot \pi}{3 \cdot \sqrt{6}} \cdot \frac{I_d \cdot \sqrt{2}}{\sqrt{3}} + 3 \cdot \frac{U_d \cdot \pi}{3 \cdot \sqrt{6}} \cdot \frac{I_d \cdot \sqrt{2}}{\sqrt{3}}}{2 \cdot U_d \cdot I_d} =$$

$$= \frac{\pi}{3} = 1,045,$$

где  $S_1, S_2$  – установленные мощности первичной и вторичной обмоток трансформатора, ВА;  $U_{1\phi}, U_{2\phi}$  – фазные напряжения обмоток трансформатора, В;  $I_{1\phi}, I_{2\phi}$  – фазные токи обмоток, А;  $U_d$  – выпрявленное напряжение, В;  $I_d$  – выпрямленный ток, А.

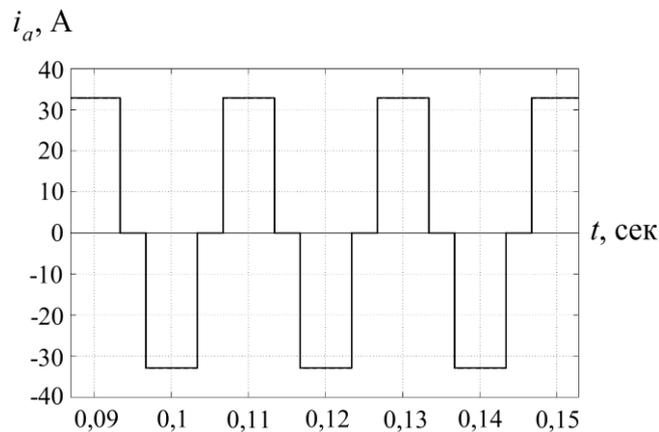


Рис. 3. Линейный вторичный ток трехфазного выпрямительного трансформатора

Таким образом, при использовании трехфазных мостовых выпрямителей полная мощность питающего выпрямительного трансформатора составляет 104,5% от мощности нагрузки выпрямителя, что объясняется несинусоидальным током обмоток вследствие нелинейных свойств полупроводниковых вентилей выпрямителя [1].

Улучшение качества преобразования энергии переменного тока в постоянный с соответствующим снижением пульсаций выпрямленного напряжения и улучшением формы кривой потребляемого трансформатором тока, которое может быть достигнуто путем использования многомостовых выпрямителей с последовательным или параллельным соединением мостов, питаемых от вторичных обмоток трансформатора, соединенных в соответствующие схемы: звезда, треугольник, зигзаг, треугольник с фазосмещением и другие, характеризуется некоторым изменением установленной мощности такого трансформатора. Это связано с изменением формы первичного тока, а также с увеличением установленной мощности вторичных обмоток, соединенных в зигзаг, треугольник с фазовым сдвигом (при наличии) вследствие того факта, что необходимая

величина фазового сдвига получается путем геометрического суммирования векторов напряжений катушек.

Так, в случае использования 12-пульсного выпрямителя на базе одного трансформатора и двух последовательно соединенных выпрямительных мостов (рис. 4) за счет использования двух вторичных обмоток трансформатора с фазовым сдвигом вторичных напряжений  $30^\circ$  (схемы звезда и треугольник), токи и намагничивающие силы (МДС) которых в относительных единицах имеют вид, приведенный на рис. 5, а, б, суммарная вторичная МДС имеет вид, более близкий к синусоидальному (рис. 5, в).

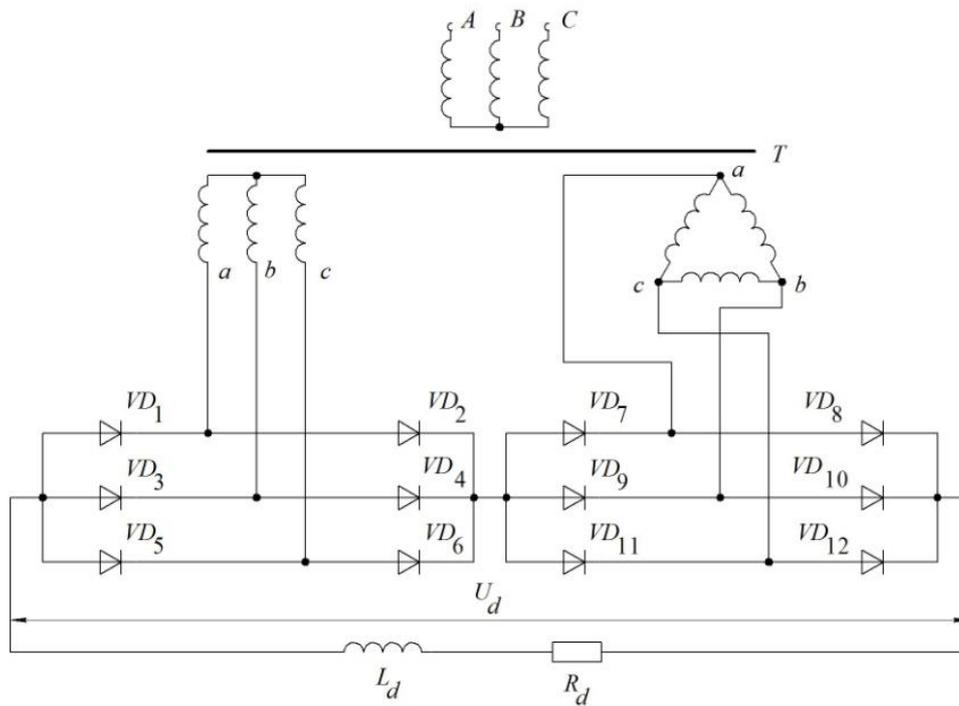


Рис. 4. Принципиальная схема 12-пульсного выпрямителя

В этом случае установленная мощность вторичной обмотки, соединенной в звезду или треугольник, одинакова и определяется по формуле:

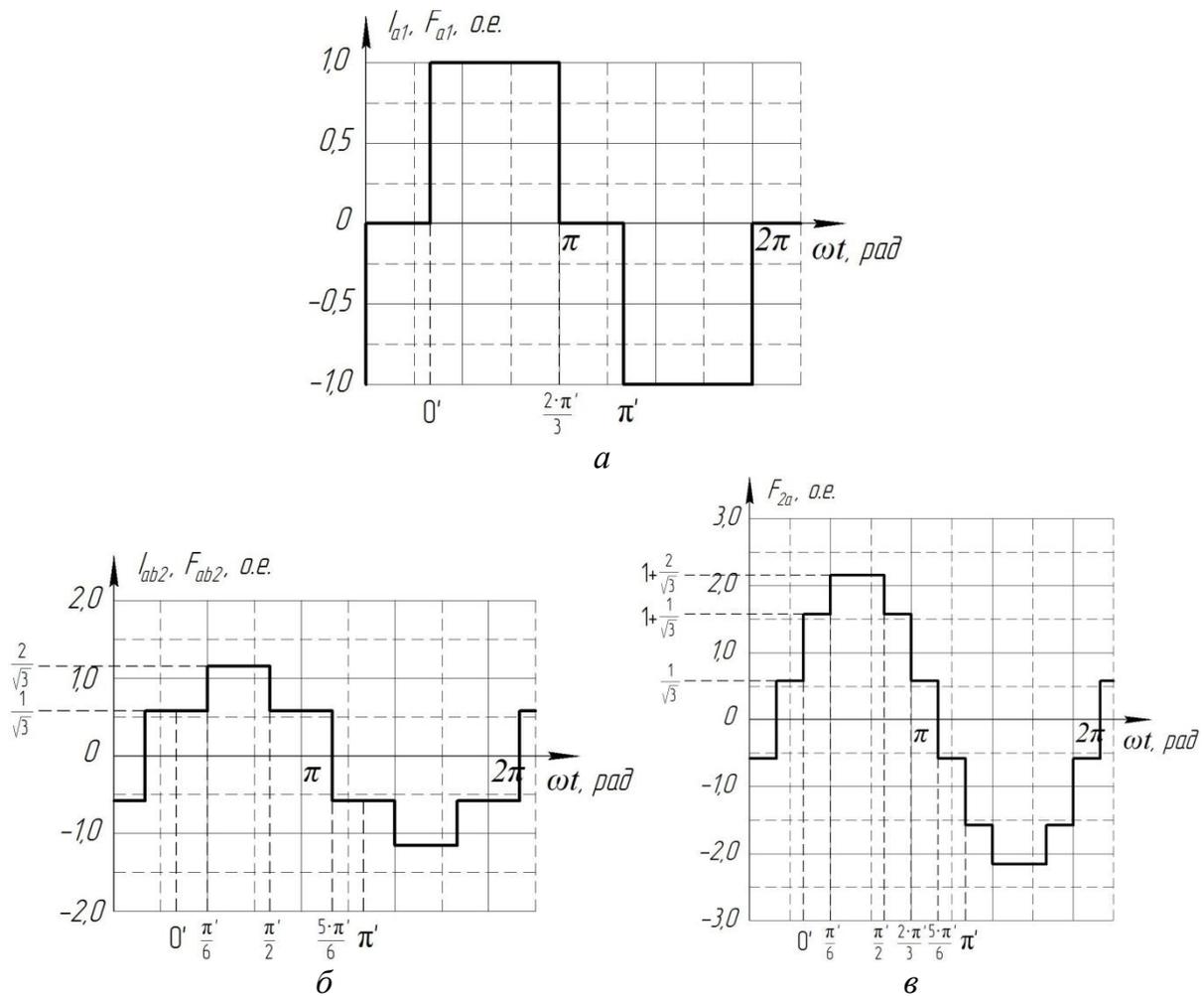
$$S_{21} = S_{22} = \frac{\pi \cdot U_d \cdot I_d}{n \cdot 3} = \frac{\pi \cdot U_d \cdot I_d}{2 \cdot 3},$$

где  $n$  – число выпрямительных мостов.

Отсюда может быть определена суммарная установленная мощность вторичных обмоток ТПЧФ для 12-пульсного выпрямителя:

$$S_2 = \frac{\pi \cdot U_d \cdot I_d}{3}.$$

Установленная мощность первичной трехфазной обмотки, при расчете которой действующее значение первичного тока было определено путем вычисления графика суммарной вторичной МДС по рис. 5, в (при условии  $k_r = 1$ ), составила  $S_1 = 1,048 \cdot U_d \cdot I_d$ .



**Рис. 5. Вторичные токи и МДС трансформатора для 12-пульсного выпрямителя:**  
 а – линейный ток и МДС обмотки по схеме звезды; б – фазный ток и МДС обмотки по схеме треугольника; в – суммарная вторичная МДС трансформатора

Таким образом, установленная мощность ТПЧФ для питания 12-пульсного двухмостового выпрямителя составляет:

$$S_y^* = \frac{S_1 + S_2}{2 \cdot U_d \cdot I_d} = \frac{(1,045 + 1,048) \cdot U_d \cdot I_d}{2 \cdot U_d \cdot I_d} = 1,047.$$

### Выводы

1. Применение многофазных многомостовых трансформаторно-выпрямительных преобразователей для получения постоянного (выпрямленного) тока позволяет существенно улучшить качество электрической энергии, подаваемой на нагрузку, при этом установленная мощность питающего выпрямительного трансформатора зависит от количества и схем соединения вторичных обмоток.

2. Величина установленной мощности трехфазного выпрямительного трансформатора при применении трехфазного мостового выпрямителя

составляет  $S_y = 104,5$  % от мощности обычного трехфазного трансформатора, а в случае использования ТПЧФ для 12-пульсного двухмостового выпрямителя – 104,7 %, то есть повышение установленной мощности во втором случае незначительное. При этом большим преимуществом двенадцатипульсных выпрямителей с такими трансформаторами является повышенное качество выпрямленного напряжения и более близкий к синусоидальному потребляемый ток.

#### Библиографический список

1. **Зиновьев, Г.С.** Силовая электроника: учебное пособие для бакалавров, 5-е изд., испр. и доп. / Г.С. Зиновьев – М.: Юрайт, 2015. – 667 с.
2. **Рогинская, Л.Э.** Уменьшение влияния на окружающую среду электромагнитных помех, создаваемых управляемыми полупроводниковыми преобразователями, при помощи фазо-преобразующих трансформаторов / Л.Э. Рогинская, А.С. Горбунов // Экологические системы и приборы. – 2017. – № 11. – С. 50–61.

УДК 621.314.57

Л.Э. Рогинская, А.С. Горбунов

**МОДЕЛИРОВАНИЕ РЕЗОНАНСНЫХ ИНВЕРТОРОВ С ДРОССЕЛЯМИ НАСЫЩЕНИЯ В ПРОГРАММНОМ КОМПЛЕКСЕ *MATLAB***

Уфимский государственный авиационный технический университет

В статье приведено описание работы полупроводниковых резонансных инверторов с применением дросселей насыщения с ферромагнитным сердечником. Рассмотрена конструкция и особенности влияния дросселей насыщения на работу преобразователя. С помощью компьютерного моделирования в программном комплексе *Matlab* осуществлено сравнение электромагнитных процессов в преобразователях частоты в случае отсутствия и наличия насыщающихся дросселей в цепи полупроводниковых вентилях.

The article describes the operation of semiconductor resonant inverters using saturation chokes with a ferromagnetic core. The structure and features of the effect of saturation chokes on the operation of the converter are considered. With the help of computer simulation in the *Matlab* software package, a comparison of electromagnetic processes in frequency converters is carried out in the case of the absence and presence of saturable chokes in the semiconductor gate circuit.

**Ключевые слова:** индукционный нагрев, инвертор, вентиль, дроссель, индуктор, преобразователь частоты.

**Key words:** induction heating, inverter, semiconductor gate, choke, inductor, frequency converter.

**Особенности работы полупроводниковых резонансных инверторов с дросселями насыщения**

В настоящее время для питания промышленных установок индукционного нагрева применяются полупроводниковые преобразователи частоты на базе тиристорных или транзисторных инверторов, среди которых наиболее часто используются резонансные инверторы тока или напряжения. В таких инверторах в качестве полупроводниковых вентилях могут использоваться тиристоры или транзисторы.

При проектировании и эксплуатации источников питания на базе полупроводниковых преобразователей для правильной эксплуатации применяемых тиристоров и диодов необходимо обеспечивать допустимые величины скоростей нарастания, а также спада (перед отключением) токов вентилях. В противном случае могут возникать значительные коммутационные перенапряжения в цепях вентилях, для ограничения которых требуется применение защитных (снабберных) *RC*-цепей, рассчитанных на значительную мощность. Также при превышении допустимой скорости нарастания прямого тока тиристора может произойти локальный перегрев в структуре вентиля и выход его из строя [1].

Эффективным средством ограничения скоростей нарастания и спада токов вентиля является применение дросселей насыщения, представляющих собой, например, катушку индуктивности с ферромагнитным сердечником. Кроме того, в литературе известно большое количество типов дросселей насыщения с дополнительными обмотками подмагничивания и т.д. На рис. 1 приведена конструкция одного из типов дросселей насыщения, состоящего из катушки обмотки, намотанной на сердечнике из ферритовых колец. Для герметизации и обеспечения конструктивной прочности дроссель снаружи залит компаундом [2].

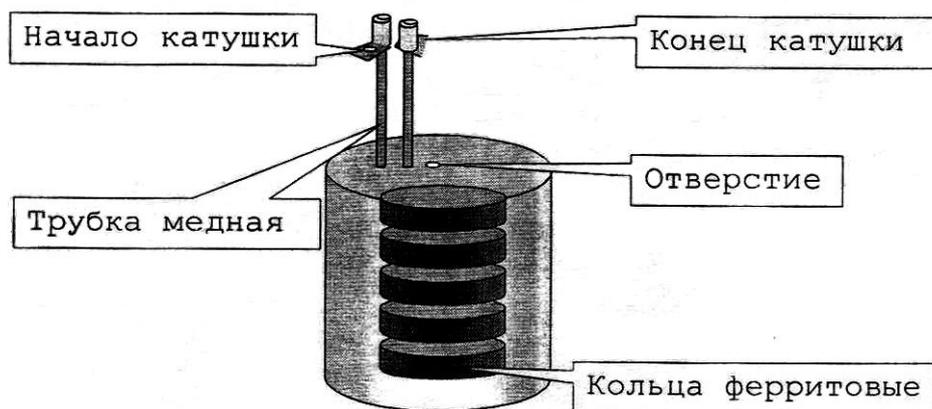


Рис. 1. Конструкция дросселя насыщения

Такой дроссель используется в тиристорных преобразователях частоты с последовательным включением в цепь вентиля. Влияние наличия дросселя на работу преобразователя заключается в следующем. Ферромагнитный сердечник на основе ферритовых колец, материал которых отличается малой величиной индукции насыщения, по сравнению с традиционными сердечниками из электротехнической стали, обеспечивает работу дросселя в режиме насыщения при превышении токами вентиля некоторого заданного уровня. При открывании тиристора (при малых значениях тока) дроссель не насыщен и обладает высоким значением индуктивности, составляющим, например, несколько сотен мкГн. Влияние такой последовательно включенной в цепь вентиля индуктивности приводит к ограничению скорости нарастания тока. В дальнейшем, когда ток превысит некоторую величину, вследствие достижения потоком в сердечнике дросселя области насыщения, индуктивность дросселя резко упадет до единиц мкГн. В дальнейшем он практически не будет сказываться на работе преобразователя до тех пор, пока при спаде тока вентиля величина данного тока не снизится до области, при которой дроссель выйдет из режима насыщения. Далее высокая индуктивность дросселя будет обеспечивать ограничение скорости спада тока вентиля до нулевого значения.

Благодаря использованию таких дросселей применяемые защитные *RC*-цепочки вентиля могут быть рассчитаны на значительно меньшую мощность вследствие меньших величин коммутационных перенапряжений.

На рис. 2 приведена принципиальная схема одного из вариантов резонансных тиристорных инверторов для индукционного нагрева на примере схемы несимметричного одноячейкового инвертора [1]. В таком инверторе последовательно с полупроводниковыми элементами включен дроссель насыщения  $L_H1$ . Данный дроссель обеспечивает снижение скоростей нарастания токов вентилей при их включении и спада токов перед их отключением.

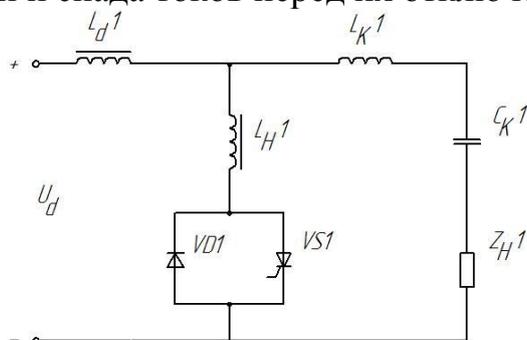


Рис. 2. Принципиальная схема одноячейкового инвертора с дросселем насыщения

На рис. 3 приведена принципиальная схема тиристорного мостового инвертора тока с удвоением частоты с применением дросселей насыщения, состоящих из двух полуобмоток, которые включены в цепи встречно-параллельно соединенных тиристора и обратного диода.

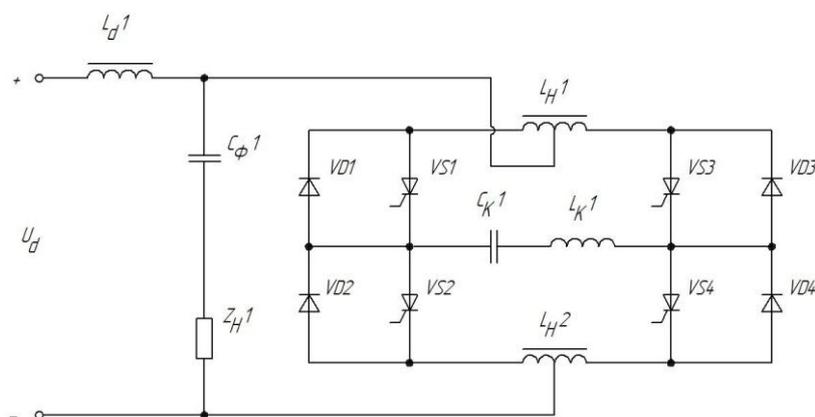


Рис. 3. Принципиальная схема мостового инвертора с удвоением частоты и дросселями насыщения

Рассмотрим электромагнитные процессы в тиристорном инверторе с дросселем насыщения на примере несимметричного одноячейкового инвертора по рис. 2. На рис. 4 показана компьютерная модель инвертора в программном комплексе *Matlab*, состоящая из идеального источника постоянного напряжения, реализующего неуправляемый полупроводниковый выпрямитель с напряжением  $U_d$ , инвертора, согласующего высокочастотного трансформатора и индуктора, образованного параллельно соединенными активным и индуктивным сопротивлением. При этом индуктор расположен на вторичной стороне

трансформатора (на стороне низкого напряжения), а компенсирующий конденсатор – на первичной стороне (на стороне высокого напряжения), что обеспечивает малую требуемую емкость конденсатора. В цепи встречно-параллельно включенных тиристора и диода включен дроссель насыщения, моделируемый в виде блока нелинейной индуктивности *Nonlinear Inductance*. Содержимое блока *Nonlinear Inductance* показано на рис. 5 [2]. Частота инвертирования составляет  $f = 10$  кГц.

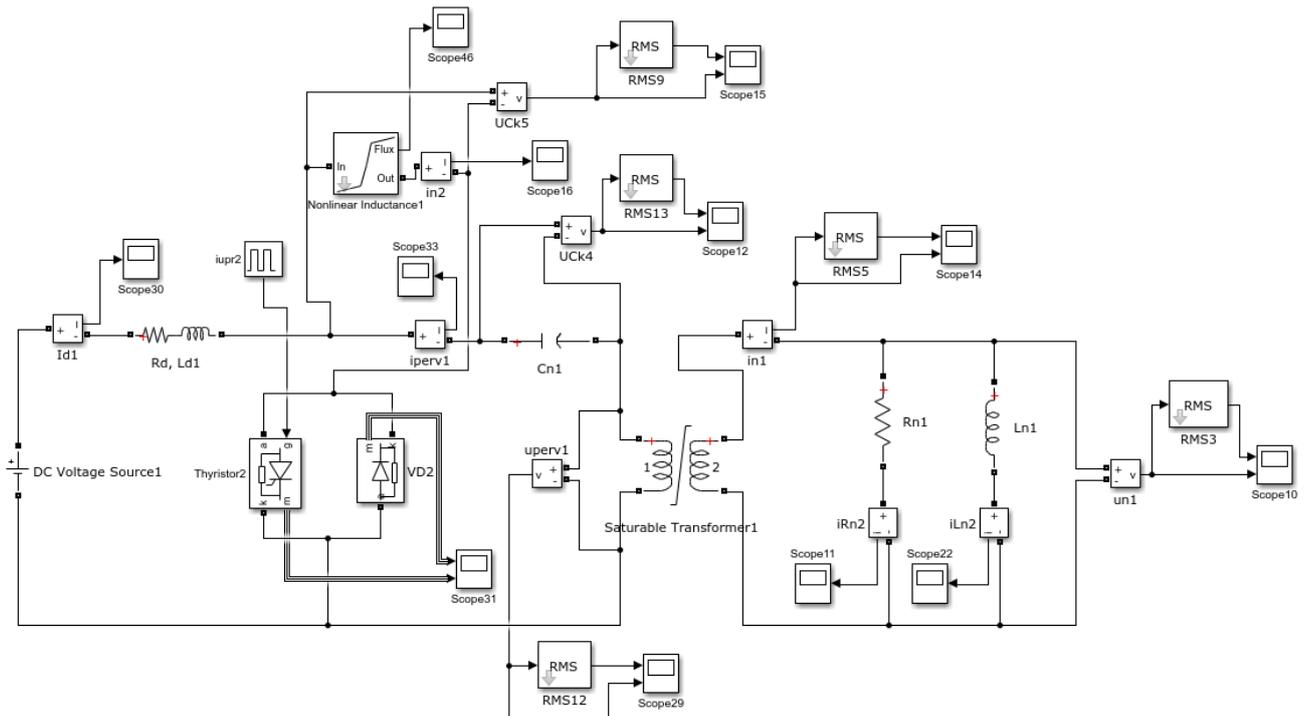


Рис. 4. Компьютерная модель тиристорного инвертора тока с дросселем насыщения

Блок (подсистема) дросселя насыщения реализует систему уравнений нелинейной индуктивности (активным сопротивлением дросселя пренебрегаем):

$$\begin{cases} U_{\text{др}} = \frac{d\psi}{dt} = L_{\text{др}}(\psi) \cdot \frac{di_{\text{др}}}{dt}; \\ \psi = \int U_{\text{др}} \cdot dt; \\ i_{\text{др}} = \frac{\psi}{L_{\text{др}}}, \end{cases} \quad (1)$$

где  $U_{\text{др}}$  – напряжение на зажимах дросселя, В;  $\psi$  – потокосцепление с витками катушки дросселя, Вб;  $t$  – время, с;  $L_{\text{др}}$  – индуктивность дросселя в данный момент времени, Гн;  $i_{\text{др}}$  – ток обмотки дросселя, А.

Работа такой модели дросселя заключается в следующем. При работе схемы происходит измерение напряжения на зажимах дросселя (рис. 5), интегрирование полученного сигнала обеспечивает определение величины потокосцепления  $\psi$ . Далее в блоке одномерной таблицы *1-D Lookup Table* происходит

получение тока дросселя в зависимости от текущей величины потокосцепления  $i_{др} = f(\psi)$ . Данная характеристика определяется кривой намагничивания заданного материала магнитопровода дросселя  $B = f(H)$ , которая может быть пересчитана к виду  $i_{др} = f(\psi)$ . Большое активное сопротивление  $R > 2$  кОм (блок *Series RLC Branch*) необходимо для корректной работы модели дросселя в цепи, к которой он подключается.

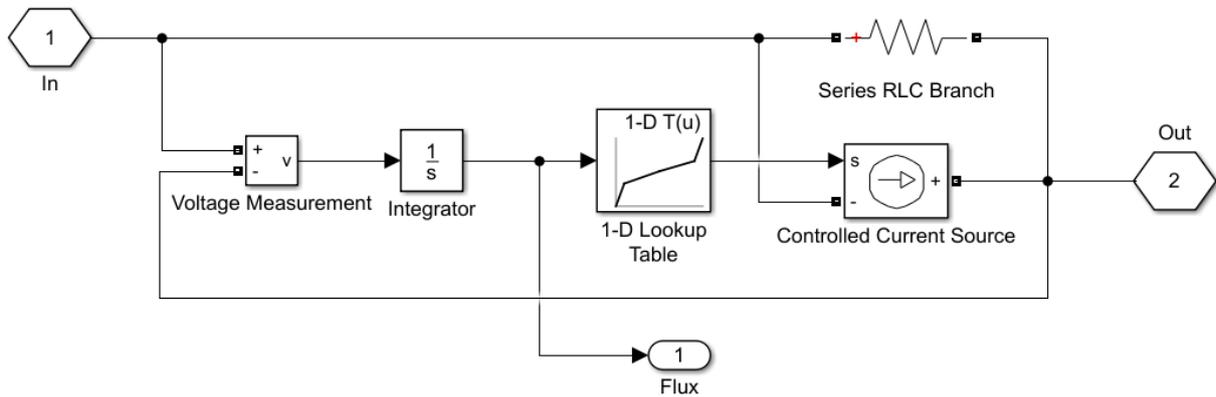


Рис. 5. Реализация блока дросселя насыщения

На рис. 6 приведены результаты моделирования работы инвертора в виде осциллограмм токов в цепи вентилях при отсутствии (рис. 6, а) и при наличии (рис. 6, б) дросселя насыщения.

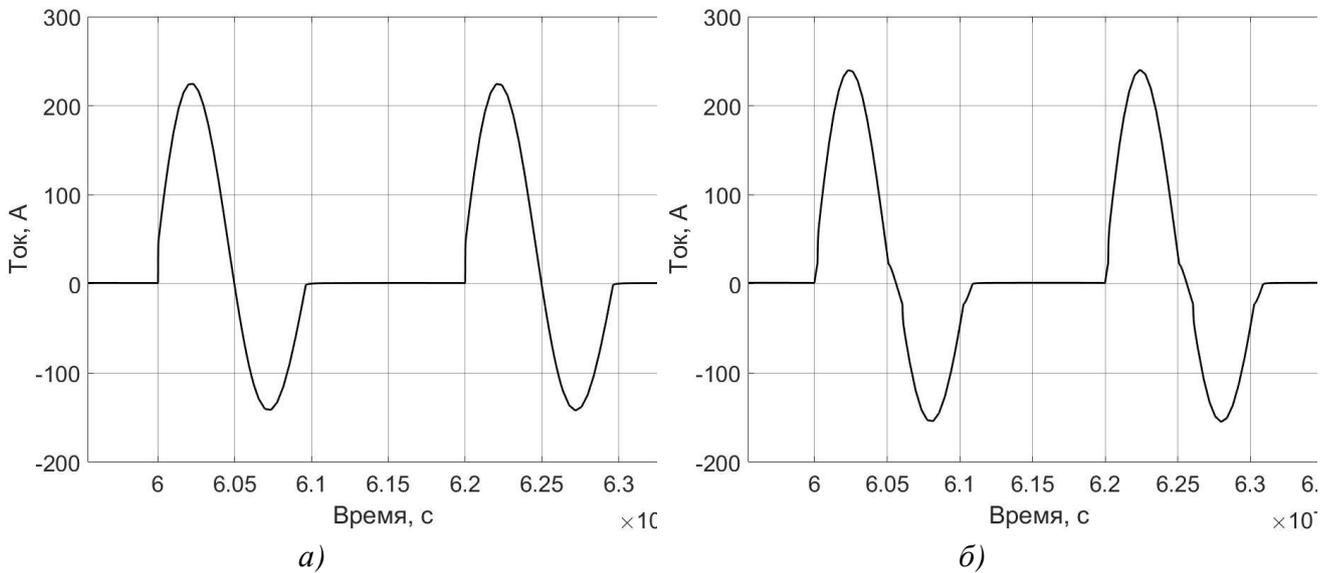
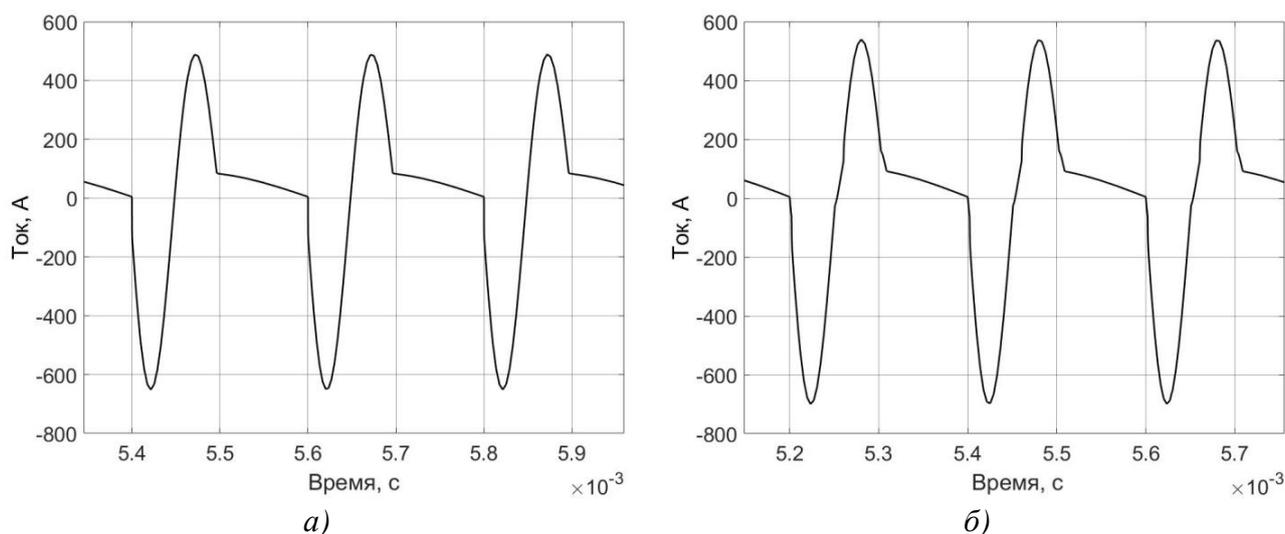


Рис. 6. Осциллограммы токов вентилях:  
 а – при отсутствии дросселя насыщения; б – при наличии дросселя насыщения

На рис. 7 приведены осциллограммы токов нагрузки, полученные при отсутствии (рис. 7, а) и при наличии (рис. 7, б) дросселя насыщения.



**Рис. 7. Осциллограммы токов нагрузки:**  
**а** – при отсутствии дросселя насыщения; **б** – при наличии дросселя насыщения

### Выводы

1. Электромагнитные процессы в высокочастотных инверторах для электротехнологических установок могут быть эффективно исследованы при помощи компьютерного моделирования в программном комплексе *Matlab* путем как реализации устройств при помощи готовых блоков, так и создания собственных блоков, реализующих требуемые математические выражения.

2. Применение дросселей насыщения в тиристорных инверторах позволяет, как видно из полученных осциллограмм, эффективно снижать скорости изменения токов вентилях при их включении и перед их отключением. При этом ограничивается величина коммутационных перенапряжений в вентилях, а также снижается необходимая величина мощности снабберных цепей для защиты полупроводниковых приборов. Благодаря малой индуктивности дросселя в режиме насыщения, влияние дросселя в этом режиме на работу преобразователя, на величины токов и напряжений на нагрузке незначительно.

### Библиографический список

1. Тиристорные преобразователи частоты / А.К. Белкин [и др.] – М.: Энергоатомиздат, 2000. – 263 с.
2. **Рогинская, Л.Э.** Расчет ферромагнитных модулей преобразовательных устройств [Электронный ресурс]: учебное пособие / Л.Э. Рогинская, А.С. Горбунов; Уфимский государственный авиационный технический университет (УГАТУ). – Учебное электронное издание. – Уфа: РИК УГАТУ, 2016.

УДК 621.314.58

В.В. Севастьянов, А.И. Чивенков, В.И. Гребенщиков, Д.А. Алешин

**АКТИВНЫЙ ВЫПРЯМИТЕЛЬ НАПРЯЖЕНИЯ  
С ПАРАМЕТРИЧЕСКИМ УПРАВЛЕНИЕМ**

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Рассмотрены вопросы, посвященные созданию и исследованию активного выпрямителя напряжения как устройства для построения универсальной системы регулирования переменного тока. Приведены результаты исследования силового модуля. Предложен алгоритм работы системы управления активным выпрямителем. Приведены результаты моделирования в различных режимах работы.

The questions devoted to the creation and study of an active voltage rectifier as a device for building a universal system for regulating alternating current are considered. The results of the study of the power module. An algorithm for the operation of the active rectifier control system is proposed. The results of modeling in various modes of operation are given.

**Ключевые слова:** гибкая система электропередачи, регулирование потоков мощности, универсальная система регулирования переменного тока; энергетическая сеть, инвертор напряжения, активный выпрямитель, емкостный накопитель, имитационная модель.

**Keywords:** flexible power transmission system, power flow control, universal AC control system; power network, voltage inverter, active rectifier, capacitive storage, simulation model.

В настоящее время значительное внимание уделяется разработке устройств силовой электроники, обеспечивающих регулирование параметров качества электроэнергии в питающих сетях. Одной из систем, позволяющих регулировать напряжение по величине и фазе при управлении потоками мощности в сети, является универсальная система регулирования переменного тока (*Unified Power Flow Controller – UPFC*) [1, 2].

В соответствии с существующими тенденциями была поставлена задача создания и исследования элементов универсальной системы регулирования переменного тока. Вопросы, касающиеся алгоритмов работы входного элемента такой системы, ранее рассматривались в [3, 4]. В последующих исследованиях они получили дальнейшее развитие. Работа выполняется при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ (Соглашение № 14.574.21.0167 о предоставлении субсидии от 26.09.2017 г., уникальный идентификатор проекта RFMEFI57417X0167).

Анализ структур гибких систем передачи переменного тока (*Flexible Alternative Current Transmission System – FACTS*) и *UPFC* [2] показывает, что входным элементом статического силового полупроводникового модуля этих систем является преобразователь, работающий в режиме активного

выпрямителя напряжения (АВН). Его задача – поддержание постоянного напряжения на емкостном накопителе (ЕН) в заданных пределах.

В соответствие с существующими требованиями к силовому модулю АВН и с учётом проведенного анализа возможных технических решений [5], наиболее целесообразной и перспективной схмотехникой силовой части была признана топология, построенная на базе транзисторного трехфазного автономного инвертора напряжения (АИН).

Существующие системы управления (СУ) АВН, в основном, базируются на векторных принципах управления [6, 7]. Это предполагает выполнение, кроме ряда других операций, прямых и обратных координатных преобразований для манипуляций с компонентами обобщенных векторов электромагнитных величин. Такие СУ могут быть выполнены на базе программируемых устройств с достаточной вычислительной мощностью и существенным объемом программных средств.

В данной работе исследовался АВН с управлением по амплитуде ( $U_m$ ) и фазовому углу ( $\varphi$ ) заданного напряжения основной частоты. На первом этапе задачей являлось выяснение особенностей взаимодействия АИН с сетью при формировании зарядных и разрядных токов ЕН, получение регулировочных характеристик при выбранном способе управления.

Исследования проводились с использованием имитационного моделирования в пакете прикладных программ *MATLAB Simulink*.

Имитационная модель АВН приведена на рис. 1.

Инвертор выполнен на базе мостовой трехфазной схемы *DC/AC* преобразователя (*Universal Bridge*). Для сокращения времени моделирования в качестве силовых электронных устройств приняты идеальные ключи.

Емкостный накопитель представлен конденсаторами  $Cs1$ ,  $Cs2$  (*Series RLC Branch*). Индуктивность  $Lf$  (*3-Phase Series RLC Branch*) обеспечивает работу инвертора в режиме АВН. Трехфазный источник напряжения (*Three-Phase Source*) с неидеальными параметрами имитирует питающую сеть. Нагрузка (*Load*) создает разрядную мощность для ЕН. Нагрузка является секционированной и представлена рядом 30, 24, 18, 12, 6 кВт. Формирователь импульсов (*Pulse shaper*) генерирует сигнал синусоидальной ШИМ для управления силовыми ключами в соответствии с заданными входными величинами. Регистрация интересующих токов и напряжений выполнялась библиотечными средствами *MATLAB Simulink*.

Для построения регулировочных характеристик выполнен ряд расчетов в среде имитационной модели для накопления массивов данных. Анализ результатов показал, что основное влияние на ток ЕН ( $I_c$ ) оказывает величина фазового угла ( $\varphi$ ) заданного напряжения. Соответствующее семейство регулировочных характеристик приведено на рис. 2. Необходимо отметить линейность характеристик, что говорит о хороших регулировочных свойствах АВН по фазе заданного напряжения.

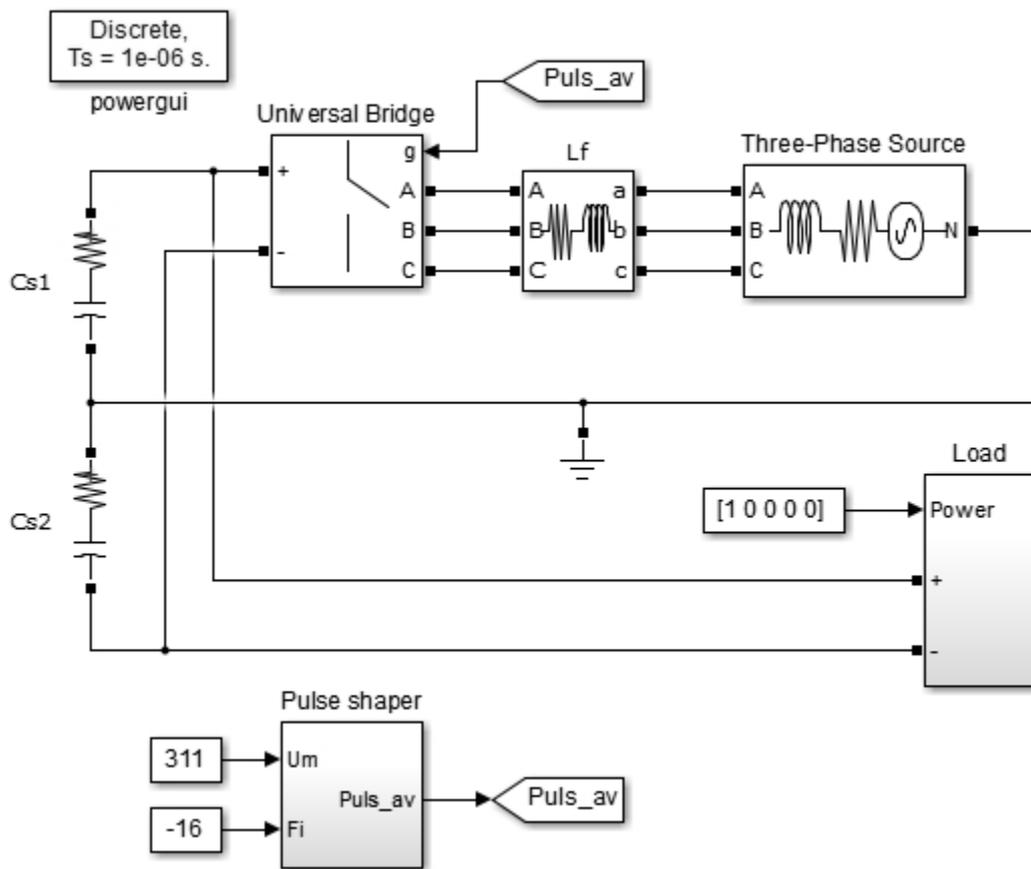


Рис. 1. Имитационная модель АВН с параметрическим управлением

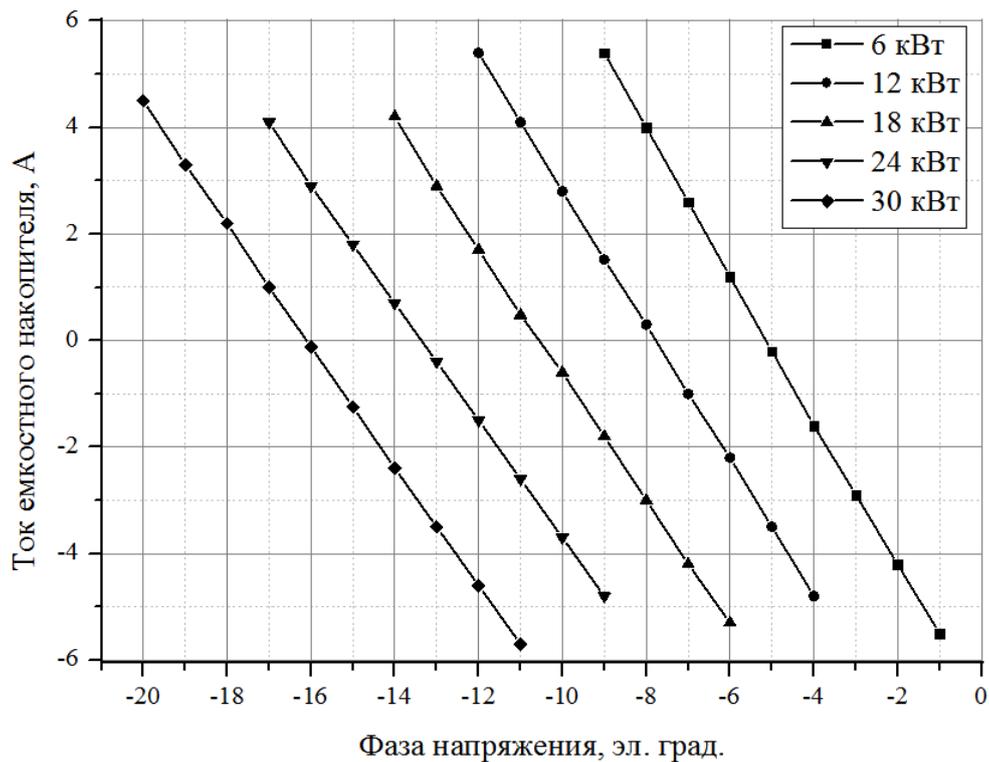


Рис. 2. Семейство регулировочных характеристик  $I_c(\varphi)$  при  $U_m = 311$  В

Значение  $\varphi_0$ , при котором  $I_c = 0$ , зависит от мощности нагрузки АВН. Характеристика, отражающая такую зависимость, приведена на рис. 3. Зависимость в значительной степени линейна, что дает возможность использовать ее в автоматическом регулировании  $\varphi$  при изменении нагрузки АВН.

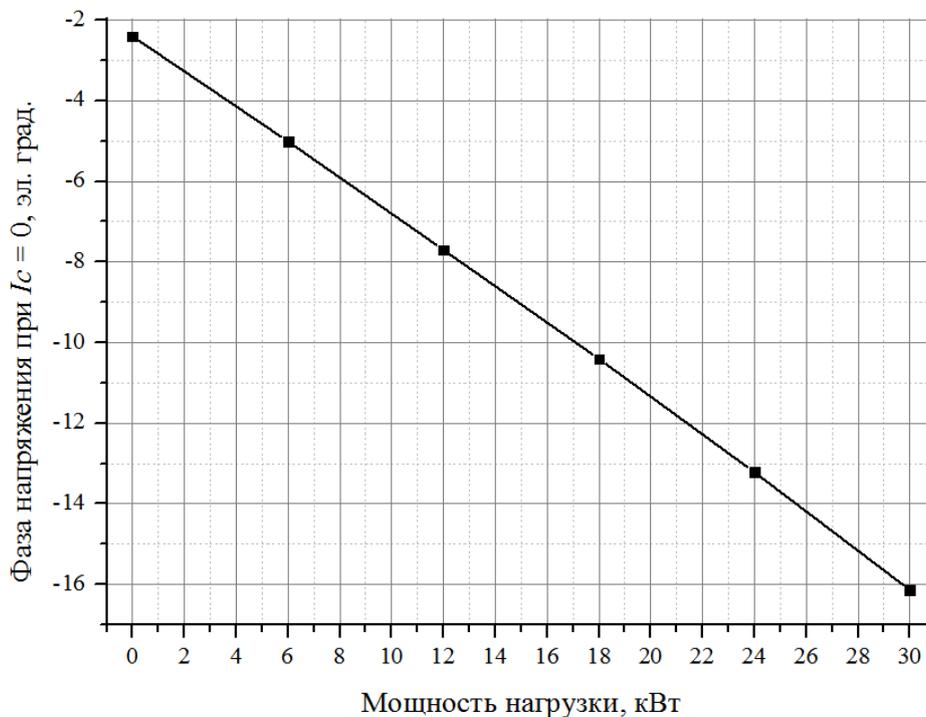


Рис. 3. Зависимость  $\varphi_0$  от мощности нагрузки

Дальнейшей задачей являлась разработка соответствующего алгоритма управления АВН, позволяющего обеспечить постоянство напряжения на ЕН в статических, динамических и аварийных режимах.

Анализ регулировочных характеристик позволил выявить следующие основополагающие аспекты для СУ:

- при заданной мощности нагрузки ток, потребляемый АВН из сети, линейно определяется величиной заданного фазового угла напряжения для АВН;
- фазовый угол  $\varphi_0$ , при котором напряжение на ЕН постоянно, зависит от нагрузки;
- заданная величина амплитуды напряжения АВН ( $U_m$ ) в основном определяет  $\cos\varphi$ .

Для учета названных факторов СУ выполнена замкнутой с контуром обратной связи по напряжению на ЕН. Имитационная модель АВН с замкнутой СУ приведена на рис. 4.

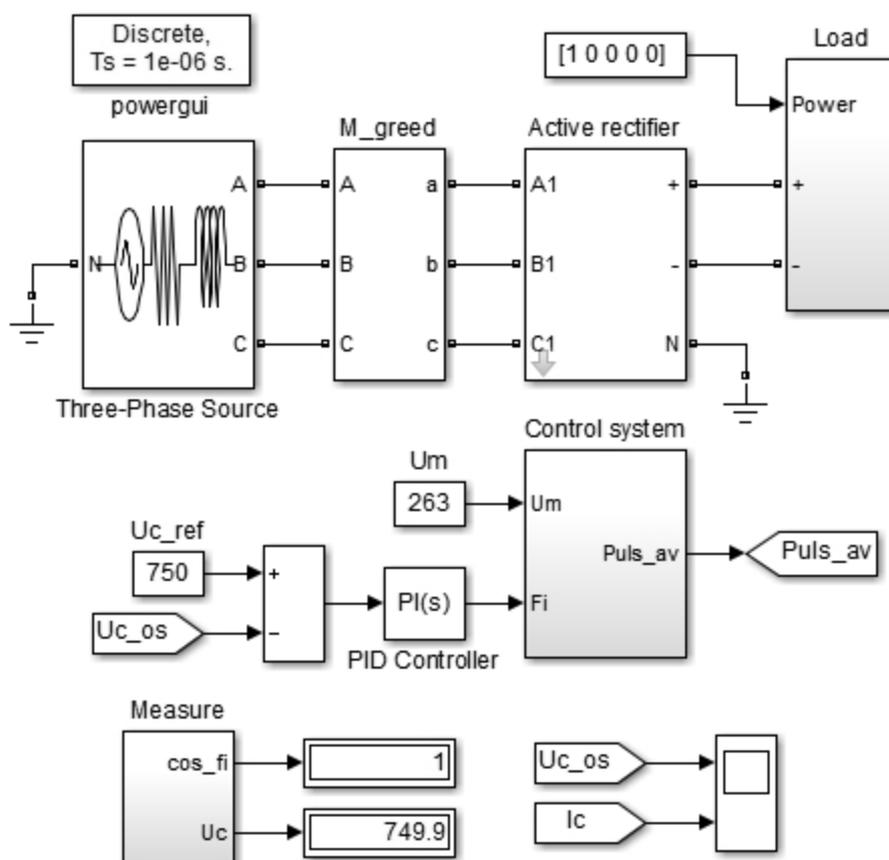


Рис. 4. Имитационная модель АВН с замкнутой СУ

В системе задается опорное напряжение на ЕН ( $U_{c\_ref}$ ). Разность между  $U_{c\_ref}$  и сигналом обратной связи по напряжению на ЕН ( $U_{c\_os}$ ) поступает на регулятор *PID Controller*, который интерпретирует полученную разность как заданный фазовый угол напряжения АВН, при котором соблюдается баланс мощностей в ЕН.

С целью определения соответствия разработанной СУ сформулированным особенностям был проведен ряд расчетных экспериментов с использованием имитационной модели.

Основной функцией АВН является стабилизация напряжения на ЕН. На рис. 5 приведено семейство нагрузочных характеристик для АВН при различных значениях заданного напряжения на ЕН. Особенностью приведенных характеристик является их предельная жесткость, которая обусловлена адекватной работой СУ.

В ходе эксперимента выполнялось скачкообразное изменение нагрузки с 30 кВт до 1кВт и снова до 30 кВт. Реакция СУ на предпринятые действия в виде напряжения на ЕН приведена на рис. 6.

Проводилось исследование работоспособности АВН при неполнофазных режимах в первичной питающей сети. На рис. 7 приведена реакция АВН при исчезновении двух фаз. Как показывают осциллограммы, СУ справляется с

этим режимом, поддерживая напряжение на ЕН в заданных пределах. При потере только одной из фаз режим работы более легкий.

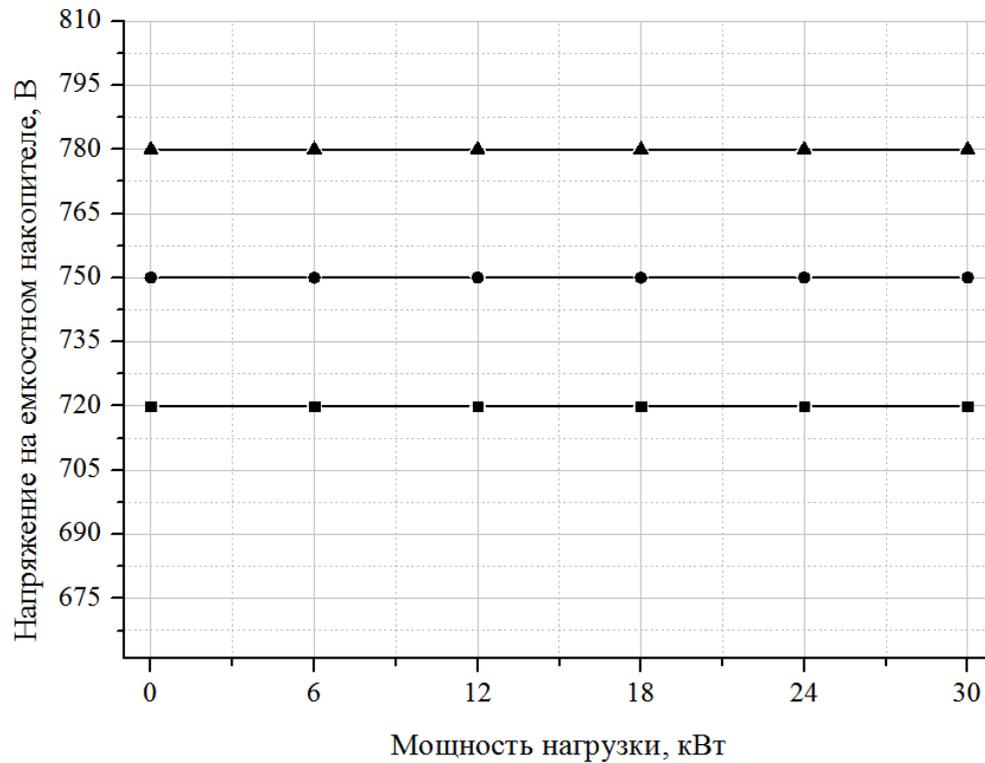


Рис. 5. Нагрузочные характеристики АВН

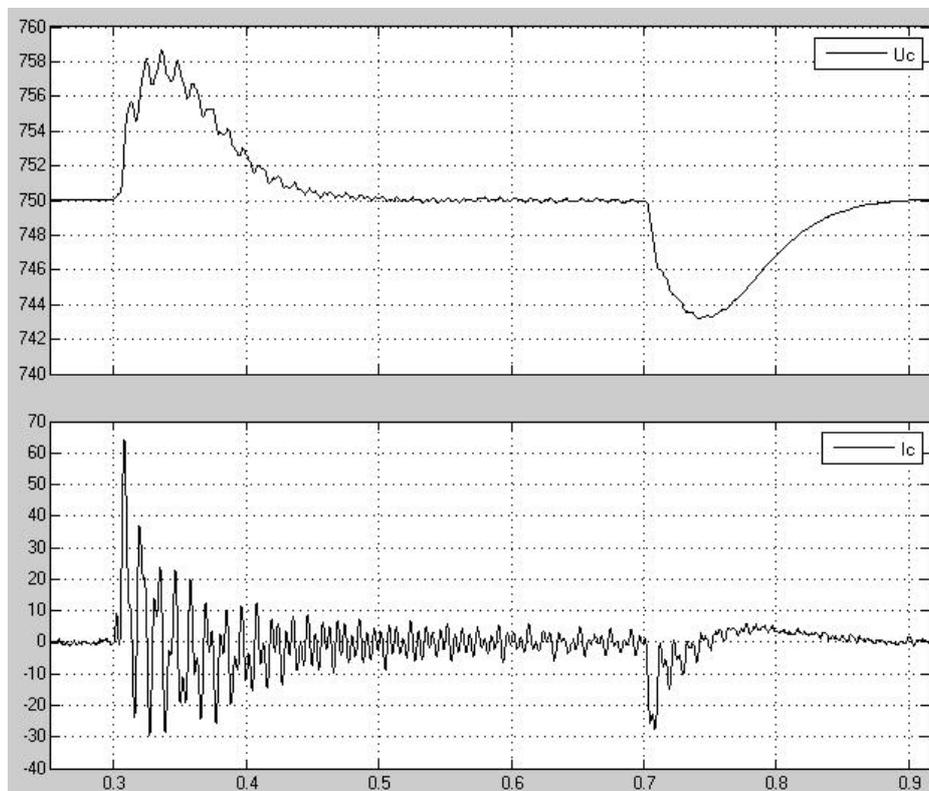


Рис. 6. Напряжение и ток ЕН при сбросе и набросе нагрузки

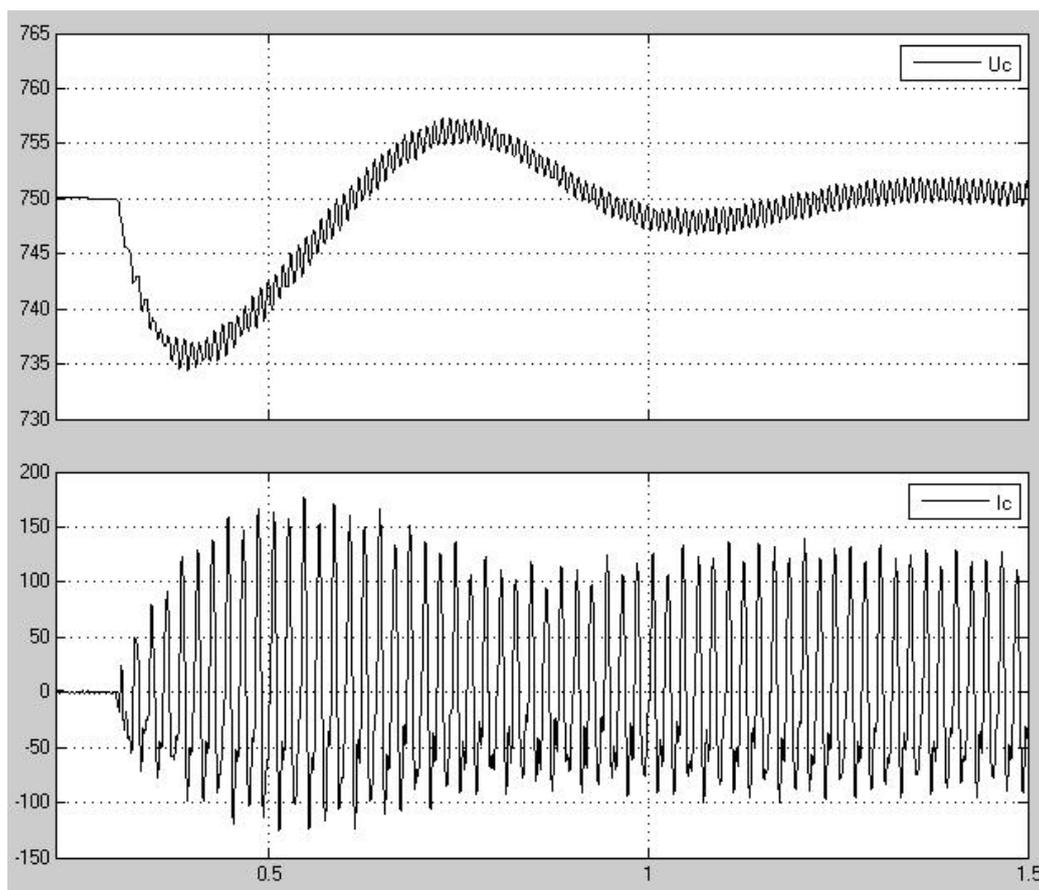


Рис. 7. Напряжение и ток ЕН при исчезновении двух фаз первичной сети

Оценивалась работоспособность АВН при коротких замыканиях в первичной питающей сети. На рис. 8 приведена реакция на однофазное к.з. сети, свидетельствующая о работоспособности АВН. Если защита сети своевременно отключает возникшее к.з., то данный режим превращается в неполнофазный режим с потерей одной из фаз.

Кроме основных функций, АВН как преобразовательное устройство, работающее параллельно с сетью, часто выполняет функцию коррекции коэффициента мощности. В исследуемой системе эта функция может быть реализована путем изменения амплитуды заданного напряжения АВН ( $U_m$ ). Регулировочные характеристики  $\cos\varphi(U_m)$ , полученные в ходе эксперимента, являются нелинейными. Экспериментально установлено, что наилучшим образом они аппроксимируются функцией Гаусса:

$$y = y_0 + a \cdot \exp\left[-\frac{(x-b)^2}{2c^2}\right]. \quad (1)$$

На рис. 9 представлена аппроксимирующая кривая регулировочной характеристики для мощности нагрузки 30 кВт, полученная применением функции Гаусса (1) с коэффициентами  $y_0 = 0,53473$ ;  $a = 0,46399$ ;  $b = 262,10524$ ;

$c = 43,42507$ . На рис. 10 приведена абсолютная погрешность аппроксимации в контрольных точках. Характер зависимостей при меньших значениях мощности такой же, но в меньшем диапазоне напряжений. Погрешность аппроксимации во всех случаях составляет менее 1%.

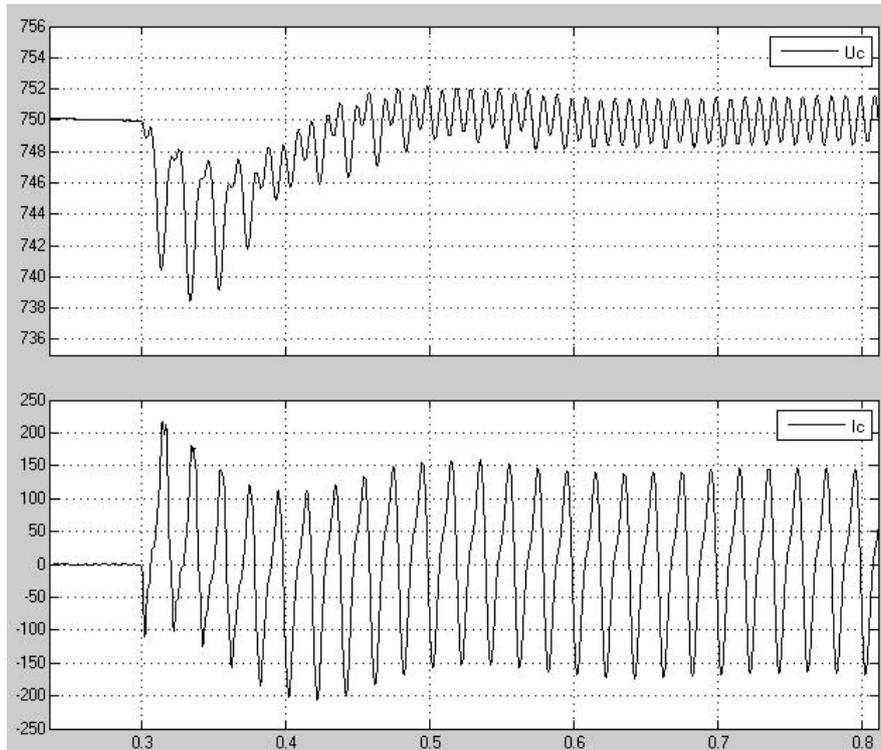


Рис. 8. Напряжение и ток ЕН при однофазном к.з. в первичной сети

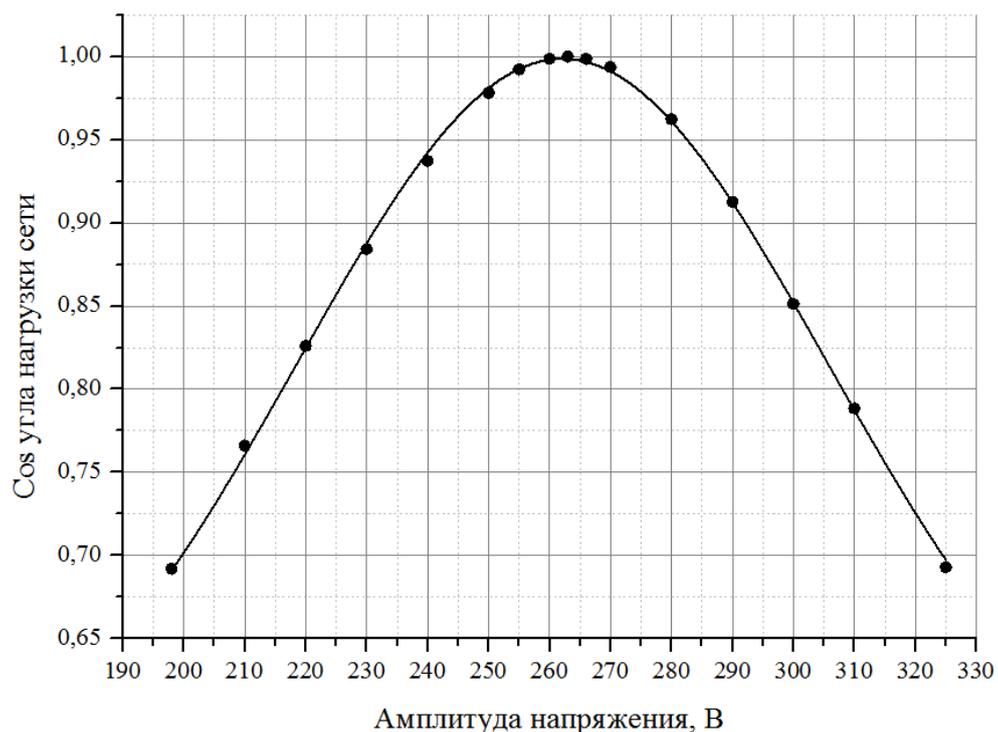
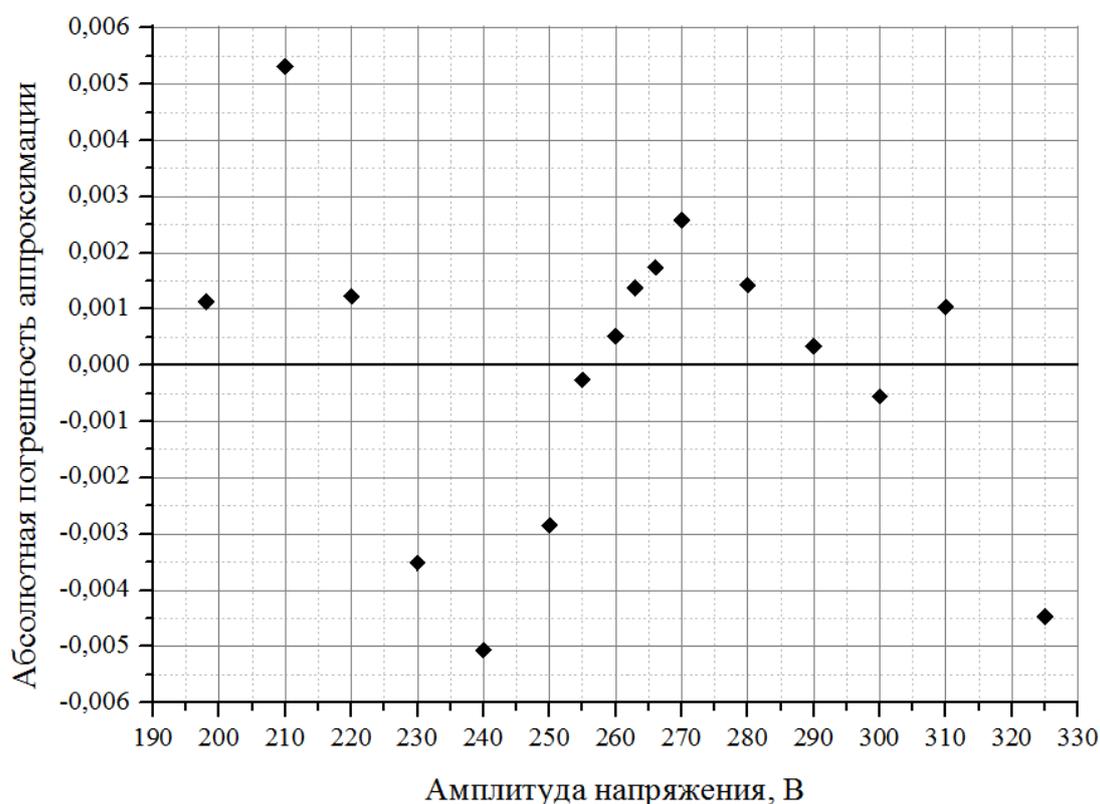


Рис. 9. Аппроксимация характеристики  $\cos\phi(U_m)$  при  $P = 30\text{кВт}$



**Рис. 10. Абсолютная погрешность аппроксимации**

Приведенные результаты исследований свидетельствует о корректной работе СУ АВН с параметрическим управлением в статических, динамических и аварийных режимах.

#### Библиографический список

1. Куро, Ж. Современные технологии повышения качества электроэнергии при ее передаче и распределении // Новости электротехники. 2005, - №1. - С. 22-26.
2. Padiyar, K. R. *FACTS controllers in power transmission and distribution* / K.R. Padiyar.- New Age International (P) Ltd. Publishers, 2007. – 532 с.
3. Чивенков, А.И. Определение соотношений параметров универсальной системы регулирования переменного тока / А.И. Чивенков [и др.] // Промышленная энергетика, 2016, №7, - с. 19-24 с.
4. Чивенков, А.И. Соотношение параметров входных цепей UPFC / А.И. Чивенков [и др.] // Электронный научный журнал «Инженерный вестник Дона». 2016, №4. URL: <http://ivdon.ru/magazine/archive/n4y2016/3788>
5. Зиновьев, Г.С. Силовая электроника: учеб. пособие, углубленный курс. 5-е изд., испр. и доп. / Г.С. Зиновьев - М.: Издательство Юрайт, 2012.- 667 с.
6. Герман-Галкин, С.Г. Аналитическое и модельное исследование активного полупроводникового преобразователя в системах электропривода / С.Г. Герман-Галкин, З.Ч. Звежевич, Н.А. Поляков // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики, 2014, № 3 (91) - с. 131-139.
7. Маклаков, А.С. Влияние на сеть трёхфазного мостового двухуровневого активного выпрямителя напряжения при различных видах ШИМ / А.С.Маклаков, А.А.Радионон // Машиностроение: сетевой электронный научный журнал. 2013, №2 - с. 40-47.

УДК 621.316.722.9

В.Г. Сугаков, Н.С. Варламов, Ю.С. Малышев

**ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ЦИФРОВОГО ФАЗОСМЕЩАЮЩЕГО  
УСТРОЙСТВА В РЕГУЛЯТОРАХ ПЕРЕМЕННОГО НАПРЯЖЕНИЯ**

Волжский государственный университет водного транспорта

В статье рассмотрены способы управления полупроводниковыми регуляторами переменного напряжения. Разработана математическая модель регулятора с системой управления на основе импульсно-фазового управления, корректирующая моменты формирования импульсов коммутации при нестабильности частоты питающего напряжения. Результаты моделирования показывают, что использование блока памяти в цифровом фазосмещающем устройстве позволяет стабилизировать напряжение с выхода регулятора при отклонении частоты напряжения от номинального значения.

The article discusses the methods to control alternating current voltage regulators. A mathematical model of a regulator with a control system based on pulse-phase control has been developed, correcting the moments of the formation of switching pulses when the supply voltage frequency is unstable. The simulation results show that the use of a memory block in a digital phase shifting device allows stabilizing the voltage from the regulator output when the voltage frequency deviates from the nominal value.

**Ключевые слова:** фазосмещающее устройство, коррекция угла управления, блок памяти, нестабильность частоты питающей сети.

**Key words:** phase-shifting device, correction of the phase angle control, block of memory, instability frequency of system electrical power.

Широкое использование полупроводниковых регуляторов переменного напряжения объясняется их широким применением для пуска и регулирования скорости асинхронных двигателей, для осветительных устройств, в сварочных аппаратах, для изменения выпрямленного напряжения при использовании в сети переменного тока, в водонагревательных и других устройствах [1, 2]. Основной функцией таких регуляторов является преобразование переменного напряжения в регулируемое напряжение той же частоты. Простейшая схема такого полупроводникового преобразователя, как правило, состоит из двух встречно-параллельно включенных силовых вентиляей [1].

В зависимости от системы управления преобразователем выделяют несколько основных способов управления: амплитудный, фазовый и широтно-импульсный [3]. При амплитудном управлении регулирование выходного напряжения происходит за счет изменения тока, протекающего через управляющий электрод силового вентиля. Импульсно-фазовый способ управления основан на изменении длительности открытого и закрытого состояния силового вентиля. При фазовом управлении регулирование выходного напряжения достигается за счет изменения момента открытия силового вентиля относительно

момента его естественного открытия, однако длительность открытого состояния вентиля не превышает половину периода питающего напряжения [4].

Для обеспечения практически плавного изменения угла управления и его высокой стабильности при отклонении частоты напряжения сети от номинального значения разработано цифровое фазосмещающее устройство (ЦФСУ) с коррекцией кода в зависимости от частоты питающего напряжения и необходимого угла управления [5]. Целью данной работы является обоснование возможности использования ЦФСУ в системах управления трехфазных регуляторов переменного напряжения.

Модель трехфазного регулятора с ЦФСУ разработана в программном пакете *MATLAB Simulink* (рис. 1, а). Данная модель включает в себя источник трехфазного напряжения *Three-Phase Programmable Voltage Source1*, нагрузку *Three-Phase Series RL Load*, первый *Three-Phase V Measurement1* и второй *Three-Phase V Measurement2* трехфазный измеритель напряжения, анализаторы трехфазного сигнала *Sequence Analyzer1* и *Sequence Analyzer2*, блок задания угла управления *Constant1*, блок синхронизации *YC1*, блоки силовой части регулятора *ПП1*, блок системы управления *CV1*. Подробное описание системы управления и имитационной модели на основе трехфазной мостовой схемы с несимметричным управлением приведено в работе [6].

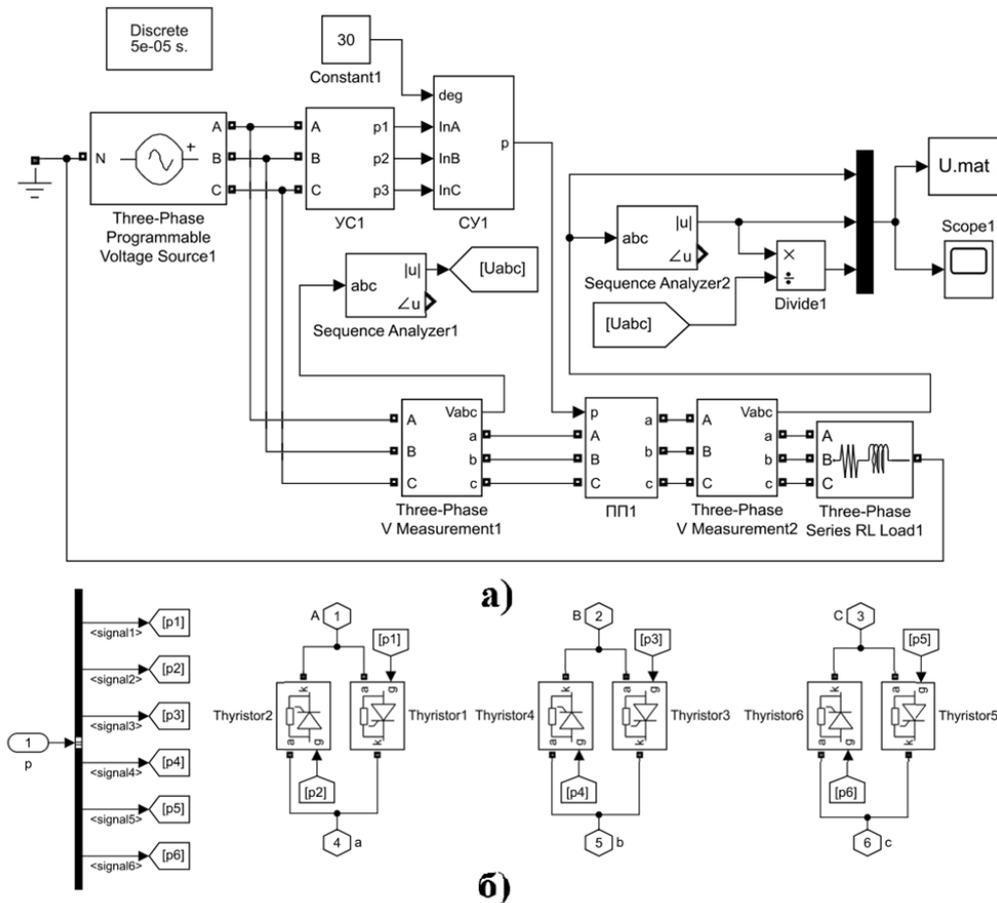


Рис. 1. Имитационная модель регулятора переменного тока (а) и структурная схема подсистемы силовой части (б)

Блок трехфазного регулятора *ППП* представлен на рис. 1, б; он состоит из шести встречно-параллельных тиристоров *Thyristor1-Thyristor6* и системы распределения импульсов коммутации *p1-p6*.

Имитационное моделирование проводилось при активно-индуктивном характере нагрузки, полная мощность которой была принята равной 10 кВА. Линейное напряжение с выхода источника задано 400 В. На рис. 2 показаны диаграммы работы регулятора при различных углах управления  $\alpha$  и зависимости относительного напряжения  $U$  с выхода регулятора от частоты входного напряжения  $f$ .

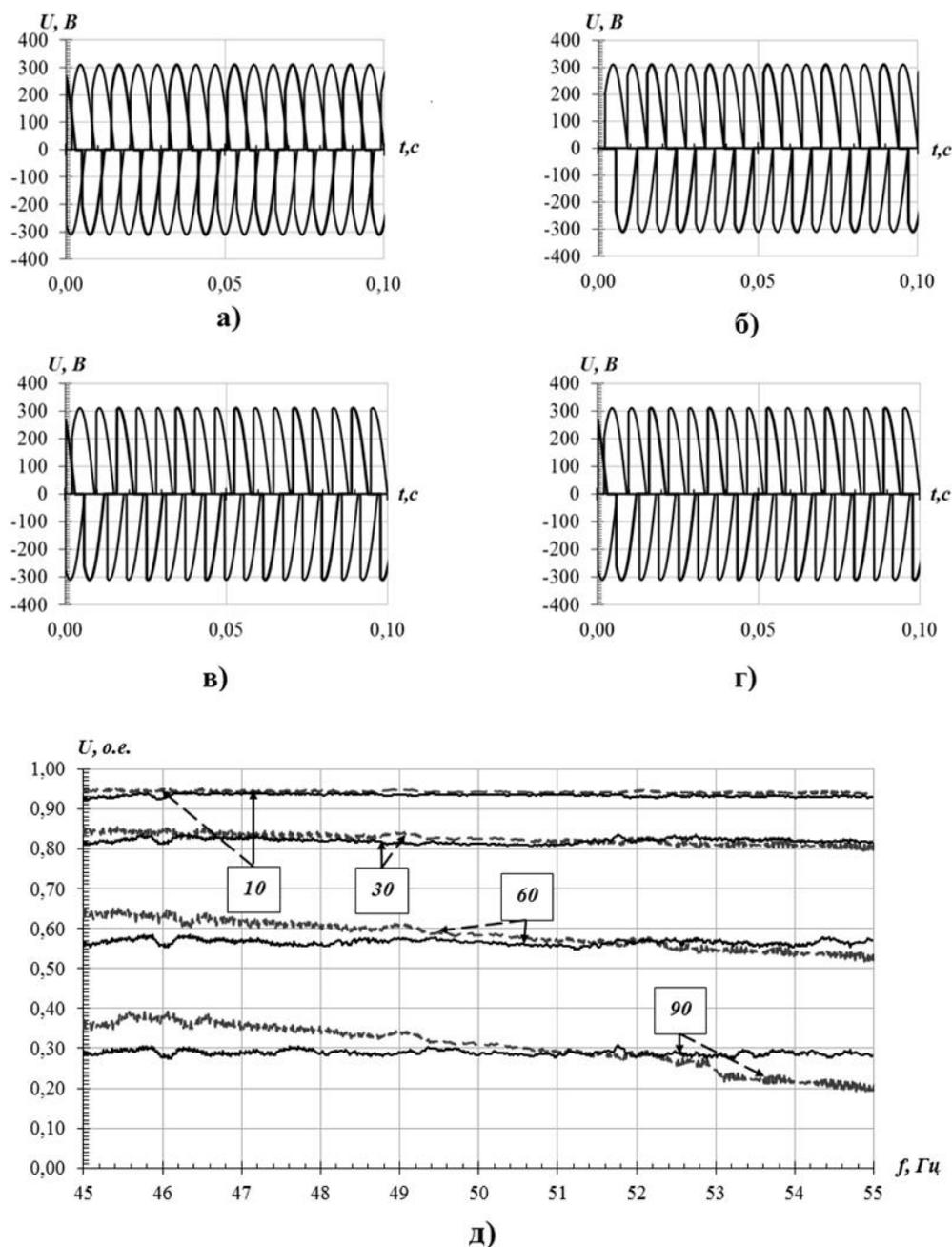


Рис. 2. Диаграммы работы регулятора переменного напряжения при углах управления равные 10 (а), 30 (б), 45 (в), 90 (г) градусов и характеристики выходного относительного напряжения от частоты питающего напряжения (д)

Временные диаграммы (рис. 2, *a-z*) иллюстрируют режим работы регулятора напряжения при импульсно-фазовом управлении. Силовые вентили полупроводникового преобразователя поочередно открываются при положительной полуволне напряжения приложенного к анодам силового вентиля в момент поступления импульса коммутации.

При изменении частоты питающего напряжения (рис. 2, *д*) величина относительного напряжения при коррекции угла управления (сплошная линия) практически постоянна на всём протяжении в диапазоне частоты от 45 до 55 Гц. Особенно это заметно при увеличении угла управления, где без его коррекции (пунктирная линия) относительное напряжение изменяется в пределах от 0,8 до 0,85 при угле управления, равном  $30^\circ$ , а при угле управления  $90^\circ$  – от 0,2 до 0,38.

Наблюдается увеличение значения выходного напряжения при уменьшении частоты напряжения и, наоборот, при увеличении частоты напряжения уменьшается величина напряжения. Это объясняется тем, что начало формирования опорного напряжения в системе управления начинается от момента естественной коммутации силового вентиля. При отклонении частоты напряжения сети от номинального значения моменты формирования импульса коммутации будут соответствовать другому значению мгновенного напряжения сети.

Таким образом, имитационное моделирование показало возможность использования предлагаемого ЦФСУ, в состав которого входит блок памяти с записанным кодом в функции от текущей частоты напряжения и необходимого угла управления, в регуляторах переменного напряжения. В этом случае при отклонении частоты напряжения величина выходного напряжения практически не изменяется в отличие от системы управления без коррекции опорного напряжения.

#### Библиографический список

1. Энергетическая электроника: справочное пособие / Под ред. В.А. Лабунцова. – М.: Энергоатомиздат, 1987. – 464 с.
2. **Файда, Е.Л.** Управление тиристорными ключами на первичной стороне вольторегулирующих трансформаторов / Е.Л. Файда, А.П. Сивкова // Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика». – 2015. – Т. 15, № 4. – С. 69–73. DOI: 10.14529/power150410
3. Устройства и элементы систем автоматического регулирования и управления. Книга 2. Усилительные устройства, корректирующие элементы и устройства / Под ред. В. В. Солодовникова. - М.: изд-во «Машиностроение» 1975 - 687 с.
4. **Горбачев, Г.Н.**, Промышленная электроника: учебник для вузов / Г.Н.Горбачев, Е.Е Чеплыгин ; под общ. ред. В.А. Лабунцова. – М.: Энергоатомиздат, 1988. – 320 с.
5. Пат. 2612055 Российская Федерация, МПК G01R 25/00 Цифровое фазосмещающее устройство / В.Г. Сугаков, О.С. Хватов, Н.С. Варламов. – 2015155112; за-явл. 22.12.2015; опубли. 02.03.2017, Бюл. № 7. – 6 с.
6. **Сугаков, В. Г.** Обоснование реализации фазосмещающего устройства с коррекцией кода в зависимости от частоты напряжения / В. Г. Сугаков, Н. С. Варламов, Ю. С. Малышев // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. - 2017. - №4(44). - С. 829-837. DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-4-829-837

УДК 621.341.572

М.П. Шилов

## ШИРОТНО-ИМПУЛЬСНАЯ МОДУЛЯЦИЯ С ТРАПЕЦЕИДАЛЬНОЙ ФОРМОЙ УПРАВЛЯЮЩЕГО СИГНАЛА ДЛЯ АВТОНОМНОГО ИНВЕРТОРА

Волжский государственный университет водного транспорта, г. Н.Новгород

В статье рассмотрен метод широтно-импульсной модуляции - ШИМ с трапецеидальной формой управляющего сигнала для трехфазного автономного инвертора напряжения - АИН. В пакете *Matlab* с использованием библиотеки *Simulink* создана модель управления АИН. На осциллограмме представлена форма требуемого линейного напряжения, которая сформирована вычитанием двух фазных напряжений. Для оценки линейного выходного напряжения с помощью FFT анализатора получен гармонический состав, в котором были определены величины высших гармоник и коэффициент нелинейных искажений.

This article describes the method of pulse-width modulation - PWM with a trapezoidal control signal for three-phase autonomous voltage inverters - AVI. In the *Matlab* package using the *Simulink* library, an AIN control model was created. The oscillogram shows the form of the required linear voltage, which is formed by subtracting two phase voltages. To estimate the linear output voltage using a FFT analyzer, a harmonic composition was obtained, in which the values of higher harmonics and the nonlinear distortion coefficient were determined.

**Ключевые слова:** широтно-импульсная модуляция, автономный инвертор напряжения, синусоидальная ШИМ, ШИМ с предмодуляцией третьей гармоникой, ШИМ с трапецеидальной формой управляющего сигнала.

**Key words:** pulse width modulation, putonomous voltage inverter, the sinusoidal PWM, the third-harmonic-injection PWM, PWM with trapezoidal control signal.

В настоящее время преобразователи частоты обеспечивают формирование и регулирование фундаментальной гармоники питающего напряжения методами широтно-импульсной модуляции (ШИМ). ШИМ широко используется для управления трехфазными автономными инверторами (АИ). Они способны вырабатывать переменное напряжение как с изменяемой амплитудой, так и с изменяемой частотой при низком коэффициенте нелинейных искажений. Главные преимущества этого решения заключаются в низком потреблении мощности, высокой энергоэффективности и легкой реализации управления [1]. Многие методы ШИМ были разработаны в соответствии со специальными требованиями и критериями оптимизации. В большей степени на практике реализуется метод синусоидальной ШИМ, вопреки такому недостатку, как недостаточное использование напряжения источника питания [2]. Это явление пагубно влияет на элементы силовой схемы - *IGBT*-ключи, высоковольтные конденсаторы, что приводит к их неоптимальному использованию. Другой способ решения этой проблемы основан на использовании метода ШИМ с предмодуляцией третьей

гармоники, что дает возможность увеличить выходное напряжение АИН [3]. Однако, наличие седлообразной формы сигнала управления приводит к уменьшению напряжения на выходе силового инвертора. Так как большинство синхронных генераторов, применяемых на судах, вырабатывают действующее линейное напряжение холостого хода, равное 400 В, то использование данного метода ШИМ влечет за собой потерю напряжения на выходе АИН в пределах 2%, соответствующее 8 В, и уменьшению КПД установки. По этой причине выходное напряжение силового инвертора будет равно 392 В, что оказывает неблагоприятное действие на работу судовых механизмов, рассчитанных на большее напряжение. Чтобы исключить потерю напряжения, необходимо установить ограничение управляющего сигнала в диапазоне от 1 до -1, что повлечет за собой увеличение коэффициента нелинейных искажений, но позволит получить требуемое выходное напряжение АИН. В этой статье предложен альтернативный метод для ШИМ с предмодуляцией третьей гармоникой - это ШИМ с трапецеидальной формой управляющего сигнала.

Для исследования ШИМ в пакете *Matlab Simulink* была разработана модель системы управления преобразователем частоты [4, 5], представленная на рис. 1.

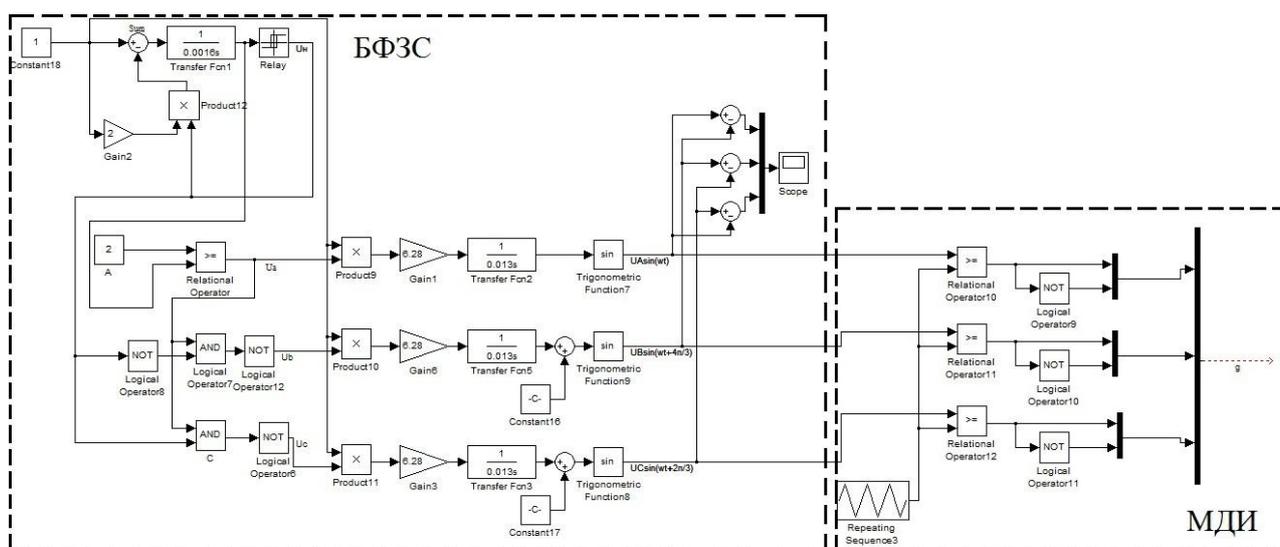
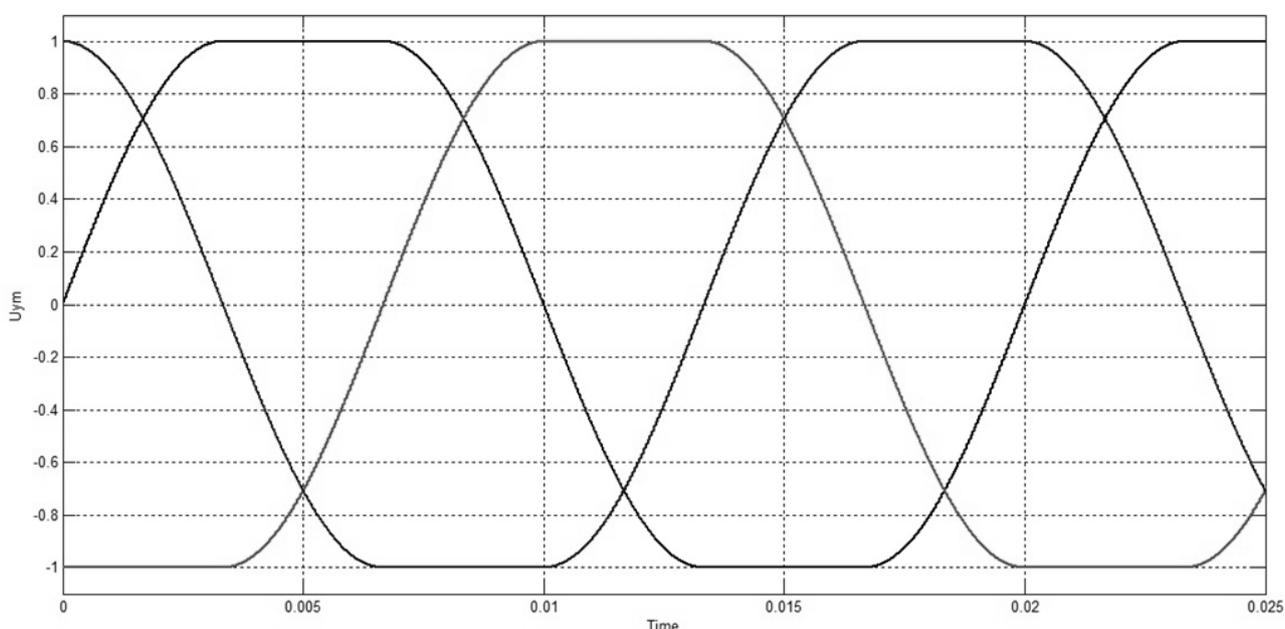


Рис. 1. Модель системы управления преобразователя частоты для ШИМ с трапецеидальной формой управляющего сигнала.

При разработке модели использовались стандартные блоки библиотеки *Simulink*. Модель системы управления состоит из блока формирования задающего сигнала - БФЗС, представляющего собой трехфазный источник напряжения трапецеидальной формы. На положительный вход блока вычитания - *Sum* поступает единичный сигнал. Этот сигнал вместе с сигналом - *Gain2*, равным двум, задают частоту следования импульсов  $f = 100$  Гц и скважностью  $S = 2$ .

С помощью блока *Sum* формируется разность сигнала задания и удвоенного выходного сигнала -  $U_H$ , представляющего собой сигнал прямоугольной формы. Выходное значение блока *Sum* поступает на вход интегратора - *Transfer*

$Fcn1$ , на выходе которого формируется пилообразная форма сигнала, поступающая на вход блока - *Relay*. Блок *Relay* выполняет функцию сравнения входного сигнала с заданным предельным значением, что позволяет выполнять переключение выходного сигнала между двумя установленными в параметрах величинами, тем самым формируя сигнал прямоугольной формы -  $U_H$  с частотой  $f = 50$  Гц. Данный сигнал вместе с сигналом пилообразной формы поступают на группу логических элементов - И, НЕ, осуществляющих формирование прямоугольных импульсов  $U_a, U_b, U_c$  для генератора сигналов. В результате на выходе формируется трехфазная система управляющих сигналов трапецеидальной формы и сдвинутых на  $120^\circ$ :  $U_A \sin(\omega t)$ ,  $U_B \sin(\omega t + 4\pi/3)$ ,  $U_C \sin(\omega t + 2\pi/3)$ . Осциллограмма управляющих сигналов приведена на рис. 2.



**Рис. 2. Осциллограмма управляющих сигналов для ШИМ с трапецеидальной формой управляющего сигнала.**

Блок *Repeating Sequence*, формирующий сигнал треугольной формы, обеспечивает задающее значение несущей частоты коммутации *IGBT*-транзисторов, равное 10 кГц. В модуляторе длительности импульсов - МДИ выполняется непрерывное сравнение трапецеидальных управляющих сигналов с сигналом треугольной формы блока *Repeating Sequence*.

Таким образом, на выходе системы управления формируется шесть сигналов -  $g$ , управляющих коммутацией *IGBT*-транзисторов силового инвертора.

Для оценки синусоидальной формы сигнала на выходе БФЗС формируем разностное значение управляющих сигналов  $U_A \sin(\omega t)$ ,  $U_B \sin(\omega t + 4\pi/3)$ ,  $U_C \sin(\omega t + 2\pi/3)$ . На рис. 3 представлен гармонический состав требуемого выходного линейного напряжения.

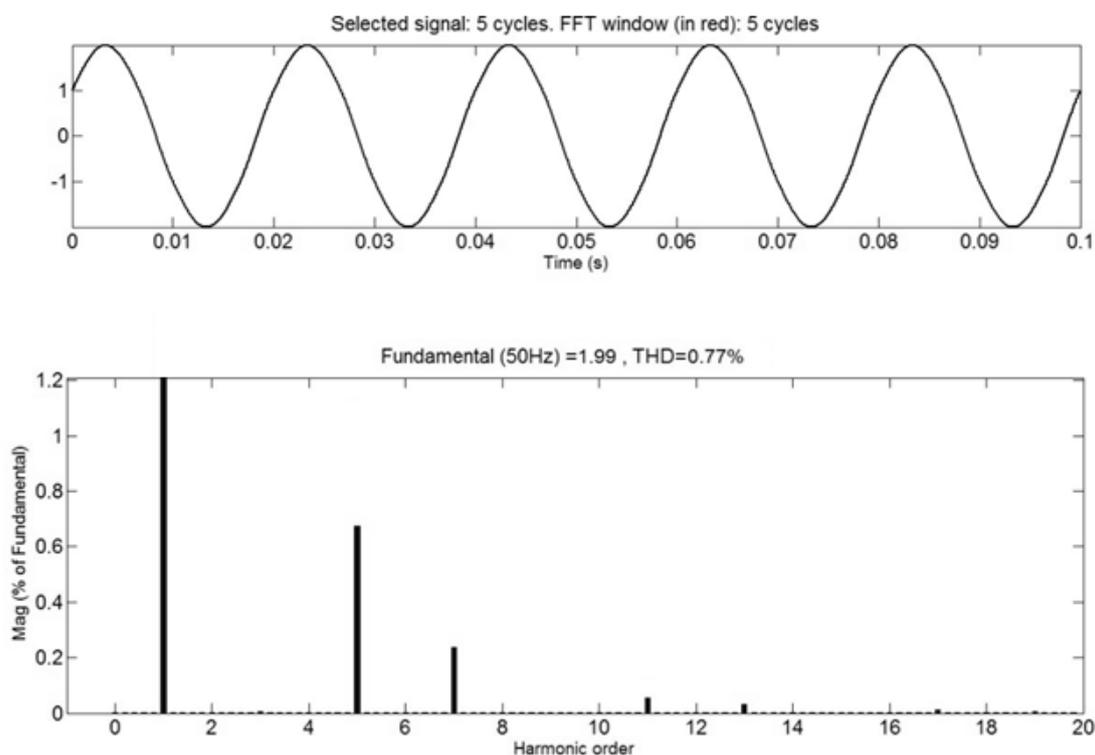


Рис. 3. Гармонический состав линейного выходного напряжения

Анализ гармонического состава показывает, что суммарные нелинейные искажения составляют 0.77%.

Разработанный способ ШИМ с трапецеидальной формой управляющего сигнала позволяет увеличить процент использования напряжения источника питания на 2% по сравнению с методом предмодуляций третьей гармоники. Предложенный метод широтно-импульсной модуляции актуален с целью уменьшения содержания гармоник высшего порядка и получения выходного напряжения, близкого к синусоидальному. Результат *FFT* анализатора показал, что разность фазных управляющих сигналов соответствует форме требуемого линейного напряжения.

#### Библиографический список

1. **Розанов, Ю.К.** Силовая электроника: учебник для вузов / Ю.К. Розанов, М.В. Рябчицкий, А.А. Кваснюк – М.: Изд. дом МЭИ, 2007.
2. **Белоусов, И.В.** Сравнительный анализ методов широтно-импульсной модуляции / И.В. Белоусов, В.Ф. Самосейко, Л.М. Бровцинова // Вестник Государственного Университета Морского и речного Флота имени адмирала С. О. Макарова. - 2018. - №2 (48). - С. 420-429.
3. **Обухов, С.Г.** Широтно-импульсная модуляция в трехфазных инверторах напряжения / С.Г. Обухов, Е.Е. Чаплыгин, Д.Е. Кондратьев – Электричество, 2008, № 8.
4. Моделирование процессов и систем в *Matlab*. Учебный курс / Ю.М. Лазарев - СПб.: Питер; Киев: Издательская группа ВНУ, 2005. – 512 с.
5. **Черных, И.В.** Моделирование электротехнических устройств в *Matlab*, *SimPowerSystem* и *Simulink* / И.В. Черных - М.: ДМК Пресс, 2007. – 288 с.

---

---

## Секция 2. АВТОМАТИЗИРОВАННЫЙ ЭЛЕКТРОПРИВОД

---

УДК 621.3.07

Т.Х. Абузьяров, А.С. Плехов

### ИССЛЕДОВАНИЕ МЕТОДОВ СНИЖЕНИЯ ПУЛЬСАЦИЙ МОМЕНТА БЕСКОЛЛЕКТОРНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ ПОСТОЯННОГО ТОКА

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

В предлагаемой статье показана целесообразность выбора бесколлекторных двигателей постоянного тока (БДПТ) для ряда случаев. Ставится задача анализа систем электропривода с минимальными пульсациями момента и минимальными электрическими потерями на основе БДПТ, и обсуждаются подходы к их совершенствованию. Приведены области применения этих систем.

The article deals with brushless DC (BLDC) motor drive implementation relevance. Various torque pulsation and copper losses minimization techniques have been reviewed. The authors have discussed different approaches of such techniques development. BLDC motor-based systems implementation areas have been given.

**Ключевые слова:** бесколлекторные двигатели постоянного тока, типовые элементы систем электропривода, алгоритмические преобразования, математические модели.

**Key words:** brushless DC motor, typical drive system elements, algorithmic conversions, mathematical models.

### Введение

Бесколлекторный электропривод постоянного тока находит все более широкое применение в промышленности, авиастроении, автомобилестроении, электротранспорте, медицине, робототехнике. Он обладает рядом преимуществ по сравнению с электроприводами других типов. К таким преимуществам, как правило, относят низкий вес, малые габариты, высокий КПД, высокую надежность, простоту организации бездатчиковой системы управления.

Среди недостатков электропривода такого типа отмечают дороговизну изготовления электрической машины из-за использования высококоэрцитивных редкоземельных постоянных магнитов в конструкции ротора, а также пульсации момента, создаваемого электродвигателем. Последняя особенность серьезно ограничивает применение привода такого типа в целом ряде случаев.

Максимальный размах пульсаций момента достигает 30% [1], что затрудняет использование электропривода на основе БДПТ на низких скоростях вращения вала: в медицинских приложениях, авто- и электротранспорте, робототехнике, приложениях безредукторного привода [1–3]. Пульсации момента

электродвигателя также могут быть причиной появления нежелательных вибраций ротора и, как следствие, исполнительного механизма [4, 5].

Ряд преимуществ, связанных с использованием привода на основе БДПТ, ставит задачу уменьшения пульсаций электрического момента как перед разработчиками электрических машин, так и перед разработчиками систем электроприводов. Следует отметить многочисленные работы, посвященные усовершенствованию привода на основе БДПТ путем уменьшения пульсаций момента различными методами. Это позволяет сделать вывод о том, что данное направление развития представляет собой одну из первоочередных задач теории электропривода [5].

### Математическая модель бесколлекторного двигателя постоянного тока

Статорные обмотки электрической машины в составе бесколлекторного привода постоянного тока расположены таким образом, что с вращением ротора фазная ЭДС изменяется трапецеидально. Для создания постоянного момента полупроводниковый преобразователь генерирует в обмотках статора ток прямоугольной формы с шириной каждого импульса равной, как правило, 120 электрическим градусам (рис. 1).

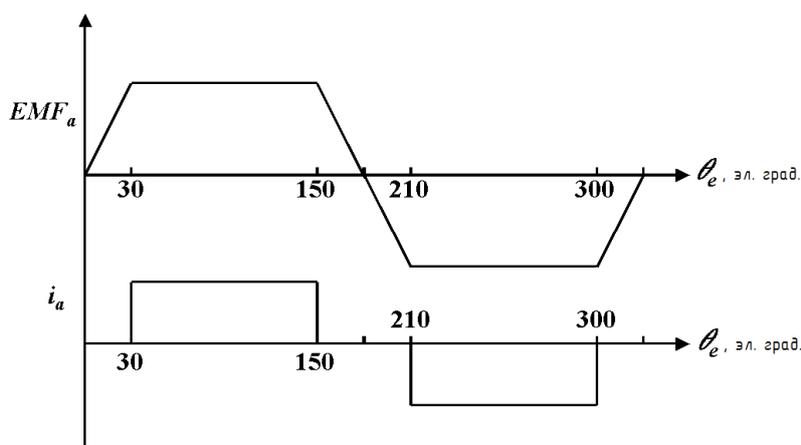


Рис. 1. Форма обратной ЭДС (вверху) и тока фазы А (внизу) при вращении ротора бесколлекторного электропривода постоянного тока

Запишем уравнения, упрощенно описывающие работу бесколлекторного двигателя постоянного тока [6]. При этом будем руководствоваться следующими допущениями: обмотки статора расположены под углом 120 градусов относительно друг друга и соединены в звезду без нулевого провода; обмотки статора симметричны, их сопротивление и индуктивность постоянны; не учитывается насыщение магнитной цепи, гистерезис и вихревые токи; не учитывается взаимодействие стали статора с постоянными магнитами, зазор электрической машины считается равномерным. Учитывая допущения, запись закона Ома для статорной цепи в матричном виде будет иметь вид:

$$\begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R & 0 & 0 \\ 0 & R & 0 \\ 0 & 0 & R \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} L_a & L_{ab} & L_{ca} \\ L_{ab} & L_b & L_{bc} \\ L_{ca} & L_{bc} & L_c \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} e_a \\ e_b \\ e_c \end{bmatrix}, \quad (1)$$

где  $v_a, v_b, v_c$  – напряжения на обмотках статора, В;  $i_a, i_b, i_c$  – токи фаз статора, А;  $R = R_a = R_b = R_c$  – активное сопротивление обмотки статора, Ом;  $L_a, L_b, L_c$  – собственная индуктивность обмотки статора, Гн;  $L_{ab}, L_{bc}, L_{ca}$  – взаимная индуктивность обмоток статора, Гн;  $e_a, e_b, e_c$  – ЭДС фаз статора, А.

Следует отметить, что форма ЭДС статора имеет трапецеидальную форму подобно тому, как это изображено на рис. 1.

Так как изменение магнитного сопротивления ротора не учитывается и электрическая машина симметрична, справедливо утверждать, что

$$\begin{aligned} L_a &= L_b = L_c = L, \\ L_{ab} &= L_{bc} = L_{ca} = M, \end{aligned} \quad (2)$$

где  $L$  – собственная индуктивность обмотки статора, Гн;  $M$  – взаимная индуктивность обмоток статора, Гн.

Тогда выражение (1) можно переписать как

$$\begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R & 0 & 0 \\ 0 & R & 0 \\ 0 & 0 & R \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L & M & M \\ M & L & M \\ M & M & L \end{bmatrix} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} e_a \\ e_b \\ e_c \end{bmatrix}. \quad (3)$$

Принимая во внимание тот факт, что обмотки соединены в звезду без нулевого провода, справедливо выражение

$$i_a + i_b + i_c = 0. \quad (4)$$

Тогда

$$Mi_b + Mi_c = -Mi_a. \quad (5)$$

Таким образом, выражение (3) принимает вид

$$\begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R & 0 & 0 \\ 0 & R & 0 \\ 0 & 0 & R \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L-M & 0 & 0 \\ 0 & L-M & 0 \\ 0 & 0 & L-M \end{bmatrix} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} e_a \\ e_b \\ e_c \end{bmatrix}. \quad (6)$$

Электромагнитный момент  $T_e$ , Н·м, на валу электрической машины может быть найден как

$$T_e = \frac{1}{\omega_r} (e_a i_a + e_b i_b + e_c i_c), \quad (7)$$

где  $\omega_r$  – угловая скорость вращения ротора, рад/с.

Уравнение динамики электропривода записывается как

$$\frac{d}{dt} \omega_r = \frac{1}{J} (T_e - T_L), \quad (8)$$

где  $T_L$  – момент нагрузки, Н·м, на валу электродвигателя.

## Методы снижения пульсаций момента бесколлекторного электропривода постоянного тока

Как уже было отмечено, несмотря на многочисленные преимущества, связанные с применением бесколлекторного электропривода постоянного тока, электрические машины в составе таких систем подвержены влиянию нежелательных пульсаций электромагнитного момента [1–5]. Данное явление может быть вызвано как структурой электрической машины, так и особенностями системы управления электроприводом. Все приемы, направленные на уменьшение пульсаций момента, можно разделить на две основные группы: конструктивные методы, применяемые на стадии проектирования электрической машины, и методы, связанные с усовершенствованиями системы управления.

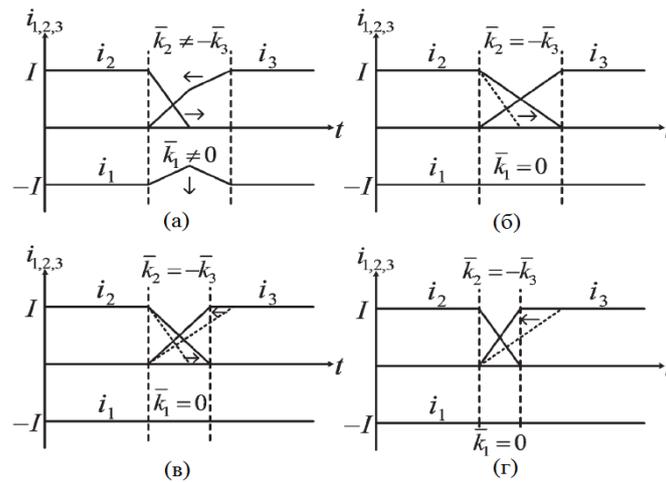
С точки зрения конструкции электрической машины для уменьшения зубцового момента необходимо обеспечить равномерное распределение магнитной проницаемости статора. Одной из наиболее популярных техник минимизации зубцового момента является применение скоса пазов статора. Как показывают исследования, скос пазов статора на одно зубцовое деление в значительной степени сокращает зубцовый момент. В ряде случаев применяют скос магнитного поля ротора. Это осуществляется с помощью применения либо непосредственно скоса магнитов ротора, либо с помощью смещения отдельных секций ротора [2]. Известными [5] недостатками применения скосов в конструкции электродвигателя являются уменьшение среднего значения момента, более высокие требования к конструкции статора (составу производственной линии), увеличению потока рассеяния и прочим потерям. Для уменьшения момента гармоник применяют техники распределения потока ротора в зазоре электрической машины. Это, в свою очередь, достигается при помощи регулирования направления и силы намагничивания постоянных магнитов, а также за счет изменения их формы, смещения относительно друг друга, что также ведет к дополнительному усложнению технологического процесса производства электрической машины. Таким образом, как показано ранее, представленные техники уменьшения пульсаций момента, как правило, влекут за собой дополнительные трудности при производстве электродвигателя, уменьшение среднего значения момента, увеличение потока рассеяния и т. д.

С этой точки зрения перспективным направлением исследований является решение проблемы пульсаций методами, применяемыми при разработке систем управления электроприводом. Выделяют две основные причины пульсаций момента, вызванных непосредственно системой управления бесколлекторным электродвигателем постоянного тока. Первая обусловлена пульсациями тока, вызванными ШИМ на периоде между коммутациями фаз. Вторая – процессами, происходящими при коммутации тока с одной фазы двигателя на другую.

Классическая стратегия управления БДПТ подразумевает коммутацию проводящих ключей каждые 60 электрических градусов. Из выражения (7) для электромагнитного момента двигателя видно, что при питании двигателя током идеальной прямоугольной формы (как на рис. 1) электрическая машина формирует постоянный момент на валу. На практике достижение идеальных фронтов

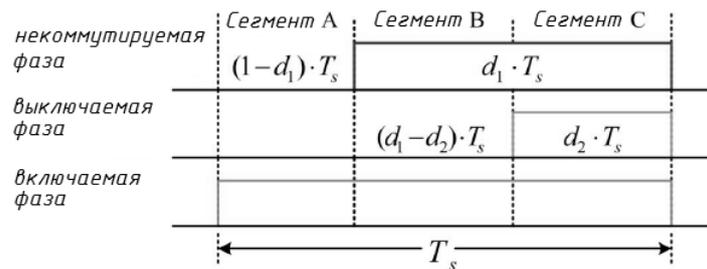
и спадов формы тока невозможно, при этом переключение тока с одной фазы на другую, как правило, сопровождается пульсациями момента, вызванными неравенством скорости нарастания тока во вновь включаемой фазе БДПТ и скорости спада тока во вновь выключаемой. Данный процесс наглядно проиллюстрирован на рис. 2, а. Кроме того, можно заметить, что коммутация фаз 2 и 3 вызывает кратковременную просадку тока  $i_1$  фазы 1, который также принимает участие в формировании момента согласно (7). Это объясняется уравнением (4) математической модели.

В работе [7] представлена техника так называемой «трехсегментной модуляции» (от англ. three-segment modulation method), позволяющая исключить пульсации момента при коммутации фаз (рис. 2 б, в, г). Задача регулирования скоростей нарастания токов в коммутируемых фазах достигается путем вычисления оптимальных продолжительностей включения  $d_1$  и  $d_2$  на периоде ШИМ в процессе коммутации (рис. 3). Авторы демонстрируют практически полное исключение пульсаций тока и увеличение мощности двигателя до 18% в зависимости от режима работы преобразователя. Для испытаний был использован двигатель мощностью 150 Вт.



**Рис. 2. Форма фазных токов БДПТ в процессе коммутации и возможные решения проблемы коммутационных пульсаций момента:**

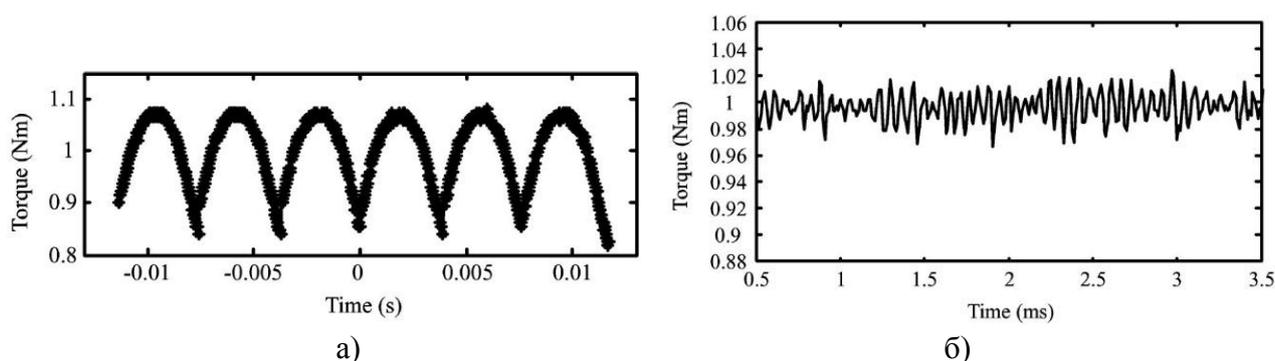
а – коммутация, вызывающая пульсации момента; б – уменьшение скорости спада тока «быстрой» фазы; в – уменьшение скорости спада тока «быстрой» фазы вместе с ускорением «медленной»; г – ускорение «медленной» фазы



**Рис. 3. Принцип работы трехсегментной коммутации**

В работе [8] представлен метод минимизации пульсации момента на основе прямого управления моментом (англ. Direct torque control) БДПТ с учетом мгновенной величины напряжения звена постоянного тока силового преобразователя и реальной формы ЭДС фазы электрической машины. При этом учет формы ЭДС проводился при помощи серии предварительных тестов электрической машины с последующей конфигурацией инвертора. В результате для двигателя с номинальной мощностью 4 кВт и с номинальной скоростью 3000 об/мин достигнуто уменьшение размаха пульсаций приблизительно с 25% до 5-6%. На рис. 4 изображены результаты математического моделирования, представленные автором в работе [8].

Ряд исследований [6, 9, 10] показывает эффективность подходов к управлению БДПТ, аналогичных тем, что применяются для синхронных двигателей с постоянными магнитами (СДПМ) (с синусоидальной формой фазной ЭДС). Для таких методов характерно одновременное протекание тока по трем обмоткам электрической машины подобно тому, как это организовано при подходе к управлению СДПМ. При этом форма токов выбирается исходя не только из условия минимизации пульсаций момента (то есть с учетом неидеальной формы обратной ЭДС конкретного двигателя), но и из условия минимальных потерь в меди электрической машины.



**Рис. 4. Минимизация пульсаций момента на основе метода прямого управления моментом:**

*а* – момент при традиционном подходе к управлению БДПТ; *б* – момент при использовании метода прямого управления моментом с контролем напряжения звена постоянного тока

Применение такого рода подходов может требовать от топологии силового преобразователя возможности обеспечивать такую оптимальную форму фазного тока, трехфазная система которых в общем случае может не удовлетворять уравнению (4).

Выполнение этого равенства для классических трехфазных автономных инверторов может являться серьезным ограничением для достижения максимальной эффективности решения поставленной задачи.

Наиболее логичным вариантом развития этой технологии выглядит идея расширить пространство базовых векторов инвертора напряжения путем изменения классической силовой схемы преобразователя. Это позволило бы отойти от необходимости выполнения равенства (4).

Исследование новых топологических решений и алгоритмов управления с использованием математической модели БДПТ позволит разработать высокоэффективный бесколлекторный электропривод постоянного тока.

### Выводы

В данной работе подробно рассмотрен привод на основе БДПТ, представлена его математическая модель. Указаны основные причины образования пульсаций момента. Причины классифицированы по источнику возникновения на вызванные конструктивными особенностями электрической машины и вызванные несовершенствами системы управления. Проведен анализ математической модели, наглядно демонстрирующей некоторые причины возникновения пульсаций. Показано, что данная математическая модель служит отправной точкой для отработки алгоритмических решений, направленных на снижение размаха пульсаций момента. В работе приведена классификация методов решения поставленной проблемы, которые разделяются на две группы: конструктивные и алгоритмические. Для каждой из выделенных групп приведен обзор ряда исследовательских работ, демонстрирующих результаты и потенциальные возможности применяемых авторами методов. Показаны преимущества и перспективность алгоритмических методов снижения пульсаций момента. Исследования в области разработки новых топологических решений преобразовательной части бесколлекторного привода постоянного тока, а также в области алгоритмов управления БДПТ позволят расширить область применения привода данного типа, что приведет к уменьшению стоимости и массогабаритных показателей, более требовательных к точности систем.

### Библиографический список

- 1 **Monteiro, J. R. B. A.** Electromagnetic torque ripple and copper losses reduction in permanent magnet synchronous machines / J. R. B. A. Monteiro [et al.] // E.T.E.P. 2011.
- 2 **Lee, G. H.** Torque ripple minimization control of permanent magnet synchronous motors for EPS applications / G. H. Lee [et al.]// International Journal of Automotive Technology, Vol. 12, No. 2, pp. 291–297 (2011).
- 3 **Oksuztepe E.** Sensorless vector control of PMSM with non-sinusoidal flux using observer based on FEM / Eyyup Oksuztepe [et al.] // Article in Electrical Engineering, September, 2013.
- 4 **Hwang, M. H.** Analysis of Torque Ripple and Cogging Torque Reduction in Electric Vehicle Traction Platform Applying Rotor Notched Design / M.H. Hwang [et al.] // MDPI, Published: 6 November 2018.

- 5 **Grčar, B.** Pulsating Torque Reduction for Permanent Magnet AC Motors / B.Grčar [et al.] // Conf.: Control Applications, 2001.
- 6 **Mozaffari Niapor, S. A. KH.** Review of Permanent-Magnet Brushless DC Motor Basic Drives Based on Analysis and Simulation Study / S. A. KH. Mozaffari Niapour [et al.] // IREE Vol. 9, N. 5, 2014.
- 7 **Shi, J.** New Method to Eliminate Commutation Torque Ripple of BLDC Motor With Minimum Commutation Time / J. Shi [et al.] // IEEE Trans. on ind. electr. vol. 60, no. 6, 2013.
- 8 **Lu, H.** A New Torque Control Method for Torque Ripple Minimization of BLDC Motors With Un-Ideal Back EMF / H. Lu [et al.] // IEEE Transactions on Power Electronics, 04.2008.
- 9 **Kim, T.** Optimal power and torque control of a brushless DC (BLDC) motor/generator drive in electric and hybrid electric vehicles / T. Kim [et al.]// IEEE 41st Annual Meeting on Industry Applications, 2006.
- 10 **Gaurav, N.** A survey and comparison of characteristics of motor drives used in electric vehicles / N. Gaurav, C. K. Narayanr // CCECE, May, 2006, Ottawa, Canada.

УДК 621.752.3

Б.А. Гордеев<sup>1,2</sup>, С.Н. Охулков<sup>1,2</sup>, А.И. Ермолаев<sup>2</sup>, Д.Ю. Титов<sup>2</sup>

## ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ НА АМПЛИТУДНО-ЧАСТОТНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ МАГНИТОУПРАВЛЯЕМОЙ ГИДРООПОРЫ

Институт проблем машиностроения Российской академии наук<sup>1</sup>,  
Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева<sup>2</sup>

В статье приведена модель магнитоуправляемой гидроопоры с магнитореологическим трансформатором (МРТ). Магнитоуправляемая гидроопора представлена электромеханическим эквивалентом – заграждающим фильтром на основе последовательного электрического контура. Приведены результаты моделирования гидроопоры с МРТ при температурах магнитореологической жидкости (МРЖ) 20°C, 40°C, 60°C и напряжённости магнитного поля  $H = 252$  кА/м. Значения динамической жесткости и обобщённых гидравлических коэффициентов трения в дроссельных каналах гидроопоры рассчитаны при массе нагрузки в 27 кг и входном воздействии типа «белый шум» со среднеквадратическим отклонением (СКО) виброскорости 50 м/с<sup>2</sup>.

The article presents a model of a magnetically controlled hydromount with a magnetorheological transformer (MRT). The magnetically controlled hydromount is represented by an electromechanical equivalent - by a rejector filter based on a series electric circuit. The results of the simulation of the hydromount with MRT at temperatures of a magnetorheological fluid (MRF) 20 °C, 40 °C, 60 °C and magnetic field strength  $H = 252$  kA/m are given. The values of dynamic stiffness and generalized hydraulic coefficients of friction in the throttle channels of the hydromount are calculated with a load weight of 27 kg and an input effect of the “white noise” type with a standard deviation (RMS) vibration velocity of 50 m/s<sup>2</sup>.

**Ключевые слова:** магнитореологический трансформатор, гидроопора, дроссельные каналы, магнитореологическая жидкость, динамические жёсткости, передаточные функции, математическое моделирование, метод электроаналогий, магнитное поле, температура.

**Key words:** magnetorheological transformer, hydromount, throttle channels, magnetorheological fluid, dynamic stiffness, transfer functions, mathematical modeling, electrical analogy method, magnetic field, temperature.

### Введение

К настоящему времени к вопросам проектирования и исследования активных гидроопор с магнитореологическими трансформаторами (МРТ), заполненных магнитореологическими жидкостями (МРЖ), проявляется всё больше внимания. Гидроопоры с МРТ являются активными средствами виброзащиты машин и механизмов электротехнических комплексов. В теории механических систем и автоматического управления гидроопоры можно представить в виде двух- или четырёхполюсников, которые встраиваются в механические цепи виброизолируемых объектов.

Данное представление базируется на фактическом совпадении физических и информационных представлений, для которых внешние силовые и кинематические параметры, действующие на активные средства виброзащиты, воспринимаются как входные и выходные сигналы, так как гидроопора с МРТ как технический объект может рассматриваться как некоторый преобразователь. Такой преобразователь обеспечивает определенную связь между входным и выходным сигналом. Принимая во внимание параметры таких соотношений, можно вполне оценивать динамическое состояние гидроопоры с МРТ, ее узлов и деталей. Такой подход вполне правомерен, но требует своих форм, методов изучения и способов адекватного представления математических моделей при проектировании и разработке активных гидроопор с МРТ [1-3].

При изучении динамического состояния гидроопор с МРТ в рамках представлений об обобщенных задачах виброзащиты их математические модели формируются на основе аналитического аппарата теории автоматического управления и теории электрических цепей, что позволяет с единых позиций рассматривать динамические процессы различной физической природы.

Если вопросы прохождения внешних сил и кинематических воздействий по механической цепи относятся к задачам механики, то прохождение электрических сигналов и их преобразование относится к электрическим цепям, имеющим тесную связь с механическими цепями на базе электромеханических аналогий [1-3].

Прежде чем перейти к моделированию динамических свойств гидроопор с МРТ в виде электрических схем необходимо дать представление о механических двух- и четырёхполюсниках, применяемых при исследовании механических цепей [1-3].

## 1. Гидроопора как механический двухполюсник

Механическую систему, представленную в виде совокупности соединенных между собой активных и пассивных элементов, называют механической цепью. Механическая цепь с приемлемой точностью отражает динамические свойства исходной механической системы. Для всякой системы можно указать места, через которые осуществляется ее связь со средой. Место, в котором к системе прикладывается воздействие, называют входом, а выходом - место, в котором оценивают реакцию системы. Вход (или выход) системы, характеризующийся обобщенными координатой и силой, называют полюсом. В общем случае вход и выход системы могут быть многополюсными. Элемент, имеющий два полюса, называют двухполюсником [1-3].

Любой двухполюсник в принятой системе отсчета можно характеризовать силами  $F_1$  и  $F_2$ , приложенными к его полюсам 1 и 2, и параметрами движения полюсов (рис. 1) [1-3]. В двухполюснике силы  $F_1$  и  $F_2$  полюсов равны по величине и противоположно направлены (рис. 1):

$$\mathbf{F}_1 = F_1 \mathbf{x}^0 = F \mathbf{x}^0 = \mathbf{F}, \mathbf{F}_2 = F_2 \mathbf{x}^0 = -F \mathbf{x}^0 = -\mathbf{F}, \quad (1)$$

где  $\mathbf{F}$  - воспринимаемая двухполюсником сила;  $F$  - силовая переменная двухполюсника;  $\mathbf{x}^0$  - единичный вектор оси  $Ox$ .

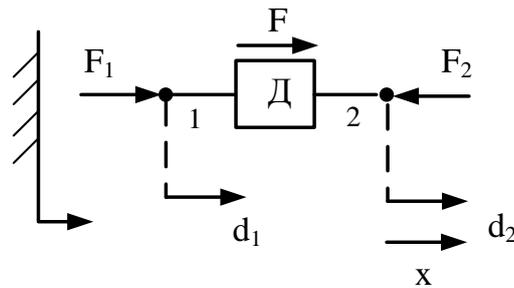


Рис. 1. Двухполюсник Д с полюсами 1 и 2, где  $d_1$  и  $d_2$  – перемещения полюсов

Кроме представления гидроопоры как двухполюсника (рис. 1), её представляют через динамические жесткости объекта и фундамента. Для случая, когда гидроопора устанавливается под объект на фундамент [1-3], на рис. 2 показана импедансная схема системы виброизоляции объекта.

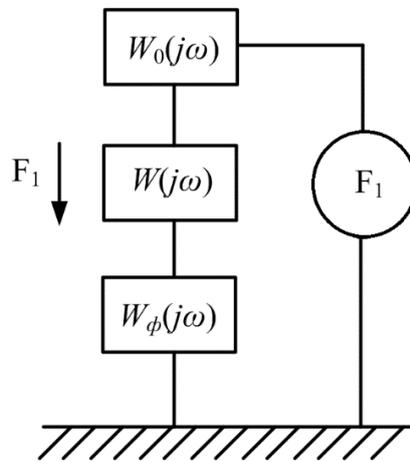


Рис. 2. Импедансная схема:  $W_0(j\omega)$  – передаточная функция объекта;  $W(j\omega)$  – передаточная функция гидроопоры;  $W_\phi(j\omega)$  – передаточная функция фундамента

Определим динамическую жесткость и передаточную функцию такой системы относительно внешней силы  $\mathbf{F}$ :

$$W_1(j\omega) = \frac{1}{\frac{1}{W(j\omega)} + \frac{1}{W_\phi(j\omega)}} = \frac{W(j\omega)W_\phi(j\omega)}{W(j\omega) + W_\phi(j\omega)};$$

$$W_c(j\omega) = W_0(j\omega) + W_1(j\omega) = \frac{W_0(j\omega)W(j\omega) + W_0(j\omega)W_\phi(j\omega) + W(j\omega)W_\phi(j\omega)}{W_0(j\omega)W_\phi(j\omega)}; \quad (2)$$

$$W(j\omega) = \frac{F_1}{F} = \frac{D_1}{D_c} = \frac{W_0(j\omega)W_\phi(j\omega)}{W_0(j\omega)W(j\omega) + W_0(j\omega)W_\phi(j\omega) + W(j\omega)W_\phi(j\omega)}$$

В результате имеем передаточную функцию системы, выраженную через отношение динамических жесткостей.

Исходя из выражений (2) видно, что проведение анализа и расчета гидроопоры на основе двухполюсника (рис. 2) представляет собой достаточно сложную задачу. Передаточные функции, полученные на основе двухполюсника,

предполагают, что заранее известны все входные характеристики системы виброизоляции объекта.

Более наглядным и менее трудоемким методом исследования динамических свойств таких систем является рассмотрение гидропоры с позиции теории механического четырехполюсника [1-3].

Классическим способом рассмотрения динамических характеристик гидропоры с позиции теории механического четырехполюсника является метод определителей, который предполагает аналитическое вычисление передаточных функций. Также одним из способов рассмотрения динамических характеристик с позиции теории механического четырехполюсника является представление гидропоры на основе составления системы механических и гидравлических уравнений [1-3], предполагающего, что гидропора представляется как линейный механический четырехполюсник через главные и передаточные динамические жесткости.

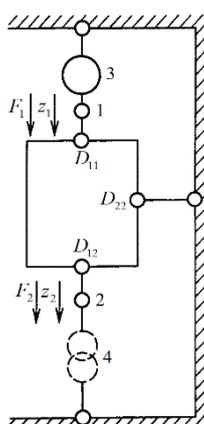
## 2. Гидропора как механический четырехполюсник

В первом приближении задача рассматривается без учета диссипативных характеристик с целью достоверного анализа частотных передаточных функций системы. Рабочая жидкость принята несжимаемой. Линейный механический четырехполюсник представлен на рис. 3.

Для данной системы справедливы следующие уравнения [1-3]:

$$\begin{cases} F_1(s) = D_{11}(s)z_1(s) - D_{12}(s)z_2(s) \\ F_2(s) = -D_{21}(s)z_1(s) + D_{22}(s)z_2(s) \end{cases} \quad (3)$$

где  $D_{11}(s)$  и  $D_{22}(s)$  - главные динамические жесткости;  $D_{12}(s) = D_{21}(s)$  - передаточные динамические жесткости;  $z_1$  и  $z_2$  - перемещения в точках 1 и 2;  $s$  - переменная преобразования Лапласа.



**Рис. 3.** Схема включения демпфера как линейного механического четырехполюсника: 1 – контакт со стороны объекта; 2 – контакт со стороны основания; 3 – генератор силы  $F_1$ ; 4 – генератор перемещения  $z_2$

Из (3) следует, что если точка 2 жестко закреплена ( $z_2 = 0$ ), или точка 1 свободна при  $F = 0$ , то абсолютная передаточная функция выражается как:

$$T(s) = -\frac{F_2(s)}{F_1(s)} \Big|_{z_2=0} = \frac{z_1}{z_2} \Big|_{F_1=0} = \frac{D_{12}}{D_{11}} \quad (4)$$

Результат иллюстрирует известное свойство равенства коэффициентов передачи при силовой и кинематической виброизоляции [1-3].

При анализе динамических свойств гидропоры важна также передаточная функция по относительному перемещению при  $F_1 = 0$ :

$$R(s) = \frac{z_2 - z_1}{z_2} = 1 - T(s) \quad (5)$$

Функции  $D_{11}(s)$ ,  $D_{12}(s)$ ,  $T(s)$  и  $R(s)$  можно представить в виде отношений полиномов:

$$D_{11}(s) = p(s) / q(s), T(s) = N(s) / p(s), R(s) = [p(s) - N(s)] / p(s), \quad (6)$$

где  $p(s)$  – полином, корни которого являются резонансными частотами;  $q(s)$  – полином, корни которого являются антирезонансными частотами;  $N(s)$  – полином, корни которого являются частотами нулей передаточной динамической жесткости и передаточной функции.

При решении совместной системы механических и гидравлических уравнений [1, 2] получена передаточная функция нагруженной гидропоры:

$$T(s) = \frac{LA^2s^2 + c_r + (A^2 / E)}{(m + LA^2)s^2 + c_r + (A^2 / E)}, \quad (7)$$

где  $m$  – масса нагрузки, кг;  $c_r$  – жесткость резиновой обечайки Н/м;  $A$  – площадь поршневого действия обечайки, м<sup>2</sup>;  $L$  – инерционное сопротивление дроссельных каналов;  $E$  – емкость дополнительной камеры;  $m_{ит} = LA^2$  присоединенная масса инерционного трансформатора ИТ.

Главная и передаточная динамические жесткости гидропоры представлены в виде:

$$D_{11}(s) = (m + LA^2)s^2 + c_r + (A^2 / E), \quad (8)$$

$$D_{12}(s) = LA^2s^2 + c_r + (A^2 / E). \quad (9)$$

Если задача рассматривается с учетом диссипативных характеристик, то передаточная функция нагруженной гидропоры по силе будет равна

$$T(j\omega) = \frac{F_2(j\omega)}{F_1(j\omega)} \frac{z_2}{z_1} = \frac{-m_{ит}\omega^2 + bj\omega + c}{-(m + m_{ит})\omega^2 + bj\omega + c}. \quad (10)$$

Тогда главная и передаточная динамические жесткости нагруженной гидропоры представляются в виде:

$$D_{11}(j\omega) = -m\omega^2 + D_{12}(j\omega) = -(m + m_{ит})\omega^2 + bj\omega + c, \quad (11)$$

$$D_{12}(j\omega) = -m_{ит}\omega^2 + bj\omega + c. \quad (12)$$

В выражениях (10-12):  $b = rA^2$  – приведенное демпфирование или гидравлический коэффициент трения в дроссельных каналах гидропоры, Н·с/м;  $c$  – эквивалентная жесткость, учитывающая взаимодействие мембраны и дополнительной камеры и сжимаемость жидкости в рабочей камере;  $\omega$  – круговая частота;  $j$  – мнимая единица.

Эффективность виброизоляции гидропорой с присоединенной массой  $m_{ит}$ , создающей силу  $F_{ит} = m_{ит}(x - V)$  на относительных ускорениях, оценивают по её передаточной функции через коэффициент передачи [1,2,3]:

$$T(j\omega) = k(j\omega) = \frac{F_{\text{ит}}(j\omega)}{F_m(j\omega)} = \frac{F_2(j\omega)}{F_1(j\omega)} < 1. \quad (13)$$

### 3. Моделирование магнитоуправляемых гидропор

При моделировании динамических характеристик гидропора с МРТ представляется как заграждающий фильтр в виде механической цепи на основе последовательного контура (рис. 4).

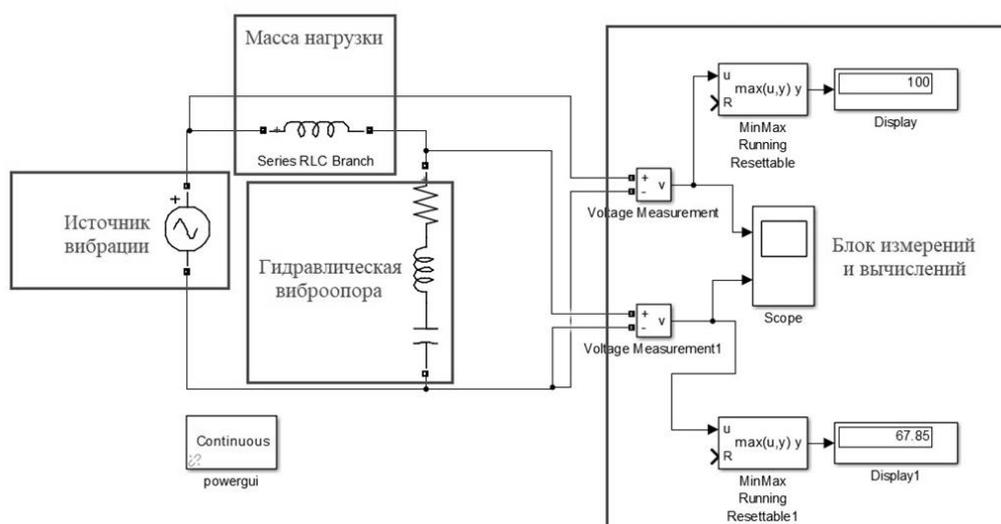


Рис. 4. Модель гидропоры с МРТ как заграждающий фильтр в виде механической цепи по методу электромеханической аналогии

При моделировании учитывались изменения динамической жесткости и коэффициента демпфирования гидропоры ОГ-95 в зависимости от частоты (рис. 5), табл. 1 и табл. 2 [2].

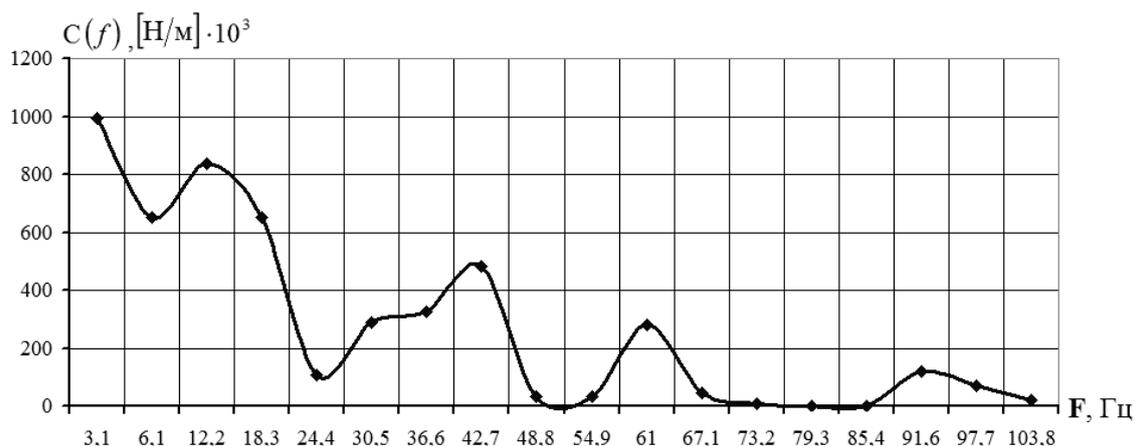


Рис. 5. Зависимость динамической жесткости одной гидропоры ОГМ-95 до 100 Гц при массе нагрузочной плиты в 108 кг и входном СКО  $50 \text{ м/с}^2$

Построение амплитудно-частотной характеристики (АЧХ) выполнено при массе нагрузки в 27 кг для двух режимов работы гидропоры:

- без учёта силового действия внешнего магнитного поля при напряжённости магнитного поля  $H = 0$  кА/м;
- с учётом силового действия внешнего магнитного поля при напряжённости магнитного поля  $H = 252$  кА/м.

Таблица 1

## Значения динамической жесткости одной гидроопоры

Частота, Гц	3,1	6,1	12,2	18,3	24,4	30,5	36,6	42,7	48,8
$C(f)$ , кН/м	993,86	649,99	836,3	651,95	105,61	290,19	324,11	483,66	33,623
Частота, Гц	54,9	61,0	67,1	73,2	79,3	85,4	91,6	97,7	103,8
$C(f)$ , кН/м	32,042	281,88	44,336	6,399	0,251	1,399	119,41	70,976	20,759

Таблица 2

Обобщённые гидравлические коэффициенты трения в дроссельных каналах длиной  $l = 15$  мм в зоне полюсов внешних электромагнитов ОМГ – 95 для частот возбуждения при  $H = 252$  кА/м и температурах 20°C, 30°C, 40°C, 60°C

Температура MRF-132DG		20°C	30°C	40°C	60°C	ОМГ – 95	
$i$	$f_i$ , Гц	$\omega_i$ , рад/с	$b_{zi}^{(252)}$ , кг/с	$b_{zi}^{(252)}$ , кг/с	$b_{zi}^{(252)}$ , кг/с	$C(f)$ , Н/м (50 м/с <sup>2</sup> )	
1	3,1	19,477858	650,422	648,77	647,3123	644,2018	993863,3913
2	6,1	38,327398	740,585	737,483	734,4659	728,3453	649992,5722
3	12,2	76,654796	863,769	857,6323	851,5307	839,2896	836339,0859
4	18,3	114,98219	959,2241	950,1153	940,8665	922,5052	651947,3041
5	24,4	153,30959	1042,489	1030,265	1018,012	993,53	105604,1521
6	30,5	191,63699	1118,756	1103,414	1088,161	1057,558	290198,0526
7	36,6	229,96439	1190,441	1172,231	1153,726	1117,003	324105,5693
8	42,7	268,29179	1258,873	1237,38	1216,039	1173,195	483661,751
9	48,8	306,61918	1324,868	1300,53	1275,914	1226,95	33623,89291
10	54,9	344,94658	1388,962	1361,347	1333,889	1278,805	32041,51141
11	61	383,27398	1451,53	1420,83	1390,34	1329,133	281876,9047
12	67,1	421,60138	1512,845	1479,31	1445,532	1378,209	44335,6412
13	73,2	459,92878	1573,108	1536,461	1499,678	1426,232	6399,602417
14	79,3	498,25617	1632,478	1592,611	1552,929	1473,362	250,5318779
15	85,4	536,58357	1691,077	1648,094	1605,409	1519,721	1399,081435
16	91,6	575,53929	1749,949	1703,967	1658,061	1566,153	119403,0702
17	97,7	613,86669	1807,276	1758,117	1709,269	1611,24	70976,24084
18	103,8	652,19408	1864,08	1811,933	1759,954	1655,805	20758,59681

Для настройки на рабочую частоту МР-гидроопоры необходимо создать инерционность по относительному перемещению. Относительное перемещение обеспечивается отношением квадратов радиусов (площадей) поршневого действия обечайки  $R_{об}$  и эквивалентного дроссельного канала  $R_{к.к.}$ . Считаем, что МРЖ в дроссельном канале  $m_{мж}$  работает как стержень из твердого тела без деформаций. Однако в МРЖ возникают внутренние процессы, требующие учета.

Присоединенную массу МРЖ в МРТ  $m_{\text{МРТ}}$ , превосходящую реальную массу МРЖ в дроссельных каналах гидроопоры без действия внешнего магнитного поля можно вычислить из эмпирического выражения [1-3]:

$$m_{\text{МРТ}}^{(H=0,t)} = m_{\text{ИТ}} = \frac{\pi R_{\text{Об}}^2}{\pi R_{\text{К.К}}^2} m_{\text{МЖ}}^{(H=0,t)}, m_{\text{МЖ}}^{(H=0,t)} = \rho_{\text{МЖ}}^{(H=0,t)} \pi \ell R_{\text{К.К}}^2, \quad (14)$$

где  $m_{\text{МРТ}} = m_{\text{ИТ}}$  – присоединенная масса, равная массе  $m_{\text{ИТ}}$  без действия внешнего магнитного поля;  $m_{\text{МЖ}}$  – масса рабочей МРЖ;  $\ell$  – длина эквивалентного дроссельного канала, м;  $\rho$  – плотность МРЖ, кг/м<sup>3</sup>.

Масса рабочей МРЖ MRF-132DG в эквивалентном дроссельном канале длиной  $\ell = 15$  мм в зоне полюсов ВЭ МР-гидроопоры ОМГ – 95 без действия внешнего магнитного поля при температуре 20°C и  $\rho = 2950$  кг/м<sup>3</sup>:

$$m_{\text{МЖ}}^{(H=0,t)} = \rho_{\text{МЖ}}^{(H=0,t)} \pi \ell R_{\text{К.К}}^2 = 1,09066 \cdot 10^{-3} \text{ кг}. \quad (15)$$

Присоединенная масса МРТ с учётом относительного температурного коэффициента вязкости МРЖ без действия магнитного поля определяется через отношение динамических вязкостей как:

$$m_{\text{МРТ}}^{(H=0,t)} = k_{i,j}^{(t)} \frac{\pi R_{\text{Об}}^2}{\pi R_{\text{К.К}}^2} m_{\text{МЖ}}^{(H=0,t)} = \frac{\eta_{i,j}^{(t)}}{\eta_{1,1}^{(20^\circ\text{C})}} \frac{\pi R_{\text{Об}}^2}{\pi R_{\text{К.К}}^2} m_{\text{МЖ}}^{(H=0,t)}, \quad (16)$$

где  $\eta_{i,j}^{(t)}$  – динамическая вязкость  $j$ -ой температуры МРЖ.

При действии внешнего магнитного поля на МРЖ в эквивалентном дроссельном канале нахождение аналитического и экспериментального выражений для вычисления присоединённой массы МРЖ в МРТ упрощается, так как учитывается силовое действие на МРЖ в дроссельном канале внешнего магнитного поля.

Механическая сила, действующая на поток МРЖ в дроссельных каналах МРТ при действии внешнего магнитного поля, может быть представлена через присоединенную массу  $m_{\text{пр}}$ , добавляемую к внешней инерционной массе нагрузки:

$$m_{\text{пр}} g = H m_{\text{МРТ}}, \quad (17)$$

где  $g$  – ускорение свободного падения.

Тогда добавляемая к внешней инерционной массе нагрузки при относительном движении присоединенная масса МРЖ  $m_{\text{пр}}$  определяется как:

$$m_{\text{пр}} g = H m_{\text{МРТ}} / g. \quad (18)$$

Присоединенную массу МРЖ в МРТ  $m_{\text{МРТ}}$ , превосходящую реальную массу МРЖ в дроссельных каналах при действии внешнего магнитного поля, можно вычислить из выражения [1-3]:

$$m_{\text{пр}}^{(H,20^\circ)} = \rho_{\text{МЖ}}^{(H=0,t)} \pi \ell R_{\text{К.К}}^2 H / g. \quad (19)$$

В выражении (17) присоединённая масса МРЖ в МРТ пропорциональна площади эквивалентного дроссельного канала и напряженности внешнего магнитного поля.

Определить присоединенную массу рабочей МРЖ в эквивалентном дроссельном канале перегородки гидроопоры при действии магнитного поля и температуры можно по:

$$m_{\text{мрт},j}^{(H=0,t)} = \frac{\eta_{i,j}^{(t)}}{\eta_{1,1}^{(20^\circ\text{C})}} \rho_{\text{мж}}^{(H=0,t)} \pi \ell R_{\text{к.к}}^2 H / g, \quad (20)$$

где  $\eta_{i,j}^{(t)}$  – динамическая вязкость при  $j$ -й температуре МРЖ, определяемой с учётом реперной точки, которую условно примем при температуре в  $20^\circ\text{C}$  и напряжённости магнитного поля  $H = 0$  кА/м.

В табл. 3 представлены вычисленные по выражениям (16) и (20) значения присоединённых масс МРЖ  $m_{\text{мрт}}$  и общих масс  $m + m_{\text{мрт}}$  МРТ при напряжённостях магнитных полей  $H = 0$  кА/м и  $H = 252$  кА/м для температур МРЖ в  $20^\circ\text{C}$ ,  $40^\circ\text{C}$  и  $60^\circ\text{C}$ .

Частота настройки гидропоры с МРТ без действия внешнего магнитного поля при напряжённости  $H = 0$  кА/м определяется по:

$$f_{\text{нас}}^{H=0} = (1/2\pi) \sqrt{C_{\text{об}} / (m + m_{\text{ит}})}, \quad (21)$$

где  $C_{\text{об}} = C_{01}(f_{01}) = 740 \cdot 10^3$  Н/м – заданная статическая жёсткость резиновой обечайки – минимальная динамическая жесткость на основной резонансной частоте при входном СКО в  $50$  м/с<sup>2</sup> и массе нагрузки в  $27$  кг, приходящейся на гидропору при максимальных перемещениях в  $\pm 4$  мм.

Таблица 3

**Значения присоединённых и общих масс МРТ при напряжённостях магнитных полей  $H = 0$  кА/м и  $H = 252$  кА/м для температур рабочей МРЖ в  $20^\circ\text{C}$ ,  $40^\circ\text{C}$  и  $60^\circ\text{C}$**

При напряжённости $H = 0$ кА/м		При напряжённости $H = 252$ кА/м	
Присоединённые массы МРТ, кг	Общие массы МРТ, кг	Присоединённые массы МРТ, кг	Общие массы МРТ, кг
$m_{\text{ит}}(20^\circ\text{C}) = 0,3901$	$m + m_{\text{ит}}(20^\circ\text{C}) = 27,3901$	$m_{\text{мрт}}(20^\circ\text{C}) = 54,448$	$m + m_{\text{мрт}}(20^\circ\text{C}) = 81,448$
$m_{\text{ит}}(40^\circ\text{C}) = 0,3396$	$m + m_{\text{ит}}(40^\circ\text{C}) = 27,3396$	$m_{\text{мрт}}(40^\circ\text{C}) = 47,3909$	$m + m_{\text{мрт}}(40^\circ\text{C}) = 78,3909$
$m_{\text{ит}}(60^\circ\text{C}) = 0,2890$	$m + m_{\text{ит}}(60^\circ\text{C}) = 27,2890$	$m_{\text{мрт}}(60^\circ\text{C}) = 40,3322$	$m + m_{\text{мрт}}(60^\circ\text{C}) = 67,3322$

Частота настройки гидропоры с МРТ при действии внешнего магнитного поля при напряжённости  $H = 252$  кА/м определяется по:

$$f_{\text{нас}}^{H=252} = (1/2\pi) \sqrt{C_{\text{об}} / (m + m_{\text{ит}})}, \quad (22)$$

Значения частот настроек гидропоры с МРТ при напряжённостях внешних магнитных полей  $H = 0$  кА/м и  $H = 252$  кА/м и температурах рабочей МРЖ в  $20^\circ\text{C}$ ,  $40^\circ\text{C}$ ,  $60^\circ\text{C}$  приведены в табл. 4.

АЧХ гидропоры ОГМ-95 при входном СКО  $50$  м/с<sup>2</sup> и напряжённости  $H = 252$  кА/м при температуре рабочей МРЖ  $20^\circ\text{C}$  приведена на рис. 6.

Передаточная функция гидропоры имеет вид:

$$H_i(s) = \frac{m_{\text{мрт}(20)} s^2 + b_{i(20)} s + c_i}{(m + m_{\text{мрт}(20)}) s^2 + b_{i(20)} s + c_i}. \quad (23)$$

Таблица 4

Значения частот настроек гидропоры при напряжённостях магнитных полей  $H = 0$  кА/м и  $H = 252$  кА/м и температурах 20°C, 40°C, 60°C

При напряжённости $H = 0$ кА/м			При напряжённости $H = 252$ кА/м		
Общие массы		Частоты настройки	Общие массы		Частоты настройки
$m + m_{ит}$ (20°C)	27,3901 кг	26,173 Гц	$m + m_{мрт}$ (20°C)	81,448 кг	15,178 Гц
$m + m_{ит}$ (40°C)	27,3396 кг	26,197 Гц	$m + m_{мрт}$ (40°C)	78,3909 кг	15,471 Гц
$m + m_{ит}$ (60°C)	27,2890 кг	26,222 Гц	$m + m_{мрт}$ (60°C)	67,3322 кг	16,693 Гц

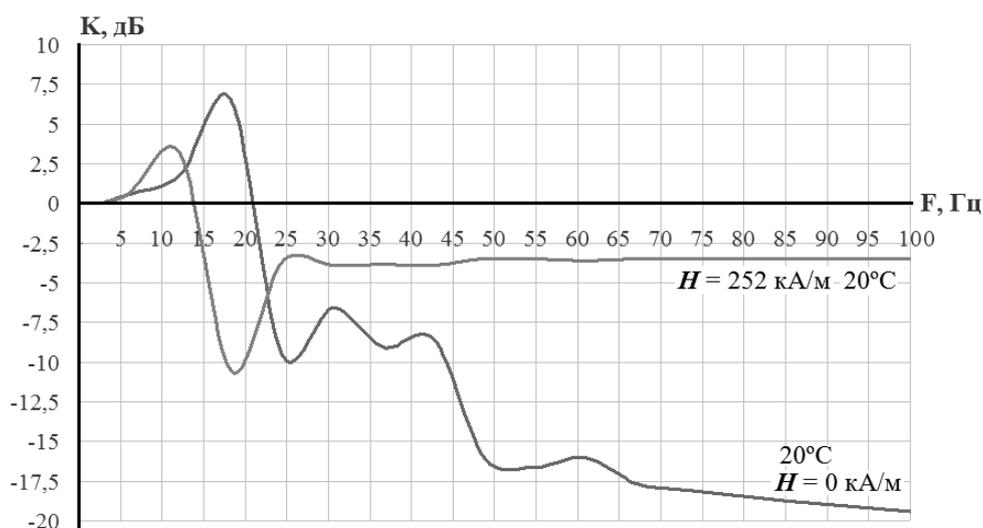


Рис. 6. Амплитудно-частотная характеристика гидропоры ОГМ – 95 при температуре МРЖ 20°C и  $H = 252$  кА/м

Из АЧХ (рис. 6) следует, что входной вибросигнал (белый шум) при напряжённости магнитного поля  $H = 0$  кА/м и  $H = 252$  кА/м при температуре 20°C демпфируется на -10 дБ и -10,5 дБ соответственно.

Причём, при 20°C и напряжённости  $H = 252$  кА/м наблюдается уход резонансной частоты  $f_{нас}^{H=0} = 26,173$  Гц на частоту  $f_{нас}^{H=252} = 15,178$  Гц. Кроме того, при  $H = 252$  кА/м на АЧХ гидропоры наблюдается горизонтальный участок на уровне -3 дБ от 25 Гц до 100 Гц, который объясняется только наличием большой инерционности присоединённой массы МРТ в 81,448 кг, возникающей в дроссельных каналах при действии внешнего магнитного поля. При этом возникает наибольшее жидкостное демпфирование в МРТ, так как магнитореологический эффект МРЖ наибольший.

АЧХ гидропоры ОГМ-95 при входном СКО 50 м/с<sup>2</sup> и напряжённости  $H = 252$  кА/м при температуре МРЖ 40°C приведена на рис. 7.

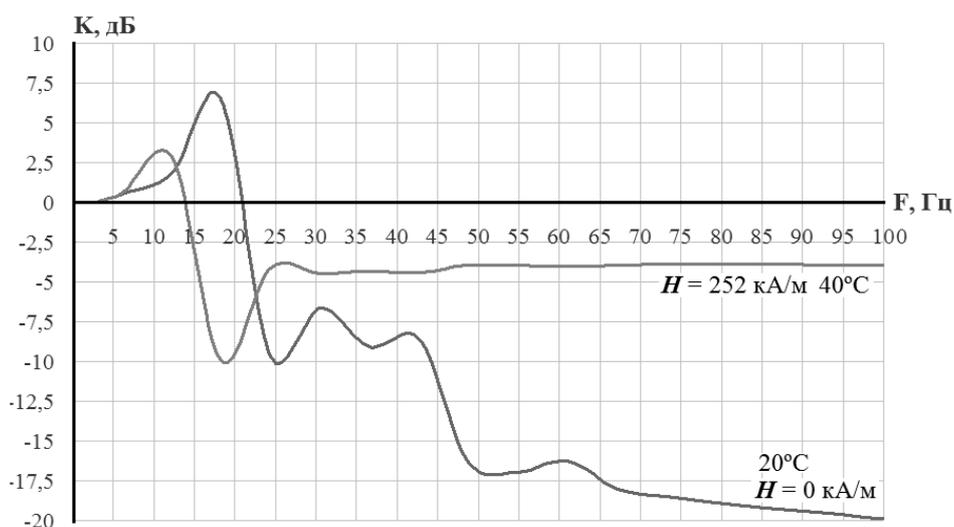
Передачная функция гидропоры имеет вид:

$$H_i(s) = \frac{m_{мрт(40)}s^2 + b_{i(40)}s + c_i}{(m + m_{мрт(40)})s^2 + b_{i(40)}s + c_i} \tag{24}$$

Из АЧХ (рис. 7) следует, что входной вибросигнал (белый шум) при напряжённости магнитного поля в  $H = 0$  кА/м и  $H = 252$  кА/м при температуре  $40^\circ\text{C}$  демпфируется на  $-10$  дБ.

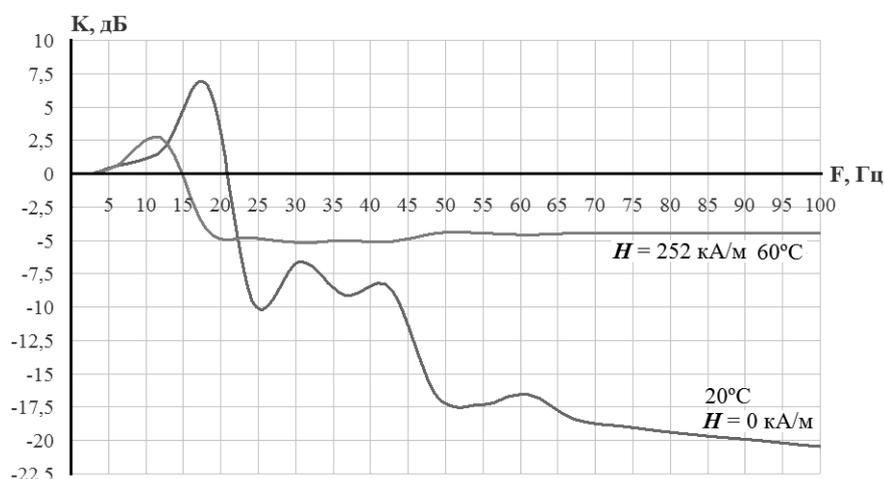
Причём, при  $40^\circ\text{C}$  и напряжённости в  $H = 252$  кА/м наблюдается уход резонансной частоты  $f_{\text{нас}}^{H=0} = 26,173$  Гц на частоту  $f_{\text{нас}}^{H=252} = 15,471$  Гц. Кроме того, при  $H = 252$  кА/м на АЧХ гидропоры наблюдается горизонтальный участок на уровне  $-2,7$  дБ от  $25$  Гц до  $100$  Гц, который объясняется наличием большой инерционности присоединённой массы МРТ в  $78,3909$  кг, возникающей в дроссельных каналах при действии внешнего магнитного поля.

При этом жидкостное демпфирование в МРТ немного ослабевает, так как магнитореологический эффект МРЖ уменьшается, но ещё сохраняет свои свойства.



**Рис. 7.** Амплитудно-частотная характеристика гидропоры ОМГ – 95 при температуре МРЖ  $40^\circ\text{C}$  и  $H = 252$  кА/м

АЧХ гидропоры ОМГ-95 при входном СКО  $50$  м/с<sup>2</sup> и напряжённости  $H = 252$  кА/м при температуре МРЖ  $60^\circ\text{C}$  приведена на рис. 8.



**Рис. 8.** Амплитудно-частотная характеристика гидропоры ОМГ – 95 при температуре МРЖ  $60^\circ\text{C}$  и  $H = 252$  кА/м

Передаточная функция гидропоры имеет вид:

$$H_i(s) = \frac{m_{\text{МРТ}(60)}s^2 + b_{i(60)}s + c_i}{(m + m_{\text{МРТ}(60)})s^2 + b_{i(60)}s + c_i}. \quad (25)$$

Из АЧХ (рис. 8) следует, что входной вибросигнал (белый шум) при напряжённости магнитного поля в  $H = 0$  кА/м и температуре 20°C демпфируется на -10 дБ, а при  $H = 252$  кА/м и температуре в 60°C демпфирование снижается до -5 дБ. Причём, при 60°C и напряжённости в  $H = 252$  кА/м наблюдается уход резонансной частоты  $f_{\text{нас}}^{H=0} = 26,173$  Гц на частоту  $f_{\text{нас}}^{H=252} = 16,693$  Гц. Кроме того при  $H = 252$  кА/м на АЧХ гидропоры наблюдается горизонтальный участок на уровне -2,5 дБ от 20 Гц до 100 Гц, который объясняется только наличием большой инерционности присоединённой массы МРТ в 67,3322 кг, возникающей при действии внешнего магнитного поля. При этом жидкостное демпфирование в МРТ падает до уровня -5 дБ, так как магнито-реологический эффект МРЖ пропадает.

Диаграмма АЧХ гидропоры ОГМ-95 при входном СКО 50 м/с<sup>2</sup> и напряжённости  $H = 252$  кА/м при температурах 20°C, 40°C, 60°C приведена на рис. 9.

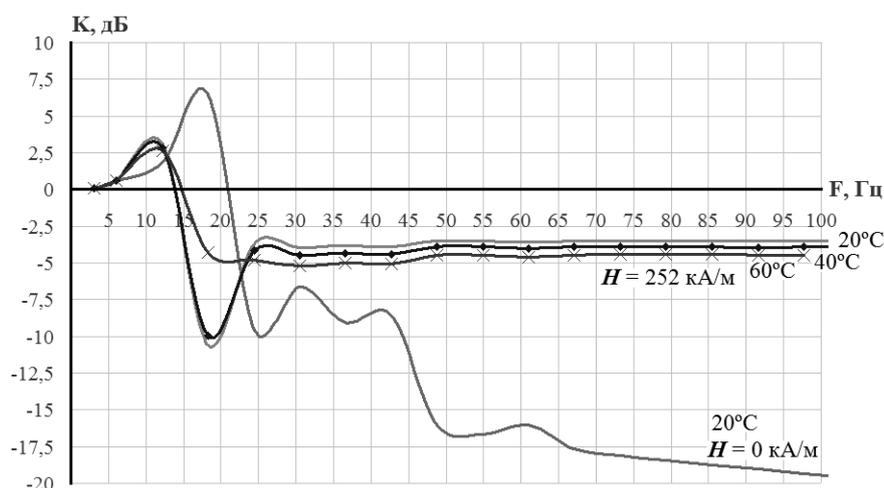


Рис. 9. Амплитудно-частотные характеристики гидропоры ОГМ – 95 при температурах МРЖ 20°C, 40°C, 60°C и  $H = 252$  кА/м

### Заключение

В статье гидропор с МРТ представляется электромеханическим эквивалентом - заграждающим фильтром на основе последовательного электрического контура. Приведены результаты моделирования АЧХ гидропоры при температурах рабочей МРЖ 20°C, 40°C, 60°C и напряжённости магнитного поля  $H = 252$  кА/м по заданным параметрам динамической жесткости гидропоры при массе нагрузки в 27 кг и входном СКО 50 м/с<sup>2</sup> и обобщёнными гидравлическими коэффициентами трения в дроссельных каналах.

Рассчитаны присоединённые массы в дроссельных каналах и резонансные частоты настройки гидропоры без действия и с действием внешнего магнитного поля. Проведена оценка демпфирования гидропоры при различных температурах рабочей МРЖ. Выяснено, что при температуре в 60°C жидкостное

демпфирование в МРТ падает до уровня -5 дБ, так как магнитореологический эффект МРЖ пропадает.

Работа выполнена за счет средств Российского научного фонда (проект №15-19-10026).

#### Библиографический список

1. **Гордеев, Б.А.** Системы виброзащиты с использованием инерционности и диссипации реологических сред / Б.А. Гордеев [и др.] - М.: Физматлит, 2004. - 175 с.
2. **Охулков, С.Н.** Методы и устройства ослабления вибрации электромеханических комплексов: монография / С.Н. Охулков [и др.]. – Н. Новгород: НГТУ им. Р.Е. Алексеева, 2016. – 254 с.
3. **Гордеев, Б.А.** Математические модели адаптивных виброизоляторов мобильных и стационарных объектов: монография / Б.А. Гордеев, В.И. Ерофеев, А.С. Плехов. – Н. Новгород: НГТУ им. Р.Е. Алексеева, 2017. – 124 с.
4. **Атабеков, Г.И.** Теоретические основы электротехники. Ч.1 / Г.И. Атабеков. М.-Л.: Энергия. 1966. – 320 с.
5. **Гордеев, Б.А.** Этапы построения математических моделей магнитоуправляемых гидроопор методом электромеханических аналогий / Б.А. Гордеев [и др.] // Сборник научно-технических статей конференции «Актуальные проблемы электроэнергетики». - 2018. - С. 119 - 128.
6. **Чикуров, Н.Г.** Синтез математических моделей технических систем методом электроаналогий / Н.Г. Чикуров // Вестник УГАТУ. – 2009. - Т.12. - № 2. - С. 156 -165.
7. **Бутенин, Н.В.** Курс теоретической механики / Н.В. Бутенин, Я.Л. Лунц. Д.Р. Меркин. – СПб: Лань, 2007. – 736 с.
8. **Бать, М.И.** Теоретическая механика в примерах и задачах. Т.2. Динамика / М.И. Бать, Г.Ю. Джанелидзе. А.С. Келвзон. - М.: Наука, 1972. - 624 с.
9. **Тарасик, В.П.** Математическое моделирование технических систем / В.П. Тарасик. - Минск: ДизайнПРО, 1997. - 640 с.
10. **Зарубин, В.С.** Математическое моделирование в технике / В.С. Зарубин, А.П. Крищенко. - М.: Изд. МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2003. - 496 с.
11. **Дружинский, И.А.** Механические цепи / И.А. Дружинский. – Л.: Машиностроение, 1977. - 240 с.
12. **Айбиндер, Р.М.** Демпфирование вибрации на резонансных частотах электротехнических комплексов и систем/ Р.М. Айбиндер [и др.] // Вестник машиностроения. – 2017. - № 1. - С. 7–14.
13. **Гордеев, Б.А.** Физическая модель магнитореологического трансформатора / Б.А. Гордеев, А.С. Плехов, Д.Ю. Титов // Труды III международной научно-технической конференции Пром-Инжиниринг. - 2017. - С. 201 - 205.
14. **Гордеев, Б.А.** Физические основы и конструкция индукционного магнитореологического трансформатора гидроопор / Б.А. Гордеев [и др.] // Прикладная механика и технология машиностроения. - 2011. - №2. – С. 52 - 68.
15. **Хьюлсман, Л.П.** Введение в теорию и расчет активных фильтров / Л.П. Хьюлсман, Ф.Е. Аллен. – М.: Радио и Связь, 1984. – 384 с.
16. **Зааль, Р.** Справочник по расчету фильтров / Р. Зааль. - М.: Радио и связь, 1983. - 752 с.

УДК 621.752.3

Б.А. Гордеев<sup>1,2</sup>, С.Н. Охулков<sup>1,2</sup>, А.Н. Осмехин<sup>1</sup>, Д.Ю. Титов<sup>2</sup>

## ЗАВИСИМОСТЬ ПРИСОЕДИНЁННОЙ МАССЫ РАБОЧЕЙ ЖИДКОСТИ В ДРОССЕЛЬНЫХ КАНАЛАХ ГИДРАВЛИЧЕСКИХ ВИБРООПОР ОТ УПРАВЛЯЮЩЕГО МАГНИТНОГО ПОЛЯ

Институт проблем машиностроения Российской академии наук<sup>1</sup>,  
Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева<sup>2</sup>

В статье рассмотрен способ нахождения присоединённой массы рабочей магнито-реологической жидкости (МРЖ) в дроссельных каналах магнито-реологического трансформатора (МРТ) гидравлической виброопоры (гидроопоры) с учётом управляющего магнитного поля. Приведен расчет присоединённой массы МРЖ марки MRF-132DG, разработанной фирмой LORD (США), заполняющей гидроопору с МРТ и предназначенной для демпфирования ударных нагрузок. Гидроопора с МРТ имеет два управляемых индукционных щелевых дроссельных канала, в которых МРЖ возбуждается внешним магнитным полем. В данной статье присоединённая масса МРЖ рассматривалась без действия магнитного поля.

The article describes a method for finding the attached mass of a magnetorheological fluid (MRF) in the throttle channels of a magnetorheological transformer (MRT) of a hydraulic support (hydromount), taking into account the control magnetic field. The calculation of the added mass of MRF-132DG, developed by the company LORD (USA), filling the hydromount with MRT and intended for damping shock loads is given. MRT hydromount has two controlled induction slit throttle channels in which the MRF is excited by an external magnetic field. In this paper, the added mass of the MRF was considered without the action of a magnetic field.

**Ключевые слова:** гидроопора, магнито-реологическая жидкость, дроссельные каналы, магнито-реологический трансформатор, вязкость, демпфирование, ударные нагрузки.

**Key words:** hydromount, magnetorheological fluid, throttle channels, magnetorheological transformer, viscosity, damping, shock loads.

### Введение

Структура гидроопоры с магнито-реологическим трансформатором (МРТ) связана с преобразованием движения инерционного элемента – массы магнито-реологической жидкости (МРЖ) в дроссельных каналах МРТ [1,3,4,5]. В качестве рабочей жидкости гидроопоры выбрана МРЖ марки MRF-132DG [8].

Виброизоляция может быть осуществлена путём настройки гидроопор на частоты, соответствующие минимальным значениям динамической жёсткости гидроопоры. Этого можно достичь в гидроопорах посредством изменения жидкостного демпфирования за счет сил инерции колеблющейся жидкости в её рабочих камерах и скорости протекания рабочей жидкости в дроссельных каналах [1,2].

В гидроопорах с МРТ, предназначенных для демпфирования ударных нагрузок в управляемых дроссельных каналах, МРЖ подвергается действию магнитного поля возбуждающих электромагнитов (ВЭ). При дросселировании

МРЖ из рабочей камеры гидропоры в её компенсационную камеру по дроссельным каналам МРТ возникает вязкое трение слоев МРЖ. При этом выделяется тепловая энергия и совершается работа [7].

### 1. МРТ гидропоры для демпфирования ударных нагрузок

На рис. 1 представлена схема двухканального МРТ управляемой гидропоры для демпфирования ударных нагрузок с двумя дроссельными каналами и одним ВЭ.

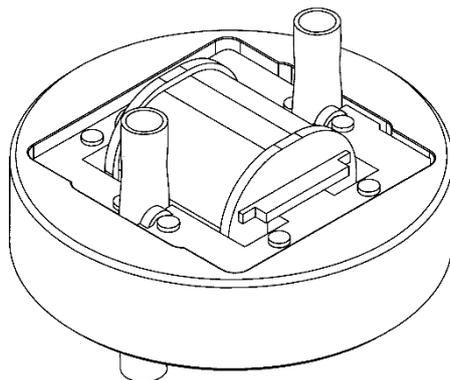


Рис. 1. Схема МРТ управляемой магнитным полем гидропоры для демпфирования ударных нагрузок с двумя дроссельными каналами и ВЭ

Присоединённая масса МРЖ в дроссельных каналах МРТ зависит от изменения управляющего магнитного поля, поэтому при расчёте демпфирующих характеристик гидропор с МРТ необходимо учитывать действие управляющего магнитного поля.

Установлено, что приведенная масса МРЖ в дроссельных каналах без учёта действия управляющего магнитного поля может на два, три порядка превышать реальную массу рабочей МРЖ в дроссельных каналах [1,3-5]. Но кроме этого возникает актуальная задача исследования изменения присоединённой массы МРЖ при действии магнитного поля, что позволит оптимально конструировать дроссельные каналы в МРТ гидропоры.

### 2. Расчёт присоединённой массы МРЖ в дроссельных каналах МРТ с учётом действия управляющего магнитного поля

Термин “присоединённая масса рабочей МРЖ в дроссельных каналах МРТ гидропоры” есть упрощение термина “увеличение инерционности по относительному движению” [3, 4]. Без учёта действия управляющего магнитного поля настройка на рабочую частоту гидропоры осуществляется путём создания инерционности по относительному перемещению обечайки гидропоры. При этом относительное перемещение обечайки обеспечивается отношением квадратов радиусов поршневого действия обечайки  $R_{Об}$  и эквивалентного дроссельного канала  $R_{д.к}$  [3,4].

Присоединённую массу МРТ  $m_{\text{мрт}}$  за счёт присоединённой массы МРЖ, превосходящей реальную массу МРЖ, в дроссельных каналах гидропоры без действия внешнего магнитного поля можно вычислить из эмпирического выражения [4,6]:

$$m_{\text{мрт}}^{(H=0,t)} = m_{\text{ит}} = \frac{\pi \cdot R_{\text{об}}^2}{\pi \cdot R_{\text{д.к}}^2} \cdot m_{\text{мж}}^{(H=0,t)}, \quad m_{\text{мж}}^{(H=0,t)} = \rho_{\text{мж}}^{(H=0,t)} \cdot \ell \cdot \pi \cdot R_{\text{к.к}}^2, \quad (1)$$

где  $m_{\text{мрт}} = m_{\text{ит}}$  – присоединённая масса МРТ, равная присоединённой массе МРЖ в инерционном трансформаторе  $m_{\text{ит}}$  без действия внешнего магнитного поля;  $m_{\text{мж}}$  – масса МРЖ в дроссельном канале длиной –  $\ell$  [м];  $\rho_{\text{мж}} = 2950 \text{ кг/м}^3$  – плотность МРЖ.

Частота настройки гидропоры без действия магнитного поля равна [1]:

$$f_{\text{настр.}} = (1/2\pi) \sqrt{C_{\text{об}}/m_{\text{мрт}}} = (1/2\pi) \sqrt{C_{\text{об}}/m_{\text{ит}}}, \quad (2)$$

где  $C_{\text{об}}$  – статическая жёсткость резиновой обечайки гидропоры.

Расчёт присоединённой массы МРЖ проводим для одного дроссельного канала гидропоры. Площадь внутреннего сечения одного дроссельного канала выбираем постоянной, и она равна  $\pi R_{\text{д.к}}^2 = 2,801 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2$ .

Длина (высота) полюсов магнитопровода ВЭ МРТ  $\ell = 15 \text{ мм}$ , и поэтому длина средних прямоугольных участков дроссельного канала МРТ выбрана также равной,  $\ell = 15 \text{ мм}$ .

Реальная масса МРЖ MRF-132DG [8] на прямоугольном участке дроссельного канала длиной  $\ell = 15 \text{ мм}$  в зоне полюсов ВЭ без магнитного поля при температуре  $20^\circ\text{C}$  равна:

$$m_{\text{мж}}^{(H=0,20^\circ)} = \rho_{\text{мж}}^{(H=0,20^\circ)} \cdot \ell \cdot \pi \cdot R_{\text{д.к}}^2 = 1,0906 \cdot 10^{-3} \text{ кг}. \quad (3)$$

При действии магнитного поля в дроссельном канале нахождение присоединённой массы МРЖ производится путем теоретических и экспериментальных исследований.

Для расчёта присоединённой массы МРЖ в дроссельном канале, входящей в выражение (1), необходимо внести поправку, учитывающую силовое действие внешнего магнитного поля. Такой поправкой является напряженность магнитного поля.

Вектор напряженности  $H$  совпадает с направлением вектора силы  $F$ :

$$\mathbf{H} = \mathbf{F}/m_0 \quad (4)$$

где  $F$  – механическая сила, действующая на единичную массу  $m_0$  пробного магнита.

Применяя данное понятие напряжённости магнитного поля через механическую силу, и заменяя в формуле (4) единичную массу  $m_0$  пробного магнита на массу МРЖ, получаем формулу для механической силы  $F$ , действующей на поток МРЖ в дроссельном канале:

$$\mathbf{F} = \mathbf{H}m_{\text{мрт}}. \quad (5)$$

Механическая сила, действующая на поток МРЖ, может быть представлена через приведённую массу  $m_{\text{пр}}$ , добавляемую к внешней инерционной массе нагрузки:

$$m_{\text{пр}} g = H m_{\text{МРТ}}, \quad (6)$$

где  $g$  – ускорение свободного падения.

Тогда добавляемая к внешней инерционной массе нагрузки при относительном движении присоединённая масса МРЖ  $m_{\text{пр}}$  определяется как:

$$m_{\text{пр}} = H m_{\text{МРЖ}} / g. \quad (7)$$

При числовой оценке демпфирующих свойств гидропор с МРТ при возрастании температуры их рабочих МРЖ необходимо также учитывать зависимость динамической вязкости от температуры нагрева. Для МРЖ корпорации LORD MRF-132DG значение вязкости при температуре в  $20^\circ\text{C}$  составляет  $0,93 \pm 0,020 \text{ Па}\cdot\text{с}$  [7]. В работе [7] предложена формула, связывающая изменение вязкости МРЖ от температуры

$$\eta_T = \eta_{20} \cdot \left[ 1 - C_T \cdot \left( \frac{T - 293,15}{293,15} \right) \right]. \quad (8)$$

где  $\eta_{20}$  – динамическая вязкость МРЖ при 293 К,  $C_T$  – температурный коэффициент (для MRF-132DG  $C_T = 1,9$ ),  $T^\circ\text{K}$  – температура МРЖ.

Выражение (3) для присоединённой массы МРЖ с учётом (7) можно записать в виде:

$$m_{\text{пр}}^{(H=0,20^\circ)} = \rho_{\text{МЖ}}^{(H=0,20^\circ)} \cdot \ell \cdot \pi \cdot R_{\text{к.к}}^2 \cdot \frac{H}{g}. \quad (9)$$

Выражение (9) показывает, что присоединённая масса МРЖ пропорциональна площади эквивалентного дроссельного канала и напряженности магнитного поля.

Определить присоединённую массу  $m_{\text{МРЖ}}$  рабочей МРЖ в дроссельном канале МРТ при действии магнитного поля и температуры можно по [3,4]:

$$m_{\text{МРТ}} = \frac{\eta_{i,j}^{(t)}}{\lambda_{1,1}^{(20^\circ)}} \cdot \ell \cdot \pi \cdot R_{\text{к.к}}^2 \cdot \frac{H}{g}, \quad (10)$$

где  $\rho_{\text{МЖ}} = \eta_{i,j}^{(t)} / \lambda_{i,j}^{(t)}$  – плотность рабочей МРЖ;  $\eta_{i,j}^{(t)}$  – динамическая вязкость  $j$ -й температуры МРЖ;  $\lambda_{1,1}^{(20^\circ)}$  – кинематическая вязкость при температуре  $20^\circ\text{C}$  и наименьшей напряжённости  $H = 9 \text{ кА/м}$  магнитного поля

В табл. 1 приведены значения вязкости рабочей МРЖ MR Fluid MRF-132DG от температуры и напряжённостей магнитного поля от  $9,0 \text{ кА/м}$  до  $252 \text{ кА/м}$ .

При расчёте присоединённой массы МРЖ при действии температуры и управляющего магнитного поля используем данные табл. 1.

При нагреве МРЖ в однофазном режиме её плотность постоянна:

$$\rho_{\text{МЖ}} = \eta_{i,j}^{(t)} / \lambda_{i,j}^{(t)} = \eta_{1,1}^{(20^\circ)} / \lambda_{1,1}^{(20^\circ)} = \eta_{2,3}^{(30^\circ)} / \lambda_{2,3}^{(30^\circ)} = \eta_{3,5}^{(40^\circ)} / \lambda_{3,5}^{(40^\circ)} = \dots = \eta_{i,9}^{(60^\circ)} / \lambda_{i,9}^{(60^\circ)}. \quad (11)$$

Динамическая вязкость МРЖ при  $j$ -й температуре определяется с учётом реперной точки, которую условно примем при температуре в  $20^\circ\text{C}$ :

$$\eta_{i,j}^{(t)} = \left( \lambda_{i,j}^{(t)} / \lambda_{1,1}^{(20^\circ)} \right) \cdot \eta_{1,1}^{(20^\circ)} = \rho_{\text{МЖ}} \lambda_{i,j}^{(t)}, \quad (12)$$

где  $\lambda_{i,j}^{(t)} / \lambda_{1,1}^{(20^\circ)}$  – относительный температурный коэффициент вязкости МРЖ.

Таблица 1

**Обобщённые гидравлические коэффициенты трения в дроссельных каналах длиной  $\ell = 15$  мм в зоне полюсов внешних электромагнитов ОМГ – 95 для частот возбуждения при  $H = 252$  кА/м и температурах 20°C, 30°C, 40°C, 60°C**

$H$ , кА/м	9	39	67	89	128	152	179	219	252
$\eta_T$ , мПа·с	$\eta_{H1}$	$\eta_{H2}$	$\eta_{H3}$	$\eta_{H4}$	$\eta_{H5}$	$\eta_{TH6}$	$\eta_{H7}$	$\eta_{H8}$	$\eta_{H9}$
$\eta_{T1}$ (20°)	530	710	830	880	920	950	990	1015	1030
$\eta_{T3}$ (30°)	682,7	757,5	794,9	822,9	860,4	888,4	925,8	949,2	963,2
$\eta_{T5}$ (40°)	635,4	705,1	739,9	765,9	800,7	826,9	861,7	883,4	896,5
$\eta_{T7}$ (50°)	588,1	652,5	684,7	708,9	741,1	765,3	797,5	817,6	829,7
$\eta_{T5}$ (40°)	635,4	705,1	739,9	765,9	800,7	826,9	861,7	883,4	896,5
$\eta_{T9}$ (60°)	540,8	600,1	629,64	651,86	681,49	703,71	733,34	751,89	762,97

Относительный температурный коэффициент вязкости МРЖ представлен в виде:

$$k_{i,j}^{(t)} = \lambda_{i,j}^{(t)} / \lambda_{1,1}^{(20^\circ)} = \eta_{i,j}^{(t)} / \eta_{1,1}^{(20^\circ)}, \quad k_{i,j}^{(t)} \neq k_{1,1}^{(20^\circ)}, \quad k_{1,1}^{(20^\circ)} = 1. \quad (13)$$

Тогда присоединённая масса МРЖ с учётом относительного температурного коэффициента вязкости МРЖ при действии внешнего магнитного поля и температуры определяется через отношение кинематических вязкостей:

$$m_{\text{мртг},j} = k_{i,j}^{(t)} \cdot \rho_{\text{МЖ}}^{(H=0,t)} \cdot \ell \cdot \pi \cdot R_{\text{к.к}}^2 \cdot \frac{H}{g} = \frac{\lambda_{i,j}^{(t)}}{\lambda_{1,1}^{(20^\circ)}} \cdot \rho_{\text{МЖ}}^{(H=0,t)} \ell \cdot \pi \cdot R_{\text{к.к}}^2 \cdot \frac{H}{g}, \quad (14)$$

или окончательно через отношение динамических вязкостей как:

$$m_{\text{мртг},j} = \frac{\eta_{i,j}^{(t)}}{\eta_{1,1}^{(20^\circ)}} \cdot \rho_{\text{МЖ}}^{(H=0,t)} \ell \cdot \pi \cdot R_{\text{к.к}}^2 \cdot \frac{H}{g}. \quad (15)$$

Присоединённая масса МРЖ MRF-132DG в дроссельном канале длиной  $\ell = 15$  мм в зоне полюсов ВЭ ОМГ – 95 при напряжённости магнитного поля в 252 кА/м, температуре 20°C и  $\rho_{\text{МЖ}} = 2950$  кг/м<sup>3</sup> равна:

$$m_{\text{мртг},9.1}^{(H=252,20^\circ)} = \frac{\eta_{9,3}^{(20^\circ)}}{\eta_{1,1}^{(20^\circ)}} \cdot \rho_{\text{МЖ}}^{(H=0,t)} \cdot \ell \cdot \pi \cdot R_{\text{к.к}}^2 \cdot \frac{H}{g} = 54,437 \text{ кг}. \quad (16)$$

Аналогично вычисляются по формуле (14) присоединённые массы МРТ в одиночном дроссельном канале с учётом действия магнитного поля для температур 300 С, 400 С и 600 С.

В табл. 2 сведены значения присоединённых масс МРЖ, возникающие в дроссельном канале с МРЖ MRF-132DG, которые добавляются к общей внешней нагрузке одной МР-гидропоры ОМГ – 95.

Таблица 2

Значения присоединённых масс  $m_{\text{МРТ}}$ , [кг] МРТ ОМГ – 95 с МРЖ MRF-132DG в дроссельном канале длиной  $\ell = 15$  мм в зоне полюсов ВЭ при напряжённостях магнитного поля и  $j$ -х температурах

H, кА/м	9	39	67	89	128	152	179	219	252
$m_{\text{МРТ},i}$ , [кг]	$\eta_{\text{H1}}$	$\eta_{\text{H2}}$	$\eta_{\text{H3}}$	$\eta_{\text{H4}}$	$\eta_{\text{H5}}$	$\eta_{\text{H6}}$	$\eta_{\text{H7}}$	$\eta_{\text{H8}}$	$\eta_{\text{H9}}$
$m_{\text{МРТ1}}(20^\circ)$	28,0169	37,5321	43,8756	46,5187	48,6332	50,219	52,3335	53,6551	54,448
$m_{\text{МРТ3}}(30^\circ)$	26,1985	35,0952	41,0316	43,5002	45,4826	46,9627	48,9398	50,1767	50,9168
$m_{\text{МРТ5}}(40^\circ)$	24,3853	32,6635	38,1876	40,4871	42,3267	43,7117	45,5513	46,6984	47,3909
$m_{\text{МРТ7}}(50^\circ)$	22,5668	30,2107	35,3436	37,474	39,1761	40,4554	42,1575	43,2201	43,8597
$m_{\text{МРТ9}}(60^\circ)$	20,7537	27,8002	32,4996	34,4587	36,025	37,1996	38,7659	39,7465	40,3322

### Выводы

Таким образом, при повышении напряжённости магнитного поля и неизменной температуре нагрева МРЖ в дроссельных каналах её присоединённая масса возрастает по линейному закону. В то же время с ростом температуры нагрева МРЖ наблюдается убывание её присоединённой массы также по линейному закону. Поэтому при проектировании гидроопор с МРТ данный эффект необходимо всегда учитывать. Учитывая эти зависимости, можно найти оптимальные конструкторские решения при проектировании дроссельных каналов МРТ.

Работа выполнена за счет средств Российского научного фонда (проект №15-19-10026).

### Библиографический список

1. Гордеев, Б.А. Системы виброзащиты с использованием инерционности и диссипации реологических сред. / Б.А. Гордеев [и др.] - М.: Физматлит, 2004. - 175 с.
2. Вибрации в технике. Т.3. Колебания машин, конструкций и их элементов / Под ред. Ф.М. Диментберга, К.С. Колесникова. - М.: Машиностроение, 1980. - 544 с.
3. Шохин, А.Е. Моделирование динамики гидроопоры с инерционным гидравлическим преобразователем при ударных воздействиях / А.Е. Шохин [и др.] // Машиностроение и инженерное образование. - 2013. - № 4 (37). - С. 63-69.
4. Брысин, А.Н. Совершенствование методики испытаний систем виброзащиты с инерционными преобразователями / А.Н. Брысин [и др.] // Проблемы машиностроения и автоматизации. - 2012. - № 4. - С. 80-83.
5. Мугин, О.О. Частотные свойства динамического гасителя с инерционным преобразователем / О.О. Мугин [и др.] // Проблемы машиностроения и надежности машин. - 2011. - № 4. - С. 37-40.

6. **Алексеев, П.С.** Схемно-технические решения и экспериментальные исследования виброизолятора с преобразованием движения инерционных элементов / П.С. Алексеев, А.В. Синев, О.О. Мугин // Проблемы машиностроения и надежности машин. - 2012. - № 1. - С. 96-101.
7. **Казаков, Ю.Б.** Взаимосвязанные физические процессы в электромеханическом магнито-жидкостном демпфере / Ю.Б. Казаков, Н.А. Морозов, С.А. Нестеров // 17 межд. Плесская научн. конф. по нанодисперсным магнитным жидкостям. Иваново: ИГЭУ, 2016. – С. 66 – 73.
8. **Беляев, Е.С.** Технологии создания и использование магнитореологических жидкостей для управляемых виброизоляторов / Е.С. Беляев [и др.] - Н. Новгород: Нижегород. гос. техн. у-т им. Р.Е. Алексеева, 2017. – 120 с.

УДК 621.752.3

Б.А. Гордеев<sup>1,2</sup>, С.Н. Охулков<sup>1,2</sup>, К.С. Степанов<sup>2</sup>, А.С. Плехов<sup>2</sup>**ПОСТРОЕНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ЭКВИВАЛЕНТА  
МАГНИТОУПРАВЛЯЕМОЙ ГИДРООПОРЫ МЕТОДОМ  
ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ АНАЛОГИЙ**Институт проблем машиностроения Российской академии наук<sup>1</sup>,  
Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева<sup>2</sup>

Повышение мощностей силовых энергетических установок электромеханических комплексов обуславливает необходимость совершенствования методов математического проектирования виброзащитных средств и внедрения новых технических решений при их разработке. В статье рассмотрены исходные положения, подходы и технология, сформулированные в виде этапов математического моделирования магнитоуправляемых гидроопор методом электроанalogий. Дан пример построения имитационной модели магнитоуправляемой гидроопоры как электромеханической системы на основе метода электроанalogий.

Increasing the capacity of the power energy installations of electromechanical complexes necessitates the improvement of the mathematical design methods of vibration protection means and the introduction of new technical solutions in their development. The article discusses the approaches and technology in the form of stages of mathematical modeling of magnetically controlled hydromount by the method of electrical analogies. An example is given of constructing a simulation model of a magnetically controlled hydromount as an electromechanical system based on the method of electrical analogue.

**Ключевые слова:** магнитореологический трансформатор, гидроопора, магнитореологическая жидкость, математическое моделирование, метод электроанalogий.

**Key words:** magnetorheological transformer, hydromount, magnetorheological fluid, mathematical modeling, electrical analogy method.

**Введение**

Магнитоуправляемые гидроопоры обладают не только механической, но и электрической (электромагнитной) энергией, сосредоточенной в элементах её механической цепи (инерционной массы нагрузки, резинометаллической обечайки, магнитогидравлическом трении рабочей жидкости), и в элементах электрической цепи магнитореологического трансформатора (МРТ) (индуктивности, конденсаторе и резисторе).

В [1] была изложена концепция расчета обычных гидроопор на основе аналогии электрических четырехполюсников. В данном случае работа обычной гидроопоры идентифицировалась с работой электрических узлов в радиоприемных устройствах: усилителей, аттенюаторов, фильтров. По своему назначению она относится к пассивным системам виброзащиты.

Магнитоуправляемые гидроопоры относятся к активным системам виброзащиты, и некоторые её элементы взаимодействуют между собой. Для

описания данного процесса взаимодействия элементов гидроопоры приходится составлять и решать систему уравнений, содержащую уравнения механики, гидравлики и теории электромагнитного поля. Решение системы уравнений получается громоздким. Поэтому для упрощения решения задач, связанных с разработкой и проектированием магнитоуправляемых гидроопор, наиболее подходит метод электромеханических аналогий, который позволяет свести анализ гидроопор к анализу эквивалентных электрических цепей и схем. Математический аппарат для анализа электрических цепей хорошо разработан и широко известен инженерам электрикам и радиоинженерам.

### 1. Механическая модель гидроопоры с МРТ без действия магнитного поля ВЭ с разделением поршневого действия и упругого элемента

Эквивалентная схема гидроопоры МРТ с разделением упругого и поршневого действия упругого элемента представлена на рис. 1, а [1,2,3].

Пусть в начале гидроопоры с МРТ установлена на основании без инерционной нагрузки (массы  $m$ ) и без действия магнитного поля возбуждающего электромагнита (ВЭ). Причём масса опорной платы  $m_{оп} < m$ .

Гидроопора содержит: резиновую обечайку и демпфер; дополнительный элемент – инерционный трансформатор (ИТ) с присоединённой (приведенной) массой  $m_{ит}$ , превосходящей реальную массу МРЖ в дроссельных каналах на относительных ускорениях (рис. 1, б) [1,3].

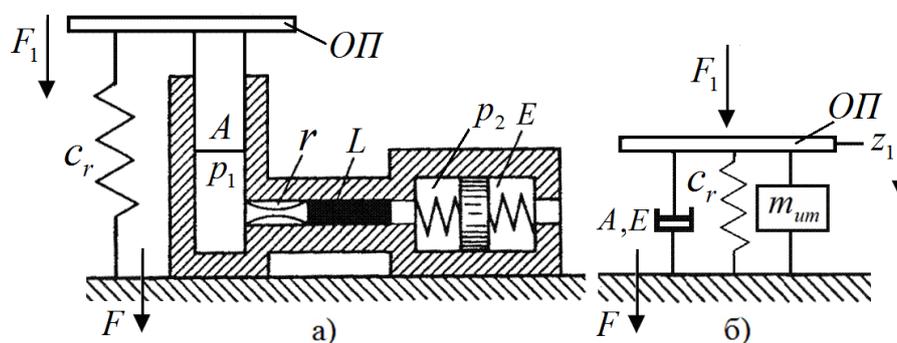


Рис. 1. Физическая модель гидроопоры (а) и обобщенная схема линейной системы виброизоляции с одной степенью свободы (б) без действия инерционной нагрузки (массы  $m$ ) и МРТ

На рис.1 показаны: ОП – опорная плата с массой  $m_{оп}$ ;  $c_r$  - жесткость упругого элемента (резиновой обечайки), Н/м;  $A$  – площадь поршневого действия,  $m_2$ ;  $L$  и  $r$  - инерционное и гидравлическое сопротивление дроссельных каналов, Нс/м;  $E$  - емкость дополнительной камеры;  $F_1$  - сила веса опорной платы, действующая на основание при наличии упругой связи (через гидроопору), Н;  $F$  - сила веса гидроопоры, действующая на основание, Н;  $m_{ит}$  – присоединённая масса ИТ.

Емкость дополнительной (компенсационной) камеры создается за счет наличия в ней упругих элементов (рис. 1, а). Запишем совместную систему механических и гидравлических уравнений [1,2]:

$$F_1 = c_r z_1 + p_1 A, Q = Az_1 s, LQs = p_1 - p_2, Q = Ep_2 s,$$

$$p_1 = \frac{F_1 - c_r z_1}{A}, p_2 s = \frac{Q}{E}, p_2 s = \frac{Az_1 s}{E}, p_2 = \frac{Az_1}{E}.$$

Выполним необходимые алгебраические преобразования над выражением  $LQs = p_1 - p_2$  и получим

$$LQs = p_1 - p_2 = LAz_1 s^2 = \frac{F_1 - c_r z_1}{A} - \frac{Az_1}{E} \cdot \frac{A}{z_1},$$

$$LA^2 s^2 = \frac{F_1}{z_1} - c_r - \frac{A^2}{E}, \quad \frac{F_1}{z_1} = LA^2 s^2 + c_r + \frac{A^2}{E},$$

$$D_{11}(s) = LA^2 s^2 + c_r + A^2/E, \quad (1)$$

где  $D_{11}(s)$  - главная динамическая жесткость гидропоры с ИТ без нагрузки (массы  $m$ ), при  $m_{\text{оп}} \ll m$ ;  $s$  - переменная преобразования Лапласа.

В (1)  $m_{\text{ит}} = LA^2$  - присоединённая масса,  $L = \rho l/A_T$ ,  $\rho$  - плотность жидкости, кг/м<sup>3</sup>;  $l$  - длина дроссельных каналов, м;  $A_T$  - площадь поперечного сечения трубки, м<sup>2</sup>;  $c_r$  - жесткость резиновой обечайки;  $c_M$  - эквивалентная жесткость, учитывающая взаимодействие мембраны и дополнительной камеры.

Из (1) следует, что система имеет одну частоту резонанса:

$$\omega_p = \sqrt{\frac{c_r + (A^2/E)}{LA^2}}. \quad (2)$$

Весом опорной платы пренебрегаем, то есть  $m_{\text{оп}} \ll m$ . Теперь рассмотрим гидропору с МРТ на основании с инерционной нагрузкой (массой  $m$ ) и без действия магнитного поля ВЭ (рис. 2, а).

На рис. 2 показаны:  $m$  - масса нагрузки, кг; ОП - опорная плата;  $c_r$  - жесткость упругого элемента Н/м;  $A$  - площадь поршневого действия, м<sup>2</sup>;  $L$  и  $r$  - инерционное и гидравлическое сопротивление дроссельных каналов, Нс/м;  $E$  - емкость дополнительной камеры;  $F_m$  - сила, действующая на основание при наличии упругой связи (через гидропору), Н;  $F$  - сила, действующая на основание, Н;  $m_{\text{ум}}$  - присоединённая масса ИТ.

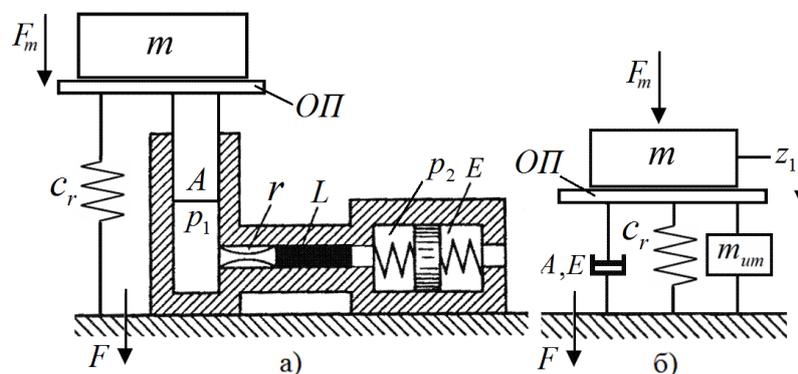


Рис. 2. Физическая модель гидропоры (а) и обобщенная схема линейной системы виброизоляции с одной степенью свободы (б) при действии инерционной нагрузки (массы  $m$ ) и без действия МРТ

Добавляя инерционную нагрузку на вход системы (массу  $m$ ), получаем

$$D_{11}(s) = (m + LA^2)s^2 + c_r + (A^2 / E), \quad (3)$$

$$D_{12}(s) = LA^2s^2 + c_r + (A^2 / E), \quad (4)$$

где  $D_{12}(s)$  - передаточная динамическая жесткость.

Тогда передаточная функция гидропоры через коэффициент передачи запишется в виде

$$T(s) = \frac{LA^2s^2 + c_r + (A^2 / E)}{(m + LA^2)s^2 + c_r + (A^2 / E)}. \quad (5)$$

Для такой системы получим две характерные частоты: частоту резонанса

$$\omega_p = \sqrt{\frac{c_r + (A^2 / E)}{(m + LA^2)}} \quad (6)$$

и частоту нуля  $\omega_0$ , совпадающую с (2).

Здесь резонансная частота гидропоры без нагрузки перешла в частоту нуля гидропоры с нагрузкой. Вместо массы  $m$  может быть более сложная динамическая нагрузка, но частота нуля передаточной функции не изменится.

Если задача рассматривается с учетом диссипативных характеристик, то динамическая жесткость ненагруженной гидропоры определена как [1,2]:

$$D(j\omega) = -\omega^2 m_{um} + j\omega b + c. \quad (7)$$

При установке на гидропору массы  $m \gg m_{оп}$  (рис. 2) суммарная динамическая жесткость при действии на  $m$  силы  $F_m$  будет равна:

$$-m\omega^2 + D(j\omega) = -(m + m_{um})\omega^2 + j\omega b + c. \quad (8)$$

В выражениях (7) и (8):  $b = rA^2$  - приведенное демпфирование или гидравлический коэффициент трения в дроссельных каналах гидропоры, Н·с/м;  $c$  - эквивалентная жесткость, учитывающая взаимодействие мембраны и дополнительной камеры и сжимаемость жидкости в рабочей камере;  $\omega$  - круговая частота;  $j$  - мнимая единица.

Эффективность виброизоляции гидропорой с присоединённой массой  $m_{ит}$ , создающей силу  $F_{ит}$  на относительных ускорениях, оценивают по её передаточной функции через коэффициент передачи [1,2,3]:

$$T(j\omega) = K(j\omega) = F_{um}(j\omega)/F_m(j\omega) = F_2(j\omega)/F_1(j\omega) < 1. \quad (9)$$

На рис. 3 показано: а) модель для силового возбуждения на неподвижном основании (1); б) модель для кинетического возбуждения на подвижном основании (2); в) модель без рабочей жидкости, где элементы упругости, массы и трения отделены друг от друга; масса  $m$  сосредоточена в центре тяжести (ЦТ).

Тогда, передаточная функция гидропоры по силе (рис. 3, а) будет равна

$$T(j\omega) = \frac{F_2(j\omega)}{F_1(j\omega)} \cdot \frac{z_1}{z_2} = \frac{-m_{um}\omega^2 + bj\omega + c}{-(m + m_{um})\omega^2 + bj\omega + c}. \quad (10)$$

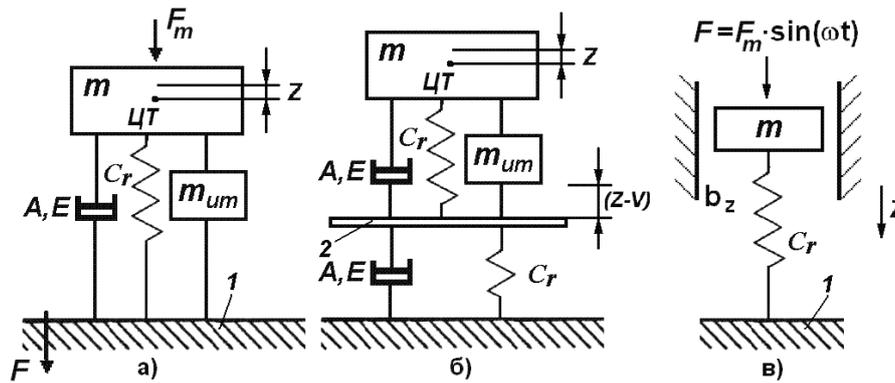


Рис. 3. Физические модели одномассовых систем виброизоляции с одной степенью свободы по координате  $Z$

Если  $V \neq 0$ , а сила  $F = 0$ , то передаточная функция гидропоры от кинетического воздействия (рис. 2, б) определяется из условия равенства сил

$$-m\omega^2 z = (-m_{um}\omega^2 + bj\omega + c) \cdot (z - V), \quad (11)$$

$$T(j\omega) = \frac{z}{V}(j\omega) = \frac{-m_{um}\omega^2 + bj\omega + c}{-(m + m_{um})\omega^2 + bj\omega + c}. \quad (12)$$

Передаточная функция по силе и кинематическая передаточная функция гидропоры оказываются одинаковыми, т.е. равными. Общий результат для этого равенства получен из анализа этих систем как четырехполюсников [1,2].

Анализируя формулу (12), можно сделать следующий вывод о путях повышения виброизоляции машин и агрегатов при помощи гидропор.

Виброизоляция может быть осуществлена путём настройки гидропор на частоты их внутренних динамических резонансов, совпадающих с резонансными вибрациями машин и агрегатов. Это достигается в гидропорах при изменении жидкостного демпфирования за счет сил инерции колеблющейся жидкости в её рабочих камерах и скорости её протекания в дроссельных каналах. В результате этого изменяется динамическая жесткость гидропоры относительно статической жесткости без потери последней, и тем самым осуществляется настройка её на резонансные вибрации машин и агрегатов условиях меняющейся нагрузки.

С точки зрения виброзащиты наибольший интерес в гидропорах представляют вибрации вблизи частот их внутренних динамических резонансов. В этом случае гидропоры необходимо рассматривать как системы виброизоляции с одной степенью свободы (рис. 3, а, б). Здесь гидропора рассматривается с рабочей жидкостью в составе системы виброизоляции в виде сосредоточенной массы  $m$ , покоящейся на резиновой обечайке – пружине, другой конец пружины жестко закреплен на основании (рис. 2, в). Система, кроме того, обладает вязким трением  $b_z$ , Н·с/м. В этой системе элементы упругости, массы и вязкого трения обечайки отделены друг от друга. При анализе считаем, что на систему воздействует возмущающая изменяющаяся гармоническая сила по синусоидальному закону [2,3].

Уравнение колебательного движения тела с массой  $m$  в этом случае имеет вид:

$$m z'' + b_z z' + c z = F_m \cdot \sin(\omega t), \quad (13)$$

где  $m$  - масса системы, кг;  $c$  - эквивалентная жесткость пружины (обечайки), численно равная силе, которую необходимо приложить к пружине, чтобы вызвать её единичную деформацию, Н·/м;  $Z$  - текущее значение колебательного смещения пружины, м;  $z' = dz/dt$  - текущее значение колебательной скорости, м/с;  $z'' = dv/dt$  - текущее значение колебательного ускорения м/с<sup>2</sup>;  $b_z$  - постоянная, которая называется коэффициентом вязкого трения (сопротивления), Нс/м;  $F_m$  - амплитуда возмущающей силы, Н;  $\omega$  - частота возмущающей силы, рад/с.

Решение этого уравнения даёт соотношение между амплитудами колебательной скорости  $V_m$  и возмущающей силы  $F_m$ :

$$V_m = \frac{F_m}{\sqrt{b_z^2 + (\omega m - c/\omega)^2}}. \quad (14)$$

Знаменатель этого выражения характеризует сопротивление, которое оказывает система возмущающей переменной силе, и называется полным механическим сопротивлением или импедансом колебательной системы.

Величина  $b_z$  составляет активную, а величина  $(c/\omega - c/\omega)$  - реактивную часть этого сопротивления. Реактивное сопротивление, в свою очередь, состоит из двух сопротивлений: упругого  $c/\omega$  и инерционного  $c/\omega$ . Единица механического сопротивления - Н·с/м.

Применительно к гидроопорам соотношение (14) между амплитудами колебательной скорости  $V_m$  и возмущающей силы  $F_m$  принимает вид:

$$V_m = \frac{F_m}{\sqrt{b_z^2 + b_z^2 (j\omega) + [(m + m_{ит})\omega - c/\omega]^2}}. \quad (15)$$

Из (15) видно, что с введением в гидравлическую систему гидропоры рабочей жидкости создаётся дополнительная присоединённая масса  $m_{ит}$  ИТ, изменяющая реактивное сопротивление и амплитуду колебательной скорости  $V_m$  и, тем самым достигается наилучшая виброизоляция. Здесь гидравлическая система гидропоры кроме коэффициента вязкого сопротивления  $b_z$  обладает и гидравлическим коэффициентом трения  $b_z(j\omega)$  рабочей жидкости, протекающей в дроссельных каналах.

Поэтому снижение вибрации при помощи гидропор достигается, как и их эластичной резиновой обечайкой, так и гидравлическим инерционным трансформатором с присоединённой массой  $m_{ит}$  ИТ [2,3].

## 2. Электрическая модель гидропоры с МРЖ без действия МРТ

Гидропора с МРЖ без действия МРТ представляет собой механическую пассивную систему, и для расчета её параметров можно воспользоваться методом электроаналогий для моделирования технических объектов, связывающим механические параметры системы с электрическими аналогами.

Сравним дифференциальные уравнения, составленные по второму закону Кирхгофа для последовательного  $R-L-C$  контура и механической колебательной системы гидропоры с МРЖ без действия МРТ [4-11].

Первое уравнение имеет вид:

$$L \frac{di(t)}{dt} + Ri(t) + \frac{1}{C} \int i(t) dt = e(t), \quad (16)$$

где  $L, R, C$  - электрические индуктивность, сопротивление и емкость последовательного колебательного контура;  $e(t)$  - ЭДС источника контура, причем ЭДС можно выразить через напряжение:  $e(t) = u(t)$ .

Уравнение для механической колебательной системы гидропоры с МРЖ без действия МРТ можно записать в виде:

$$(m + m_{um}) \frac{d^2 z(t)}{dt^2} + b'_z \frac{dz(t)}{dt} + c z(t) = F(t), \quad (17)$$

где  $m + m_{ит}$  - масса нагрузки и присоединённая масса ИТ,  $b'_z = b_z + b'_z(j\omega)$  - обобщённый гидравлический коэффициент трения или коэффициент демпфирования;  $c = 1/\lambda$  - эквивалентная жесткость гидропоры с ИТ;  $\lambda$  - податливость;  $z$  - смещение под действием силы  $F$ .

Учитывая, что производная по времени от перемещения есть скорость, можно переписать уравнение в виде:

$$(m + m_{um}) \frac{dv(t)}{dt} + cv(t) + \frac{1}{\lambda} \int v(t) dt = F(t). \quad (18)$$

Можно провести аналогии между электрическими и механическими характеристиками системы гидропоры с МРТ: напряжение  $u$  - сила  $F$ ; электрический ток  $i$  - скорость  $v$ ; общая индуктивность  $L + L_{ит}$  - общая масса  $m + m_{ит}$ ; электрическое сопротивление  $R$  - коэффициент демпфирования  $b'_z$ ; емкость  $C$  - податливость  $\lambda$ . Следовательно, индуктивное сопротивление электрической системы должно быть равно инерционному сопротивлению механической системы  $\omega(L + L_{ит}) = \omega(m + m_{ит}) = Z_{ин}$ , а емкостное должно быть равно упругому сопротивлению механической системы (резиновой обечайки)  $1/\omega C = 1/\omega \lambda = Z_{уп}$ . Электрический импеданс должен быть равен механическому:  $z_3 = u/i = F/v = z_м$  (рис. 4, а) [4-11].

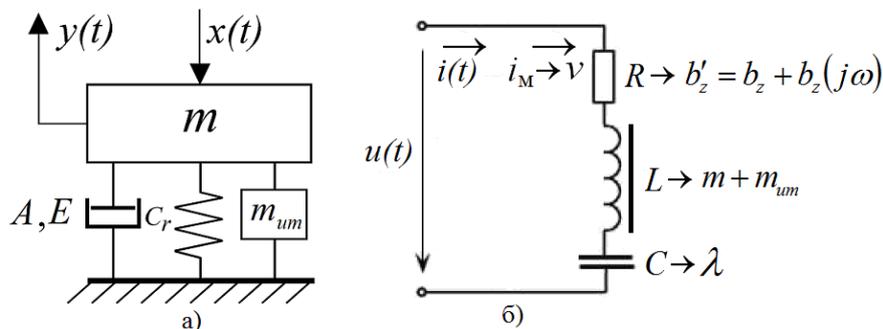


Рис. 4. Модель гидропоры при силовом возбуждении на неподвижном основании (а); электрическая схема гидропоры с МРЖ как двухполюсника во временной форме без действия МРТ (б)

С учетом того, что гидроопора с МРЖ без действия МРТ (рис. 4, а) с электрической точки зрения представляет собой последовательный  $R-L-C$  контур, то по методу электроанalogий гидроопора может быть смоделирована в виде электрической схемы двухполюсника (рис. 4, б).

Схема (рис. 4, б) представляет собой последовательный электрический колебательный контур для гидроопоры с МРЖ без действия МРТ, в котором может возникать резонанс напряжений (механический резонанс).

### 3. Нагруженная гидроопора с инерционным трансформатором как заграждающий фильтр - пробка

Нагруженная гидроопора с ИТ (рис. 5, а) может быть представлена и как четырёхполюсник: в виде механического заграждающего фильтра – пробки, основным элементом которого по методу электроанalogий является последовательный колебательный контур (рис. 5, б) [4-12].

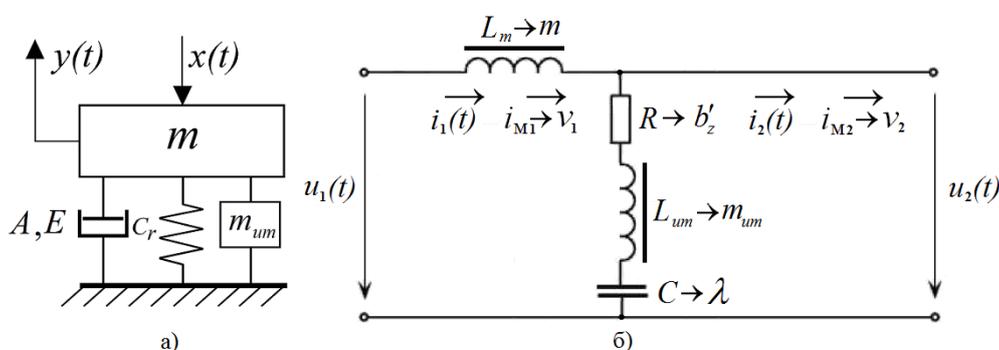


Рис. 5. Модель гидроопоры при силовом возбуждении на неподвижном основании (а); электрическая схема гидроопоры с МРЖ как заграждающий фильтр – пробка во временной форме без действия МРТ (б)

Представление гидроопоры с ИТ в виде механического заграждающего фильтра – пробки более подходит при анализе её динамических свойств, так как анализ данных свойств через передаточные функции, полученные на основе двухполюсника, предполагают, что заранее известны все входные характеристики системы виброизоляции объекта.

Поэтому нагруженная гидроопора с ИТ, представленная в виде электрического заграждающего фильтра на основе последовательного контура (рис. 5, б), имеет передаточную функцию [4-11]:

$$H(j\omega) = \frac{U_2(j\omega)}{U_1(j\omega)} = \frac{R + (j\omega L_{um} + 1/(j\omega C))}{R + [j\omega(L + L_{um}) + 1/(j\omega C)]}. \quad (19)$$

Такая передаточная функция определяется отношением сумм активных и реактивных сопротивлений ветвей электрической схемы замещения гидроопоры с ИТ.

В операторной форме записи данная передаточная функция нагруженной гидроопоры с ИТ представляется в виде [4-11]:

$$H(s) = \frac{U_2(s)}{U_1(s)} = \frac{R + (sL_{um} + 1/(sC))}{R + [s(L + L_{um}) + 1/(sC)]}, \quad (20)$$

где  $s$  - переменная преобразования Лапласа.

Передаточные функции (19) и (20) для электрического заграждающего фильтра аналогичны передаточным функциям нагруженной гидропоры с ИТ как механического четырёхполюсника.

Передаточная функция нагруженной гидропоры с ИТ как заграждающего фильтра в виде механической цепи на основе последовательного контура [1,2] определяется также через отношение сумм активных и реактивных сопротивлений ветвей механической цепи гидропоры с ИТ:

$$H(j\omega) = \frac{F(j\omega)}{F_m(j\omega)} = \frac{b'_z + (j\omega m_{um} + c/j\omega)}{b'_z + [j\omega(m + m_{um}) + c/j\omega]}. \quad (21)$$

В операторной форме записи данная передаточная функция нагруженной гидропоры с ИТ представляется в виде [15,16]:

$$H(s) = \frac{F(s)}{F_m(s)} = \frac{b'_z + (sm_{um} + c/s)}{b'_z + [s(m + m_{um}) + c/s]}. \quad (22)$$

Для передаточных функций нагруженной гидропоры с ИТ как заграждающих фильтров введём обозначения [15,16]:

- для (2.20) -  $\sigma_p = R/(2L + 2L_{um})$ ,  $\sigma_z = R/(2L_{um})$ ,  $\omega_p^2 = 1/[(L + L_{um})C]$ ,  $\omega_z^2 = 1/(L_{um}C)$ ;

- для (2.22) -  $\sigma_p = b'_z/(2m + 2m_{um})$ ,  $\sigma_z = b'_z/(2m_{um})$ ,  $\omega_p^2 = c/(m + m_{um})$ ,  $\omega_z^2 = c/m_{um}$ .

В результате приходим к формуле [15,16]

$$H(s) = K \frac{(s^2 + 2\sigma_z s + \omega_z^2)}{(s^2 + 2\sigma_p s + \omega_p^2)}. \quad (23)$$

Неравенство  $\sigma_z > \sigma_p$  показывает, что полюса являются доминирующими по отношению к нулям (т.е. всегда расположены ближе к оси  $j\omega$ ).

Для случая  $\omega_p = \omega_z$  АЧХ (частотно-заграждающая) имеет место минимум:

$$H_{\min} = |H(j\omega_p)| = K\sigma_p / \sigma_z = Kq_z / q_p. \quad (24)$$

Диаграмма полюсов и нулей приведена на рис. 6, а, а АЧХ - рис. 6, б.

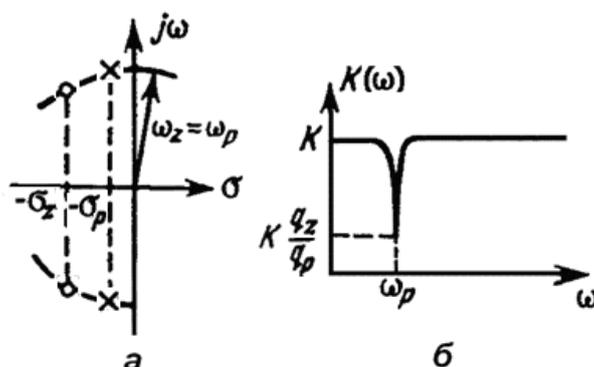


Рис. 6. Диаграмма полюсов и нулей передаточной функции гидропоры (а); идеальная частотно-заграждающая АЧХ гидропоры с ИТ (б)

Передаточная функция гидропоры с ИТ имеет два нуля:  $z_{1,2} = \pm j\omega_z$ . Они расположены около или на мнимой оси симметрично относительно начала координат (рис. 6, а). Есть еще два полюса:

$$p_{1,2} = -\sigma_p \pm j\sqrt{\omega_p^2 - \sigma_p^2},$$

находящиеся левее мнимой оси и являющиеся комплексно-сопряженными числами [15,16]. Это означает, что переход в установившееся состояние происходит в данной цепи в форме свободных колебаний с затухающей по закону  $e^{-\sigma t}$  амплитудой и периодом, равным

$$2\pi/\sqrt{\omega_p^2 - \sigma_p^2}.$$

Виброколебания с частотой  $\omega_p = \omega_z$ , равной нулю передаточной функции, демпфируются и в идеале не проходят на выход гидропоры с ИТ.

### Выводы

В статье показано построение электромагнитного эквивалента магнитоуправляемой гидропоры по методу электроанalogий. Преимущество рассмотренного метода заключается в том, что синтез имитационных моделей гидропоры и схем управления сопровождается построением их эквивалентных электрических схем замещения. Поскольку эквивалентные электрические схемы замещения гидропоры и схемы управления содержат небольшое количество звеньев, то появляется возможность исследовать магнитоуправляемую гидропору как динамическую систему с привлечением методов теории управления.

Работа выполнена за счет средств Российского научного фонда (проект №15-19-10026).

### Библиографический список

1. **Гордеев, Б.А.** Системы виброзащиты с использованием инерционности и диссипации реологических сред / Б.А. Гордеев [и др.]. - М.: Физматлит, 2004. - 175 с.
2. **Охулков, С.Н.** Методы и устройства ослабления вибрации электромеханических комплексов: монография / С.Н. Охулков [и др.]. - Н. Новгород: НГТУ им. Р.Е. Алексеева, 2016. - 254 с.
3. **Гордеев, Б.А.** Математические модели адаптивных виброизоляторов мобильных и стационарных объектов: монография / Б.А. Гордеев, В.И. Ерофеев, А.С. Плехов. - Н. Новгород: НГТУ им. Р.Е. Алексеева, 2017. - 124 с.
4. **Атабеков, Г.И.** Теоретические основы электротехники. Ч.1 / Г.И. Атабеков. М.-Л.: Энергия. 1966. - 320 с.
5. **Гордеев, Б.А.** Этапы построения математических моделей магнитоуправляемых гидропор методом электромеханических аналогий / Б.А. Гордеев [и др.] // Сборник научных статей конференции «Актуальные проблемы электроэнергетики». - 2018. - С. 119 - 128.
6. **Чикуров, Н.Г.** Синтез математических моделей технических систем методом электроанalogий / Н.Г. Чикуров // Вестник УГАТУ. - 2009. - Т.12. - № 2. - С. 156 -165.
7. **Бутенин, Н.В.** Курс теоретической механики / Н.В. Бутенин, Я.Л. Лунц. Д.Р. Меркин. - СПб: Лань, 2007. - 736 с.

8. **Бать, М.И.** Теоретическая механика в примерах и задачах. Т.2. Динамика. / М.И. Бать, Г.Ю. Джанелидзе, А.С. Келвзон. - М.: Наука, 1972. - 624 с.
9. **Тарасик, В.П.** Математическое моделирование технических систем / В.П. Тарасик. - Минск: ДизайнПРО, 1997. - 640 с.
10. **Зарубин, В.С.** Математическое моделирование в технике / В.С. Зарубин, А.П. Крищенко. - М.: Изд. МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2003. - 496 с.
11. **Дружинский, И.А.** Механические цепи / И.А. Дружинский. – Л.: Машиностроение, 1977. - 240 с.
12. **Айбиндер, Р.М.** Демпфирование вибрации на резонансных частотах электротехнических комплексов и систем / Р.М. Айбиндер [и др.] // Вестник машиностроения. – 2017. - № 1. - С. 7–14.
13. **Гордеев, Б.А.** Физическая модель магнитореологического трансформатора / Б.А. Гордеев, А.С. Плехов, Д.Ю. Титов // Труды III международной научно-технической конференции Пром-Инжиниринг. - 2017. - С. 201 - 205.
14. **Гордеев, Б.А.** Физические основы и конструкция индукционного магнитореологического трансформатора гидроопор / Б.А. Гордеев [и др.] // Прикладная механика и технология машиностроения. - 2011. - №2. – С. 52 – 68
15. **Хьюлсман, Л.П.** Введение в теорию и расчет активных фильтров / Л.П. Хьюлсман, Ф.Е. Аллен. – М.: Радио и Связь, 1984. – 384 с.
16. **Зааль, Р.** Справочник по расчету фильтров / Р. Зааль. - М.: Радио и связь, 1983. - 752 с.

УДК 621.314

А.Б. Дарьенков<sup>1</sup>, И.А. Варыгин<sup>2</sup>

## СПОСОБ СКАЛЯРНОГО УПРАВЛЕНИЯ МАТРИЧНЫМ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕМ ЧАСТОТЫ ДЛЯ ЭЛЕКТРОПРИВОДА ТУРБОМЕХАНИЗМОВ

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева<sup>1</sup>  
Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики Российской академии наук»<sup>2</sup>

Предложен способ скалярного управления трехфазным матричным преобразователем частоты на основе высокочастотной широтно-импульсной модуляции с четырёхтактной коммутацией транзисторов двунаправленных ключей, обеспечивающий коэффициент передачи напряжения  $q = U_{\text{ВЫХ}}/U_{\text{ВХ}}$  в области линейной модуляции до 0,866 и при перемодуляции до 0,92, и позволяющий сократить количество параллельно вычисляемых коэффициентов модуляционной матрицы с 9 до 6.

A method for a scalar control of 3-phase direct matrix converter was proposed. The method based on high-frequency PWM with four-step commutation of *IGBTs*. Using the proposed method allows to achieve voltage transfer ratio up to 0,866 in linear modulation, and up to 0,92 in overmodulation mode. The control method proposed in this study requires calculation of 6 duty ratios, not 9 as in the known methods.

**Ключевые слова:** матричный преобразователь, скалярное управление.

**Key words:** matrix converter, scalar control.

### Общие сведения о матричном преобразователе частоты

Наиболее рациональным является построение регулируемого электропривода турбомеханизмов (ЭП ТМ) на базе полупроводниковых преобразователей частоты (ПЧ). При всем многообразии существующих топологий ПЧ наиболее перспективными с точки зрения использования в составе ЭП ТМ являются двухзвенные преобразователи частоты (в основном, преобразователи со звеном постоянного напряжения - ДПЧ), и непосредственные преобразователи, в частности, матричные преобразователи частоты (МПЧ), обеспечивающие преобразование параметров электроэнергии без промежуточных звеньев. В настоящее время именно ДПЧ со звеном постоянного напряжения являются основой регулируемого ЭП ТМ. Их номенклатура основывается на ПЧ производства фирм *AllenBradley* (США), *ABB* (Швейцария), *Danfoss* (Дания), *Hitachi* (Япония), *Siemens* (ФРГ), *Schneider* (ФРГ), *MitsubishiElectric* (Япония).

Основными преимуществами МПЧ по сравнению с ДПЧ являются однократное преобразование электроэнергии ввиду отсутствия звена постоянного напряжения, двунаправленный обмен энергией с питающей сетью, обеспечение близких к синусоидальным входных и выходных токов. Поэтому многими

исследователями МПЧ рассматривается как наиболее перспективная с точки зрения эффективности и технологичности альтернатива ДПЧ.

В общем случае управление МПЧ может осуществляться с помощью следующих способов: скалярного управления [1,2,3], векторного управления по потокосцеплению ротора [4,5,6] и прямого управления моментом [7,8,9].

Отсутствие колебаний статического момента на валу ТМ, высокая инерционность большинства ТМ и, как следствие, отсутствие жёстких требований к точности регулирования позволяет сделать вывод о целесообразности применения скалярного управления частотно-регулируемым ЭП ТМ. ЭП АД, питающийся от ПЧ со скалярным управлением без обратной связи по скорости, способен обеспечить диапазон регулирования в среднем от 10:1 до 30:1, что является достаточным для большинства ЭП ТМ.

### Формирование выходных напряжений МПЧ

Упрощенная принципиальная схема МПЧ, использованная при разработке способа управления, представлена на рис.1. Силовая часть МПЧ представляет собой матрицу из девяти двунаправленных ключей, образованную пересечением трех подключенных к фазам питающей сети  $A, B, C$  шин с номерами  $i=1, 2, 3$  (вход МПЧ) и подключенных к фазам  $a, b, c$  нагрузки шин с порядковыми номерами  $j=1, 2, 3$  (выход МПЧ). [10]. Каждый двунаправленный ключ МПЧ  $S_{ij}$  состоит из двух  $IGBT$ , соединенных согласно рис. 1.

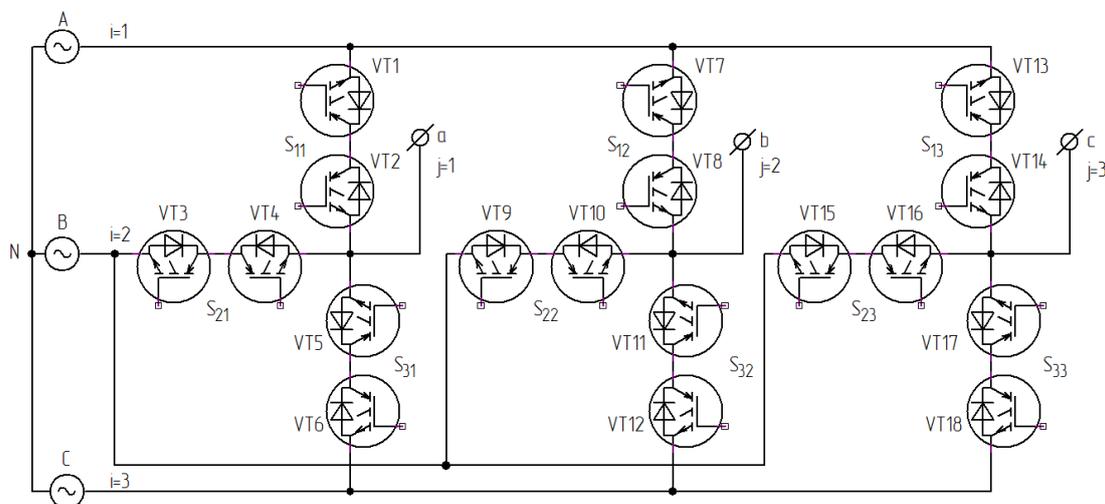


Рис.1. Упрощенная принципиальная схема силовой части МПЧ

Примем допущение, что полупроводниковые ключи являются идеальными, и переключение их происходит мгновенно. Двунаправленные ключи МПЧ  $S_{ij}$  находятся в открытом состоянии на протяжении интервалов проводимости  $t_{ij}$ , номер интервала проводимости  $ij$  соответствует номеру  $ij$  двунаправленного ключа. Кривые выходных фазных напряжений МПЧ требуемой частоты и амплитуды формируются подключением фаз питания к нагрузке в течение изменяющихся во времени интервалов  $t_{ij}$ , где  $i, j = 1, 2, 3$  ( $i$  - фаза питания,  $j$  - фаза нагрузки). Длительность интервалов  $t_{ij}$  зависит от значений модулирующих гармонических сигналов (коэффициентов модуляционной матрицы)  $m_{ij}$ , и

определяется посредством сравнения мгновенных значений  $m_{ij}$  с высокочастотным пилообразным опорным сигналом. Таким образом, вектор выходных напряжений МПЧ на периоде ШИМ формируется посредством умножения вектора напряжений питания на модуляционную матрицу:

$$\begin{bmatrix} U_a(t) \\ U_b(t) \\ U_c(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} m_{11}(t) & m_{21}(t) & m_{31}(t) \\ m_{12}(t) & m_{22}(t) & m_{32}(t) \\ m_{13}(t) & m_{23}(t) & m_{33}(t) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_A(t) \\ U_B(t) \\ U_C(t) \end{bmatrix}. \quad (1)$$

Аналогично, потребляемый преобразователем ток равен произведению вектора токов нагрузки на модуляционную матрицу:

$$\begin{bmatrix} i_A(t) \\ i_B(t) \\ i_C(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} m_{11}(t) & m_{21}(t) & m_{31}(t) \\ m_{12}(t) & m_{22}(t) & m_{32}(t) \\ m_{13}(t) & m_{23}(t) & m_{33}(t) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a(t) \\ i_b(t) \\ i_c(t) \end{bmatrix}. \quad (2)$$

Уравнения (1) и (2) представляют собой математическое описание МПЧ в общем виде и являются универсальными для любого способа скалярного управления МПЧ. Решение задачи управления МПЧ при этом сводится к нахождению коэффициентов  $m_{ij}$  модуляционной матрицы.

### Расчёт коэффициентов модуляционной матрицы

Для обеспечения безопасной коммутации транзисторов, исключающей возникновение короткого замыкания между фазами питания и обрыв тока нагрузки, мгновенные значения коэффициентов модуляционной матрицы должны удовлетворять следующим соотношениям:  $0 < m_{ij}(t) < 1$ ,  $m_{11}(t)+m_{21}(t)+m_{31}(t)=1$ ,  $m_{12}(t)+m_{22}(t)+m_{32}(t)=1$ ,  $m_{13}(t)+m_{23}(t)+m_{33}(t)=1$ .

В разработанном способе управления МПЧ значения коэффициентов  $m_{ij}$  определяются согласно (3):

$$m_{ij}(t) = \begin{bmatrix} \delta 1(t) + \lambda(t) - \xi \cdot \sin(\omega_{\text{ex}}t - \varphi) + k_A \sin(\omega_{\text{ex}}t - \varphi) \\ \delta 1(t) + \lambda(t) - \xi \cdot \sin(\omega_{\text{ex}}t - \varphi) + k_B \sin(\omega_{\text{ex}}t - \varphi) \dots \\ \delta 1(t) + \lambda(t) - \xi \cdot \sin(\omega_{\text{ex}}t - \varphi) + k_C \sin(\omega_{\text{ex}}t - \varphi) \\ \delta 2(t) + \lambda(t) - \xi \cdot \sin(\omega_{\text{ex}}t - 2\pi/3 - \varphi) + k_A \sin(\omega_{\text{ex}}t - 2\pi/3 - \varphi) \\ \dots \delta 2(t) + \lambda(t) - \xi \cdot \sin(\omega_{\text{ex}}t - 2\pi/3 - \varphi) + k_B \sin(\omega_{\text{ex}}t - 2\pi/3 - \varphi) \dots \\ \delta 2(t) + \lambda(t) - \xi \cdot \sin(\omega_{\text{ex}}t - 2\pi/3 - \varphi) + k_C \sin(\omega_{\text{ex}}t - 2\pi/3 - \varphi) \\ \delta 3(t) + \lambda(t) - \xi \cdot \sin(\omega_{\text{ex}}t + 4\pi/3 - \varphi) + k_A \sin(\omega_{\text{ex}}t + 4\pi/3 - \varphi) \\ \dots \delta 3(t) + \lambda(t) - \xi \cdot \sin(\omega_{\text{ex}}t + 4\pi/3 - \varphi) + k_B \sin(\omega_{\text{ex}}t + 4\pi/3 - \varphi) \\ \delta 3(t) + \lambda(t) - \xi \cdot \sin(\omega_{\text{ex}}t + 4\pi/3 - \varphi) + k_C \sin(\omega_{\text{ex}}t + 4\pi/3 - \varphi) \end{bmatrix}, \quad (3)$$

где  $\delta 1(t)$ ,  $\delta 2(t)$ ,  $\delta 3(t)$  – добавочные коэффициенты, обеспечивающие положительные значения коэффициентов модуляционной матрицы ( $m_{ij} > 0$ ):  $\delta 1(t) = 0,5 \cdot \sin(\omega_{\text{вых}}t - \varphi)$ ,  $\delta 2(t) = 0,5 \cdot \sin(\omega_{\text{вых}}t - 2\pi/3 - \varphi)$ ,  $\delta 3(t) = 0,5 \cdot \sin(\omega_{\text{вых}}t - 4\pi/3 - \varphi)$ ;

$\lambda$  – добавочный коэффициент, обеспечивающий равенство сумм мгновенных значений модуляционных сигналов  $m_{11}(t)+m_{21}(t)+m_{31}(t)=1$ ,  $m_{12}(t)+m_{22}(t)+m_{32}(t)=1$ ,  $m_{13}(t)+m_{23}(t)+m_{33}(t)=1$ :  $\lambda=(1-[\delta 1(t)+\delta 2(t)+\delta 2(t)]/3)$ ;

$\varphi$  – фазовый сдвиг модуляционного сигнала;  $\omega_{\text{вх}}$  – угловая частота напряжения питающей сети;  $\omega_{\text{вых}}$  – угловая частота выходного напряжения МПЧ;  $k_A, k_B, k_C$  – первичные модуляционные сигналы, имеющие амплитуду  $k_m$  и изменяющиеся с частотой выходного напряжения  $\omega_{\text{вых}}$ :  $k_A(t)=k_m \sin(\omega_{\text{вых}}t - \varphi)$ ,  $k_B(t)=k_m \sin(\omega_{\text{вых}}t - 2\pi/3 - \varphi)$ ,  $k_C(t)=k_m \sin(\omega_{\text{вых}}t - 4\pi/3 - \varphi)$ ;

$\xi$  – коэффициент, обеспечивающий максимальный коэффициент передачи напряжения при линейной модуляции:  $\xi = [-(\max\{k_A, k_B, k_C\} + \min\{k_A, k_B, k_C\})/2]$ .

Регулирование амплитуды и частоты выходного напряжения в разработанном способе управления осуществляется изменением значения амплитуды  $k_m$  вектора модуляционного сигнала  $k_j$ , и изменением угловой частоты  $\omega_{\text{вых}}$  этого вектора соответственно. Значение  $0 \leq k_m \leq 0,577$  соответствует области линейной модуляции, т.е. области, в которой модулирующий сигнал имеет гармоническую форму. В качестве примера на рис.2 показана структура и форма модулирующей функции  $m_{11}$  при  $f_{\text{вых}}=25$  Гц и различных значениях  $k_m$ .

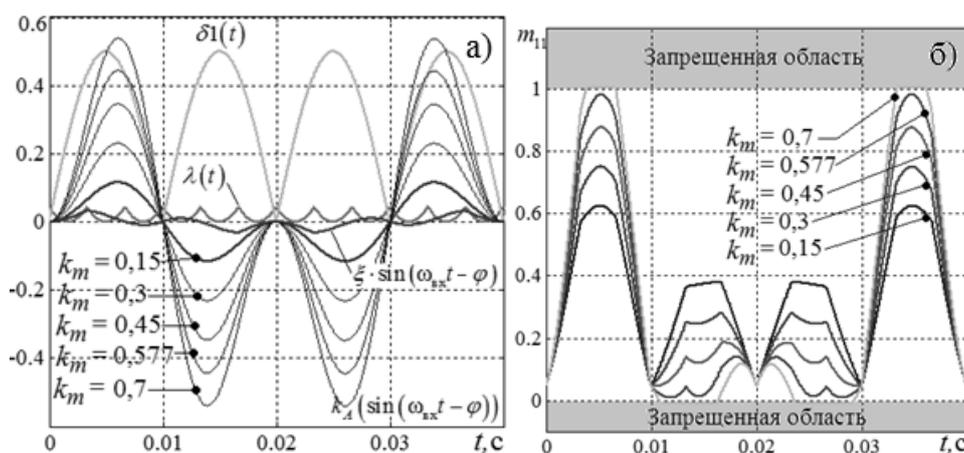
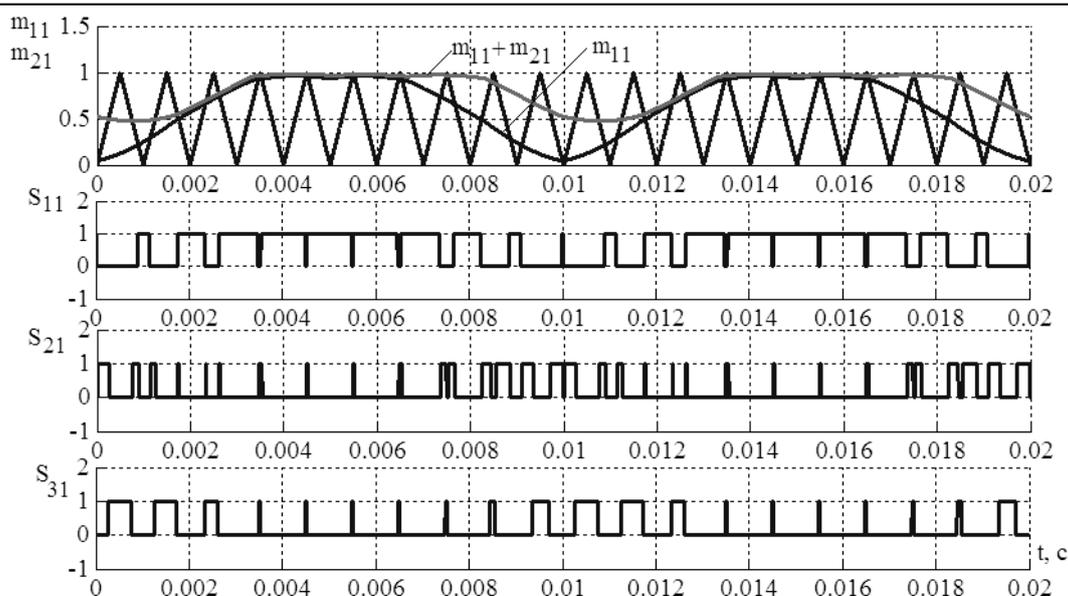


Рис. 2. Структура модулирующей функции  $m_{11}$  (а) и форма модулирующей функции  $m_{11}$  (б) при  $f_{\text{вых}}=25$  Гц и  $k_m=0,15; 0,3; 0,45; 0,577; 0,7$

### Формирование импульсов управления транзисторами

Формирование импульсов управления двунаправленными ключами, соединяющих фазу  $A$  нагрузки с фазами питающей сети, происходит путем сравнения значений сигналов  $m_{11}$  (для ключа  $S_{11}$ ) и  $m_{11} + m_{21}$  (для ключа  $S_{21}$ ) с уровнем опорного пилообразного сигнала единичной амплитуды  $U_{\text{оп}}$ . Импульс управления ключом  $S_{31}$  может формироваться посредством логической операции, исходя из равенства  $m_{11}(t)+m_{21}(t)+m_{31}(t)=1$ , без использования математического вычисления коэффициента  $m_{31}$  (3).

Формирование первичных импульсов управления двунаправленными ключами, соединяющими фазу  $a$  нагрузки с фазами питающей сети, происходит путем сравнения значений сигналов  $m_{11}$  (для ключа  $S_{11}$ ) и  $m_{11} + m_{21}$  (для ключа  $S_{21}$ ) с уровнем опорного сигнала единичной амплитуды  $U_{\text{оп}}$  (рис. 3).



**Рис. 3. Принцип формирования импульсов управления ДК S11...S31 в области линейной модуляции выходного напряжения при  $f_{\text{вых}}=50$  Гц,  $k_m=0,577$**

Первичный импульс управления двунаправленным ключом  $S_{31}$  может быть сформирован посредством логической операции «НЕ» без использования непосредственного математического вычисления коэффициента  $m_{31}$ . Формирование импульсов управления ДК, подключенных к другим фазам нагрузки, аналогично. Таким образом, в разработанном способе управления МПЧ [11] по сравнению с известными способами [1,12] количество непосредственно вычисляемых коэффициентов  $m_{ij}$  снижено с 9 до 6, что упрощает реализацию способа управления.

Импульсы управления транзисторами двунаправленных ключей формируются исходя из значений  $S_{ij}$  согласно правилам четырёхтактной коммутации.

Максимально допустимый коэффициент передачи напряжения можно вычислить следующим образом. Из (2) следует, что

$$u_a(t) = m_{11}(t)U_A(t) + m_{21}(t)U_B(t) + m_{31}(t)U_C(t). \quad (4)$$

После подстановки  $k_A(t), k_B(t), k_C(t)$  в (4) получим:

$$u_a(t) = k_A(t)U_m \left[ \sin(\omega_{\text{вх}}t) \cdot \sin(\omega_{\text{вх}}t - \varphi) + \sin(\omega_{\text{вх}}t - 2\pi/3) \cdot \sin(\omega_{\text{вх}}t - 2\pi/3 - \varphi) + \sin(\omega_{\text{вх}}t - 4\pi/3) \cdot \sin(\omega_{\text{вх}}t - 4\pi/3 - \varphi) \right].$$

Упрощая, получим:

$$u_a(t) = \frac{3}{2}k_A(t)U_m \cos(\varphi). \quad (5)$$

Уравнение (5) показывает, что напряжение фазы  $a$  нагрузки зависит от амплитуды входного напряжения  $U_A$ , сигнала  $k_A$ , и фазового сдвига  $\varphi$ , и не зависит при этом от частоты питающей сети  $\omega_{\text{вх}}$ .

При этом среднее значение выходного фазного напряжения при  $\cos\varphi = 1$  и  $k_m = 0,577$  составит 0,866 от среднего значения фазного напряжения питания. Значение  $k_m > 0,577$  соответствует области перемодуляции, в которой модулирующий сигнал преимущественно имеет форму, близкую к трапецевидной.

При этом максимальное выходное напряжение можно получить при форме трапеции, близкой к меандру, и при значении  $\cos\varphi = 1$  позволяет получить коэффициент передачи напряжения МПЧ, равный 0,92 [11].

### Выводы

1. Предложен способ скалярного управления МПЧ, позволяющий формировать в нагрузке трехфазное напряжение с коэффициентом передачи в области линейной модуляции не менее 0,866. Дальнейшее повышение коэффициента передачи возможно до величины 0,92 за счет повышения амплитуды  $k_m$  первичных модуляционных сигналов  $k_a$ ,  $k_b$ ,  $k_c$  и перехода преобразователя в режим перемодуляции.

2. Реализация закона скалярного управления  $U/f=\text{const}$  в предложенном способе возможна за счёт одновременного изменения амплитуды  $k_m$  и частоты  $\omega_{\text{вых}}$  первичных модуляционных сигналов  $k_a$ ,  $k_b$ ,  $k_c$ .

3. Разработанный способ управления МПЧ отличается меньшим количеством модулирующих функций, используемых для формирования выходного напряжения МПЧ. Для управления двунаправленными ключами МПЧ система управления преобразователем должна одновременно вычислять шесть модулирующих функций  $m_{ij}$  (вместо девяти модулирующих функций в известных способах) и выполнять ряд математических операций с ними. Решение данной задачи возможно на обеспечивающих параллельное вычисление математических функций программируемых логических интегральных схемах (ПЛИС), что упрощает реализацию системы управления МПЧ.

Работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки РФ (соглашение № 14.574.21.0167 о предоставлении субсидии от 26.09.2017, уникальный идентификатор проекта RFMEFI57417X0167).

### Библиографический список

1. **Сидоров, С. Н.** Матричный преобразователь частоты - объект скалярного управления / С.Н. Сидоров // Силовая электроника. 2009. №3. с.31-35.
2. **Федоров, С. В.** Способы широтно-импульсной модуляции на основе сравнения синхронизирующих сигналов с сигналами модуляции матричных преобразователей частоты / С.В. Федоров, А.В. Бондарев // Вестник ОГУ. 2014. №3 (164) С.180-186.
3. **Andreu, J.** A step forward towards the development of reliable matrix converters. / J.Andreu [et.al] //IEEE Trans. Ind. Electron. 59. – 2012. – V.59. – N.1.–P.167–183.
4. **Мещеряков В. Н.** Математический анализ и моделирование преобразователя частоты матричного типа с непосредственным управлением по методу пространственно-векторной модуляции / В.Н. Мещеряков, Д.В. Байков// Вестник ЮУрГУ. Серия: Энергетика. – 2015. - №1.–С.21-33.
5. **Ahmed, S.M.** Simple carrier based PWM technique for a three-to-nine-phase direct AC–AC converter. /S.M.Ahmed [et al] IEEE Trans. Ind. Electron. – 2011. – V.58. – N.11. – P.5014–5023.
6. **Omrani, K.** A SVM control strategy for a direct matrix converter / K.Omrani [et.al] //International Conference on Green Energy Conversion Systems (GECS). – 2017. – P 1-6.

7. **Анучин, А.С.** Системы управления электроприводов: учебник для вузов – М.: Издательский дом МЭИ, 2015. – 373 с.
8. **Кокорин, Н.В.** Исследование и разработка преобразователя частоты матричного типа для электроприводов переменного тока. Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. Чувашский государственный технический университет. Чебоксары. 2010.
9. **Benachour, A.** DTC-SVM control of induction machine fed by three level NPC matrix converter / A.Benachour [et al] // 8th International Conference on Modelling, Identification and Control (ICMIC). – 2016. – P. 628 – 633.
10. **Дарьенков, А. Б.** Разработка входного фильтра матричного преобразователя частоты / А.Б. Дарьенков, И.А. Варыгин // Актуальные проблемы электроэнергетики: Материалы научно-технической конференции НГТУ, Н.Новгород, 2014.
11. **Дарьенков, А.Б.** Способ управления матричным преобразователем частоты. Патент РФ RU 2641653 C1 Патентообладатель: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева" (НГТУ). Дата подачи заявки: 26.09.2016, Дата начала действия 26.09.2016, Дата публикации патента 19.01.2018.
12. **Venturini, M.:** Solid-state power conversion: a Fourier analysis approach to generalized transformer synthesis / M.Venturini, A. Alesina // IEEE Trans. on circuit and systems, V.28. – N.4. – P. 319-330

УДК 621.31

А.Б. Дарьенков, А.В. Серебряков, Д.М. Кочеганов

**ИМИТАЦИОННАЯ МОДЕЛЬ ГИБРИДНОГО ГЕНЕРАТОРНОГО КОМПЛЕКСА С ДИФФЕРЕНЦИРОВАНИЕМ НАГРУЗКИ**

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Статья посвящена разработке имитационной модели автономного гибридного генераторного комплекса с дифференцированием нагрузки в среде *Matlab Simulink*. Приводится функциональная схема имитационной модели, описание принципа работы, структурная схема в среде *Matlab Simulink*, осциллограммы, полученные при работе модели.

The article devoted to the development of autonomous hybrid generation complex mathematical model with load differentiation. Modelling is performed in *Matlab Simulink*. The article includes functional scheme, principle of operation, model in *Matlab Simulink*, signal waveforms, obtained by this model.

**Ключевые слова:** имитационное моделирование, возобновляемая энергетика, дифференцирование нагрузки.

**Key words:** mathematical model, renewable energy, load differentiation.

Специфической чертой электроэнергетики России является отсутствие централизованного электроснабжения на значительной части территории страны. Из-за малой плотности населения в данных областях установившейся практикой является использование генерирующих комплексов малой мощности для индивидуального электроснабжения потребителей (малые населенные пункты, автономные промышленные объекты). Сейчас большая часть таких генерирующих комплексов представляет собой дизель-генераторные установки. К их достоинствам относится простота устройства и бесперебойность выработки электрической энергии. К недостаткам – необходимость доставки топлива, что может являться проблемой для удаленных объектов, а также низкая экологичность.

Значительная часть мировой выработки электрической энергии основывается на использовании ископаемых видов топлива. Недостатками данного способа производства электрической энергии являются ограниченное количество полезных ископаемых, а также негативное влияние на глобальную экологическую обстановку. Решением данных проблем может стать использование экологически чистых возобновляемых источников энергии. В настоящее время увеличение доли возобновляемых источников в энергетическом балансе является приоритетной задачей развития электроэнергетики для многих государств.

По данным International Renewable Energy Agency (IRENA) одним из наиболее используемых возобновляемых источников в настоящее время является энергия ветрового потока [1]. Одним из главных недостатков этого источника энергии является его нестабильность, что приводит к необходимости

использования в генерирующих комплексах элементов накопления энергии и резервных источников энергоснабжения, как правило, в виде дизельных генераторов. Тем не менее, использование возобновляемых источников энергии в данном случае позволяет уменьшить зависимость от дизельного топлива, а также снизить негативное влияние на окружающую среду и здоровье населения.

Наличие в структуре генерирующего комплекса элементов накопления энергии, обеспечение требуемых параметров выходного напряжения при меняющейся скорости ветрового потока приводит к необходимости использования полупроводниковых преобразователей. Большая часть генераторных комплексов, существующих в настоящее время, построена по функциональной схеме (рис. 1).

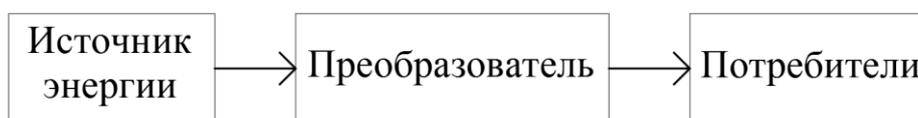


Рис. 1. Функциональная схема без дифференцирования нагрузки

В данной схеме расчетная мощность преобразователя соответствует суммарной мощности всех подключаемых потребителей энергии. Однако результаты исследования, представленные в [2-5], показывают, что для значительной части гражданских потребителей, находящихся в зоне децентрализованного электроснабжения, до 60% суммарной мощности потребителей электроэнергии составляют нагревательные приборы. Большая их часть не относится к ответственным потребителям, и не требует бесперебойного питания, а также строгого соблюдения требований к минимальной частоте и амплитуде напряжения. То есть включение данных потребителей к выводам источника энергии (ветровая турбина, дизельный генератор), рис. 2, позволит уменьшить расчетную мощность преобразователя энергии без значительных потерь в качестве функционирования данных потребителей.

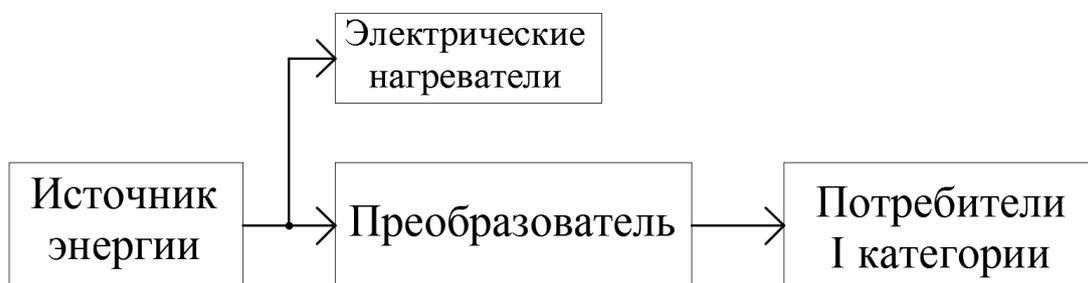


Рис. 2. Функциональная схема с дифференцированием нагрузки

В рамках работы создана имитационная модель комплекса с совмещенной ветро-дизельной генерацией и дифференцированием нагрузки. Функциональная схема модели представлена на рис. 3.

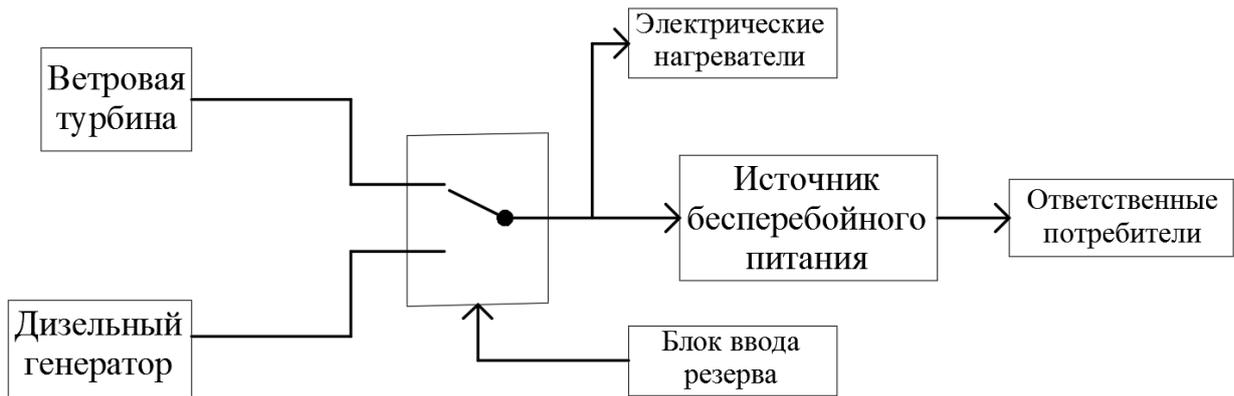


Рис. 3. Функциональная схема имитационной модели

Схема включает в себя ветровую турбину, дизельный генератор, источник бесперебойного питания. Принцип работы схемы заключается в следующем. В режиме нормальной эксплуатации питание потребителей осуществляется от ветровой турбины. При достаточном потенциале ветрового потока также осуществляется заряд накопителей энергии в источнике бесперебойного питания. При скорости ветра ниже допустимой турбина отключается, питание ответственных потребителей продолжается от накопителей энергии источника бесперебойного питания. При снижении уровня заряда накопителей энергии ниже допустимого уровня в работу вводится дизельный генератор, осуществляющий питание потребителей и заряд накопителей до номинального уровня.

На рис.4 представлена схема имитационной модели в среде *Matlab Simulink*.

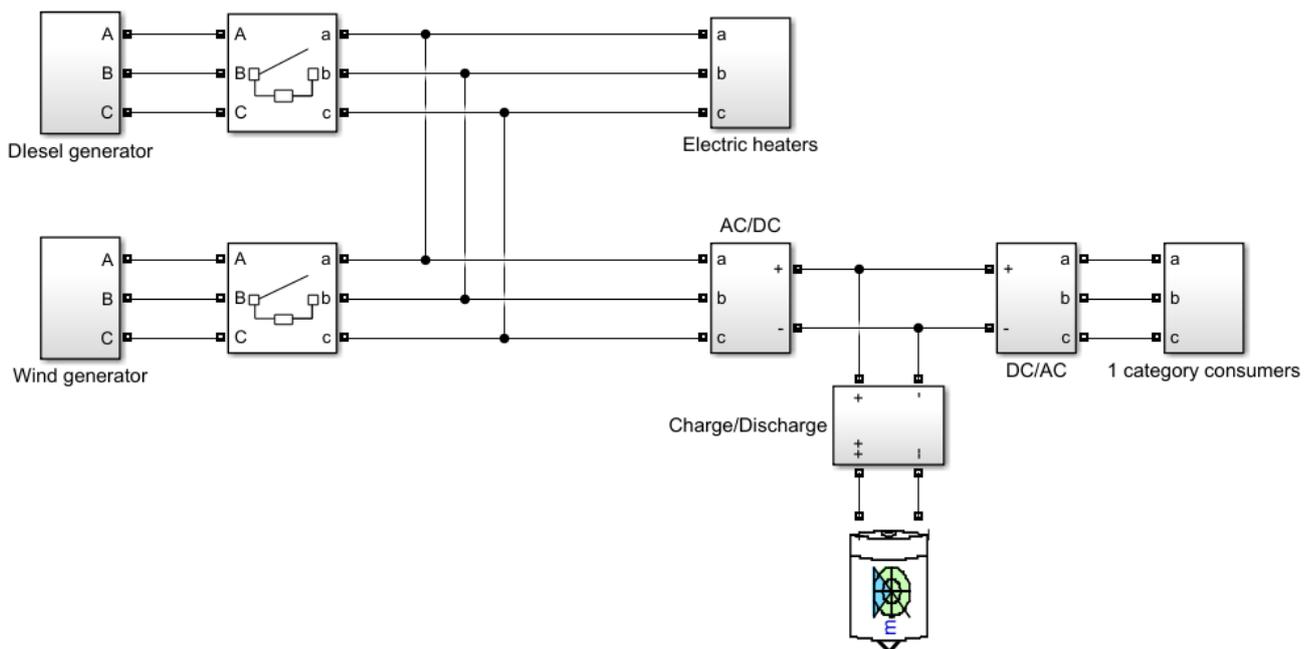


Рис. 4. Имитационная модель в среде *Matlab Simulink*

Модель дизельного генератора включает в себя блок Simplified Synchronous Machine, сигнал скорости вращения вала поступает с упрощенной модели дизельного двигателя с линеаризованными механическими характеристиками. В модели ветрового генератора также используется блок Simplified Synchronous Machine, сигнал скорости вращения вала формируется на основе заданной скорости ветра в относительных единицах. Источник бесперебойного питания включает понижающий AC/DC преобразователь, выполненный по схеме выпрямитель – инвертор - высокочастотный трансформатор – выпрямитель; зарядное устройство накопителя энергии; повышающий DC/AC преобразователь, выполненный по схеме инвертор - высокочастотный трансформатор – выпрямитель – инвертор. Алгоритмы системы управления реализованы в виде m-функций.

Рассматривается режим работы системы, при котором в момент времени  $t_1$  потенциал ветрового потока становится недостаточным для обеспечения требуемых параметров выходного напряжения, рис. 5.

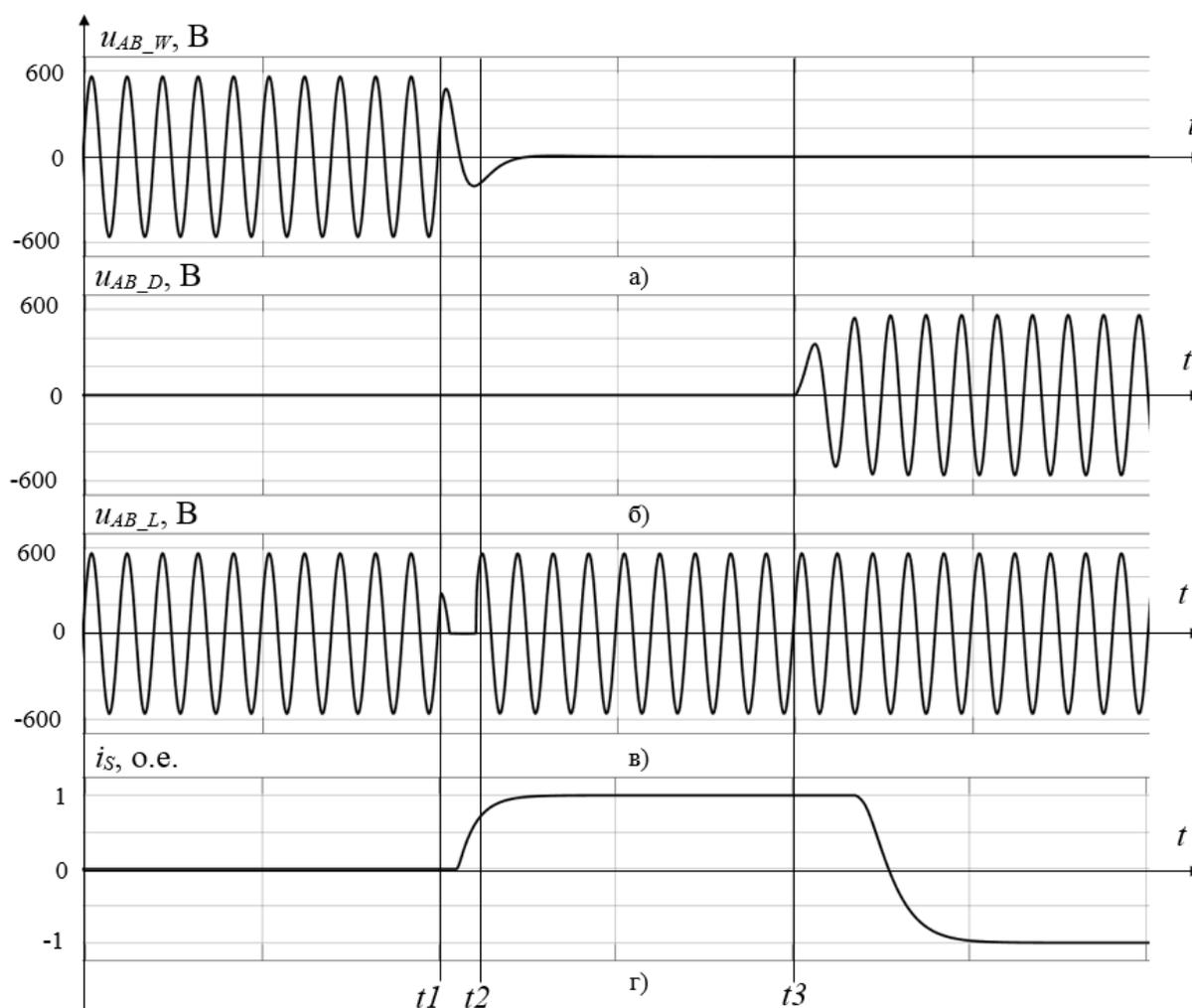


Рис. 5. Осциллограммы работы системы при недостаточном потенциале ветрового потока

На графике *a* представлена осциллограмма линейного напряжения *AB* ветрового генератора. На графике *б* представлена осциллограмма линейного

напряжения  $AB$  нагрузки. На графике  $\epsilon$  представлена осциллограмма линейного напряжения  $AB$  дизельного генератора. На графике  $\zeta$  представлена осциллограмма тока накопителя энергии в относительных единицах. Для большей наглядности инерционность механических элементов системы значительно уменьшена по сравнению с типовыми значениями для реальных объектов. Для получения точных результатов для каждого конкретного объекта необходима инициализация модели при помощи паспортных данных используемого оборудования и экспериментальных данных.

После регистрации снижения напряжения, за время, не превышающее 20 мс, момент времени  $t_2$  в работу вводится бесперебойное питание от накопителя энергии. Минимальная емкость накопителя энергии должна обеспечивать питание системы при номинальной нагрузке на протяжении времени, необходимого для введения в работу дизельного генератора. После снижения уровня заряда накопителя энергии до пороговой отметки (момент времени  $t_3$ ) в работу включается дизельный генератор, который осуществляет питание потребителей и заряд накопителя энергии до требуемого уровня.

### Выводы

1. Представлена имитационная модель гибридного генераторного комплекса с применением дифференцирования нагрузки. Осциллограммы, полученные в результате моделирования, позволяют считать работу модели адекватной.
2. Дифференцирование нагрузки за счет питания потребителей третьей категории без использования бесперебойного питания позволяет уменьшить расчетную мощность преобразовательных устройств, и, следовательно, снизить капитальные затраты на сооружение генераторного комплекса.

### Библиографический список

1. IRENA (2019), Renewable capacity statistics 2019, International Renewable Energy Agency (IRENA), Abu Dhabi.
2. **Кочеганов, Д.М.** Дифференцирование нагрузки в автономных генераторных комплексах на основе альтернативных источников энергии / Д.М. Кочеганов, А.В. Серебряков // Интеллектуальная электроэнергетика/ НГТУ им. Р.Е. Алексева. – Н. Новгород, 2018. №4. С. 63-71.
3. **Серебряков, А.В.** Дифференцирование нагрузки в системах электроснабжения автономных потребителей / А.В. Серебряков [и др.] // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексева. 2015. № 2 (109). С. 203-209.
4. **Серебряков, А.В.** Энергоэффективные ветроэнергетические установки с оперативной диагностикой для автономных систем электроснабжения: дис. канд. техн. наук, НГТУ, Н. Новгород, 2013. – 171 с.
5. **Васенин, А.Б.** Как повысить энергоэффективность ветроэнергетической установки / А.Б. Васенин, В.Г. Титов // Главный энергетик. 2015. № 1. С. 58-60.

УДК 62-83:621.313

А.О. Кашканов, А.Ю. Смирнов

**МАГНИТОЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ МАШИНА С ПРЕОБРАЗОВАНИЕМ  
ЭНЕРГИИ НА ТРЕТЬЕЙ ГАРМОНИКЕ**

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Описывается конструкция синхронной машины, в которой осуществляется механическое преобразование энергии на третьей гармонике поля в зазоре, созданном многофазной обмоткой статора. По сравнению с машиной, в которой обеспечивается преобразование на зубцовой гармонике, данная машина обеспечивает большее быстродействие и меньшие потери.

The article deals with the design of a synchronous machine, in which the mechanical energy conversion at the third harmonic field in the gap created by the multiphase stator winding. In comparing with the machine, which provides conversion to the prong harmonic, this machine provides greater speed and less loss.

**Ключевые слова:** шаговый электродвигатель, обмотка якоря, высшие гармоники.

**Key words:** stepper motor, armature winding, high harmonics.

В системах точного позиционирования регулирующих органов получили применение синхронные двигатели, электромеханическое преобразование энергии в которых осуществляется не на первой, а на одной из зубцовых гармоник [1]. Физически это означает, что при полном обороте магнитного поля в зазоре ротор поворачивается на одно зубцовое деление, то есть на угол  $360/Z$  градусов [2]. Однако частота приемистости таких двигателей – то есть частота вращения, на которую двигатель способен запускаться без пропуска шагов – может оказаться недостаточной для тех или иных механизмов. Для расширения диапазона рабочих скоростей привода иногда целесообразно исключить развитые зубчатые структуры на роторе и на статоре, сохранив всё-таки при этом достаточное число устойчивых положений ротора на оборот при переключении фаз обмотки статора. Это позволило бы сохранить приемлемую точность позиционирования подвижных органов в приводе при существенно большей частоте приемистости.

Оправданным решением при таких требованиях может стать отказ от преобразования энергии на зубцовой гармонике магнитного поля в зазоре и использование одной из высших гармоник, в частности, третьей. В этом случае полному обороту магнитного поля в такой машине будет соответствовать фактический поворот ротора на 120 электрических градусов, то есть 120/p геометрических.

Анализируя возможные конструкции переменного-полюсных магнитоэлектрических машин с возбуждением со стороны ротора, для работы на высших гармониках МДС можно рекомендовать следующие магнитные системы:

- индуктор с составным звездообразным магнитопроводом - шести (рис. 1, *а*) и двенадцати-полюсный (рис.1, *б*),
- индуктор с когтеобразным магнитопроводом (рис. 1, *в*, двухсекционный шестиполюсный вариант) как наиболее технологичный.

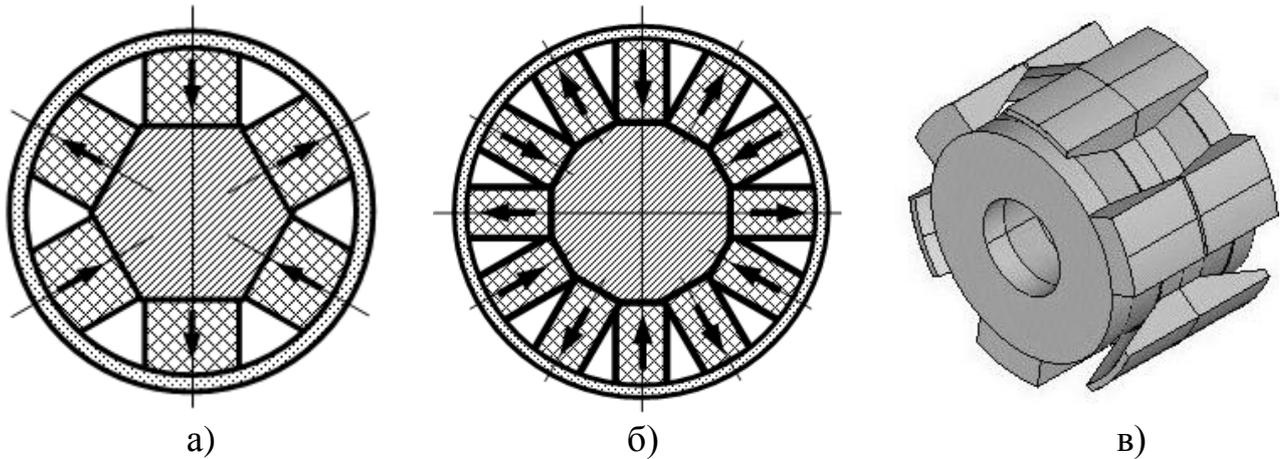


Рис. 1. Ротор переменного-полюсного индукторного двигателя с преобразованием энергии на третьей гармонике

На (рис.2, *в*) показаны предельные механические характеристики индукторного двигателя с преобразованием энергии на третьей гармонике поля якоря, с двух- и четырехполюсным полем по первой гармонике. Расчетные кривые получены при питании от источника номинального (сплошные линии) и половины от номинального (пунктирные линии) напряжения.

Несмотря на меньший момент по угловым характеристикам (рис.2, *а, б*) двигатель с двенадцатиполюсным ротором обеспечивает более высокие моментные показатели, что можно объяснить наложением реактивных моментов. При этом дискретность - число устойчивых положений ротора на оборот при переключении фаз обмотки, у этого варианта в два раза выше, чем с шестиполюсным ротором.

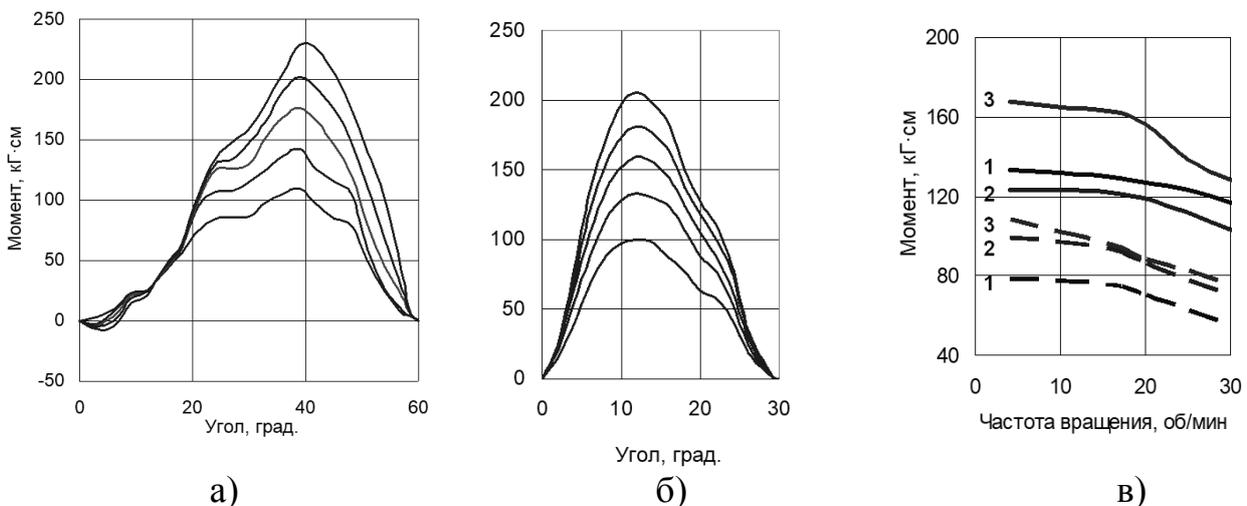


Рис. 2. Угловые (статические) характеристики переменного-полюсного индукторного двигателя с преобразованием энергии на третьей гармонике при двух- (*а*) и четырёх- (*б*) полюсном поле якоря и предельные механические характеристики двигателей (*в*)

## Выводы

Экспериментально подтверждена и проверена работоспособность синхронного двигателя с преобразованием энергии на третьей гармонике поля якоря. Благодаря увеличенному в три раза количеству устойчивых положений на оборот такая машина может быть использована в шаговом приводе систем автоматизации с повышенными требованиями к точности регулирующих органов.

## Библиографический список

1. **Смирнов, А.Ю.** Магнитоэлектрические машины с преобразованием энергии на высшей гармонике поля якоря и их анализ // *Электричество*, 2014, №9, с. 60-65.
2. Дискретный электропривод с шаговыми двигателями / под общ. ред. Чиликина. М.: Энергия, 1971, 624 с.
3. **Смирнов, А.Ю.** Синтез 3D-моделей униполярной индукторной машины / Смирнов А.Ю. [и др.] // *Электротехника*, 2018, №3. С.12-17.

УДК 62-83:621.313

А.О. Кашканов, А.Ю. Смирнов

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОПТИМАЛЬНОЙ ФОРМЫ ИМПУЛЬСА ТОКА В ШАГОВОМ ЭЛЕКТРОПРИВОДЕ С ИНВЕРТОРОМ ТОКА

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Приведены расчетно-экспериментальные исследования влияния формы импульсов в приводе с инвертором тока на пусковые характеристики. Показано, что при пуске с импульсами трапецидальной и синусоидальной формы плавность хода на 30-40% выше, чем для импульсов треугольной формы. Последние, напротив, показывают более высокий пусковой момент при повышенной амплитуде колебаний.

The article deals with experimental studies of the effect of the pulse shape in a drive with a current inverter on the starting characteristics are given. It is shown that when starting with trapezoidal and sinusoidal pulses, smoothness is 30–40% higher than for triangular pulses. The latter, on the contrary, show a higher starting torque with increased amplitude of oscillations.

**Ключевые слова:** шаговый электродвигатель, инвертор тока, форма тока.

**Key words:** stepper motor, current inverter, pulse shape.

Разомкнутый электропривод с шаговыми двигателями (ШД)[1] нашел широкое применение в современных системах позиционирования. Он позволяет создавать компактные механизмы, позиционирующие подвижные элементы в заданном положении. Быстродействие таких механизмов зависит от частоты приемности - предельной частоты вращения ШД, на которую он способен запуститься без пропуска шагов. В приводе со стабилизацией тока в фазах частота приёмности является функцией максимального момента двигателя  $M_{\max}$  по статической характеристике и момента инерции привода  $J$ . При холостом ходе максимальная частота, на которую двигатель способен запуститься без пропуска шагов, частота приёмности составит, в об/мин:

$$\Omega_{\text{пр}} \approx 2 \cos \frac{\pi}{2n_{\text{т}}} \sqrt{\frac{M_{\max}}{pJ} \frac{30}{\pi}} \quad (1)$$

[1,2], где  $n_{\text{т}}$  – число тактов коммутации, представляющее число переключений, осуществляемое для поворота ротора на одно зубцовое деление,  $p$  – число пар полюсов обмотки якоря,  $Z$  – число зубцов на роторе.

Современные частоты преобразователи с инверторами тока позволяют создавать на обмотках электрической машины любую форму тока для того, чтобы машина приобрела определенные, заранее заданные положительные качества: повышенную частоту приемности, плавность хода и т.д.

Например, плавность хода снижает вибрацию и ударные нагрузки на механизмы, что повышает ресурс работы электропривода, а также снижает издаваемый шум. Повышение частоты приемности же позволяет при аналогичном

статическом моменте на валу приводить механизм в движение с большей скоростью, быстрее обрабатывая сигнал изменения положения от системы управления.

Рассмотрим электромеханическую модель электропривода, описывающую перемещение ротора под действием электромагнитного момента двигателя. В большинстве случаев она может быть представлена единственным уравнением – уравнением движения ротора

$$\frac{1}{Z} J \frac{d^2\theta}{dt^2} + M_1 + \frac{d\theta}{dt} \alpha + M_2 \operatorname{sign}\left(\frac{d\theta}{dt}\right) = \frac{Z}{2} \sum_{j=1}^m \sum_{k=1}^m i_j i_k \frac{dL_{jk}}{d\theta}, \quad (2)$$

где  $J$  – приведённый момент инерции;  $M_1$  и  $M_2$  – составляющие нагрузки: потенциальная и типа “сухое трение” соответственно;  $\alpha$  – коэффициент составляющей нагрузки типа “вязкое трение”. Если принять условие равномерности движения ротора  $\dot{\theta} = \text{const}$ , уравнение движения представляет собой баланс электромагнитного момента двигателя и связанной с ним механической нагрузки:

$$\sum_{j=1}^N \sum_{k=1}^N i_j \frac{dL_{jk}}{d\theta} i_k + M_{\text{нагр}} = 0. \quad (3)$$

Можно рассмотреть несколько вариантов формы импульсов тока  $i$ :

- треугольная (рис. 1, а);
- трапецеидальная (рис. 1, б);
- симметричный «криволинейный треугольник», аппроксимированный тремя фронтами линейного нарастания и спада тока разной крутизны (рис. 1, в);
- аппроксимированная полуволна синусоиды (рис. 1, г).

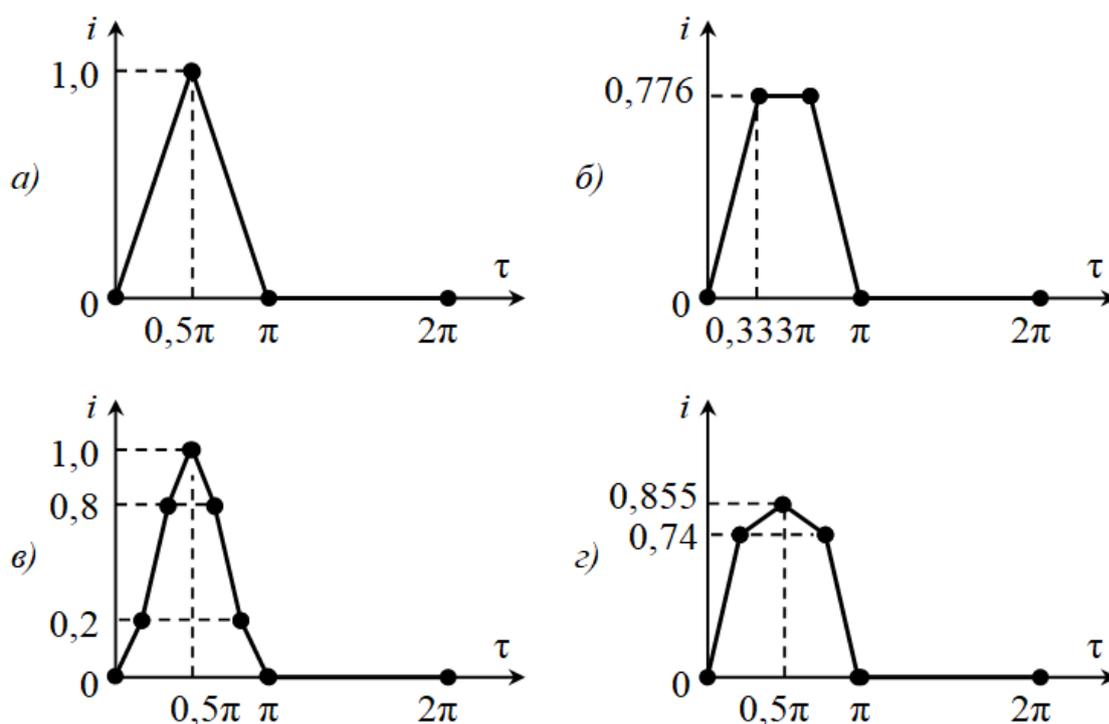
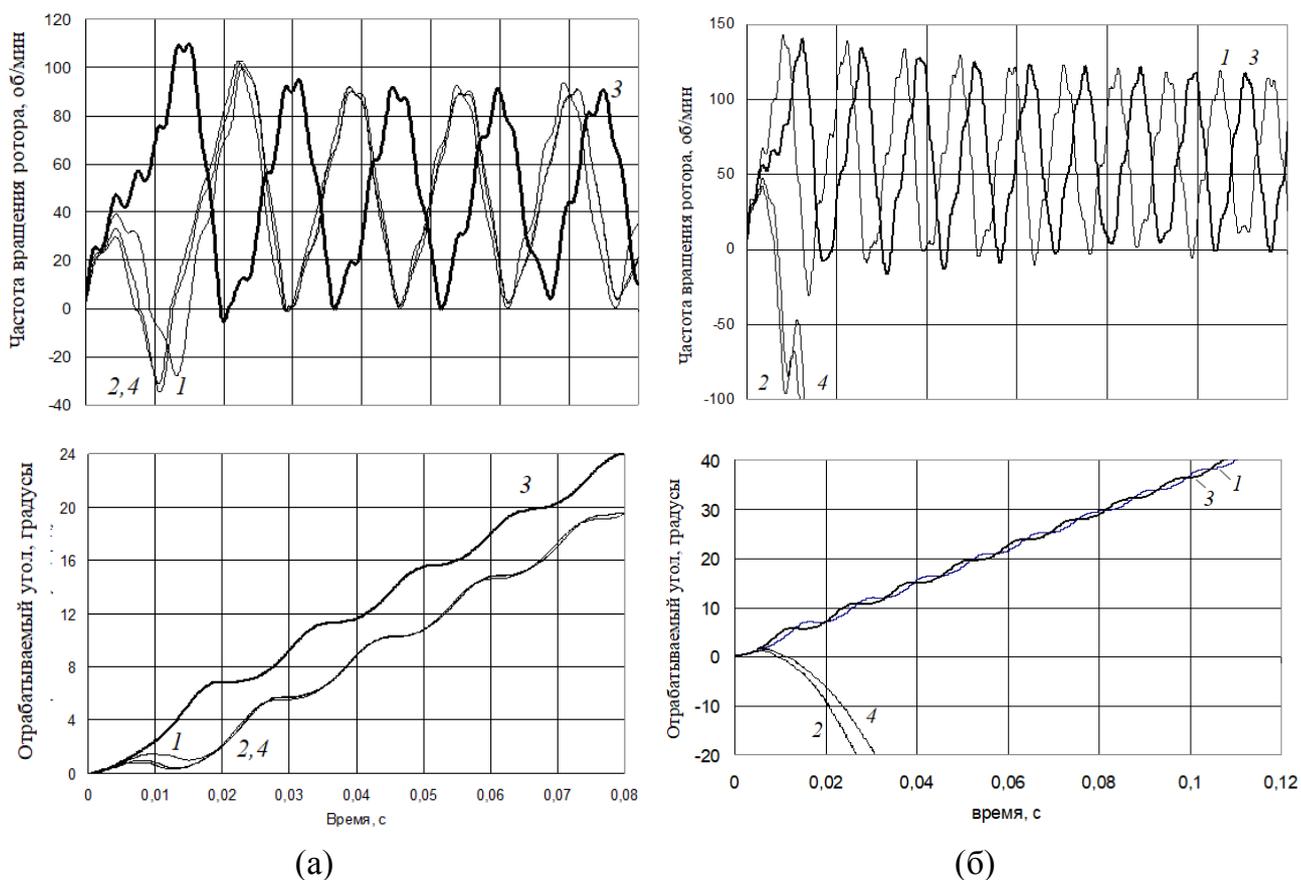


Рис. 1. Формы импульсов для работы в приводе с инвертором тока

Алгоритм воспроизведения движения шагового привода с источником тока содержит в блоке интегрирования единственное уравнение – уравнение движения (1). В нём задаётся форма импульса тока. Индуктивные параметры двигателя с параметрами, представленными в табл. 1, вычислены методом конечных элементов на трехмерной сеточной модели [3], предварительно рассчитанной относительно скалярных магнитных потенциалов.

На рис. 2 представлены расчетные осциллограммы скорости и перемещения ротора при пуске привода для нагрузки на валу типа «сухое трение» (рис. 2, а) и для потенциальной нагрузки (рис. 2, б), составляющей 90% от общего момента, имитирующая работу подъемного механизма.

Расчёты показывают, что изгиб переднего и заднего фронтов импульсов тока по сравнению с линейным его нарастанием и спаданием (рис. 1, в, по сравнению с рис. 1, а) практически не оказывает влияния на плавность движения ротора, которая оценивалась по максимальному угловому ускорению за время переходного процесса. При этом плавность движения ротора при пуске с импульсами трапецеидальной (рис. 1, б) и синусоидальной формы (рис. 1, г) оказалась на 30-40% выше, чем при треугольных импульсах, что можно объяснить большей составляющей первой гармоники в импульсах тока, аппроксимирующих синусоиду.



**Рис. 2** Осциллограммы пуска шагового электропривода на частоту приёмности при различной форме импульсов тока в фазах, 1 – треугольные импульсы, 2 – трапецидальные, 3 – «криволинейный треугольник», 4 - аппроксимированная синусоида

При изменении характера нагрузки обеспечивается положительный результат с треугольными импульсами с прямолинейными фронтами нарастания и спада тока (рис. 1, *а*) и с импульсами тока “криволинейный треугольник” (рис. 1, *в*), кривые 1 и 3 на рис. 2, *б*, соответственно.

**Таблица 1. Параметры двигателя и привода**

Наименование параметра	Значение
Момент нагрузки на валу, типа “сухое трение”, Н·м	3,0
Прочие составляющие момента нагрузки	0
Момент инерции двигателя и привода, кг·м <sup>2</sup>	0,2
Активное сопротивление фазы в нагретом состоянии, Ом	1,29
Максимальное значение индуктивности фазы, Гн	0,0087
Минимальное значение индуктивности фазы, Гн	0,0016
Индуктивность рассеяния лобовых частей, Гн	0,0015
Число зубцов на роторе	100
Число фаз	4

### Выводы

Проведенные расчетно-экспериментальные исследования, выполненные на модели привода с инвертором тока и индукторным двигателем с возбуждением от постоянного магнита, показали, что наилучшие пусковые характеристики обеспечиваются при питании двигателя импульсами тока треугольной формы, с линейным или близким к линейному фронтом нарастания тока.

Благодаря избыточной мощности в начале переходного процесса, привод демонстрирует более уверенный пуск на первых тактах коммутации, сопровождающийся, однако, большей амплитудой переходных колебаний скорости, способных ограничить диапазон рабочих частот.

### Библиографический список

1. Дискретный электропривод с шаговыми двигателями: учеб. пособие, [под ред. Чиликина]. -М.: Энергия, 1971, 624 с.
2. **Смирнов, А.Ю.** Индукторные машины. Проектирование и вычислительный анализ (специальный курс): учебное пособие для вузов / А.Ю. Смирнов - М.: изд-во Форум, 2015, 192 с.
3. **Смирнов, А.Ю.** Синтез 3D-моделей униполярной индукторной машины / А.Ю. Смирнов [и др.] // Электротехника, 2018, №3. С.12-17.

УДК 621.311

Р.Р. Саттаров, В.В Еременко

**ЗАМЕДЛЕНИЕ ОБЪЕКТОВ С ПОМОЩЬЮ УПРАВЛЯЕМОГО  
ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ДЕМПФЕРА**

Уфимский государственный авиационный технический университет

Исследован управляемый электромагнитный тормоз с постоянными магнитами и его воздействие на тела. Использование постоянных магнитов повышает эффективность работы тормоза, однако он отличается невозможностью управления тормозного момента тормоза. Это реализуется с помощью внутреннего сердечника, который можно переводить в максимальное и минимальное положение. В статье исследована основная концепция ЭМТ и проведены приблизительные расчеты его взаимодействия с телом.

In this paper, we investigated a controlled electromagnetic brake with permanent magnets and its effect on bodies. The use of permanent magnets increases the efficiency of the brake, however, it is characterized by the impossibility of controlling the braking torque of the brake. This is implemented with the help of the inner core, which can be transferred to the maximum and minimum position. This paper explores the basic concept of EMT and its approximate calculations of its interaction with the body.

**Ключевые слова:** электромагнитный тормоз, постоянные магниты, тормозной момент, крутящий момент.

**Key words:** electromagnetic brake, permanent magnets, braking torque, torque.

**Введение**

Принцип действия электромагнитных тормозов основан на вихревых токах, которые образуются при взаимодействии первичного, в виде постоянных магнитов или электромагнитов, и вторичного поля [1]. Вследствие отсутствия трения между взаимодействующими частями возможно получение благоприятных характеристик ЭМТ, таких как высокая производительность и хорошая надежность.

Управление ЭМТ возможно путем изменения токов в первичном поле (катушках) [2]. Таким образом можно регулировать тормозной момент (ТМ) тормоза от минимального до максимального значения. Однако основная проблема состоит в том, что необходим источник тока относительно большой мощности.

Также возможно использование постоянных магнитов вместо электромагнитов или катушек с сердечниками [3]. Это приводит к хорошим результатам: увеличивается крутящий момент тормоза и ЭМТ с постоянными магнитами не использует никакого внешнего источника [3], [4], [5]. Но в этой конструкции невозможно регулирование крутящего момента.

В [6] отмечается, что тормозной момент можно изменять, варьируя воздушный зазор между постоянными магнитами и источником вторичного поля.

Известна простая конструкция, содержащая подвижную и неподвижную части [7]. Неподвижная часть представляет собой постоянные магниты или катушки, создающие первичное поле. Подвижная часть – проводящая пластина. Тормозной момент (ТМ) регулируется изменением воздушного зазора путем передвижения подвижной части конструкции. Однако эта конструкция является малоэффективной при работе.

В данной статье рассматривается основная концепция ЭМТ с  $N$  постоянными магнитами с возможностью управления тормозного момента.

### Устройство и принцип действия электромагнитного тормоза

Модель электромагнитного тормоза представлена на рис. 1. Первичная обмотка представлена как постоянные магниты. Основными частями ЭМТ являются цилиндрический электропроводящий ротор, неявнополюсный сердечник, выполненный с радиально расположенными  $N$  постоянными магнитами. Электропроводящий ротор выполнен полым, чтобы можно было поместить неявнополюсный сердечник. Чтобы усилить магнитный поток постоянных магнитов и уменьшить воздушный зазор, внутри полого ротора помещают неявнополюсный сердечник.

### Принцип работы ЭМТ

Схема показана на рис. 2. ЭМТ содержит цилиндрический корпус, на котором установлен индуктор с радиально  $N$  постоянными магнитами. Электропроводящий ротор закреплен на валу, который может вращаться на подшипниках. Внутренний неявнополюсный сердечник с  $2N$  выступающими полюсами закреплен на валу. Сердечник размещен внутри полого электропроводящего ротора.

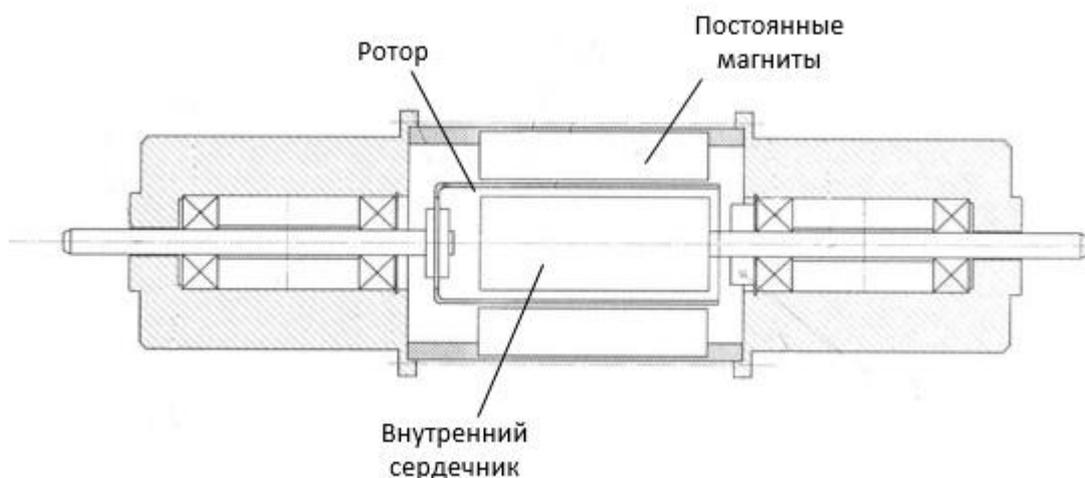
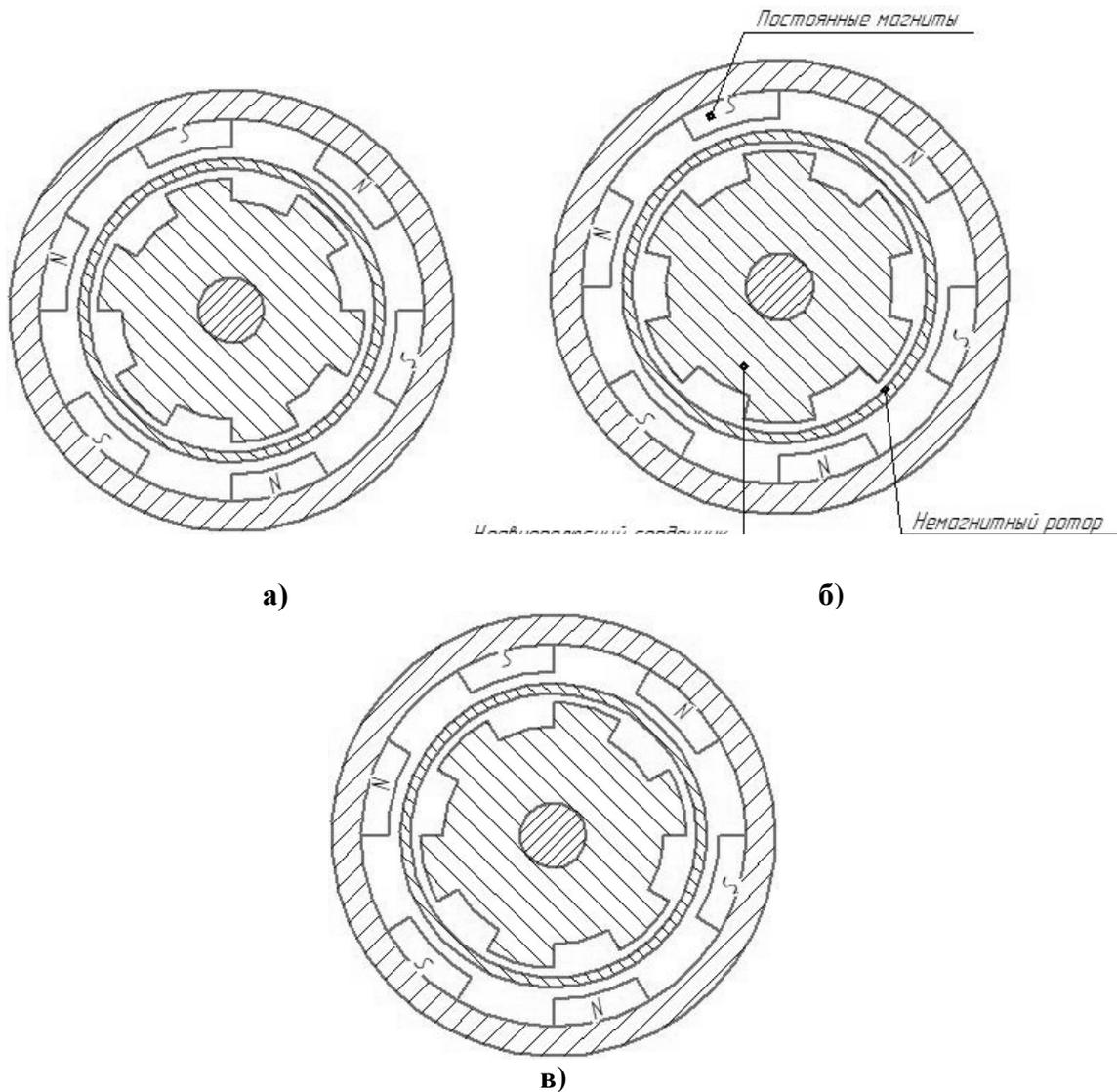


Рис.1. Схема электромагнитного тормоза



**Рис. 2. Тормозной момент: максимальный (а), средний (б), минимальный (в)**

Внутренний неявнополюсный сердечник может вращаться от 0 до 90 электрических градусов. На рис. 2, а сердечник занимает такое положение, что выступающие полюса находятся над постоянными магнитами. При повороте на 90 электрических градусов выступающие полюса сердечника будут расположены между полюсами постоянных магнитов. Поворот будет обеспечивать мало-мощный механический привод, который в данной статье рассматриваться не будет. Фиксирование неявнополюсного сердечника осуществляется фиксатором.

В рабочем положении, показанном на рис. 2, а воздушный зазор между *N* полюсами сердечника и магнита будет минимальным. Следовательно, будет максимальным и магнитный поток, замыкающийся через сердечник. ЭДС и вихревые токи, индуцированные на сердечнике, и тормозной момент в этом положении будут также максимальны.

Для того чтобы уменьшить тормозной момент, необходим поворот неявнополюсного сердечника на 30 электрических градусов, который обеспечивает мало-мощный привод (рис. 2, б). Полюса сердечника будут наполовину перекрывать полюса постоянных магнитов. Воздушный зазор между ними

увеличится на определенную величину. Уменьшится магнитный поток постоянных магнитов, а, следовательно, и магнитный поток.

В нерабочем положении, показанном на рис. 2, *в*, воздушный зазор между полюсами внутреннего сердечника и постоянных магнитов будет максимальным, а тормозной момент – минимальным.

Таким образом, изменяя угол поворота неявнополюсного сердечника, можно контролировать величину тормозного момента ЭМТ.

### Приближенный расчет момента ЭМТ

Электромагнитные поля достаточно сложны для изучения. Для этого существуют различные подходы. Наиболее подходящий подход для разработки и исследования новых устройств основан на уравнениях электродинамики [8],[9]. Оценка крутящего момента демпфера с дисковым ротором и одним полюсом была сделана в [10]. В этой статье вычисляется приблизительное значение максимального тормозного момента.

Уравнения Максвелла применяются для нахождения напряженности вторичного поля [11], [12]:

$$\frac{\partial^2 H_2}{\partial x^2} - \sigma \mu_0 K_d v_r \frac{\delta H_2}{\delta x} - \sigma K_0 \frac{\delta H_2}{\delta t} = \mu_0 \sigma v_r \frac{\delta H_1}{\delta x}$$

Допустим, что, как и в [11], поле постоянных магнитов однородно и отличается только по направлениям. Первичное поле периодически в тангенциальном направлении:

$$T_b = K_d \cdot n,$$

где  $n$  - угловая скорость [об./мин.],  $K_d$  - коэффициент тормозного момента ЭМТ с внутренним сердечником.

Тогда крутящий момент будет равен [12]:

$$K_d = 2p \frac{2\pi}{60} d \sigma r^2 2a B_1^2 b_x,$$

где  $p$  – количество полюсов постоянного магнита,  $d$  – толщина сенки ротора,  $a$  – длина магнитов,  $r$  - радиус цилиндрического ротора,  $b_x$  - ширина перекрываемой части магнита,  $\sigma$  - удельная электропроводность ротора.

$$K_d = \beta K_{d0} \text{ и } T_b = \beta K_{d0} n,$$

где  $\beta = b_x / b_p$  является отношением площадей полюсов постоянных магнитов и внутреннего сердечника.

### Модель замедления объекта

#### Уравнения замедления и их решение

Рассмотрим систему на рис. 3, состоящую из тела массой  $m$ , которое держится на блоке на невесомой нити, электромагнитного тормоза 1, передающего крутящий момент через мультипликатор 2.

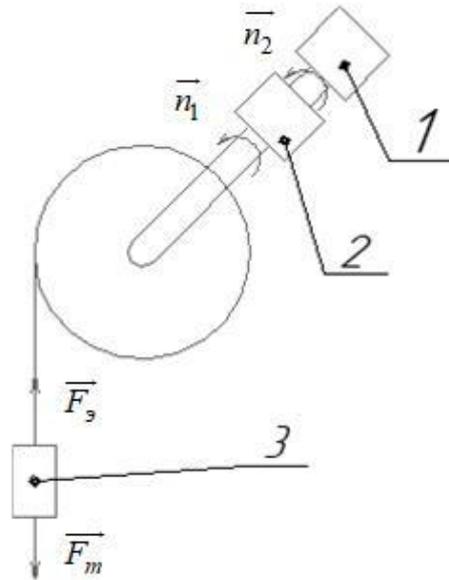


Рис. 3. Схема замедления объекта

На тело действует сила тяжести, сила, которая оказывается в случае включенного режима максимального тормозного момента ЭМТ; силу сопротивления среды и силу натяжения нити учитывать в дальнейших расчетах не будем.

Сила, действующая со стороны электромагнитного тормоза:

$$F_з = K_d K_r v,$$

где  $K_d$  - коэффициент тормозного момента, зависящий от перекрываемости части магнита внутренним сердечником,  $K_r$  - крутящий момент тормоза, зависящий от скорости движения ЭМТ.

Таким образом, уравнение сил, действующих на тело, будет иметь вид:

$$m \frac{dv}{dt} = mg - K_d K_r v.$$

Тогда решением является:

$$v(t) = \frac{m^2 g}{K_d K_r} \left( 1 - e^{-\frac{K_d K_r t}{m}} \right).$$

На рис. 4 представлена зависимость скорости от времени. По причине действия тормозного момента скорость, которая зависит от величины ТМ, достигает установившегося режима.

Установившаяся скорость объекта:

$$v_{уст.} = \frac{mg}{K_d K_r}.$$

В результате передачи крутящего момента от ЭМТ к блоку с помощью мультипликатора появляются потери момента, затрачиваемые на силы трения и т.д. Выразив частоту вращения через скорость тела, получим:

$$K_r = \frac{30}{\pi} \cdot \frac{\alpha mg}{rK_d n_2}$$

Здесь коэффициент  $\alpha = \frac{n_2}{n_1}$ .

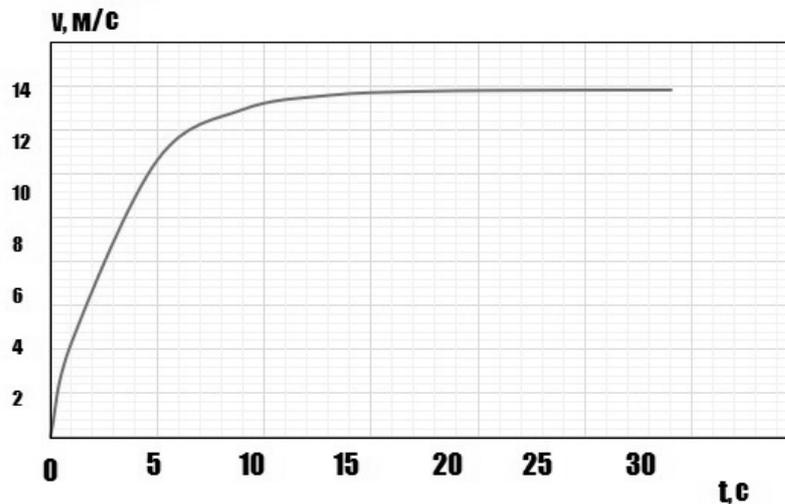


Рис 4. Зависимость скорости объекта от времени при замедлений

Получены графики для различных величин  $K_{r1} > K_{r2} > K_{r3}$  (рис.5):

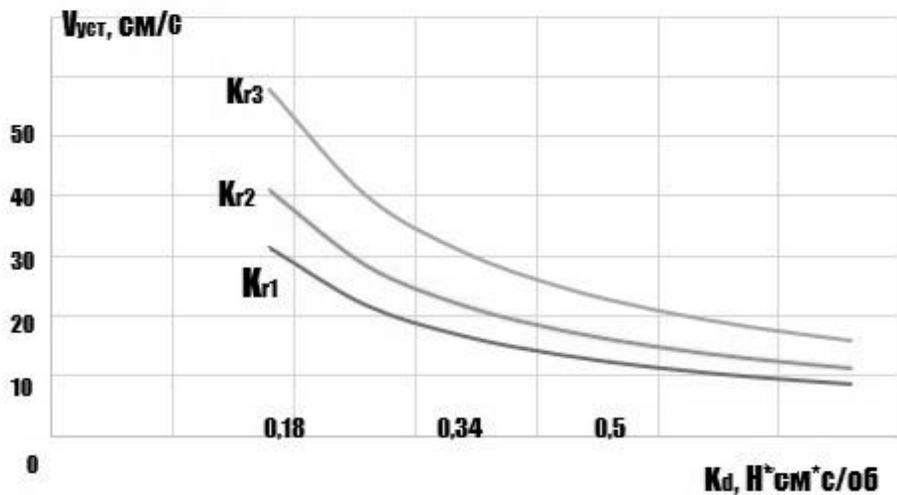


Рис. 5. Зависимость  $v_{уст}$  и  $K_d$

Таким образом, для управления тормозного момента ЭМТ необходимо либо изменять площадь полюсов постоянных магнитов, либо регулировать величину магнитной индукции первичного поля, либо уменьшить частоту вращения электромагнитного тормоза. Наиболее эффективным и наименее затратным является изменение расположения источников первичного и вторичного полей.

## Выводы

1. В статье предложена модель управляемого электромагнитного тормоза с постоянными магнитами и приближенные расчеты крутящего момента. Эта модель имеет достаточно преимуществ, таких как надежность, отсутствие трения, возможность регулировки тормозного момента, отсутствие внешнего источника тока.

2. Предлагаемая модель может быть использована как замедляющее устройство для транспорта, различных двигателей. Также его можно использовать в различных устройствах, где требуется контролировать крутящий момент. При этом возможно регулирование скорости и отсутствуют затраты энергии.

## Библиографический список

1. **Sodano, H.A.** Eddy current damping in structures / H. A. Sodano, J. S. Bae / Shock and Vibration Digest - 2004.
2. **Lee, K.** Optimal robust control of a contactless brake system using an eddy current / K. Lee, K Park / Mechatronics, - 1999.
3. **Vavilov, V.** Selecting the Rotor's Magnetic System in Electromechanical Energy Converters with Highly Coercive Permanent Magnets // April, с. 0–4, - 2018.
4. **Gand, J.F.** PERMANENT MAGNET MOTOR // July, - 2013.
5. **Oliver, G.** Stronger, Lighter, and More Energy Efficient // Magnetic Materials and Devices for the 21st Century: Adv. Mater., - 2010.
6. **Mahmood, S.** CHAPTER 5 // Permanent Magnet Applications, January, - 2016.
7. **Shin, H.J.** Analytical Torque Calculations and Experimental Testing of Permanent Magnet Axial Eddy Current Brake / H.J. Shin [et al.] / № 49. - 2013.
8. **Neiman, V.Y.** On the question of taking into account the main dimensions when selecting type of electromagnet according to value of constructive factor / V.Y. Neiman [et al.] // Russ. Electr. Eng., - 2011.
9. **Neyman, L.A.** Simulation of processes in an electromagnetic converter with energy loss in the massive magnetic core / L.A. Neyman, V.Y. Neyman, A.S. Shabanov // International Conference of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices, EDM, - 2016.
10. **Simeu, E.** Modeling and control of an eddy current brake / E. Simeu, D. Georges // Control Eng. Pract., - 1996.
11. **Potapov, L.A.** Modeling of salient-pole brake with hollow nonmagnetic rotor / L.A. Potapov, S.Y. Babak // Russ. Electr. Eng., - 2011.
12. **Sattarov, R.R.** The Controllable Eddy Current Brakes with Permanent Magnets: Basic Concept / R.R. Sattarov // 10-th International Conference on Electrical Power Drive Systems, ICEPDS 2018 - Conference Proceedings, - 2018.

УДК 531.768

Р.А. Сафиуллин, И.Ф. Янгиров, Ю.Г. Ишмуратов, Р.А. Ямалтдинов

**ПРОЕКТИРОВАНИЕ ДЕФЕКТΟΣКОПА НА ОСНОВЕ СПИРАЛЬНОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА**

Нефтекамский филиал Башкирского государственного университета

Представлена разработанная математическая модель пружинного электропривода с ногофункциональной способностью дефектоскопа, обладающего повышенной избирательностью и разрешающей способностью к технологическим дефектам контролируемого изделия (нефте- и газопроводы, их сварные швы). Работа спирального электропривода для дефектоскопов (СЭПД) основана на том, что при появлении на внутренней и внешней поверхностях изделия продольных и поперечных дефектов изменяется сопротивление магнитному потоку. В результате данного эффекта при движении СЭПД внутри изделия на пружинной обмотке в результате изменения тока цепи появляется сигнал, определяющий местонахождение и параметры дефектов. Технические возможности указанного привода - дефектоскопа позволяют исследовать обнаруженные дефекты при следующих метрологических параметрах: погрешность измерения толщины стенки трубы 0,4 мм; минимальная протяженность дефекта типа «трещина» вдоль оси трубы 40 мм; минимальная протяженность дефекта типа «поперечная трещина» 1/6 окружности, многофункциональность.

The article presents the developed mathematical model of electric spring with multifunctional ability of the flaw detector, which has increased selectivity and resolution to the technological defects of the controlled product (oil and gas pipelines, their welds). The operation of the electric spring drive for flaw detectors (SDFD) is based on the fact that the appearance on the inner and outer surfaces of the product of longitudinal and transverse defects changes the resistance to magnetic flux. As a result of this effect, when the SDFD moves inside the product on the spring winding, as a result of a change in the current of the circuit, a signal appears that determines the location and parameters of the defects.

The technical capabilities of the specified drive - flaw detector allow to investigate the detected defects with the following metrological parameters: error in measuring the thickness of the tube wall 0.4 mm; minimum length of the defect of the "crack" type along the pipe axis 40 mm; minimum length of the defect of the "transverse crack" type 1/6 of the circle, versatility.

**Ключевые слова:** электропривод, спиральная пружина, дефектоскоп, дефект, резонанс, настройка.

**Key words:** electric drive, spiral spring, defectoscope, defect, resonance, tuning.

В настоящее время в нефтегазовой и нефтехимической промышленности используется большое количество различного оборудования неразрушающего контроля изделий, использующие следующие технологии:

- ультразвуковых волн;
- распространения радиоволн;
- излучения гамма – волн;
- термографические;
- электромагнитные.

Рассмотрим более подробно существующие типы дефектоскопов [1]. По приводу дефектоскопов в промышленности известны передвижной гамма-дефектоскоп «Магистраль» («Трасса»), который применяют для контроля качества сварных соединений трубопроводов в процессе монтажа и эксплуатации. В комплект передвижного аппарата входят радиационная головка, транспортный кожух радиационной головки, ручной пульт управления, электрический пульт управления, самоходная тележка, блок электропитания, транспортно-перезарядный контейнер, комплект приспособлений. Передвижной гамма-дефектоскоп «Магистраль-1» используют для контроля качества сварных стыков магистральных трубопроводов диаметром 1420 мм с толщиной стенки до 40 мм. Он комплектуется источником Cs. Электромеханический привод дефектоскопа обеспечивает перемещение радиационной головки внутри трубопровода на расстояние до 1,5 км. Дефектоскоп используют с автоматизированным комплексом АКП-141.

Для автоматизированных комплексов применяют самоходную установку «Парус-3М», которую доставляют к месту работы в закрытом автомобиле. Для просвечивания стыков трубопроводов установка «въезжает» в трубопровод, а после контроля возвращается обратно. Установка «Парус-3М» в трубопроводе перемещается от электродвигателя со скоростью 15 м/мин. На установке может быть установлен любой рентгеновский аппарат или гамма-дефектоскоп. Гамма-дефектоскоп с точностью  $\pm 2$  мм устанавливается у стыка благодаря находящемуся снаружи трубы датчику управления и корректирующему устройству. Гамма-дефектоскоп при просвечивании совершает круговое движение для панорамного просвечивания стыка. Контроль 40-80 стыков в смену установка может осуществлять в непрерывном технологическом потоке, следуя непосредственно за центратором (ждущий режим), или непрерывно в сваренной нитке.

Для контроля качества сварных соединений трубопроводов применяют высокопроходимые передвижные лаборатории РМЛ-2В и ВЛК-2. Лабораторию РМЛ-2В устанавливают на шасси автомобиля ГАЗ-66, а ВЛК-2 - на тягач ГТ.

Сравнение предлагаемого электропружинного привода-дефектоскопа с применяемыми на практике (например, известный малогабаритный портативный электромагнит МЭД-120 или дефектоскоп УИУ "Сканер+" (модель "Скаруч"), электромагнитный дефектоскоп-толщиномер ЭМДС-С), показывает преимущества приведенной модели по таким параметрам как универсальность, экономичность, удобство в эксплуатации и при этом не уступает уже апробированным в промышленности дефектоскопам по техническим характеристикам.

Предварительные ожидаемые технические характеристики:

-скорость передвижения:	0,1- 0,8 м/с
-напряжение питания:	220 В
-частота сети питания:	50 Гц
-мощность установки:	0.8 кВт
-КПД:	60%
-масса:	50 кг.

Яркие примеры износа нефтегазовых труб и аварий на них показывают, что устранение последствий разливов нефти и выброса продуктивного газа занимают продолжительное время и очень трудозатратны, материалоёмки и могут привести к негативным техногенным чрезвычайным последствиям. Поэтому работа комплексных систем ранней диагностики и прогнозирования таких случаев является актуальной задачей нефтегазового дела.

В данной работе разработана математическая модель работы рассматриваемого спирального электропривода для дефектоскопии (СЭПД), которая найдёт своё применение в дефектоскопии нефтегазопроводов - неразрушающего контроля наличия, локализации продольных и поперечных трещин на их заданных участках или магистралах.

Рассмотрим конструкцию электропружинного двигателя, который содержит полый корпус 1, внутри которого имеется ось 5 по всей длине корпуса (рис. 1). На ось свободно одето инерционное кольцо 4 с возможностью свободного перемещения на оси. На ось также свободно продета электропроводящая цилиндрическая пружина 3, которая одним концом жестко закреплена на головке корпуса, а другим связана с кольцом. В головке корпуса установлены блоки питания и управления 2, имеющие автономное питание с целью создания импульсного напряжения. При получении импульса напряжения по электропроводящей пружине протекает ток, причем в соседних ветвях имеющих одинаковые направления. Между витками возникает притягивающая электродинамическая сила, вследствие чего пружина сжимается, т.е. заряжается. Когда импульс тока равен нулю, пружина разжимается с кольцом, т.е. разряжается, на корпус двигателя действует импульс реактивной движущейся силы. Дальше процесс повторяется, и движение двигателя стабилизируется. Конструкция проста, надежна, удобна в эксплуатации. Такой двигатель можно использовать для транспортировки диагностической аппаратуры внутри нефтегазопроводов. Двигатели такой конструкции найдут широкое применение в двигателестроении, машиностроении, приборостроении, медицине.

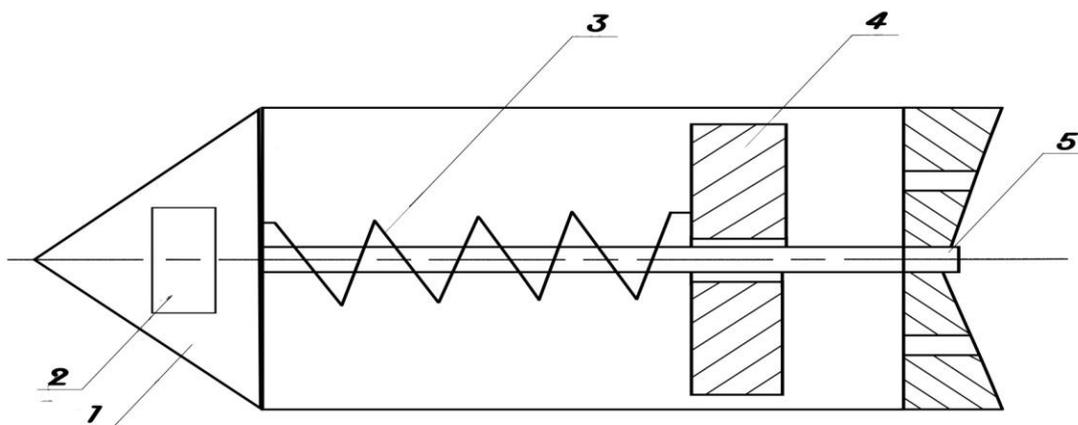


Рис. 1. Электропружинный двигатель

Математическая модель СЭПД – электропружинного двигателя строится на основе дифференциальных уравнений [2-4]

$$\frac{\partial^2 s_w}{\partial r_w^2} + \frac{1}{r_w} \times \frac{\partial s_w}{\partial r_w} - \frac{1}{r_w^2} s_w = \rho \frac{1 - \mu^2}{E} \times \frac{\partial^2 s_w}{\partial t^2};$$

$$\frac{\partial^2 s_w}{\partial t^2} + 2n\xi \times \frac{\partial s_w}{\partial t} + \omega_0^2 s_w = -2\pi A_{\text{ex}} \sin \omega t \times s_w +$$

$$+ \left\{ \frac{i^2}{2} \left[ \frac{dL_{ow}}{dr_{ow}} + 2 \sum_1^N \sum_1^N \frac{dM_{ow,n}}{dr_{ow}} \right] + \left[ \sum_1^N K_{Lw} + 2 \sum_1^N \sum_1^N K_{Mw,n} \right] + B_o il \right\} \cdot s_w$$

$$e_w = B_o l_w \frac{\partial s_w}{\partial t} +$$

$$iR + \frac{di}{dr} \left( \sum_1^N L_{ow} + 2 \sum_1^N \sum_1^N M_{ow,n} \right) + \frac{di}{dt} \left( \sum_1^N K_{Lw} s_w + \sum_1^N \sum_1^N K_{Mw,n} s_w \right) +$$

$$+ i \left( \sum_1^N K_{Lw} \frac{ds_w}{dt} + 2 \sum_1^N \sum_1^N K_{Mw,n} \frac{ds_w}{dt} \right)$$

$$s_w \Big|_{r_w=r_0} = 0; \quad s_w = N \Big|_{r_w=R_0} = 1;$$

где  $s_w$  - радиальное перемещение,  $w$ -го витка спирали;  $E$  - модуль упругости первого рода;  $\mu$  - коэффициент Пуассона;  $\eta\xi$  - коэффициенты трения и демпфирования;  $\omega_0$  - частота собственных колебаний;  $\omega$  - частота вынужденных колебаний;  $r_w$  - радиус  $W$ -го витка;  $l_w$  длина участка витка;  $B_o$  - индукция магнитного поля;  $s_w(1)$ - форма колебаний спирали магнитного поля;  $R$  - активное сопротивление спирали,  $e(t)$  - подводимое напряжение,  $L_{ow}$  и  $M_{ow}$  - индуктивность и взаимоиндуктивность спирали в статическом состоянии,  $K_{Lw}, K_{Min}$  - некоторые конструктивные постоянные.

Система дифференциальных уравнений (1) с переменными коэффициентами представляет собой математическую модель обобщенной конструкции СЭПД со спиральным вторичным элементом и позволяет исследовать её характеристики.

Пусть электропроводящая спиральная пружина подключена к синусоидальному источнику тока  $I = I_m \sin(\omega t)$ , тогда решение системы (1) упрощается, и уравнение колебания точки приведения системы будет иметь вид

$$\ddot{x} + 2n\xi\dot{x} + \omega_0^2 x = \sum s_w(1) \left\{ \frac{I_m^2}{2} \left[ \left( \sum \frac{dL_{ow}}{dr_{ow}} + 2 \sum \sum \frac{dM_{ow}}{dr_{ow}} \right) + \left( \sum K_{Lw} + 2 \sum \sum K_{Mw,n} \right) \right] \sin^2 \omega t + B_o I_m l \sin \omega t \right\}. \quad (2)$$

В результате, решение полученного нелинейного дифференциального уравнения находится как сумма решений вида

$$x_1 = \frac{\sum s_w(1) I_m^2}{M_{np} \omega_0^2} \frac{1}{4} \left[ \left( \sum \frac{dh_{ow}}{dr_{ow}} + \sum \sum \frac{dM_{ow}}{dr_{ow}} \right) + \left( \sum K_{Lw} + 2 \sum \sum K_{rwn} \right) \right], \quad (3)$$

$$x_2 = \frac{\sum s_w(1) I_m^2}{M_{np} \omega_0^2} \frac{1}{4\sqrt{(1-4q^2)+16D^2q^2}} \left[ \left( \sum \frac{dM_{ow}}{dr_{ow}} + 2 \sum \sum \frac{dM_{ow}}{dr_{ow}} \right) + \left( \sum K_{vw} + 2 \sum \sum K_{vwn} \right) \right] \cos(2\omega t + \varphi_2), \quad (4)$$

$$x_3 = \frac{\sum s_w(1)}{M_{np} \omega_0^2} \frac{I_m B_0 l}{\sqrt{(1-q^2)^2 + 4D^2 q^2}} \sin(\omega t + \varphi_3) \quad (5)$$

Суммарное результирующее усилие, развиваемое пружинной СЭПД в режиме вибродвигателя, находится из второго закона Ньютона [5,6] как произведение приведенной массы на ускорение точки приведения системы

$$F_\Sigma = M_{np} \left( \frac{d^2 x_1}{dt^2} + \frac{d^2 x_2}{dt^2} + \frac{d^2 x_3}{dt^2} \right), \quad (6)$$

Подстановка выражений (2) – (5) в уравнение (6) позволяет определить общую формулу для расчёта характеристик электропружинного двигателя

$$F_\Sigma = \frac{\omega^2}{\omega_0^2} \sum s_w(1) \left\{ \frac{4I_m^2 \left[ \left( \sum \frac{dl_{ow}}{dr_{ow}} + 2 \sum \sum \frac{dM_{ow}}{dr_{ow}} \right) + \left( \sum K_{lw} + 2 \sum \sum K_{,mwn} \right) \right]}{\sqrt{(1-4q^2) + 16D^2 q^2}} \cos(2\omega t + \varphi_3) - \frac{I_m B_0 l}{\sqrt{(1-q^2)^2 + 4D^2 q^2}} \sin(\omega t + \varphi_3) \right\} \quad (7)$$

Из полученного выражения (7) видно, что электродинамическое усилие двигателя представляет собой сумму сил с двойной частотой источника. СЭПД с пружинным вторичным элементом представляет также интерес с точки зрения генератора низкочастотных колебаний, поэтому необходимо, чтобы  $F_\Sigma = (2\omega) \ll F_{\Sigma M}(\omega)$ , т.е. исключить нежелательные вибрации с двойной частотой. Этого можно добиться, исключительно варьируя геометрические размеры пружины - шаги витка, поперечные размеры, а также увеличивая индукцию первичного магнитного поля. В случае необходимости генератора двойной частоты нужно просто исключить постоянное магнитное поле. Из этих соображений усилие, развиваемое электропружинным двигателем–дефектоскопом, находится в общем случае из соотношения

$$F_{\Sigma M} = I_m B_0 \frac{\omega^2}{\omega_0^2} \frac{\sum u_w(1)}{\sqrt{(1-q^2)^2 + 4D^2 q^2}} \sin(\omega t + \varphi) \quad (8)$$

Рассмотрим предельные частные случаи из выражения (8) для двигательного режима.

1. Аргумент функции Бесселя - бесконечно малая величина. В этом случае соотношение запишется в виде

$$F = \frac{\sqrt{2}}{2} I_m B_0 \frac{R_1 R_0}{R_0^2 - \gamma_0^2 R_1^2} \sum_{w=1}^N \frac{\gamma_w^2 - \gamma_0^2}{\gamma_w} \frac{q^2}{\sqrt{(1-q^2)^2 + 4D^2 q^2}}, \quad (9)$$

или переходя к геометрическим размерам

$$F = \frac{\sqrt{2}}{2} I_m l B_0 \frac{R_0}{R_0^2 - r_0^2} \sum_{w=1}^N \frac{r_w^2 - r_0^2}{r_w} \frac{q^2}{\sqrt{(1-q^2)^2 + 4D^2 q^2}} \quad (10)$$

2. Аргумент функции Бесселя = бесконечно большая величина. Действующее усилие в этом случае:

$$F = \frac{\sqrt{2}}{2} I_m l B_0 \frac{\sum \left[ \sin \left( l_0 \gamma_w - \frac{\pi}{4} \right) - A \cos \left( l_0 \gamma_w - \frac{\pi}{4} \right) \right]}{\sin \left( \frac{l_0 R_0}{R_1} - \frac{\pi}{4} \right) - A \cos \left( \frac{l_0 R_0}{R_1} - \frac{\pi}{4} \right)} \frac{q^2}{\sqrt{(1-q^2)^2 + 4D^2 q^2}}, \quad (11)$$

и в случае двухвитковой спиральной машины с бесконечно большими геометрическими размерами

$$F = \frac{\sqrt{2}}{2} I_m l B_0 \frac{q^2}{\sqrt{(1-q^2)^2 + 4D^2 q^2}}, \quad (12)$$

что совпадает с формулой, полученной ранее для расчета классических электрических машин в режиме вибрационных колебаний с линейными геометрическими размерами [5-7].

Для преобразования формулы (12) используем закон Ампера:

$$2\pi l N B r = F_{\Sigma}, \quad (13)$$

где  $N$  – число витков спирали;  $r$  – радиус витка спирали;  $B$  – индукция в спирали;  $I$  – ток в витках спирали.

Магнитная индукция, создаваемая спиралью, будет равна

$$B = \frac{F_{\Sigma M}}{2\pi N l r}. \quad (14)$$

Сила тока в витках спирали

$$I = \frac{U_{\text{вх}}}{\sqrt{R^2 + w^2 l^2}}, \quad (15)$$

где  $R$  – активное сопротивление спиральной пружины;  $U_{\text{вх}}$  – напряжение источника питания.

Подставляя (13)-(15) в выражение (12), получим для индукции магнитного поля формулу

$$B = F_{\Sigma M} * \frac{\sqrt{R^2 + w^2 l^2}}{2\pi N U_{\text{вх}}}. \quad (16)$$

Чувствительность СЭПД определяется из выражения

$$\beta = \frac{dB}{dt}, \quad (17)$$

т.е. СЭПД одновременно может быть и носителем дефектоскопов, и одновременно выполнять роль дефектоскопа.

### Результаты построенной модели

Формулы (11) – (17) позволяют вычислить все основные электромеханические характеристики СЭПД.

Малое перемещение СЭПД за один такт работы равно

$$kx = F_{\Sigma} \Rightarrow x = s = \frac{F_{\Sigma}}{k}, \quad (18)$$

где  $k$  – жёсткость пружины.

Вычислим время перемещения СЭПД внутри нефтегазопровода за один такт

$$S = \frac{at^2}{2} \Rightarrow t = \sqrt{\frac{2S}{a}}. \quad (19)$$

Ускорение перемещения

$$a = \frac{F_{\Sigma}}{M + m}, \quad (20)$$

где  $M$  - масса установки;  $m$  - масса инерционного элемента.

Время работы пружинного привода

$$t = \sqrt{\frac{2(M + m)S}{k}}. \quad (21)$$

Скорость движения СЭПД внутри трубопровода равна

$$V = F_{\Sigma} \sqrt{\frac{1}{k(M + m)}}. \quad (22)$$

Таким образом, получены все практически соотношения для проектирования ЭППД по техническим требованиям испытуемого объекта.

### Выводы

1. В работе разработана новая конструкция оригинального многофункционального СЭПД.
2. Создана математическая модель СЭПД.
3. Получены выражения как для определения силовых электромеханических приводных характеристик конструкции, так и её чувствительности, в зависимости от геометрических размеров и магнитных характеристик системы. СЭПД экономичен, технологичен и прост в эксплуатации относительно известных дефектоскопов.

### Библиографический список

1. Герасимов, В.Г. Методы и приборы электромагнитного контроля промышленных изделий / В.Г. Герасимов, В.В. Клюев, В.Е. Шатерников - М.: Энергоатомиздат. – 1983. -265с.
2. Патент РФ №2028835. Устройство для возбуждения крутильных колебаний. / И.Х. Хайруллин, И.Ф. Янгиров, Ф.Р. Исмагилов, Т.И. Хайруллин // БИ №5, 20.02.95.
3. Сафиуллин, Р.А. Методика инженерного расчёта электропружинного привода / Р.А. Сафиуллин, И.Ф. Янгиров, Д.Ф. Максудов // Электротехнические комплексы и системы: материалы всероссийской научно-практической конференции, посвящённой 110-летию А.М. Бамдаса. Уфа: РИК УГАТУ, 2015. – С. 278- 284.

4. **Сафиуллин, Р.А.** Инженерный расчёт электромеханических параметров газопроводного спирального индукционного нагревателя / Р.А. Сафиуллин, И.Ф. Янгиров // Достижения и приложения современной информатики, математики и физики: материалы VII Всероссийской научно-практической конференции. – Уфа: РИЦ БашГУ, 2019. – 618 с. – С. 156-168.
5. **Немцов, М.В.** Справочник по расчету параметров индуктивности / М.В. Немцов – М.: Энергоатомиздат. - 1989. – 192с.
6. **Вольдек, А. И.** Индуктивные магнитогидродинамические машины с жидкометаллическим рабочим телом / А. И. Вольдек - Л.: Энергия. – 1970 – 448с.
7. **Бессонов, Л.А.** Теоретические основы электротехники / Л.А. Бессонов - М.: Высшая школа.-1978. - 528 с.

УДК 62-503.05

А.В. Синюков, Т.В. Синюкова

## НЕЧЕТКИЕ РЕГУЛЯТОРЫ В СИСТЕМАХ УПРАВЛЕНИЯ ОБЪЕКТАМИ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИХ ПРЕДПРИЯТИЙ

Липецкий государственный технический университет

Рассмотрена возможность применения нечеткого регулятора в системе управления подъемно-поворотным столом, служащим для осуществления поворота изделия в горизонтальной плоскости над устройством для транспортировки на металлургических предприятиях. Использование интеллектуальных систем на устройствах данного типа позволяет уменьшить колебания в электромеханической системе, улучшая пусковые и тормозные характеристики объекта.

The possibility of using a fuzzy controller in the control system of a tilt-turn table, which serves to rotate the product in a horizontal plane above the device for transportation at metallurgical enterprises, is considered. The use of intellectual systems on devices of this type allows reducing oscillations in the electromechanical system, improving the starting and braking characteristics of the object.

**Ключевые слова:** фаззификация, нечеткий регулятор, система нечеткого управления.

**Key words:** fuzzification, fuzzy controller, fuzzy control system.

### Модель с нечетким регулятором

Целью автоматического управления объектами является обеспечение последовательности операций, позволяющих улучшить функционирование системы, ее точность, производительность, исключить ошибки, связанные с человеческим фактором. Автоматизация широко распространена на технологических объектах с большим количеством обратных связей.

Рассматриваемый подъемно-транспортный механизм, предназначенный для передачи груза (рулонов) без использования дополнительного оборудования, задействован в сложном технологическом процессе. В своей структуре он имеет зубчатые соединения в редукторе, к которым предъявляются требования по обеспечению плавности хода и безаварийности.

Исследование направлено на разработку математической модели, содержащей блоки нечеткой логики, осуществляющие управление динамическим объектом, при условии неопределенности, обусловленной сложностью механизма и недостаточностью информации об объекте управления, необходимой для предоставления численного представления о процессах, происходящих в системе [1, 2, 3, 4, 5].

Циклограмма работы механизма состоит из разгона механизма до номинальной скорости, его поворота на этой же скорости и торможения на скорости от номинального значения до нуля (остановка).

На действующем агрегате процесс торможения двигателя осуществляется в одну ступень с многочисленным использованием зубчатых передач, что не позволяет достичь плавной пусковой и остановочной характеристики электропривода. Переходный процесс сопровождается соударением зубчатых частей механизма, что может привести к быстрому его износу. При торможении не учитывается отсутствие или наличие груза, при любых условиях оно начинается в одно и то же время.

Использование нечеткого регулятора обеспечит более высокую точность и оптимальный поворот стола, необходимую точку начала торможения.

В основе разработки модели с нечетким управлением лежит использование фаззи-множеств, базой для которых являются данные необходимых физических величин. В нашем случае необходимы значения угла поворота стола и его скорость при повороте. Термы служат для качественной оценки фаззи-множеств. Функция принадлежности характеризует степень принадлежности определенного значения из фаззи-множества к конкретному терму. На рис. 1 представлены функции выбранных переменных. Функциональные данные переменных лежат в диапазоне от нуля до единицы, принимая значения из всего множества. В связи с тем, что целью усовершенствования системы управления является обеспечение плавности пуска и останова, то возникает необходимость в появлении терм «Очень большое» (ОБ), «Большое» (Б), «Среднее» (С), «Маленькое» (М), «Очень маленькое» (ОМ) значения скорости.

Следующим этапом является создание базы знаний (табл. 1), определяющей данные выходного сигнала нечеткого регулятора, в зависимости от комбинаций данных входных сигналов.

Формирование последовательности управления происходит в несколько этапов, что отражено на рис. 2.

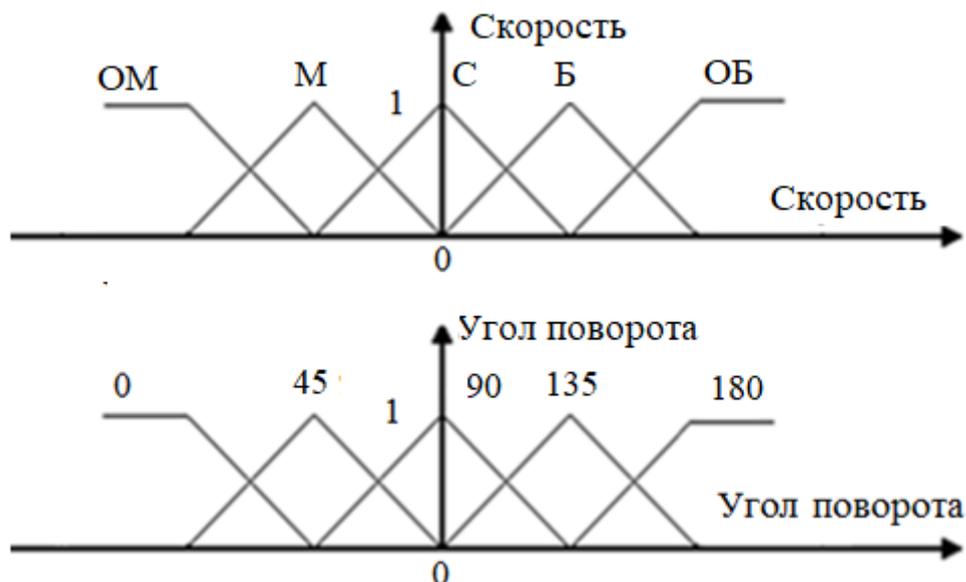


Рис. 1. Функции принадлежности

Таблица 1

		База знаний				
Угол \ Скорость		ОМ	М	С	Б	ОБ
0		С	С	М	М	ОМ
45		Б	С	С	М	М
90		ОБ	Б	С	С	М
135		ОБ	ОБ	Б	С	С
180		ОБ	ОБ	ОБ	Б	С

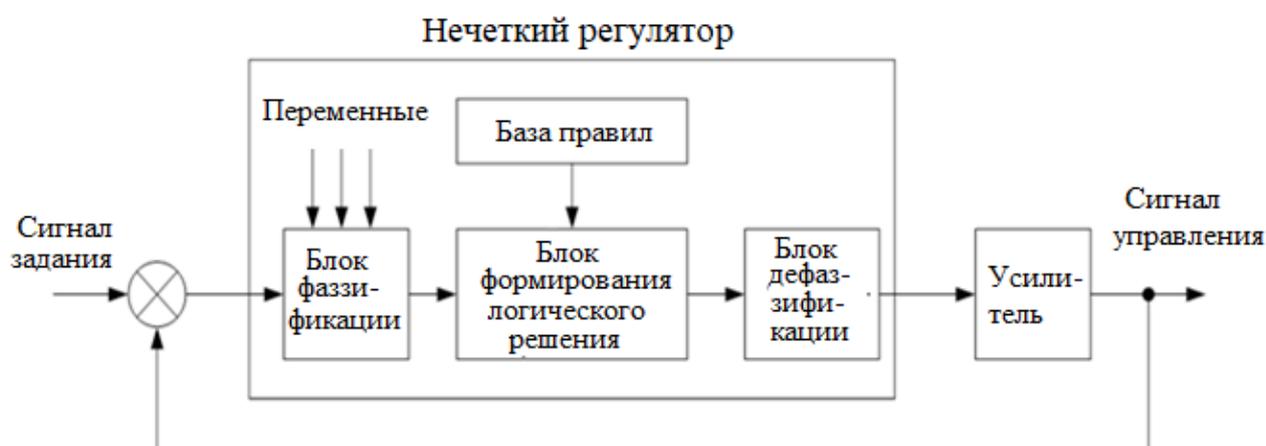


Рис. 2. Система с блоком нечеткого управления

Фаззификация необходима для перехода от физических величин в лингвистические переменные термы, выдающие для каждого временного момента необходимые функции принадлежности. Посредством блока дефаззификации осуществляется перевод терм в сигнал управления, поступающий на объект управления.

Для наглядного отображения переходных процессов, происходящих в электродвигателе, были разработаны математические модели в среде имитационного моделирования *Matlab* без нечеткого регулятора и с ним.

График переходных процессов без использования в системе управления нечеткого регулятора при разных исходных углах поворота (90 градусов и 180 градусов) представлен на рис. 3.

В обоих случаях значение статического момента равно нулю. Использование двухмассовой системы позволяет производить учет нагрузки и механических связей в самом объекте исследования, и, соответственно, позволяет отслеживать появляющиеся в системе колебания и оценивать их величину и характер изменения. Полученные данные позволяют сделать вывод о том, что изменение скорости ведет к появлению значительного количества колебаний, так как происходит учет связанных инерционных масс, что характерно для двухмассовой

электромеханической системы реального объекта. Также анализ полученных графиков говорит о том, что поворот стола на 180 градусов является более тяжелым и продолжительным режимом, поэтому дальнейшее моделирование производится для самого тяжелого режима работы.

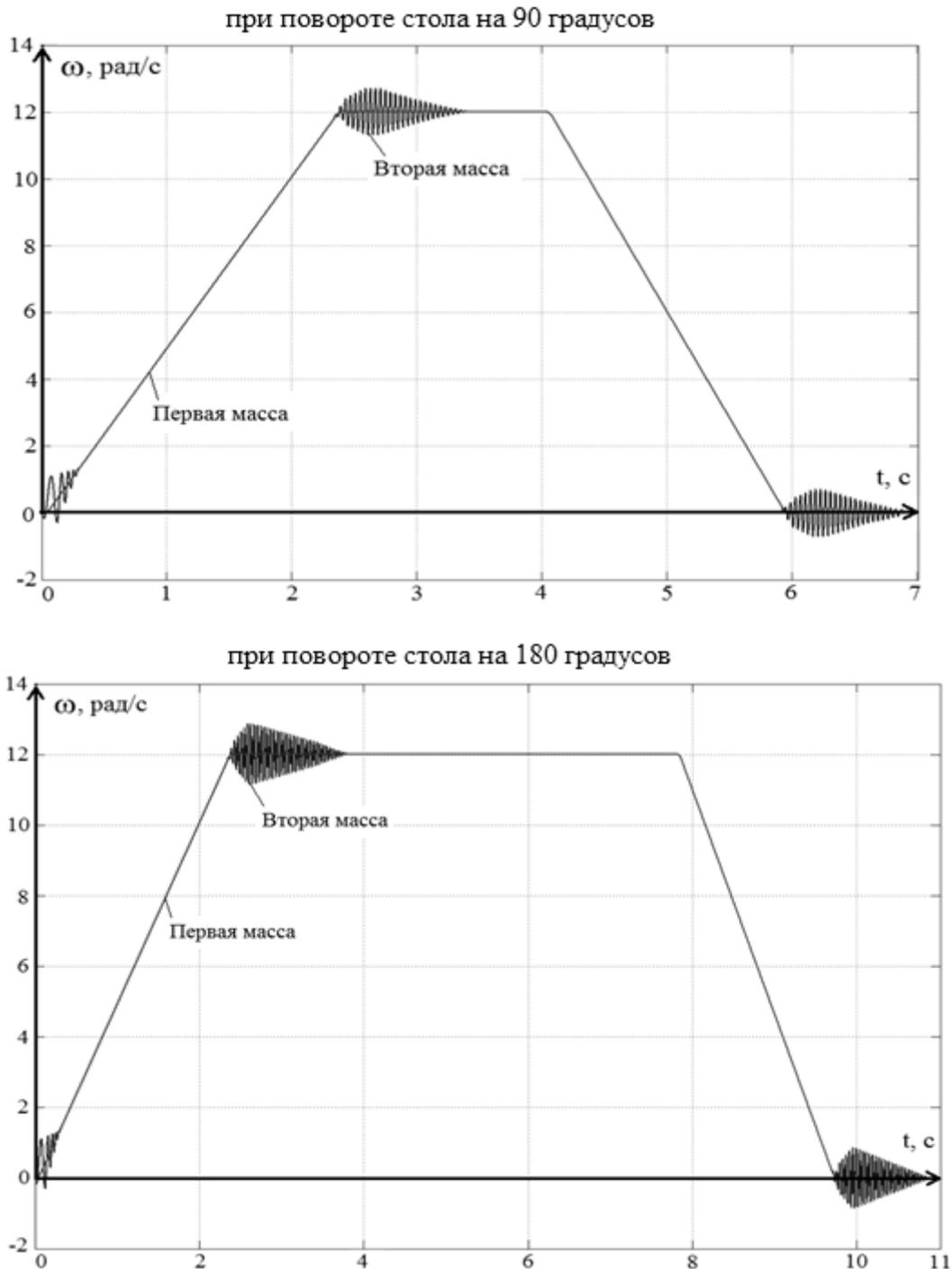


Рис. 3. Графики переходных процессов в системе с ПИД-регулятором

На следующем этапе произведено моделирование с использованием нечеткого регулятора, полученный график переходного процесса представлен на рис. 4.

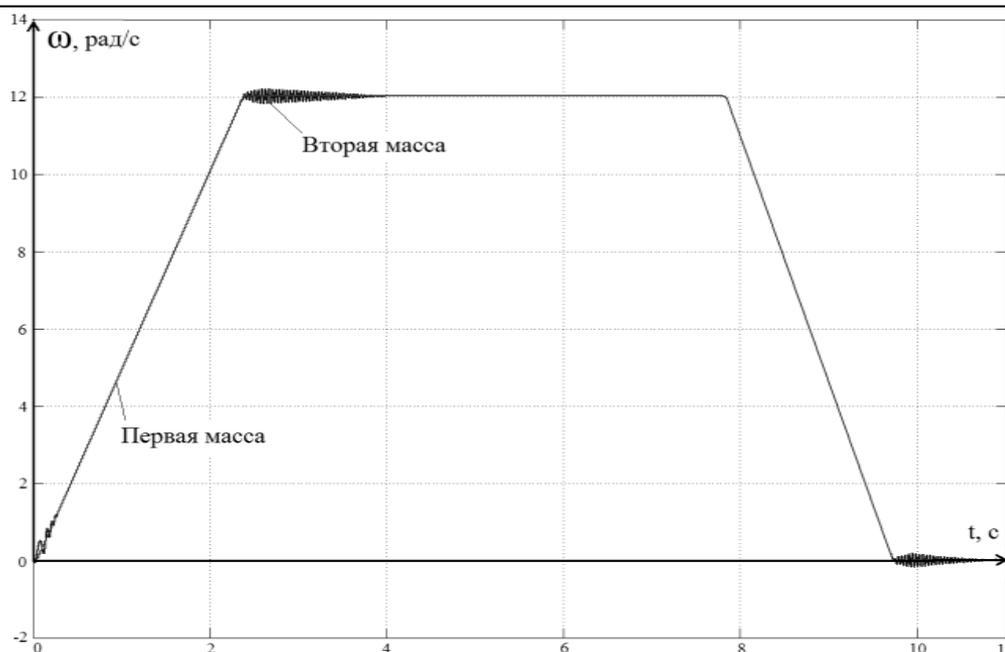


Рис. 4. График переходного процесса в системе с нечетким регулятором

### Выводы

1. Применение нечеткого регулятора приводит к уменьшению амплитуды колебаний как в установившемся режиме, так и при пуске и останове примерно в 2,2 раза.
2. Увеличивается демпфирующая способность в системе с нечетким управлением.

### Библиографический список

1. Мещеряков, В.Н. Моделирование асинхронного двигателя с преобразователем частоты в программе *MATLAB* / В. Н. Мещеряков, П.Н. Левин, Т.В. Синюкова // Современные сложные системы управления HTCS 2012: материалы Междун. научно-технич. конф. – 2012. – С. 53 – 54.
2. Мещеряков, В.Н. Нечеткий алгоритм оптимизации энергетических параметров асинхронного электропривода / В. Н. Мещеряков, П.Н. Левин, Т.В. Синюкова // Актуальные направления научных исследований XXI века: теория и практика. – 2013. – № 1 (1). – С. 118– 125.
3. Синюкова, Т.В. Метод ускорения поискового алгоритма для прямого управления моментом / Т. В. Синюкова, П.Н. Левин // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. – 2013. – № 12. – С. 60 – 63.
4. Мещеряков, В.Н. Применение нечеткой логики для реализации энергосбережения в электроприводе / В. Н. Мещеряков, П.Н. Левин, Т.В. Синюкова // Школа молодых ученых по проблемам технических наук: материалы областного профильного семинара. – 2013. – С. 106 – 107.
5. Мещеряков, В.Н. Повышение эффективности поискового алгоритма при реализации энергосберегающего режима за счет форсирования магнитного потока в переходных режимах / В. Н. Мещеряков, П.Н. Левин, Т.В. Синюкова // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. – 2014. – № 6. – С. 25 – 30.

УДК 62-83:621.313

А.Ю. Смирнов, А.Ю. Зимин

## ОПТИМИЗАЦИОННЫЕ РАСЧЁТЫ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ В СОСТАВЕ ШАГОВОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Представлен метод оптимизации конструкции бесконтактных синхронных машин, предназначенных для точного позиционирования регулирующих органов, в составе шагового электропривода с частотным управлением.

The article presents a method for optimizing of the construction of a brushless synchronous motor designed for the precise positioning of the regulatory bodies, as step electric drive with frequency control.

**Ключевые слова:** шаговый электропривод, электродвигатель, метод Гаусса-Зейделя, оптимизация.

**Key words:** step motor drive, electric drive, electromotor, Gauss-Seidel method, optimization.

Преимуществами шагового привода являются отсутствие развитой кинематической цепи, независимость от работы устройств обратной связи, за которыми сохраняется только функция контроля над перемещением, а не участие в его выполнении, безопасность при заедании механизма, отсутствие выбега при остановке. Простота алгоритма управления, наряду с прочими достоинствами шагового привода, послужила причиной его использования в отечественных механизмах, предназначенных для регулирования мощности ядерных реакторов [1].

Используя выбранную методику проектирования, проверенную данными испытаний, возможно найти наилучшее решение при выборе переменных проектирования электропривода в допустимых пределах.

Целью оптимизации может быть достижение следующих результатов:

- минимизация габаритов (внешнего диаметра и осевой длины статора);
- минимизация общей массы активных частей;
- минимизация потерь в меди обмотки и достижение максимального КПД;
- достижение наибольшей частоты приемистости в шаговом приводе.

В качестве  $n$  переменных проекта индукторного двигателя используются:

- индукция в зазоре  $B_\delta$ ;
- линейная нагрузка  $A$ ;
- момент инерции ротора относительно момента инерции привода  $\beta$ ;
- относительная длина ротора  $\lambda$ ;
- число зубцов на поверхности одного полюсного наконечника статора  $n_z$ .

Количество магнитов на роторе  $n_m$  на роторе всегда должно быть минимальным по технологическим соображениям, что позволяет вывести этот параметр из числа переменных проектирования.

Среди ряда известных численных методов оптимизации наиболее простую и очевидную логическую схему имеет метод Гаусса-Зайделя [2]. Суть метода состоит в последовательном поиске частного максимума оптимизируемой характеристики по каждой переменной проекта. Поиск осуществляется многократным пересчётом проекта двигателя с поочерёдно изменяемыми (вплоть до достижения наилучшего варианта) параметрами.

Переменные представлены массивом  $[X]$  из четырёх (по числу переменных) элементов. Первоначально им присваиваются минимально допустимые на диапазонах варьирования значения. Вместе с остальными не изменяемыми исходными данными задаются также приращения переменных проекта в виде массива значений  $[\Delta X]$ , и их максимальные (верхние) значения на диапазонах варьирования  $[X_{\max}]$ . После каждого единичного расчёта проекта найденное текущее значение целевой функции  $F_{ц}$  сравнивается с результатом, полученным в предыдущем расчёте, кроме самого первого ( $k=1$ ), и присваивается целевой переменной  $Q$ , в случае достижения очередного локального минимума, а данные проекта - выходному массиву  $[Rez]$ . По достижении локального минимума целевой функции по одной переменной проекта выполняется переход к следующей переменной проекта с номером  $n$  в массивах  $[X]$ ,  $[\Delta X]$  и  $[X_{\max}]$ . На рис.1 представлен алгоритм для одного цикла перебора четырёх переменных проекта.

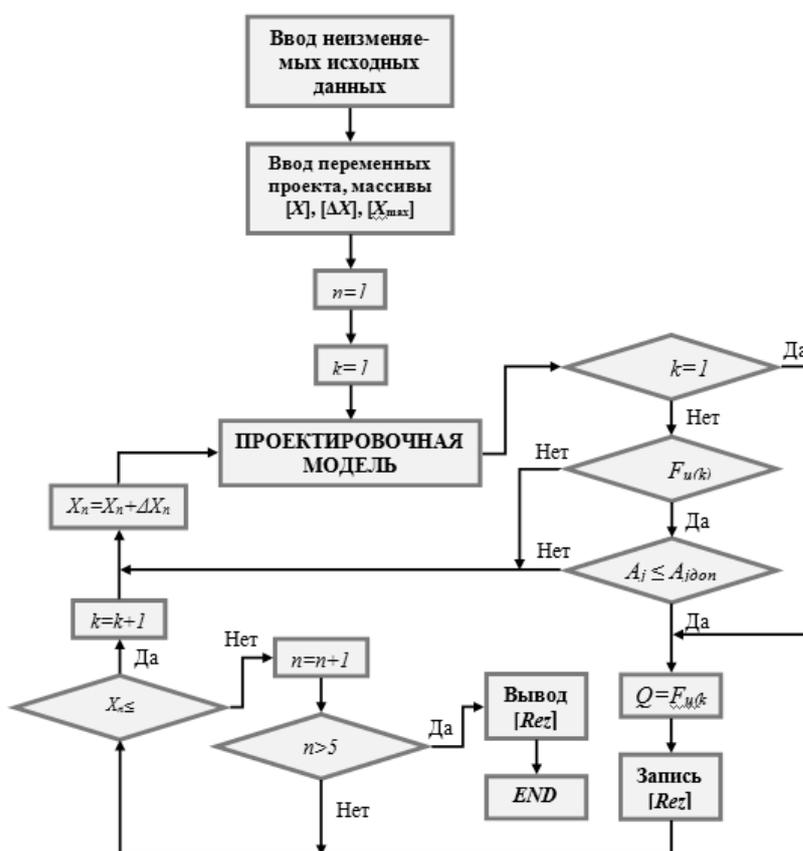


Рис. 1. Алгоритм оптимизации (минимизации) одного параметра индукторного двигателя по четырем переменным проекта

С целью повышения массогабаритных показателей выполнены оптимизационные расчёты аналогов серийных двигателей, данные которых представлены в табл.1.

Таблица 1

Результаты сопоставления характеристик изготовленных и спроектированных двигателей

№ п/п	Наименование параметра, единицы измерения	Значения по вариантам	
		серийный	проект
1	Напряжение на входе, В	110	
2	Схема коммутации	разнополярная	
3	Число фаз	2	
4	Шаг, град.	0,9	
5	Момент нагрузки, Н·м	3	
6	Момент инерции привода, кг·м	$3 \cdot 10^{-3}$	
7	Количество секций ротора	1	
8	Диаметр магнита, наружный внутренний/толщина, мм /	95/65/4	159/124/4
9	Наружный диаметр ротора, мм	99,78	167,00
10	Аксиальная длина ротора, мм	24,00	100,20
11	Наружный диаметр статора	150,00	227,00
13		49КФА, ГОСТ 10160-75, 0,2 мм	
14	Магнитопровод ротора	49КФ, ТУ 14-1-1185-75	
15	Магниты	КС25ДЦ-225, ГОСТ21559-76, $B_r \geq 1,02$ Тл, $H_{св} \geq 740$ кА/м	
16	Электромагнитные нагрузки: - индукция в зазоре, Тл - линейная нагрузка, А		0,70 10000
17	Фиксирующий момент, Н·м	0,80	0,94
18	Частота приемистости, шаг/с	250	347

Минимальные и максимальные значения переменных проекта, принятые при оптимизации, а также значения шага, присвоенные элементам массивов  $[X]$ ,  $[\Delta X]$  и  $[X_{\max}]$  при оптимизации, представлены в табл.2.

Таблица 2

Значения переменных проекта при оптимизации

Обозначение массива/переменной	$B_\delta$ , Тл	$A$ , А/м	$\beta$	$\lambda$	$n_3$
$[X]$	0,7	10000	1,0	0,2	4
$[X_{\max}]$	0,95	20000	2,0	5,0	8
$[\Delta X]$	0,05	1000	0,1	0,4	1

Последовательность изменения переменных проекта при движении методом Гаусса-Зайделя по алгоритму рис.1 и получаемые после каждого выполнения проекта значения представлены в табл. 3.

**Таблица 3**  
**Значения переменных проекта и результаты оптимизационных расчётов**

№ п/п	$B_\delta$	$A$	$\beta$	$\lambda$	$n_3$	$D$	$D_{\text{нар}}$	$L_s$	$m_a$
1	0,7	10000	1,0	0,6	4	167,0	227	180	30,1
2	0,7	10000	1,0	1,0	4	129,3	183	195	25,5
3	0,7	10000	1,0	1,4	4	109,5	165	212	22,8
4	0,7	10000	1,0	1,8	4	96,3	152	228	21,2
5	0,7	10000	1,0	2,2	4	87,1	143	243	20,0
6	0,7	10000	1,0	2,6	4	80,1	136	258	19,3
7	0,7	10000	1,1	2,6	4	76,4	135	247	17,8
8	0,7	10000	1,2	2,6	4	73,1	131	238	16,0
9	0,7	10000	1,3	2,6	4	70,2	129	230	14,9
10	0,7	9000	1,3	2,6	4	66,6	124	219	12,6
11	0,7	8000	1,3	2,6	4	67,2	122	219	12,4
12	0,7	8000	1,3	2,6	5	67,2	113	215	11,1
13	0,7	8000	1,3	2,6	6	67,2	110	213	10,8
14	0,7	8000	1,3	2,6	7	67,2	108	212	10,8
15	0,7	8000	1,3	2,2	7	67,2	111	188	9,9
16	0,7	8000	1,4	2,2	7	67,2	109	185	9,3

Отсутствие прогресса в улучшении целевой переменной предполагает переход к подбору следующей переменной проекта.

Увеличение индукции  $B_\delta$  в зазоре в конце первого цикла не дало улучшения целевой функции.

Увеличение линейной нагрузки  $A$  требует увеличения необходимой площади пазов под обмотку и приводит к повышению габаритов и массы двигателя. Поэтому шаг изменения этой переменной (табл.2) изменён на отрицательный (-1000 А/м), после чего процедура поиска варианта с минимальными габаритами в соответствии с алгоритмом рис.1 была продолжена с варианта №10 по табл. 3.

Начиная с варианта №12 существенного улучшения массогабаритных показателей удаётся достичь за счёт перехода к большему числу зубцов гребенчатых зубцовых зон статора  $n_3$ .

После расчёта шестнадцатого варианта дальнейшее изменение переменных проекта не даёт улучшения массогабаритных показателей.

Алгоритм рис. 1 позволяет существенно уменьшить массогабаритные показатели шагового электропривода, начиная расчёт первого варианта с минимально установленных границ, что предполагает первоначальное вычисление заведомо неоптимальных вариантов. По этой причине объём и масса двигателя в последнем из рассчитанных в табл.3 вариантов отличается от исходного в несколько раз, а параметры проекта на последующих циклах изменения пришлось изменять в противоположном направлении.

#### Библиографический список

1. Совершенствование дискретного электропривода с шаговыми двигателями. / М.Г. Чиликин [и др.] – Труды МЭИ. 1975. Вып. 223. -170 с.
2. **Копылов, И.П.** Применение вычислительных машин в инженерно-экономических расчётах (Электрические машины) / И.П. Копылов – М.: Высш. шк., 1980. - 256 с.

УДК 621.313.333

Д.И. Шишлин, Р.Н. Белокопытов, Е.В. Лютова

## СОЗДАНИЕ МОДЕЛИ ИСПЫТУЕМОГО СТЕНДА ДЛЯ МАШИН ПЕРЕМЕННОГО ТОКА В ПРОГРАММНОЙ СРЕДЕ *SIMULINK*

Липецкий государственный технический университет

Рассматривается работа виртуальной установки для исследования статических характеристик асинхронной машины, смоделированная в графической среде имитационного моделирования *Simulink*. Проведён сравнительный анализ полученных характеристик.

This article describes the work of a virtual machine for studying the static characteristics of an asynchronous machine, modeled in the graphical simulation environment of *Simulink* simulation. A comparative analysis of the characteristics obtained was carried out.

**Ключевые слова:** электрический привод, асинхронный двигатель, статические характеристики, двигатель постоянного тока, модель.

**Key words:** electric drive, asynchronous motor, static characteristics, direct current motor, model.

### Модель виртуальной установки для снятия статической механической характеристики асинхронного двигателя с фазным ротором

Асинхронный двигатель является самым распространённым электрическим двигателем. Эти двигатели потребляют до 70% всей вырабатываемой электроэнергии переменного тока и являются основными в разных отраслях промышленности. Главные достоинства асинхронных двигателей — простота конструкции и невысокая стоимость [1].

Для создания модели и исследования характеристик асинхронного двигателя широко применяются компьютерные технологии, в частности, программная среда *Matlab Simulink*.

Пакет *Simulink* и пакет расширения *Sim Power Systems* являются основой для изучения электромеханических устройств. Библиотека *Sim Power Systems* содержит блоки моделирования электротехнических устройств: электродвигатели, трансформаторы, полупроводниковые элементы, источники энергии. С помощью *Simulink* и *Sim Power Systems* возможно моделировать работу устройств и сложных электротехнических систем, а также получать широкий набор их характеристик [2].

Модель для исследования прямого пуска асинхронного двигателя с фазным ротором на холостом ходу с последующим приложением номинального момента показана на рис. 1.

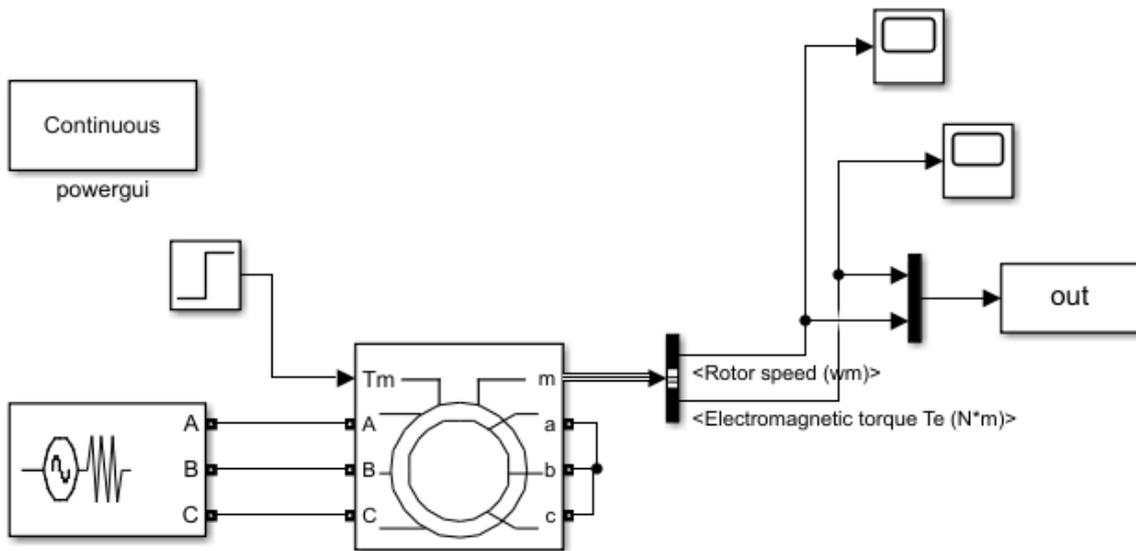


Рис. 1. Модель асинхронного двигателя с фазным ротором в *Matlab Simulink*

Модель содержит трёхфазную асинхронную машину (*Asynchronous Machine SI Units*), в которой все величины представлены в действительных единицах, запитанную от трёхфазного источника (*Three-Phase Source*). Момент нагрузки задаётся блоком *Step*, позволяющим задать начальное и конечное значение величины и время её изменения. Для снятия характеристик используются блоки *Scope*, *To Workspace*. Блок *powergui* является инструментом графического интерфейса пользователя пакета моделирования энергетических систем [2].

При запуске модели осуществляется прямой пуск, по истечению некоторого времени прикладывается момент нагрузки. Результаты моделирования машины 1,1 KW, 380 V, 50 Hz, 850 RPM представлены на рис. 2 и рис. 3.

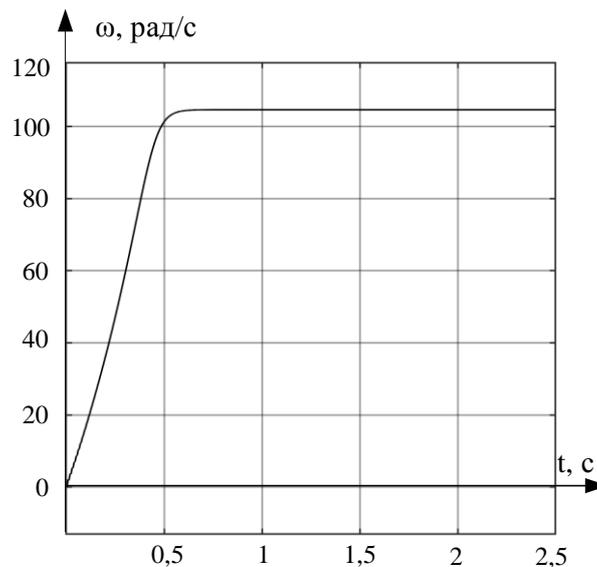


Рис. 2. График переходного процесса скорости в *Matlab Simulink*

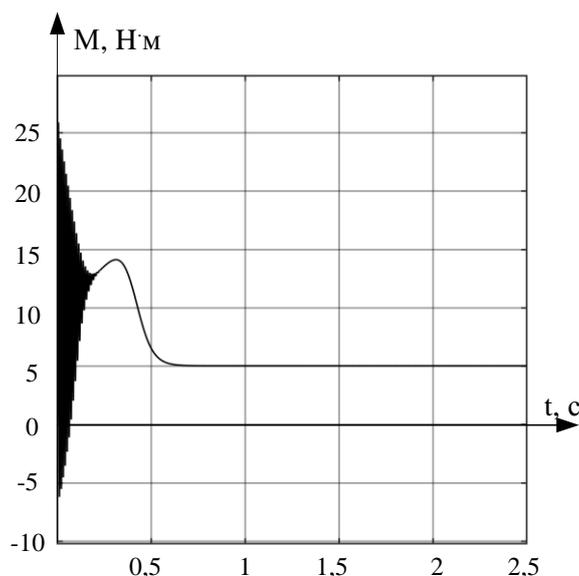


Рис. 3. График переходного процесса момента в *Matlab Simulink*

Для получения статической механической характеристики асинхронного двигателя с фазным ротором в *Simulink* была смоделирована модель виртуальной установки. Функциональная схема и модель установки для исследования статической механической характеристики представлена на рис. 4.

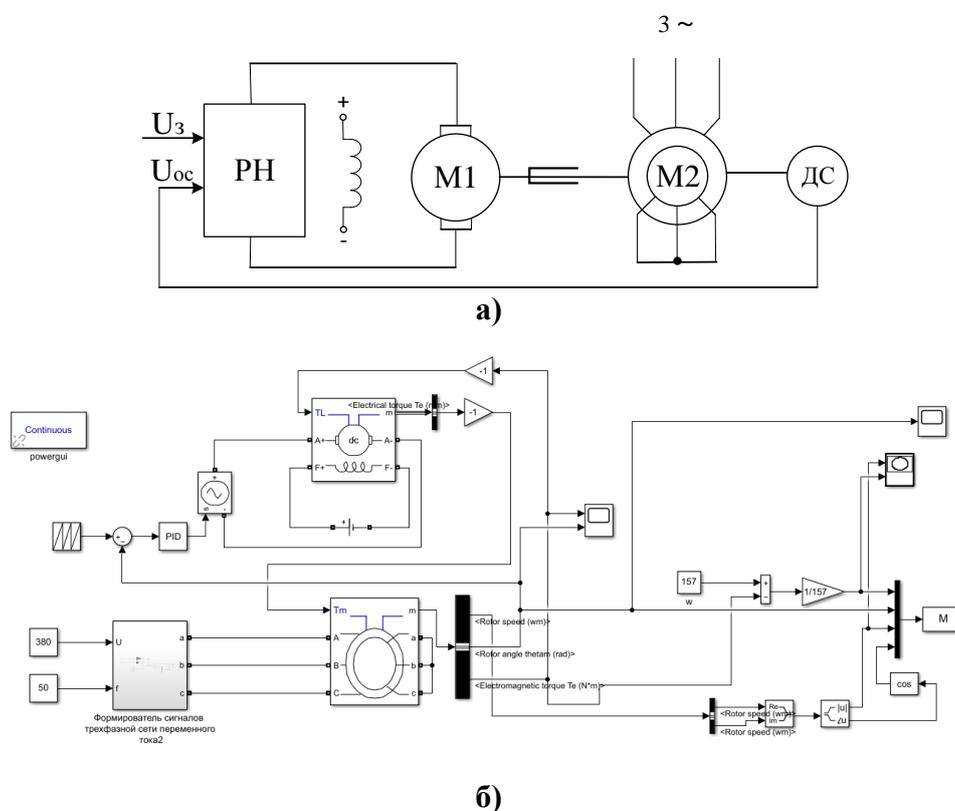


Рис. 4. Функциональная схема установки (а) модель виртуальной установки (б) для снятия статической механической характеристики АД с ФЗ:  
 РН – регулятор напряжения; М1 - нагрузочная машина (ДПТ НВ);  
 М2 - испытуемая машина (АД с ФЗ); ДС – датчик скорости

Модель установки содержит две электрические машины.

1. Асинхронную машину (АМ) со своим источником питания. В качестве питания к АМ подключен формирователь сигналов трёхфазной сети переменного тока. Данный способ даёт возможность задавать необходимые изменения напряжения и частоты в ходе процесса моделирования.

2. Машину постоянного тока (DCM) с источником питания обмотки возбуждения и регулируемым источником в якорной цепи (CVS).

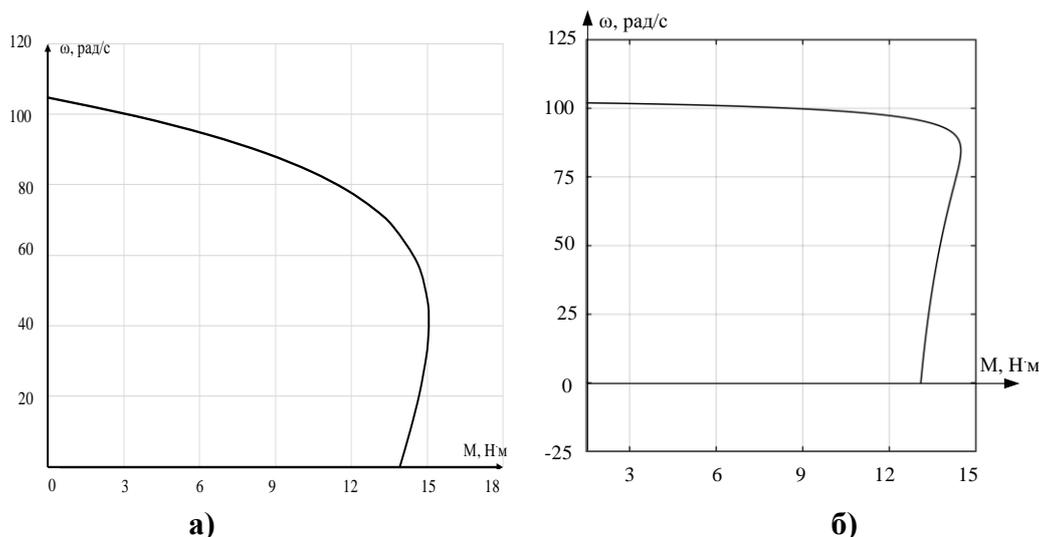
Электромагнитный момент асинхронной машины является нагрузкой на валу машины постоянного тока, а электромагнитный момент машины постоянного тока служит нагрузкой на валу асинхронной машины. При таком построении моменты обеих машин будут всегда (в установившемся режиме) равны и противоположны по знаку. Для задания скорости вращения исследуемой асинхронной машины машина постоянного тока управляется от регулятора, на вход которого поступает сигнал задания и сигнал обратной связи – скорость асинхронной машины [3].

Чтобы удостовериться, верно ли работает установка, сравним характеристики, полученные путём моделирования, и характеристики, снятые на экспериментальном стенде с испытуемым двигателем МТФ011-6.

Механическая характеристика определяется зависимостью момента сопротивления на валу асинхронного двигателя от скорости вращения вала при условии, что в каждой точке механической характеристики асинхронный двигатель работает в установившемся режиме [4].

Расчёт механической характеристики производится по соотношению, связывающему величину электромагнитного момента и скольжения при заданных параметрах машины, напряжения и частоте питания.

На рис. 5 представлены характеристики, полученные в *Matlab Simulink* и на экспериментальном стенде.



**Рис. 5.** Механическая характеристика, полученная на экспериментальном стенде (а) и статическая механическая характеристика АД с ФЭ, полученная в *Matlab Simulink* (б)

По результатам моделирования видно, что статическая механическая характеристика на виртуальной установке соответствует характеристике, полученной на

экспериментальном стенде асинхронной машины с фазным ротором. Это доказывает, что смоделированная виртуальная установка в наглядном и эффективном средстве визуального программирования моделей – пакете *Simulink* программы *Matlab* – работает должным образом.

Программная среда *Matlab Simulink* может быть применена учащимися высших учебных заведений для изучения и исследования характеристик и режимов работы асинхронного двигателя, используя при этом не лабораторные стенды, а персональный компьютер.

#### Библиографический список

1. **Блажевич, В.Э.** Создание лабораторного практикума по электромеханическим дисциплинам для подготовки студентов электроэнергетических и электротехнических направлений на базе пакета *Matlab Simulink* // Энергетика. Проблемы и перспективы развития. - 2017. - №3. - С.174-176.
2. **Герман-Галкин, С.Г.** Компьютерное моделирование полупроводниковых систем в *MATLAB 6.0*: учеб. пособие / С.Г Герман-Галкин. – СПб.: КОРОНА, 2001. -132 с.
3. **Мещеряков, В.Н.** Построение математической модели системы каскадно-частотного электропривода для определение её энергетических показателей / В.Н. Мещеряков, Д.И. Шишлин // Энерго- и ресурсосбережение-XXI век. - 2016. - С.78-82.
4. **Белокопытов, Р.Н.** Оптимизация энергетических характеристик асинхронного двигателя электропривода по критерию минимума тока статора / Р.Н. Белокопытов, В.Н. Мещеряков // Энергоэффективные и ресурсосберегающие технологии и системы. - 2016. - №12. - С. 224-231.

УДК 629.423.31

Д.И. Шишлин, Р.Н. Белокопытов, М.М. Новик

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПЕРЕДАЧИ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА,  
ИСПОЛЬЗУЕМОЙ НА ТЯГОВОМ ТРАНСПОРТЕ, В ПРОГРАММНОЙ СРЕДЕ  
SIMULINK**

Липецкий государственный технический университет

Рассмотрена работа электрической передачи переменного тока, смоделированная в среде имитационного моделирования *Simulink*, а также построено семейство характеристик при частотном регулировании асинхронного двигателя.

This article describes the work of the electrical transmission of alternating current, simulated in the environment of simulation modeling *Simulink* and built the family characteristics when the frequency regulation of the asynchronous engine.

**Ключевые слова:** электрический привод, инвертор напряжения, асинхронный двигатель, синхронный генератор, диодный выпрямитель, преобразователь частоты.

**Key words:** electric drive, voltage inverter, asynchronous motor, synchronous generator, diode rectifier, frequency Converter.

**Модель электрической передачи переменного тока**

Асинхронные двигатели активно используются практически во всех отраслях промышленности и сельского хозяйства. Они зарекомендовали себя как наиболее эффективные в качестве электрической тяги, без которой не обходятся многие технические операции.

Асинхронные двигатели с короткозамкнутым ротором также применяются на железнодорожном транспорте в качестве электрической передачи (более подробно о применении двигателей в тяговом транспорте описано в [1]).

На тепловозах применяют передачи трёх видов:

1) передача постоянного тока – и тяговый генератор, и тяговый двигатель является машиной постоянного тока. Такие передачи более просты и не имеют промежуточных звеньев;

2) передача переменного-постоянного тока – для преобразования переменного тока между синхронным генератором и тяговым двигателем постоянного тока включена выпрямительная установка;

3) передача переменного тока – генератор и тяговые двигатели выполнены в виде машин переменного тока, поэтому между генератором и двигателем включается преобразователь частоты. Такие передачи устанавливаются на тепловозах мощностью 4400 кВт в секции и более.

Модель передачи переменного тока представлена на рис. 1.

В качестве тягового генератора используется синхронный генератор переменного тока, а тяговыми двигателями являются два асинхронных двигателя

с короткозамкнутым ротором. Вырабатываемая синхронным генератором электрическая энергия в виде переменного напряжения поступает на неуправляемый диодный выпрямитель.

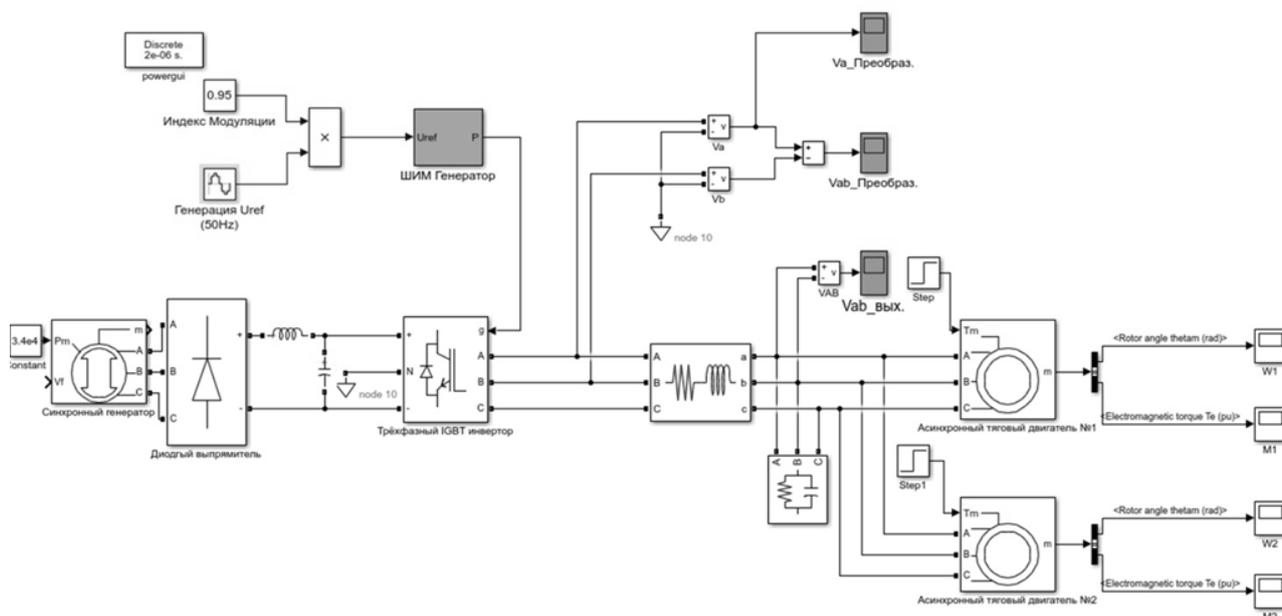


Рис. 1. Модель электрической передачи переменного тока

LC-фильтр используется для сглаживания пульсаций напряжения после выпрямления. Полученное на выходе постоянное напряжение используется для питания бортовой электроники и зарядки аккумуляторных батарей, блок-схема представлена на рис. 2.

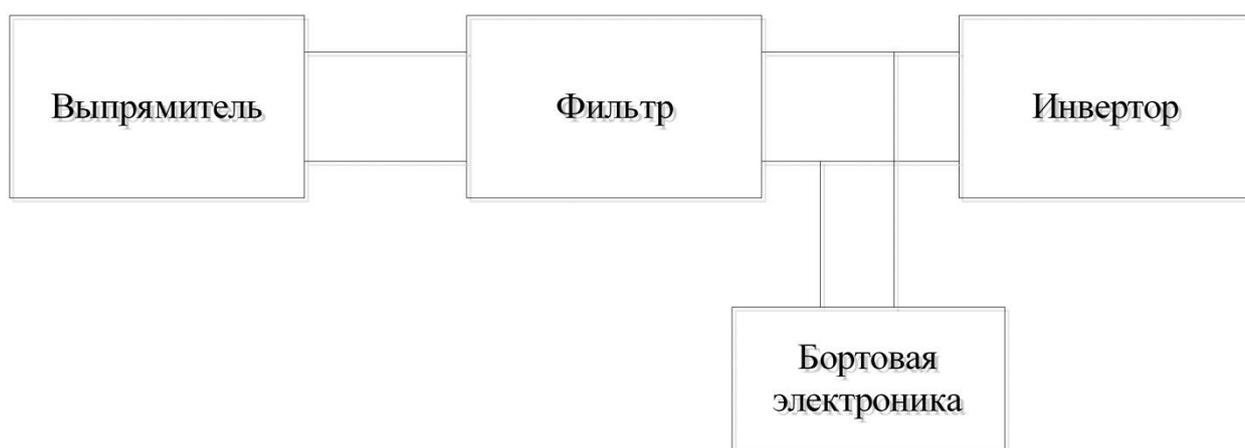
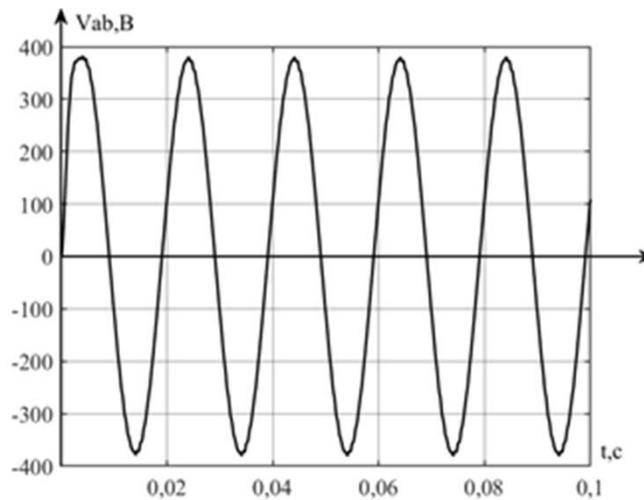


Рис. 2. Блок-схема питания бортовой электроники

Для питания асинхронных тяговых двигателей требуется переменное напряжение. Для его получения после диодного выпрямителя устанавливается инвертор на IGBT-транзисторах [2].

Для работы инвертора на управляемый вход  $g$  подается сигнал от блока “генератор ШИМ”, имитирующий ШИМ-регулятор. С помощью блока Sine

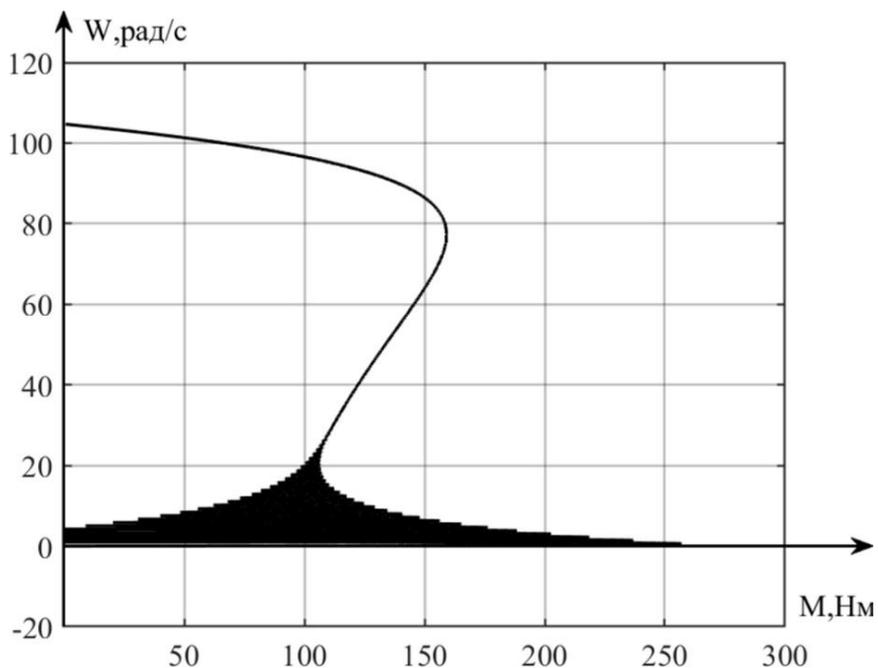
Wave моделируется синусоидальный сигнал частотой 50 Гц, который подается на блок ШИМ-генератор. Преобразованное переменное напряжение, снятое с осциллографа  $V_{ab}$  вых, имеет вид, представленный на рис. 3.



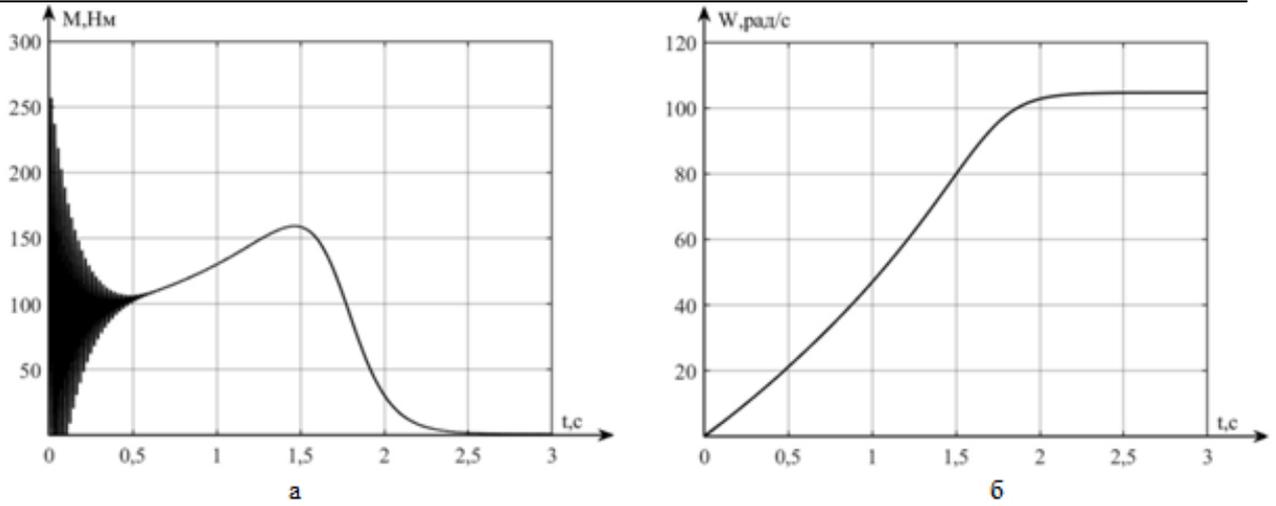
**Рис. 3. Преобразованное переменное напряжение на выходе IGBT-инвертора**

Инvertированное напряжение подается на пару асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором, рассчитанных на пуск от 380 В переменного напряжения.

Построенная механическая характеристика (рис. 4) принимает вид естественной. Графики переходных процессов момента и скорости смоделированы корректно (рис. 5).



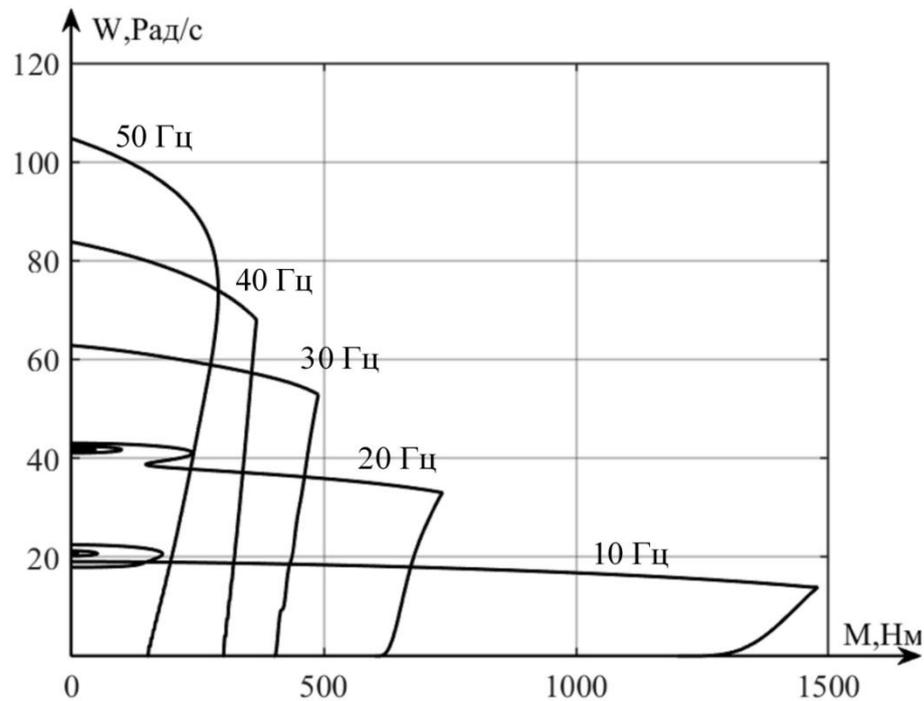
**Рис. 4. Механическая характеристика двигателя**



**Рис. 5. Графики переходных процессов:**  
 а) - момента, б) - скорости

Система Выпрямитель-*LC*-фильтр-Инвертор (рис. 1) представляет собой преобразователь частоты с промежуточным контуром постоянного тока [3]. На тяговом транспорте регулирование скорости двигателя осуществляется с помощью закона регулирования  $U_1 = \text{const} = U_{\text{сФН}}$ ,  $f_1 - \text{var}$ .

От частоты  $f_1$  зависит скорость холостого хода  $\omega_0$ , пусковой момент  $M_{\text{п}}$ , момент критический  $M_{\text{кр}}$  и критическое скольжение  $S_{\text{кр}}$ . Механические характеристики при законе регулирования  $U_1 = \text{const} = U_{\text{сФН}}$ ,  $f_1 - \text{var}$  представлены на рис. 6.



**Рис. 6. Механические характеристики  $\omega = f(M)$  при законе регулирования:**  
 $U_1 = \text{const} = U_{\text{сФН}}$ ,  $f_1 - \text{var}$

Из графика механических характеристик можно сделать вывод, что с понижением частоты скорость холостого хода уменьшается. Момент критический и критическое скольжение уменьшаются. Пусковой момент увеличивается в несколько раз. Отношение критического момента к моменту номинальному моделируемого двигателя равно 2,8. Как видно из графика рис.6, при скорости 20 рад/с номинальный момент возрастет в 5 раз, а критический момент возрастет в 4,8 раз, по сравнению с номинальной частотой.

Данная система может применяться для обеспечения движения маневровых тепловозов и электровозов. Она может также работать только от аккумуляторных батарей и использоваться для питания системы движения трамваев, что позволит избавиться от пантографных токосъемников.

Такой принцип уже используется в современных электромобилях Tesla, он достаточно энергоэффективен [4]. Применение электрической энергии взамен сжигания горючего уменьшит выбросы загрязняющих веществ в атмосферу, но на данный момент не разработаны аккумуляторы, способные долгое время работать без подзарядки, питаая достаточно мощные системы. Аккумуляторы большой мощности габаритны, поэтому применяются гибридные источники питания, в которых используется как электричество, так и горючее топливо.

#### Библиографический список

1. **Шишлин, Д.И.** Применение однокорного преобразователя в качестве тягового двигателя на локомотивах / Д.И. Шишлин, А.А. Пахомов // Инфокоммуникационные и интеллектуальные технологии на транспорте: материалы I Междунар. научно-практич. Конф.: в 2 т. - 2018. - С. 255-262.
2. **Герман-Галкин, С.Г.** Компьютерное моделирование полупроводниковых систем в *MATLAB 6.0*: учеб. пособие / С.Г Герман-Галкин. – СПб: КОРОНА. - 2001.
3. **Щербаков, В.С.** Основы моделирования систем автоматического регулирования и электротехнических систем в среде *MATLAB* и *SIMULINK*: учеб. пособие / В.С. Щербаков, А.А. Руппель, В.А. Глушец. – Омск: Изд-во СибАДИ, 2003.
4. **Белокопытов, Р.Н.** Оптимизация энергетических характеристик асинхронного двигателя электропривода по критерию минимума тока статора / Р.Н Белокопытов, В.Н. Мещеряков // Энергоэффективные и ресурсосберегающие технологии и системы. - 2016. - С. 224-231.

---

**Секция 3. ЭФФЕКТИВНОСТЬ СИСТЕМ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКИ И ЭКОНОМИЯ ЭНЕРГОРЕСУРСОВ**

---

УДК 621.311.22

В.А. Анищенко, Т.В. Писарук

**ДОСТОВЕРНОСТЬ ИЗМЕРЕНИЙ НАГРУЗКИ ПРОМЫШЛЕННЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ**

Белорусский национальный технический университет, г. Минск

Рассматривается контроль достоверности измерений активной нагрузки промышленных предприятий методом ее первых приращений, основанным на анализе динамики суточных графиков нагрузки. Признаком недостоверности является выход разности смежных результатов измерений нагрузки за допустимые границы. Приводятся результаты апробации метода контроля на примере нагрузки моторного завода.

The article deals with the control of reliability of measurements of the active load of industrial enterprises by its first increments method based on the analysis of the dynamics of daily load graphs. A sign of unreliability is the difference in adjacent results of the load measurements that exceeds the permissible limits. The results of the control method testing are given on the example of the load of Minsk Motor Plant.

**Ключевые слова:** нагрузка промышленного предприятия, первые приращения нагрузки, вероятностные характеристики, контроль достоверности измерений.

**Key words:** industrial enterprise load, first load increments, probabilistic characteristics, control of reliability of measurements.

**Математическая модель первых приращений нагрузки**

Суточные изменения активной нагрузки промышленных предприятий носят циклический характер. Они представляют собой нестационарный случайный процесс  $P(t)$ , состоящий из низкочастотной детерминированной функции  $P_{НЧ}(t)$  и высокочастотной случайной составляющей  $P_{ВЧ}(t)$ :

$$P(t) = P_{НЧ}(t) + P_{ВЧ}(t). \quad (1)$$

Оперативный контроль достоверности измерений нагрузки возможен по предельным ее значениям (метод «вилок») [1,2]. Условие достоверности в этом случае выглядит следующим образом:

$$a(t) \leq P(t) \leq b(t), \quad (2)$$

где  $a(t)$  и  $b(t)$  – нижняя и верхняя границы допустимых (достоверно измеренных) значений нагрузки в нормальных режимах работы предприятия, практически все время изменяющиеся в течение суток из-за нестационарности процесса.

Для определения границ  $a(t)$  и  $b(t)$  необходим прогноз низкочастотной составляющей  $P_{НЧ}(t)$ , что представляет непростую и трудоемкую задачу [3]. Альтернативной методу предельных значений является рассматриваемый контроль достоверности по первым приращениям нагрузки, не требующий знания низкочастотной составляющей нагрузки.

Если рассматривать суточный график нагрузки как непрерывный процесс, контролировать достоверность измерений можно путем сравнения текущей производной, т.е. скорости изменения нагрузки, с границами допустимых значений производной. После дискретизации графика нагрузки и перехода от непрерывного процесса к случайной последовательности динамику изменений нагрузки характеризуют ее первые приращения.

Первое приращение за интервал времени  $t, t - h$  представляет собой разность результатов измерений нагрузки  $P(t)$  и  $P(t - h)$ , произведенных в моменты времени  $t$  и  $t - h$ , где  $h$  – интервал временной дискретизации процесса [4].

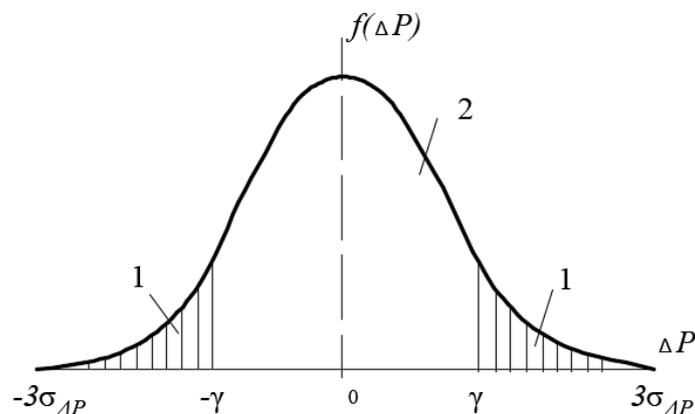
$$\Delta P(t, t - h) = P(t) - P(t - h). \quad (3)$$

Первые приращения образуют последовательность случайных функций с целочисленными значениями аргументов  $t, t - h$ . Вероятностные характеристики случайного непрерывного процесса изменений нагрузки остаются в силе и применительно к случайной последовательности. Общепринято, что распределение высокочастотной составляющей нагрузки  $P_{ВЧ}(t)$  достаточно близко к нормальному. Тогда можно считать, что первые приращения также подчиняются нормальному закону с функцией распределения плотности вероятностей

$$f(\Delta P) = \frac{1}{\sigma_{\Delta P} \sqrt{2\pi}} \exp \left[ -\frac{1}{2} \left( \frac{\Delta P - M}{\sigma_{\Delta P}} \right)^2 \right] dt, \quad (4)$$

где  $\sigma_{\Delta P}$  – среднеквадратичное отклонение первых приращений;  $M$  – математическое ожидание (центр распределения) первых приращений.

На рис. 1 приведена кривая функции распределения плотности симметричного ( $M = 0$ ) нормального распределения первых приращений.



**Рис. 1. Кривая плотности симметричного распределения первого приращения нагрузки:**

1 – недостоверные измерения; 2 – достоверные измерения

Дисперсия  $D_{\Delta P} = \sigma_{\Delta P}^2$  характеризует рассеяние измеренных первых приращений относительно центра распределения. Достоверность первого приращения позволяет считать достоверным образующие его результаты измерений нагрузки.

В теории и практике оценки надежности информационно-измерительных систем для выбора предела допустимой погрешности средства измерения, т.е. наибольшего устанавливаемого нормативными документами значения, при котором результаты измерений признаются достоверными, используется понятие квантильных оценок [5]. Этот подход предлагается распространить и на задачу нормирования достоверных первых приращений нагрузки промышленных предприятий. Квантиль  $K_\rho$  ограничивает интервал достоверных значений первых приращений в нормальных условиях эксплуатации предприятия с назначенной вероятностью  $\rho$ .

Выбор квантиля  $K_\rho$  в значительной степени субъективен и при решении технических задач надежности используют различные его значения. При контроле достоверности измерений часто назначают квантиль  $K_\rho$  с доверительной вероятностью  $\rho = 0,8$ . Тогда предельное допустимое отклонение первых приращений от центра распределения при нормальном законе будет

$$\Delta_{0,8} = K_{0,8} \sigma_{\Delta P} = 1,3 \cdot \sigma_{\Delta P}. \quad (5)$$

В этом случае интерквантильный промежуток протяженностью  $2\Delta_{0,8}$  включает в себя 80% всех возможных случайных значений первых приращений.

При отсутствии надежных данных о законе распределения первых приращений целесообразно использовать квантиль  $K_{0,9}$  с доверительной вероятностью  $\rho = 0,9$ . Тогда имеет место одно и то же соответствие между отклонением  $\Delta_{0,9}$  и среднеквадратичным значением  $\sigma_{\Delta P}$  вне зависимости от вида закона распределения

$$\Delta_{0,9} = K_{0,9} \sigma_{\Delta P} = 1,6 \cdot \sigma_{\Delta P}. \quad (6)$$

Интерквантильный промежуток  $2\Delta_{0,9}$  охватывает 90% возможных случайных значений первого приращения.

### **Алгоритм контроля достоверности измерений нагрузки методом первых приращений**

Условие достоверности первого приращения  $\Delta P(t, t-h)$  и соответственно достоверности измерений нагрузки  $P(t)$  и  $P(t-h)$  выглядит в общем виде следующим образом:

$$\gamma_1 \leq \Delta P(t, t-h) \leq \gamma_2. \quad (7)$$

Для определения границ принятия решения о достоверности  $\gamma_1$  и  $\gamma_2$  необходимо знать тренд, характеризующий среднюю скорость изменения нагрузки на различных участках суточного графика. Количественным показателем

тренда нагрузки является математическое ожидание первого приращения, рассчитываемое по формуле

$$M = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n \Delta P_i, \quad (8)$$

где  $n$  – число измерений на рассматриваемом участке суточного графика нагрузки.

Дисперсия первых приращений нагрузки рассчитывается по формуле

$$D_{\Delta P} = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (\Delta P_i - M)^2. \quad (9)$$

При положительном тренде, когда низкочастотная детерминированная составляющая нагрузки  $P_{НЧ}(t)$  возрастает, положительные первые приращения преобладают над отрицательными. При отрицательном тренде низкочастотная составляющая нагрузки снижается и отрицательные первые приращения больше положительных.

Границы принятия решения о достоверности первого приращения зависят от математического ожидания и предельного допустимого отклонения от него, т.е. квантиля  $K_\rho$  с назначаемой доверительной вероятностью  $\rho$ .

Нижняя граница достоверности первых приращений

$$\gamma_1 = M - K_\rho \sigma_\rho, \quad (10)$$

верхняя

$$\gamma_2 = M + K_\rho \sigma_\rho. \quad (11)$$

Диапазон достоверных значений первых приращения нагрузки  $\gamma_2 - \gamma_1$  для участков графика нагрузки с положительным ( $M > 0$ ) и отрицательным ( $M < 0$ ) трендом при одном и том же предельном допустимом отклонении  $\Delta\rho$  показан на рис. 2.

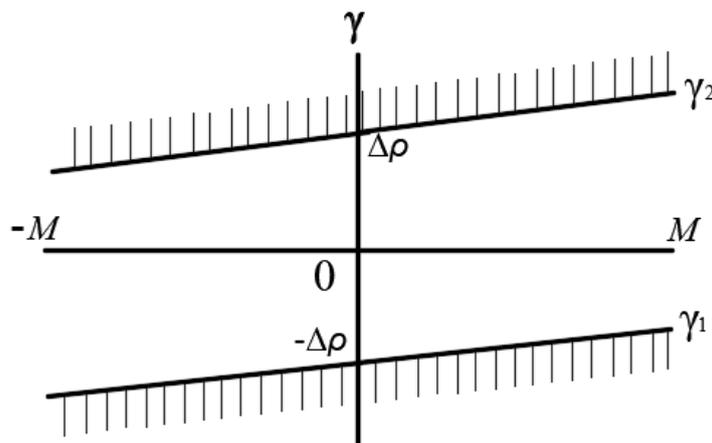


Рис. 2. Диапазон достоверных значений первых приращений нагрузки

Периодически определяя первые приращения согласно (3) и контролируя их достоверность по условиям (10) и (11), можно выявить грубые и систематические погрешности измерений нагрузки предприятия.

### Апробация метода контроля достоверности измерений нагрузки по первым приращениям

Апробация предложенного метода была проведена на примере активной нагрузки ОАО «Минский моторный завод». На рис. 3 представлены участки графиков нагрузки в утренние часы в будние дни недели. Интервал дискретизации процесса был принят  $h=3$  мин. На рис. 3 представлены соответствующие первые приращения утренней нагрузки, участки графиков стабильной нагрузки в дневные часы и соответствующие первые приращения, а также графики нагрузки и ее первые приращения в послеобеденные часы снижения нагрузки.

Анализ плотностей распределения рассчитанных первых приращений нагрузки показал, что они достаточно хорошо описываются нормальным законом. Результаты расчета вероятностных характеристик первых приращений нагрузки для указанных участков графиков с разными трендами сведены в табл. 1

Таблица 1

#### Результаты расчета вероятностных характеристик первых приращений нагрузки

Дата	Утренняя нагрузка			Дневная нагрузка			Послеобеденное снижение нагрузки		
	$D_{\Delta P}$ , кВт	$\sigma_{\Delta P}$ , кВт	$M$ , кВт	$D_{\Delta P}$ , кВт	$\sigma_{\Delta P}$ , кВт	$M$ , кВт	$D_{\Delta P}$ , кВт	$\sigma_{\Delta P}$ , кВт	$M$ , кВт
09.04.18	64955	254,86	163,84	49901	223,39	-0,86	39804	199,51	-108,16
10.04.18	75428	274,64	180,34	65417	255,77	-10,02	59163	243,23	-125,93
11.04.18	79087	281,22	186,39	42471	206,08	6,2	71060	266,57	-150,47
Среднее значение	73156	270,24	176,86	52596	228,45	-1,56	56676	236,44	-128,19

Границы достоверности первых приращений нагрузки рассчитаны по формулам (10), (11) на основе средних за три дня значений вероятностных характеристик нагрузки, приведенных в табл.1.

При расчетах был принят квантиль  $K_{0,8} = 1,3$  с доверительной вероятностью  $\rho = 0,8$ . Результаты расчетов границ достоверности следующие: для часов утренней нагрузки  $\gamma_1 = -174,71$  кВт,  $\gamma_2 = 528,16$  кВт; для дневной нагрузки  $\gamma_1 = -302,61$  кВт,  $\gamma_2 = 290,89$  кВт; для послеобеденных часов снижения нагрузки  $\gamma_1 = -435,56$  кВт,  $\gamma_2 = 108,25$  кВт.

Границы принятия решения о достоверности целесообразно определять одновременно с калибровкой средств измерений, что позволяет исключить влияние на границы недостоверных измерений. Но даже если границы достоверности определены спустя продолжительное время после калибровки и отсутствует гарантия того, что границы необоснованно расширены из-за возможного присутствия недостоверных измерений, контроль на основе этих границ поможет обнаружить появление большой систематической погрешности измерения.

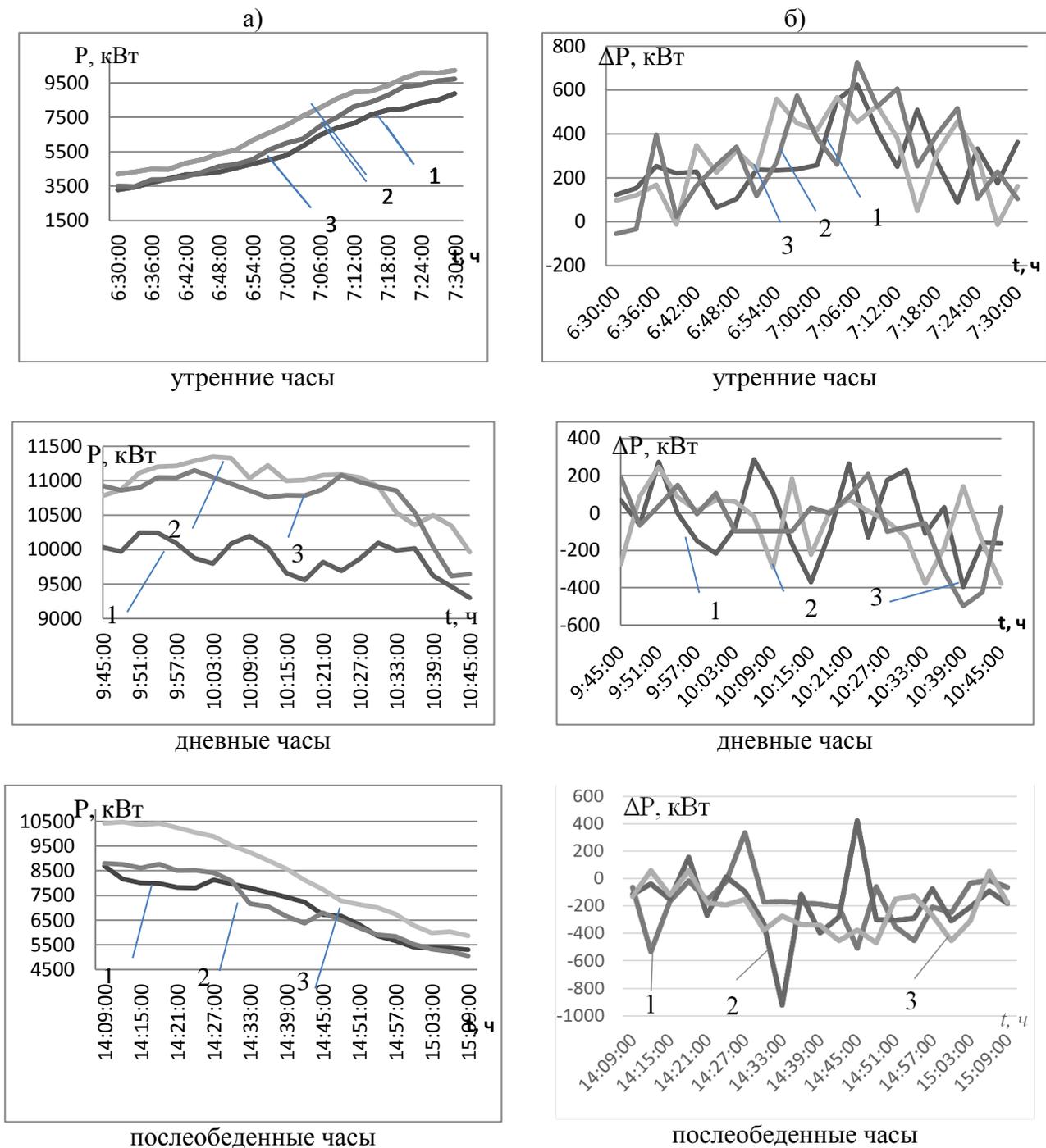


Рис. 3. Участок графика нагрузки завода (а) и первые приращения нагрузки завода (б):  
1 – для 09.04.18 г.; 2 – для 10.04.18 г.; 3 – для 11.04.18 г.

### Вывод

Контроль достоверности измерений суточной активной нагрузки промышленных предприятий методом ее первых приращений позволяет оперативно отслеживать состояние средств измерения нагрузки и своевременно

обнаруживать появление систематической погрешности измерения нагрузки предприятия.

#### Библиографический список

1. **Зингер, И.С.** Обеспечение достоверности данных в автоматизированных системах управления производством / И.С. Зингер, Б.С. Куцык. - М.: Наука, 1974. - 136 с.
2. **Мамиконов, А.Г.** Достоверность, защита и резервирование информации в АСУ / А.Г. Мамиконов, В.В. Кульба, А.Б. Шелков. - М.: Энергоатомиздат, 1986. - 304 с.
3. **Бэнн, Д.В.** Сравнительные методы прогнозирования электрической нагрузки / Д.В. Бэнн, Е.Д. Фармер. - М.: Энергоатомиздат, 1987. - 198 с.
4. **Анищенко, В.А.** Надежность измерительной информации в системах электроснабжения / В.А. Анищенко. - Минск: БГПА, 2000. - 128с.
5. **Новицкий, П.В.** Оценка погрешностей результатов измерений / П.В. Новицкий, И.А. Зограф. - М.: Энергоатомиздат, 1985. - 248 с.

УДК 621.311

В.И. Бирюлин, Д.В. Куделина

**РАЗРАБОТКА МОДЕЛИ ОЦЕНКИ СОСТОЯНИЯ ИЗОЛЯЦИИ  
КАБЕЛЬНЫХ ЛИНИЙ НА ОСНОВЕ  
НЕЧЕТКОГО ЛОГИЧЕСКОГО ВЫВОДА**

Юго-Западный государственный университет

Рассмотрены вопросы, связанные с прогнозированием остаточного ресурса работы электрооборудования. Разработанная модель оценки состояния изоляции на основе нечеткого логического вывода позволит получить данную оценку, учитывая разнородную исходную информацию, ее неполноту и неопределенность. Данная модель дает более достоверные результаты по сравнению с применением моделей, ориентированных на обработку только количественных исходных данных.

The article is devoted to the consideration of the issues related to the forecasting of the residual life of electrical equipment. The developed model for assessing the state of insulation based on the fuzzy logical inference will allow obtaining this estimate, taking into account the heterogeneous background information, its incompleteness and uncertainty. Thus, the given model gives more reliable results in comparison with the application of models focused on processing only quantitative initial data.

**Ключевые слова:** электроэнергетика, прогнозирование, нечеткий логический вывод, математическая модель, изоляция, неполнота информации.

**Key words:** electric power industry, forecasting, fuzzy inference, mathematical model, insulation, incompleteness of information.

Надежность электроснабжения потребителей - одно из основных требований к энергетическим системам. При работе энергетических объектов они постоянно подвергаются воздействию самых разнообразных неблагоприятных факторов. Это неизбежно приводит к тому, что в процессе работы происходит снижение качественного состояния электрооборудования, и эти процессы увеличивают вероятность возникновения различных отказов.

Для заблаговременного выявления начинающихся отказов требуется проведение постоянного контроля оборудования. Получение на основе данных непрерывного контроля адекватных оценок состояния объектов в энергетике становится особенно актуальным в настоящее время [8, 9].

Важным направлением, существенно влияющим на повышение качества применения информационных технологий для контроля и оценки технического состояния энергетических объектов, следует считать интеллектуализацию процессов обработки диагностической информации с использованием современных методов, в частности экспертных систем, которые способны обеспечить повышение качества оценки и прогнозирования технического состояния и ресурса объекта.

Задача прогнозирования работы электрооборудования имеет плохо формализуемый и неструктурированный характер, связанный с существованием неполноты и неоднозначности исходных данных, сложностью определения взаимных связей между значениями параметров оборудования и признаками проявления дефектов, необходимостью применения экспертных знаний для повышения достоверности результата оценки. Все это ограничивает возможность применения методов, рассчитанных на обработку количественной информации и предполагающих обработку больших объемов статических данных [1, 7].

Математический аппарат нечеткой логики более соответствует по своим основам и применению к мышлению человека, чем широко известные математические методы, направленные на обработку количественной информации [4, 5]. Такие модели могут создаваться для различных объектов, в том числе и энергетических.

Следует учитывать, что любая математическая модель может быть аппроксимирована системой, основанной на нечеткой логике, согласно теореме о нечеткой аппроксимации [6]. На этой основе с помощью качественных или лингвистических высказываний типа <Если – то> с последующей обработкой данных выражений средствами теории нечеткой логики обеспечивать адекватное отображение сколь угодно сложной рассматриваемой системы без использования громоздких систем линейных и дифференциальных уравнений.

В процессе эксплуатации энергетических объектов на изоляцию электрооборудования действует целый комплекс разрушающих воздействий, к ним относятся разнообразные электрические, тепловые, механические и другие нагрузки. Совместное действие данных факторов на изоляцию обеспечивает возникновение и развитие сложных процессов, приводящих к постепенному ухудшению свойств изоляции или старению [2, 3].

Эффективное решение подобных задач можно осуществить на основе применения аппарата нечеткой логики, позволяющей более полно учитывать многообразие механизмов воздействия на изоляцию различных нагрузок и внешних условий по сравнению с математическими моделями, основанными на применении систем алгебраических и дифференциальных уравнений. Для решения поставленной задачи разрабатываем модель на основе использования системы нечеткого логического вывода.

В процессе создания системы нечеткого логического вывода все имеющиеся знания по рассматриваемому объекту используются в виде некоторой формальной логической системы. В самом общем случае любая формальная логическая система может задаваться четверкой составляющих компонентов вида:

$$M = \langle T, P, A, B \rangle, \quad (1)$$

где  $T$  – множество базовых элементов, на основе которого строятся все выражения разрабатываемой системы, для этого множества  $T$  должен существовать способ определения принадлежности какого-либо произвольного изучаемого элемента к множеству  $T$ ;  $P$  – множество синтаксических правил, выделяющих

среди всех возможных выражений из множества базовых элементов только те, которые являются формулами или синтаксически правильными совокупностями;  $A$  – множество аксиом, т.е. формул, признаваемых априорно истинными, эти аксиомы являются ядром предметной области;  $B$  – разработанные правила вывода результатов, они являются самой сложной частью формальной логической системы.

При практическом применении формальных логических систем целесообразно выполнять замену этих систем нечеткими продукционными моделями. При разработке нечетких продукционных моделей они представляются согласованным множеством отдельных нечетких продукционных правил вида <Если – то> и заключением, следующим из данного правила, в виде нечетких высказываний. Структура разрабатываемой нечеткой продукционной модели определяется решаемой задачей, в том числе и исходной информацией.

Входной информацией для разрабатываемой модели будут причины и факторы, приводящие к старению изоляции.

Выходной величиной создаваемой модели будет оценка степени снижения ресурса электрической изоляции или степени ее износа. Поэтому в нашем случае будем работать в рамках MISO-системы со многими ( $n$ ) входными переменными и одной выходной переменной (много входов – различные входные данные, один выход – оценка степени износа изоляции).

Подобные системы реализуют отображение вида

$$y = f(x_1, x_2, x_3, \dots, x_n), \quad (2)$$

где  $y$  – выходная величина, в нашем случае оценка степени износа изоляции;  $x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$  – входные величины, или исходные данные.

Совокупность исходных данных может быть представлена вектором  $X$ , заданным на декартовом произведении областей определения входных величин  $X_1 \times X_2 \times X_3 \times \dots \times X_n$ . Функция  $f$  осуществляет отображение данного вектора  $X$  на область значений выходной величины  $Y$ .

Области определения входных величин используются для задания нечетких множеств  $A_1, A_2, A_3, \dots, A_n$ . В соответствии с принципом обобщения на выходе рассматриваемой системы получается нечеткое множество  $B = f(A_1, A_2, A_3, \dots, A_n)$ , представляющее результат отображения нечетких множеств входных величин:

$$B(y) = (A_1(x_1) \wedge A_2(x_2) \wedge \dots \wedge A_n(x_n)) = \left( \frac{\mu_B(y)}{y} \right); \quad (3)$$

$$f = f(X), X \in X_1 \times \dots \times X_n.$$

Нечеткую модель для определения степени износа изоляции разрабатываем на основе модели Мамдани [5, 6]. Эта модель в настоящее время наиболее часто используется. В ней отображение нечетких множеств входных величин, характеризующих воздействие на электрическую изоляцию, в выходное множество значений определяет существование некоторой поверхности, называемой

поверхностью отображения в пространстве  $X \times Y$ . Каждое правило, используемое в разрабатываемой модели, задает в пространстве  $X \times Y$  определенную точку, определяющую особенности поведения рассматриваемой системы.

Факторы, действующие на изоляцию, представляем как некоторое свойство рассматриваемой в математической модели системы, оцениваемое на качественном уровне, например: «уровень нагрева изоляции от протекания по токоведущим частям тока частотой 50 Гц», «интенсивность возникновения частичных разрядов». Каждому фактору при этом устанавливается в соответствие своя лингвистическая переменная, характеризуемая терм-множеством  $T_i = \{T_{1i}, T_{2i}, \dots, T_{mi}\}$ , термы которого представляют собой нечеткие оценки возможных состояний изучаемого фактора, например «низкая», «средняя», «высокая»; синтаксическими и семантическими правилами.

Рассматриваемая система нечеткого вывода реализует следующие основные этапы обработки исходной информации:

- фаззификация входных переменных;
- операция нечеткого вывода;
- дефаззификация.

Созданная модель реализует следующее отображение входных величин на выходной параметр  $Q$ :

$$X = (X_1, \dots, X_N) \rightarrow Q[0,100]. \quad (4)$$

При формировании выходного параметра его значениям соответствуют следующие отношения по общему состоянию изоляции:

- от 0 до 20 – уровень состояния изоляции «очень низкий», требуется срочный вывод оборудования в ремонт для предотвращения аварии;
- от 20 до 40 – уровень состояния изоляции «низкий», требуется техническое обслуживание, возможен мелкий ремонт оборудования;
- от 40 до 60 – уровень состояния изоляции «средний», требуется техническое обслуживание без вывода оборудования в ремонт;
- от 60 до 80 – уровень «выше среднего», рекомендуется дополнительная обработка исходных данных для уточнения состояния изоляции;
- от 80 до 100 – уровень «высокий», изоляция находится в нормальном состоянии, не требующем выполнения никаких дополнительных действий.

При формировании базы нечетких правил используются как априорные данные, которые поступают от экспертов, так и данные, получаемые в результате измерений.

Модель оценки состояния электрической изоляции с применением системы нечеткого логического вывода позволяет получать данную оценку с учетом разнородной входной информации как количественной (в первую данные различных измерений) так и качественной (в основном экспертные оценки). В процессе нахождения значения оценки состояния учитывается неполнота и неопределенность части исходной информации. Данный подход к построению

таких моделей обеспечивает получение более достоверных результатов выходного параметра или же оценки текущего состояния изоляции электрооборудования по сравнению с применением моделей, ориентированных на обработку только количественных исходных данных.

#### Библиографический список

1. **Куделина, Д.В.** Система непрерывного контроля изоляции энергетических объектов / Д.В.Куделина // Auditorium. – 2017. – № 2 (14). – С. 124–131.
2. **Воропай, Н.И.** Надёжность систем электроснабжения: конспект лекций / Н.И. Воропай. - Новосибирск, Наука, – 2006. – 205 с.
3. **Конюхова, Е.А.** Надёжность электроснабжения промышленных предприятий / Е.А. Конюхова - М., Энергопрогресс, – 2001. – 92 с.
4. **Куделина, Д.В.** Прогнозирование развития региональной энергетической системы / Д.В Куделина // Научные ведомости Белгородского государственного университета. Сер. Экономика. Информатика. – Белгород. – 2016. – № 9 (230). – С. 129–134.
5. **Леоненков, А.В.** Нечеткое моделирование в среде MATLAB и fuzzyTECH / А.В. Леоненков – СПб.: БХВ-Петербург, – 2005. – 736 с.
6. **Стеклов, А.С.** Нейро-нечеткая модель диагностирования технического состояния синхронного генератора / А.С. Стеклов, Д.С. Подковырин // Главный энергетик. – 2015. – №11–12. – С. 55–59.
7. **Ушаков, В.Я.** Современная и перспективная энергетика: технологические, социально-экономические и экологические аспекты / В.Я. Ушаков. – Томск: ТПУ, – 2008. – 469 с.
8. **Федяков, И.** Износ оборудования системная проблема всей электроэнергетической отрасли / И. Федяков // Электротехнический рынок. [Электронный ресурс]. URL: <http://market.elec.ru/nomer/36/iznos-oborudovaniya-sistemnaya-problema-vsej-elekt/>
9. Вопросы реализации оценки технического состояния силового оборудования на электрических подстанциях / А.И. Хальясмаа [и др.] // Вопросы современной науки и практики. – 2013. – №1 (45). – С. 289–300.

УДК 621.311

Г.Я.Вагин, А.А.Севостьянов, С.Н.Юртаев

**ПОВЫШЕНИЕ КАЧЕСТВА ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ  
НА МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИХ ПРЕДПРИЯТИЯХ**

Нижегородский государственный технический университет им.Р.Е.Алексеева

Приводятся рекомендации по средствам повышения качества электрической энергии на предприятиях черной и цветной металлургии, на которых имеется большое число электроприемников, оказывающих влияние на показатели качества.

The recommendations on the means of increasing the electric power quality are given at the enterprises of ferrous and non-ferrous metallurgy. These enterprises have a large number of power consumers, which have an impact on quality indicators.

**Ключевые слова:** системы электроснабжения металлургических предприятий, средства повышения качества электроэнергии.

**Key words:** power supply systems of metallurgical enterprises, means of increasing the electric power quality

Как показано в [1, 2], качество электроэнергии (КЭ) оказывает большое влияние на эффективность функционирования систем электроснабжения городов, промышленных предприятий и сельского хозяйства, ежегодный ущерб от низкого КЭ в России составляет около 25 млрд дол.

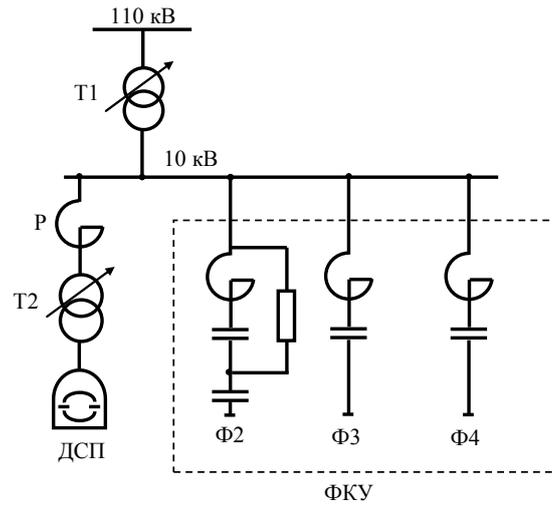
Проблема повышения КЭ особенно остро ощущается на металлургических предприятиях, на которых имеется большое количество электроприемников с резкопеременным, несимметричным и несинусоидальным режимом работы.

Наибольшее влияние на КЭ оказывают дуговые сталеплавильные печи (ДСП), прокатные станы и электролизные установки, мощность которых достигает 150 МВА.

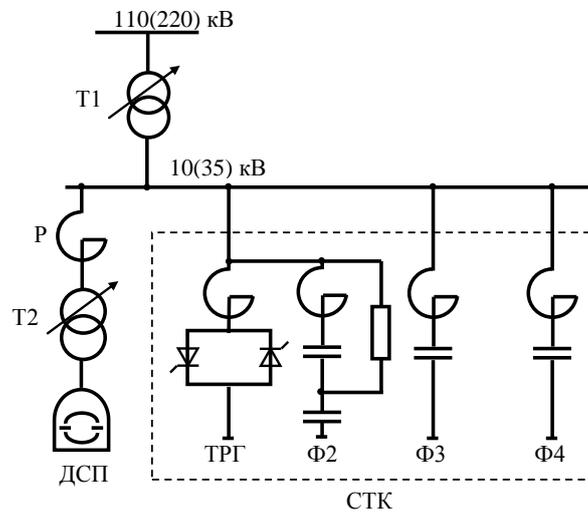
**Предприятия с ДСП.** На данных предприятиях проблему повышения КЭ можно решить следующими средствами:

- 1) применением фильтркомпенсирующих установок (ФКУ) (рис.1, а);
- 2) использованием статических тиристорных компенсаторов (СТК) (рис.1, б);
- 3) применением компенсаторов типа СТАТКОМ и силовых фильтров (рис.1, в).

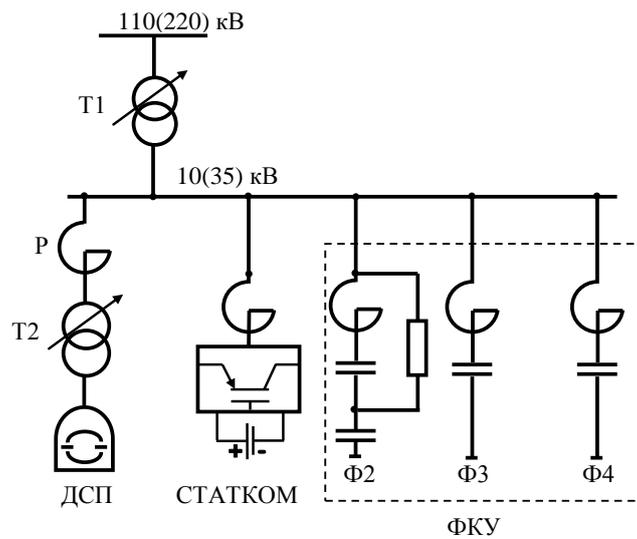
Схема рис.1, а может применяться в системах электроснабжения (СЭС) с ДСП малой мощности, когда отсутствуют электроприемники, чувствительные к КЭ (освещение, ЭВМ, электронная техника и т.д.). Она включает широкополосный фильтр Ф2 типа – С и два узкополосных фильтра Ф3 и Ф4, настроенных на 3 и 4-ю гармоники. Данная схема позволяет компенсировать реактивную мощность до заданного  $\text{tg } \varphi$  и фильтровать высшие гармоники (ВГ) тока.



а)



б)



в)

Рис. 1. Возможные варианты повышения КЭ в СЭС с ДСП

Ее недостаток – отсутствие быстродействующего регулирования изменения реактивной мощности и соответственно снижения колебаний напряжения, отсутствие возможности симметрирования нагрузки печи.

Схема рис 1, б получила наибольшее применение в системах электропитания металлургических предприятий как в России, так и за рубежом. Она позволяет компенсировать реактивную мощность, снижать колебания и провалы напряжения, фильтровать высшие гармоники тока, симметрировать нагрузку печи. Основным элементом в схеме является статистический тиристорный компенсатор (СТК), состоящий из тиристорно-реакторной группы (ТРГ) и набора фильтров ВГ (Ф2 – широкополосного, типа – С, Ф3 и Ф4 - узкополосных).

Тиристорно-реакторная группа состоит из трех однофазных реакторов, управляемых встречно-параллельно включенными тиристорами, соединенных в треугольник. Управляемый реактор ТРГ потребляет реактивную мощность в противофазе с дуговой печью и тем самым снижает набросы реактивной мощности и колебания напряжения соответственно.

Согласно данным [4], мощность СТК должна быть на 10 – 60 % выше мощности печного трансформатора.

Схема рис. 1, в является перспективной, но в настоящее время не получила распространение на металлургических предприятиях из-за высокой стоимости СТАТКОМа. Она обладает большим быстродействием и меньшей установленной мощностью элементов, чем схема рис 1, б. Основными ее элементами являются СТАТКОМ и набор фильтров ВГ.

На рис. 2 приведена однолинейная схема питания ДСП и агрегата печьюковш (АПК) с СТК на одном из действующих металлургических предприятий.

**Предприятия с прокатными станами.** В прокатных цехах имеется большое количество ЭП, требующих регулирования частоты их вращения. Для электропривода этих электроприемников в настоящее время применяют тиристорные преобразователи частоты с адаптивными выпрямителями напряжения на базе полностью управляемых IGBT тиристорных или IGBT транзисторов с ШИМ модуляцией. Как показано в [3, 4], данные преобразователи создают малые уровни гармоник в диапазоне от 50 до 1500 Гц и большие уровни в диапазоне от 1500 до 9000 Гц. Они могут работать в режиме генерации и потребления реактивной мощности.

Для снижения гармоник в диапазоне от 1500 до 9000 Гц следует предусматривать широкополосный фильтр, настроенный на частоту  $n_p$ , которая определяется по выражению [4]

$$n_p = \sqrt{\frac{S_{\text{ном.т}}}{u_k (Q_{\text{КБ}} + Q_{\text{КЛ}})}},$$

где  $S_{\text{ном.т}}$  – номинальная мощность трансформатора ГПП, от которого питаются преобразователи, кВА;  $u_k$  – напряжение короткого замыкания трансформатора ГПП, отн. ед.;  $Q_{\text{КБ}}$  – мощность КБ фильтра, квар;  $Q_{\text{КЛ}}$  – реактивная мощность кабельных линий 6, 10 кВ предприятия, квар.

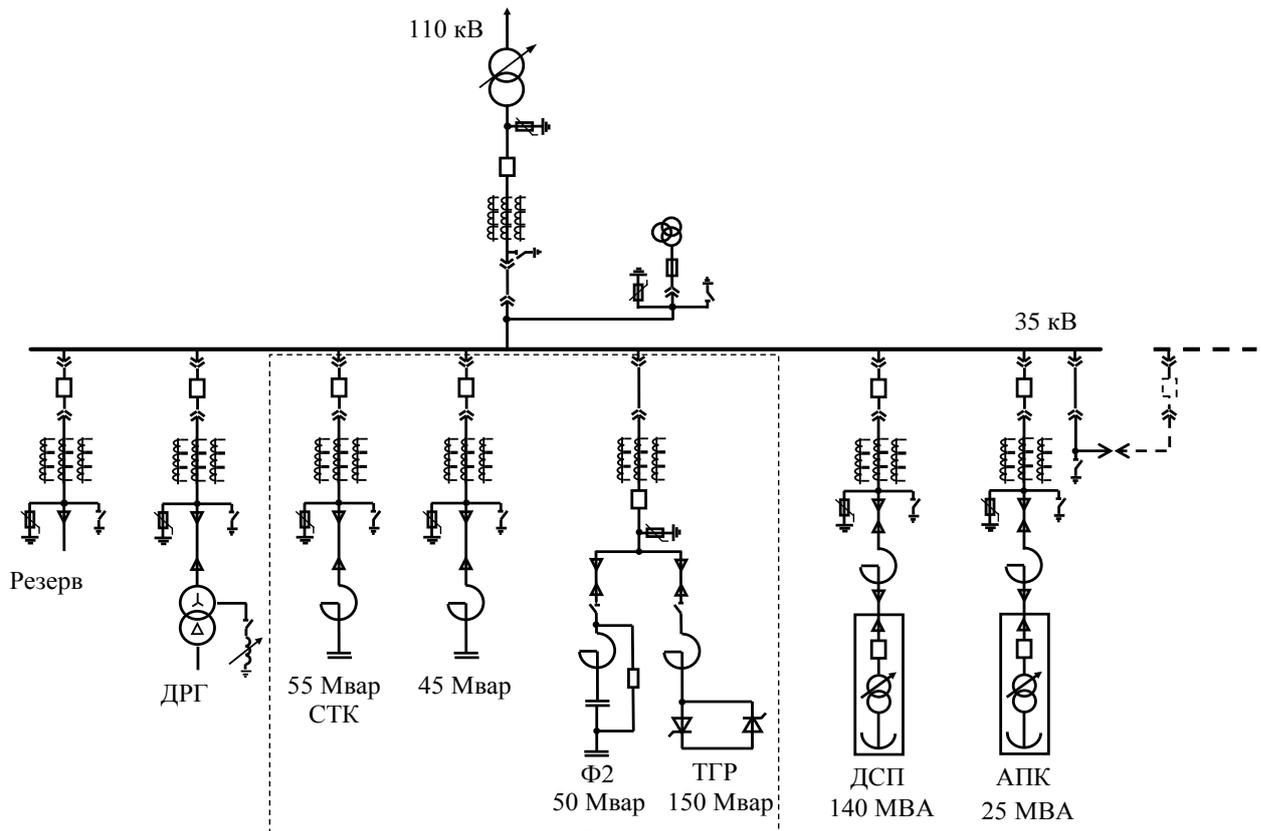


Рис. 2. Однолинейная схема питания ДСП и АПК с СК

При наличии электроприемников, чувствительных к провалам и отклонениям напряжения, необходимо применять активные фильтры продольного включения.

**Предприятия с электролизными электроприемниками.** На предприятиях цветной металлургии наиболее энергоемкими являются электролизные цеха. Проблему снижения высших гармоник и повышения КЭ в этих цехах следует решать применением фильтров ВГ. Учитывая, что ВГ не нужно снижать до нуля, можно устанавливать фильтры только на наибольшие гармоники: при шестипульсной схеме на 5 и 7, при двенадцатипульсной – на 11, 13, при двадцатичетырехпульсной схеме на 23 и 25 гармоники.

Так как на всех металлургических предприятиях имеются источники ВГ, то конденсаторные установки могут применяться только в составе фильтров (если коэффициент несинусоидальности  $K_U$  больше норм ГОСТ 32144-2013 [5]) или оснащаться защитными реакторами (если  $K_U$  меньше норм этого ГОСТа). Индуктивность защитных реакторов выбирается таким образом, чтобы цепь реактор – батарея конденсаторов носила индуктивный характер на частоте гармоник наименьшего порядка  $n_{HM}$  из спектра источника гармоник. Сопротивление реактора определяется по выражению (при соединении КБ в звезду)

$$x_p = \frac{3 \cdot U_{НОМ\ КБ}^2}{Q_{КБ} \cdot n_{HM}^2}.$$

## Вывод

В работе предложены устройства позволяющие, повысить качество электрической энергии на предприятиях черной металлургии.

## Библиографический список

1. **Вагин, Г.Я.** Качество электрической энергии в системах электроснабжения. Анализ состояния методов нормирования и контроля / Г.Я Вагин, А.Л. Куликов // Электрические станции. – 2019 - №6. - С. 54-59.
3. **Добрусин, Л.А.** Проблемы качества электрической энергии и электроснабжения в России / Л.А. Добрусин // Энергоэксперт. – 2008. - №4(9). – С.30-35.
4. **Вагин, Г.Я.** К вопросу о нормировании несинусоидальности напряжения от высших гармоник / Г.Я. Вагин, С.Н. Юртаев // Промышленная энергетика. – 2017. - №1. – С.43-47.
5. Экспериментальные исследования электромагнитной совместимости современных электроприводов в системе электроснабжения металлургического предприятия / А.А. Николаев [и др.] // Вестник МГТУ им. Г.И. Носова. – 2016. - Т.14. - №4. - С.96-105.
6. ГОСТ 32144-2013. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. – М.: Стандартинформ, 2013.

УДК 62-52:656.56

А.М. Гатауллин

**ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНАЯ СИСТЕМА ЭНЕРГОСНАБЖЕНИЯ,  
УЧИТЫВАЮЩАЯ СТЕПЕНЬ ЗАГРЯЗНЕНИЯ ИЗОЛЯТОРОВ**

Казанский государственный энергетический университет

Предложена интеллектуальная система энергоснабжения, учитывающая степень загрязнения изоляторов. Получены статистические характеристики поверхностных частичных разрядов (ПЧР) полимерных композитных изоляторов кабельных линий 6-35 кВ, обусловленные увлажнением и загрязнением поверхности. Показано, что эффект характерен для полимерных изоляторов и не характерен для фарфоровых.

The SMART GRID system, taking into degree of insulators pollution had been proposed. The statistical characteristics of the surface partial discharges (SPD for polymer composite insulators of cable lines 6-35 kV caused by moisture and contamination of the surface of the insulators had been obtained. It is shown that the effect is characteristic of polymer insulators and is not characteristic of porcelain ones.

**Ключевые слова:** оценка загрязнения полимерных изоляторов системы энергоснабжения среднего напряжения, метод частичных разрядов, интеллектуальные системы энергоснабжения.

**Key words:** assessment of contamination of polymer insulators of medium voltage cable lines, partial discharges method, SMART GRID power supply systems.

**Примеры реализации функций интеллектуальных систем  
энергоснабжения кабельных линий среднего напряжения**

В настоящее время для реализации самовосстанавливающихся после аварийных режимов сетей энергоснабжения активно развиваются интеллектуальные системы энергоснабжения (*SMART GRID*). При этом предполагается реализация функций релейной защиты и автоматики (РЗА) без участия диспетчера, а сеть энергоснабжения сама принимает «умное» решение на основе состояния ее отдельных элементов и параметров режима энергоснабжения относительно включения резервной линии электропередачи взамен поврежденной [1]. Например, в Республике Татарстан в ОАО «Сетевая компания» при реализации автоматического включения резерва (АВР) интеллектуальные системы энергоснабжения учитывается состояние выключателей. При этом система энергоснабжения 6/10 кВ реализована на кабелях с изоляцией из сшитого полиэтилена (*XLPE* кабели). Одна из главных функций интеллектуальной системы энергоснабжения – отыскание мест повреждений и принятие решения о включении резерва с учетом текущего состояния выключателей, защитных оболочек арматуры, изоляторов резервной линии. При этом сложность заключается в том, что

кабельные линии (КЛ) среднего напряжения имеют большую протяженность, разветвлены и не имеют в должном объеме датчиков тока и напряжения. В связи с этим интеллектуальные системы энергоснабжения дополняют системой датчиков частичных разрядов (ЧР) для предотвращения аварийных режимов и отключений КЛ [2]. В данной работе рассматривается возможность учета в режиме online степени загрязнения полимерных оболочек концевых и соединительных муфт КЛ среднего напряжения по характеристикам ЧР. Online диагностика КЛ по характеристикам ЧР развивается достаточно давно [3], однако, до настоящего времени имеются сложности при ее реализации на практике в системах *SMART GRID* по причине отсутствия четких параметров срабатывания функций РЗА (так называемых уставок). В том числе существенным препятствием является электромагнитный шум на подстанции, для уменьшения которого необходимо выбирать подходящий экранированный датчик с соответствующим частотным диапазоном. В данной работе применяются стандартные высокочастотные измерительные трансформаторы (ВИТ) на основе пояса Роговского.

### Пути реализации метода ЧР в интеллектуальных системах энергоснабжения

Если пояс Роговского имеет хорошо сконструированную экранированную обмотку, то он будет практически нечувствителен к внешним помехам (рис. 1). На высоковольтной подстанции имеется множество источников ЧР, сигналов помех и шума, распространяющиеся по поверхности проводников, на фоне которых необходимо выделить сигналы, отраженные от неоднородностей кабеля.

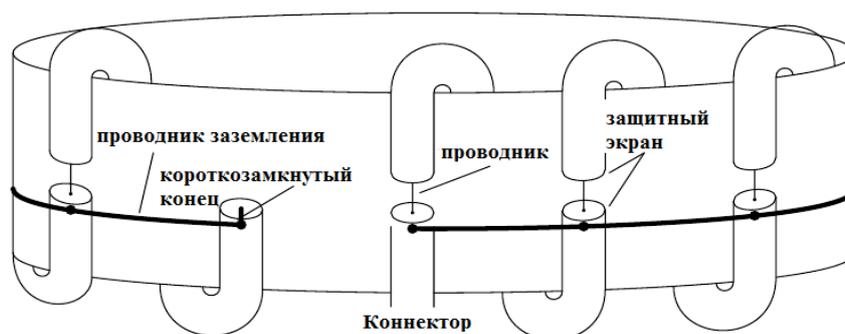
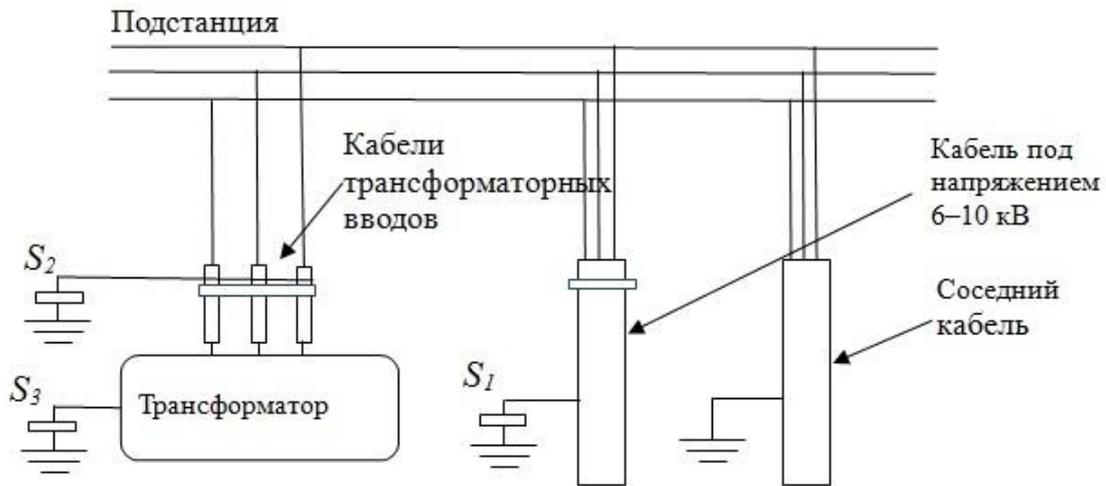


Рис. 1. Пояс Роговского с экранированной обмоткой (заземленный проводящий экран)

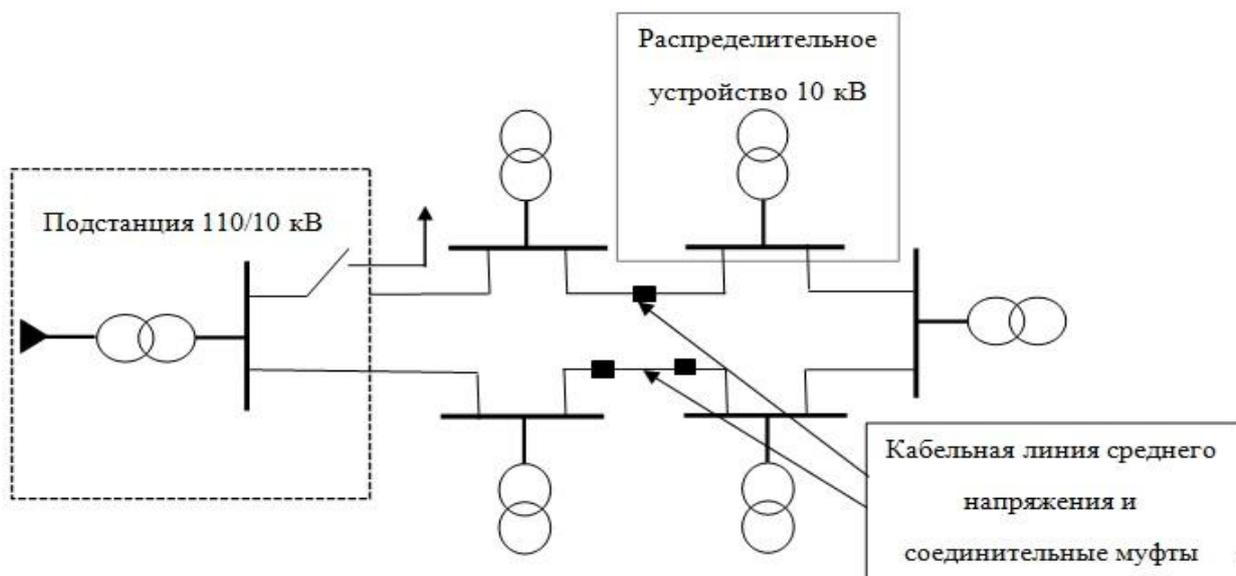
Источниками посторонних сигналов могут быть, например, обмотка, кабели вводов трансформатора, другие изоляционные конструкции. В связи с этим для учета посторонних сигналов необходимо применять несколько ВИТ и тщательно разрабатывать схему их расположения (рис. 2). С помощью нескольких ВИТ можно контролировать токи ПЧР контролируемой муфты. Необходимость применения нескольких датчиков ЧР связано с вычислением взаимного влияния элементов подстанции и увеличением соотношения сигнал–шум ( $S/N$ ),

которое зависит и от полярности электромагнитного излучения, интенсивности электромагнитного излучения, не связанного с ЧР.



**Рис.2. Пример схемы расположения датчиков на подстанции 10/0.4 кВ:**  
 $S_1$  – датчик ЧР контролируемого кабеля;  $S_2$  – датчик контроля ЧР бака трансформатора;  
 $S_3$  – датчик ЧР вводов трансформатора

Кабельно-воздушные линии электропередачи (КВЛ) среднего напряжения (6–10 кВ) на сегодняшний день самые протяженные в России и в мире в целом, поэтому для предотвращения аварийных ситуаций важно диагностировать и определить места повреждений жил, изоляции, соединительных муфт кабелей, что является одной из задач РЗА электроэнергетических систем (ЭЭС). Одна из стандартных схем распределительной сети ЭЭС с кольцевой структурой представлена на рис. 3.



**Рис. 3. Кабели среднего напряжения в распределительной сети с кольцевой структурой**

Исследования, связанные с ЧР, можно разделить на две основные категории: разработка моделей возникновения ЧР, разработка моделей старения, деградации и пробоя изоляции. Условием возникновения внутренних ЧР в твердой или жидкой изоляции является наличие в объеме изоляции воздушных вкраплений, пузырьков газа (каверн), образующихся на этапе производства и монтажа, в том числе в местах присоединений кабеля (соединительных, концевых муфтах и опорно-стержневых изоляторах, контактах, кабельной арматуре).

Распределение линий напряженности электрического поля внутри силовых кабелей связано с особенностями технологии их изготовления, например, в трехфазном кабеле электрическое поле будет максимальным между жилами кабеля (рис. 4).

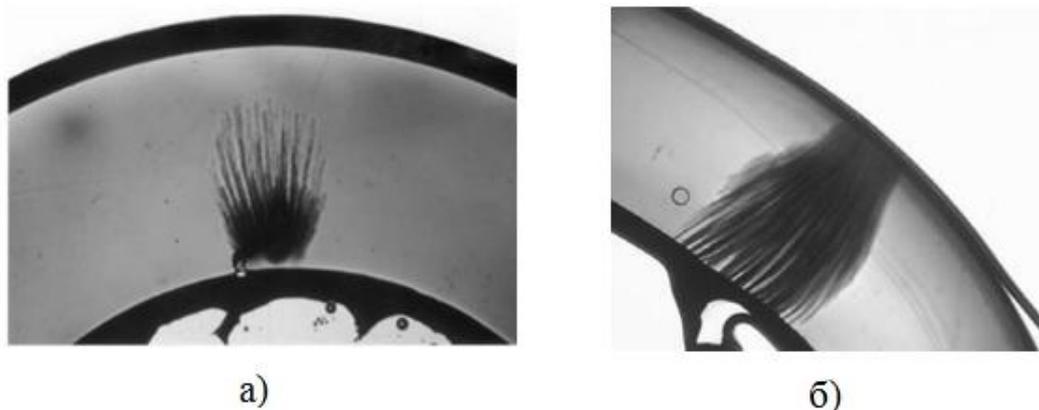


**Рис 4. Распределение линий напряженности электрического поля внутри трехфазного бронированного кабеля с бумажно-масляной пропитанной изоляцией**

Кабель с бумажно-масляной пропитанной изоляцией (БМПИ) устойчив к воздействиям относительно больших по амплитуде ЧР (тысячи пКл). Кабель из сшитого полиэтилена чувствителен даже к небольшим ЧР (порядка пКл), разрушающим связи в молекулах изоляции, иногда ЧР появляются на последней стадии разрушения. В самом начале основной причиной разрушения кабеля с изоляцией из сшитого полиэтилена служит влага, проникающая как извне, так и образующая изнутри (рис. 5). Для локализации места повреждения и интерпретации типа повреждения в изоляции кабеля необходимо применять ряд датчиков, расположенных как вокруг кабеля, так и вокруг заземляющего проводника (рис. 6).

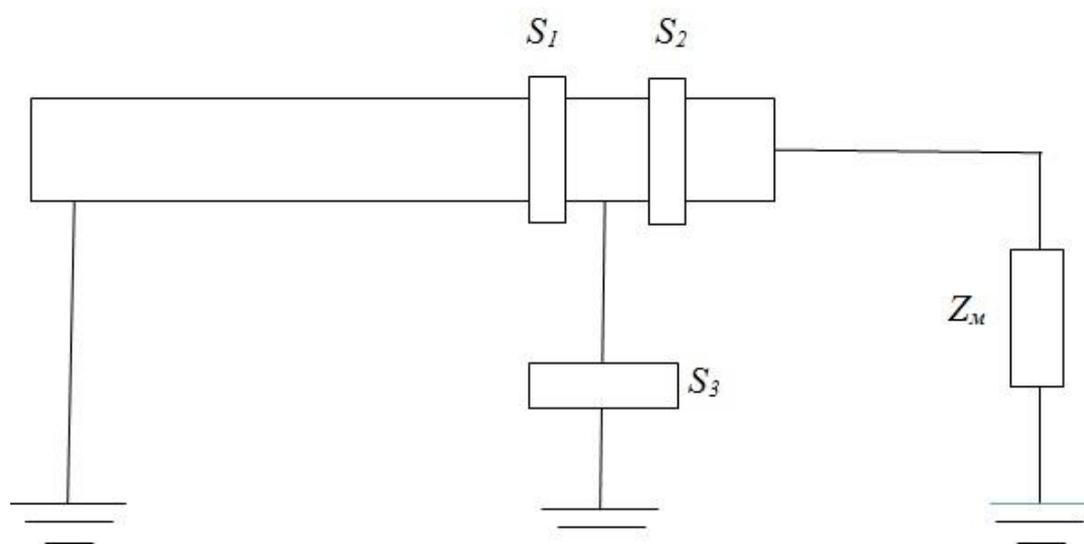
На практике проникновению воды в толщу изоляции кабеля предшествует увлажнение и последующее повреждение муфтовых соединений кабеля и опорных изоляторов (как правило, полимерных), поэтому при реализации функций интеллектуальной системы необходимо учитывать степень загрязнения и увлажнения полимерных изоляторов. При этом удастся избежать излишних отключений системы энергоснабжений, выхода из строя изоляторов по причине их увлажнения. Для реализации данной функции интеллектуальной

системы энергоснабжения следует изучить зависимость характеристик ЧР от степени увлажнения поверхности изоляторов. Далее показаны результаты исследований.



**Рис. 5. Водные триинги (water trees), образуемые под воздействием электрического поля:**

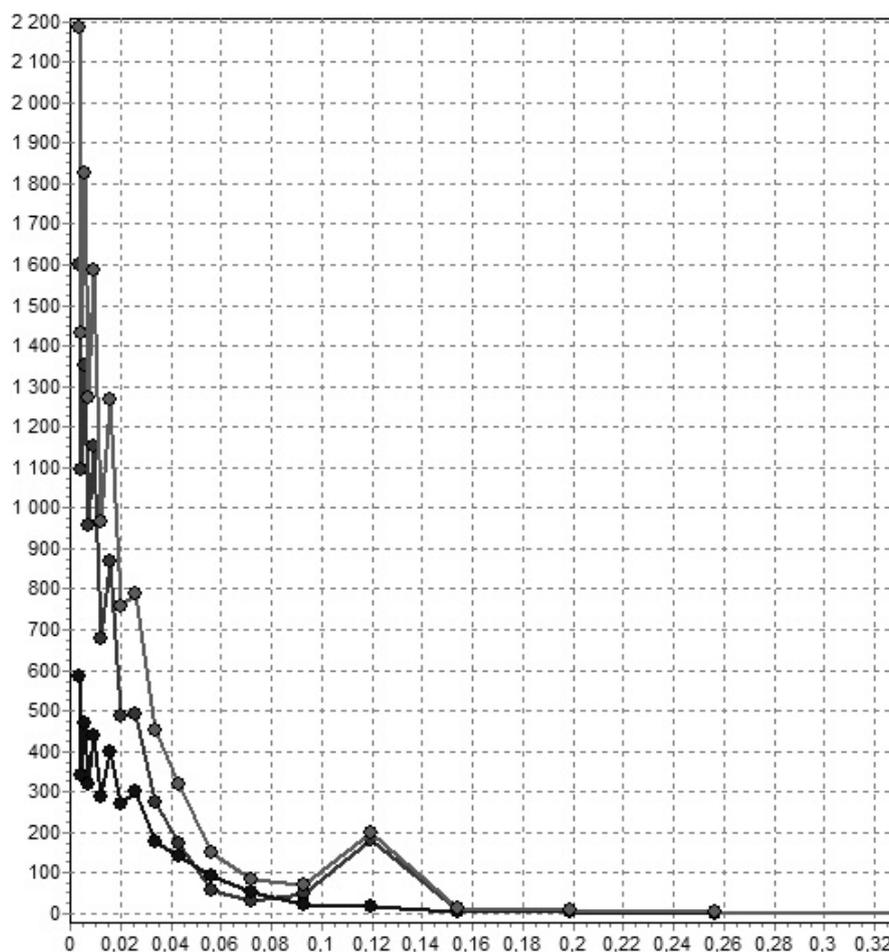
*a* - вода проникает от проводящего слоя в изоляцию; *б* - вода проникает из толщи изоляции внутрь кабеля к проводящему слою



**Рис. 6. Пример схемы расположения датчиков в кабеле 10 кВ на подстанции 110/10 кВ:**  
 $S_1$ ,  $S_2$  – датчики ЧР справа и слева от заземляющего проводника для измерения тока по каналам типа экран-проводник;  $S_3$  – датчик ЧР вокруг заземляющего проводника;  
 $Z_m$  – нагрузка (сопротивление объектов подстанции)

### Способ учета степени увлажнения и загрязнения поверхности полимерных изоляторов для внедрения в интеллектуальные системы энергоснабжения

Исследованы полимерные композитные изоляторы (ПКИ) в лабораторных условиях с точки зрения характеристик ПЧР (рис. 7).



**Рис. 7. Статистическое распределение ЧР типа 1 и 2:**  
(увлажненный ПКИ, переменное напряжение 35 кВ)

Снизу-вверх: отрицательные, положительные импульсы и суммарное число импульсов.  
Развертка по горизонтали: амплитуда в вольтах ( $[1 \text{ мВ}] = [10 \text{ пКл}]$ ),  
развертка по вертикали: число ЧР

Пик на рис.7 (0,12 В) появляется при существенном увлажнении поверхности полимерных композитных изоляторов и не проявляется при увлажнении поверхности фарфоровых изоляторов, что позволяет в автоматическом режиме определять сильно увлажненные ПКИ, из которых изготавливают концевые и соединительные муфты *XLPE* КЛ среднего напряжения. Учет степени увлажнения поверхности полимерных изоляторов при реализации функции АВР должен способствовать уменьшению выхода из строя изоляторов, прежде всего в результате предотвращения образования дуговых разрядов, пронизывающих изолятор изнутри и разрушающих его (о чем свидетельствует ряд зарубежных исследований).

Загрязнение является причиной срабатывания функций РЗА, отключений потребителей от системы энергоснабжения. Известны случаи с более тяжелыми последствиями неудовлетворительного состояния изоляторов, когда отключение линии среднего напряжения за счет каскадных отключений вследствие однофазных замыканий на землю (ОЗЗ) приводило к крупным авариям, то есть

отключениям линий энергоснабжения 110 кВ. Дело в том, что ОЗЗ происходили в разных точках, что не было предусмотрено РЗА системы энергоснабжения в целом. Предложенный способ учета степени увлажнения и загрязнения поверхности изоляторов по характеристикам ЧР позволит предотвратить аварийные ситуации в будущем. Метод прост и удобнее для внедрения в интеллектуальные системы энергоснабжения. Предложенный метод является избирательным для изоляторов различного типа, в частности для полимерных изоляторов на соответствующем статистическом распределении характерны поверхностные ЧР величиной 0,12 В.

### Выводы

Изучена взаимосвязь между характеристиками поверхностных частичных разрядов полимерных композитных изоляторов кабельных линий 6-35 кВ и степени их загрязнения. Рассмотрены варианты расположения датчиков ЧР для реализации метода частичных разрядов (ЧР) в интеллектуальных системах энергоснабжения. Показано, что с увеличением степени загрязнения на статистической зависимости четко проявляются ПЧР величиной 0,12 В. В то же время аналогичные ПЧР не наблюдаются для фарфоровых изоляторах. Полученная зависимость может быть реализована в интеллектуальных системах энергоснабжения на основе КЛ среднего напряжения для реализации функции АВР с учетом состояния муфтовых соединений и опорных изоляторов КЛ среднего напряжения. Предложенный метод оценки степени увлажнения полимерных изоляторов, будучи внедренным в интеллектуальные системы энергоснабжения, позволит предотвратить каскадные однофазные замыкания на землю, т.е. и более крупные аварии.

### Библиографический список

1. **Montanari, G.** Partial discharge diagnostics: from apparatus monitoring to *SMART GRID* assessment / G. Montanari, A. Cavallini // *IEEE Electrical Insulation Magazine*. – 2013. – 29(3). – P. 8–17.
2. Partial discharge diagnostic system for smart distribution networks using directionally calibrated induction sensors / M. Shafiq [et al.] // *Electric Power Systems Research*, 119. – 2015. – P. 447–461.
3. Aspect of on-line and off-line PD diagnosis of distribution power cables / F. Wester [et al.] // *Conference Record of the 2002 IEEE International Symposium on Electrical Insulation*. – April 2002. – P. 553 - 556.
4. **Holmgren B.** Condition assessment of 12 and 24 kV XLPE cables installed during the 80's. Results from a joint Norwegian / B. Holmgren, L. Adeen., S. Hvidsten // *Swedish research project. Nordic distribution and asset management conference*. – 23 – 24.8.2004. – Espoo Finland. – 2004. – P. 11.

УДК 62-52:656.56

А.М. Гатауллин

## РАЗРАБОТКА ЭКСПРЕСС-МЕТОДА ОЦЕНКИ СОСТОЯНИЯ ИЗОЛЯЦИИ СИЛОВЫХ КАБЕЛЕЙ

Казанский государственный энергетический университет

Рассмотрены основные методы производственного контроля качества изоляции силовых кабелей из сшитого полиэтилена на основе анализа характеристик частичных разрядов. Приведены недостатки этих методов и ограничения, обусловленные практикой. Предложен эффективный экспресс-метод оценки изоляции силовых кабелей с изоляцией из сшитого полиэтилена.

The main methods control quality of power XLPE cables insulation based on the analysis characteristics of partial discharges had been considered. The limitations of these methods application on manufacturing practice have been given. An effective express method for assessing the insulation of power XLPE cables had been proposed.

**Ключевые слова:** оценка состояния изоляции силовых кабелей из сшитого полиэтилена, метод частичных разрядов.

**Key words:** XLPE power cables insulation state assessment, partial discharges method.

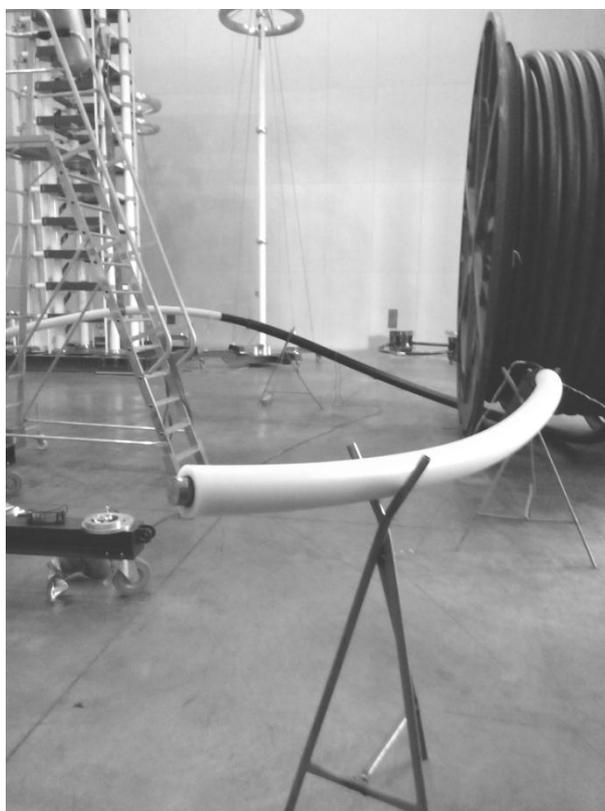
### Недостатки производственных методов контроля изоляции из сшитого полиэтилена

В Республике Татарстан на ОАО «Таткабель» организовано производство XLPE кабелей, а в 2016 г. была открыта первая в России испытательная высоковольтная лаборатория.

Изначально, согласно СТО ОАО «Севкабель», всего предусматривалось четыре вида испытания изоляции кабелей из сшитого полиэтилена, все они касались различных реализаций метода частичных разрядов (ЧР). Однако по причине трудоемкости процедуры испытаний изоляции XLPE кабелей на ОАО «Таткабель» было решено производить продукцию по техническим условиям (ТУ). В итоге из четырех методов испытания изоляции XLPE кабелей оставили метод осциллирующего возвратного напряжения (OWTS метод), предполагающий контроль состояния муфтовых соединений после монтажа и контроль стойкости изоляции кабелей к импульсным перенапряжениям по динамике изменения характеристик ЧР под воздействием коммутационных перенапряжений. Два других испытания - повышенным пробивным сверхнизкочастотным напряжением (СНЧ напряжением), предполагающим отслеживание динамики изменения характеристик ЧР при условии нахождения кабеля под номинальным напряжением в течение года в воздухе и контроль динамики изменения

характеристик ЧР при нахождении кабеля в воде под номинальным напряжением в течение более 40 дней, исключили из перечня испытаний. Два последних испытания должны проводиться в лабораторных условиях.

Все испытания должны были производиться для каждого десятого образца из производственной партии. Причиной отказа от всех типов испытаний является длительность, а, следовательно, неэффективность методов испытаний. В тоже время данные немецких лабораторий говорят о том, что число отказов *XLPE* кабелей больше по сравнению с БМИ кабелями. Следовательно, для увеличения эффективности систем энергоснабжения на основе *XLPE* кабелей, сдерживания роста тарифов, увеличения качества электроэнергии [1] необходимо внедрить на производстве эффективный метод контроля изоляции *XLPE* кабелей.



**Рис.1. Высоковольтная испытательная лаборатория ОАО «Таткабель»**

### **Анализ деградации изоляции *XLPE* кабелей под воздействием ЧР. Экспресс-метод контроля изоляции *XLPE* кабелей**

Известно, что основной причиной разрушения твердой изоляции являются внутренние ЧР. Условие возникновения внутренних ЧР в твердой изоляции - наличие в объеме изоляции воздушных вкраплений (каверн), которые наряду с другими физическими и химическими неоднородностями изоляции способствуют ее разрушению. Каверны образуются на этапе производства и монтажа, в том числе в соединительных, концевых муфтах, изоляторах. Возникновение ЧР

в воздухе происходит за счет образования резко неоднородного электрического поля. ЧР постепенно увеличивают число каверн. Условием возникновения ЧР [2] является соотношение

$$E_{\text{лок}}/n \geq 120\text{Td}, \quad (1)$$

где  $E_{\text{лок}}$  - напряженность локального электрического поля, В/м;  $n$  - концентрация молекул,  $\text{м}^{-3}$ ; Td (таунсенд) – единица измерения  $E_{\text{лок}}/n$ ,  $10^{-21} \text{Вм}^2$ .

При условии выполнения соотношения (1) возникают новые каверны, а при достижении числа каверн критического значения изоляция XLPE кабеля разрушается и происходит пробой. Дефект имеет собственную электрическую емкость, на которой периодически происходит частичный пробой, при условии превышения локального электрического поля критического значения. Амплитуда ЧР связана со степенью неоднородности напряженности электрического поля – соотношением величин напряженности локального и среднего электрического поля

$$E_{\text{лок}}/E, \quad (2)$$

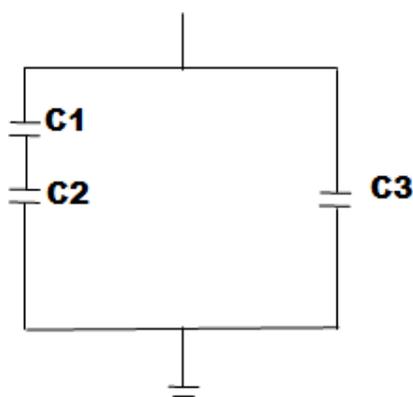
где  $E_{\text{лок}}$  - напряженность локального электрического поля, В/м;  $E$  - среднее значение напряженности электрического поля, В/м.

Относительная величина локального электрического поля определяется геометрией каверны, величиной остаточного заряда, влагой и другими параметрами. Схема замещения дефекта в диэлектрике представлена на рис.2. Чем больше число дефектов одинакового типа находятся в один момент времени под одинаковым потенциалом электрического поля, тем больше одновременно будут возникать ЧР с одной и той же величиной кажущегося заряда:

$$q = C_2(V_3 - V_2), \quad (3)$$

$$C_2 \gg C_1, \quad (4)$$

где  $q$  – амплитуда ЧР, пКл;  $C_2$  – электрическая емкость каверны, нФ;  $V_3$  – напряжение зажигания ЧР, мВ;  $V_2$  – напряжение гашения ЧР, мВ.



**Рис. 2. Схема замещения дефекта в диэлектрике:**

C1 – электрическая емкость неповрежденной изоляции; C2 – электрическая емкость, обусловленная воздушной каверной

В работе предлагается тестировать устойчивость изоляции кабелей к ЧР с помощью системы электродов подобной системе электродов плоскость-игла (рис. 3). Критерием устойчивости изоляции к ЧР является время пробоя изоляции, которое сопоставляется с аналогичным значением для образцового кабеля и для кабеля с изначальным большим количеством дефектов. Отметим, что в принятом в США стандарте напряжение плавно увеличивают до 4 кВ со скоростью 500 В/с до пробоя, а радиус иглы выбирается в соответствии с образцом изоляции, эти параметры можно составить без изменения. При этом максимальная величина напряженности электрического поля определяется соотношением

$$E_{\text{лок}} = \frac{2DE}{r \ln\left(\frac{4D}{r}\right)}, \quad (5)$$

где  $D$  – толщина изоляции кабеля между иглой и металлическим экраном кабеля;  $r$  – радиус кривизны иглы.

В ходе экспериментов было обнаружено, что перед пробоем число ЧР наиболее характерных для дефектной структуры изоляции кабеля вблизи нулевых значений приложенного напряжения, достигает критического значения, но с различной скоростью для различных образцов кабеля, что легко объяснить их первоначальным состоянием и различным остаточным эксплуатационным ресурсом соответственно. Картина разрядной активности и величина ЧР при этом целиком похожа на модельные разряды в системе поверхность-игла (рис. 4).

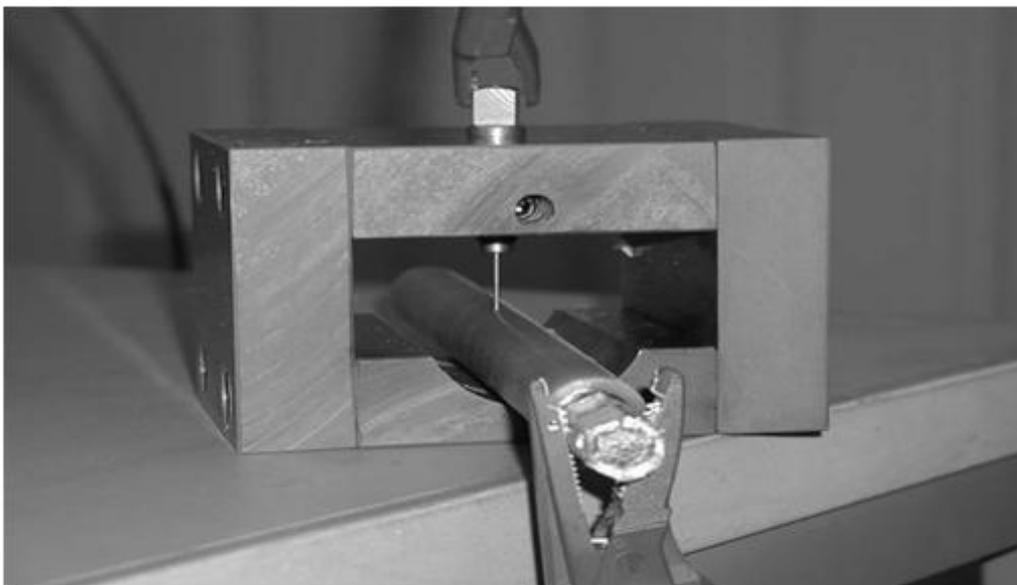


Рис. 3. Тест на электрическую прочность изоляции кабеля из сшитого полиэтилена

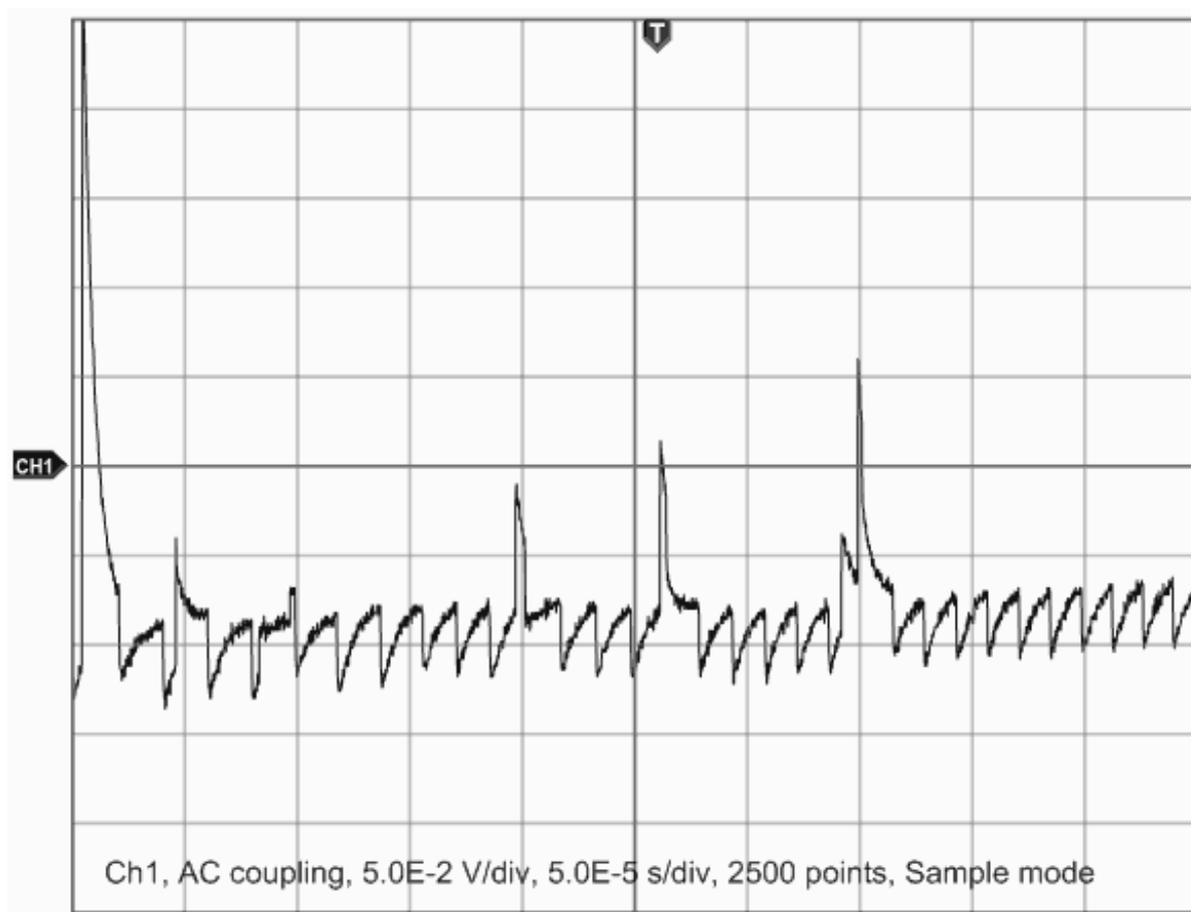


Рис. 4. Модельные ЧР (осциллограф Tektronix, полоса пропускания 100 МГц)

Время разрушения изоляции кабеля по сравнению с образцом берется за основу при оценке состояния изоляции кабеля. В зависимости от первоначального состояния кабеля время разрушения его изоляции и остаточный ресурс будут различными. Также известно, что с помощью электродов поверхность-игла в настоящее время активно исследуют структуру ЧР и механизм пробоя, обусловленный ЧР в образцах полимеров [4, 5]. При этом величина напряженности локального электрического поля определяется соотношением

$$E_{\text{лок}} = \frac{2hE}{r \ln\left(1 + \frac{4h}{r}\right)}, \quad (6)$$

где  $r$  – радиус кривизны иглы;  $h$  – расстояние от иглы до плоскости.

Сравнение соотношений (5) и (6) позволяет сделать вывод о том, что система поверхность-игла является источником стандартных сигналов для тестирования изоляции *XLPE* кабелей на стойкость к частичным разрядам и может применяться для совершенствования метода без образцов кабеля.

### Выводы

1. Рассмотрены основные методы производственного контроля качества изоляции силовых кабелей из сшитого полиэтилена на основе анализа характеристик частичных разрядов, определены недостатки этих методов, ограничения применения на практике.
2. Предложен эффективный экспресс-метод оценки изоляции силовых кабелей с изоляцией из сшитого полиэтилена на основе стандартной системы электродов и оценки времени разрушения изоляции *XLPE* кабелей под воздействием ЧР.
3. Показано, что система электродов поверхность–игла является источником стандартных частичных разрядов, которыми обусловлено разрушение изоляции *XLPE* кабелей.

### Библиографический список

1. ГОСТ 32144–2013. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. – Введ. 01.07.2014 – М: Стандартинформ, - 2014. – С. 1 – 16.
2. **Гатауллин, А.М.** Регистрация и анализ сигналов частичных разрядов / А.М. Гатауллин // Приборы и техника эксперимента. – 2014. – №4. – С.55–60.
3. **Mason, J.H.** Breakdown of solid dielectrics in divergent fields / J.H. Mason // Proc. IEE. –1955. – V. 102. – P. 254–263.
4. Evolution of Partial Discharges During Early Tree Propagation in Epoxy Resin. Lv. Zepeng [et al.]. – IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul. – 2017. – V. 24– P. 2995- 3003.
5. Modelling of Partial Discharge Characteristics in Electrical Tree Channels: Estimating the PD Inception and Extinction Voltages / Lv. Zepeng [et al.] // IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation. – 2018. – V. 25. – N. 5. – P. 2927- 2942.

УДК 621.311

Е.И. Грачева, А.А. Алимова

**АНАЛИЗ ПОТЕРЬ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ В СИСТЕМАХ ЦЕХОВОГО  
ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ**

Казанский государственный энергетический университет

Анализ потерь электроэнергии систем цехового электроснабжения осуществлен для участка механического цеха, который представляет собой смешанную схему из радиальных и магистральных сетей. Установлено и оценено влияние сопротивления контактов коммутационных аппаратов, установленных на линии, нагрева проводов и кабельных линий и температуры окружающей среды на величину потерь электроэнергии.

The analysis of electric power losses of shop power supply systems was carried out for a section of the machine shop, which is a mixed circuit of radial and main networks. The influence of contact resistance of switching devices installed on the line, heating of wires and cable lines and the ambient temperature on the amount of electric power losses has been established and evaluated.

**Ключевые слова:** потери электроэнергии, сопротивление контактов коммутационных аппаратов, цеховые сети.

**Key words:** electricity losses, contact resistance of switching devices, shop networks.

Передача, распределение и потребление электроэнергии (ЭЭ) на промышленных предприятиях должны производиться с высокой экономичностью, надежностью и требуемым качеством ЭЭ.

На величину потерь ЭЭ влияет большое число различных факторов. Снижение уровня потерь в электрических сетях промышленных предприятий – одна из наиболее важных эксплуатационных задач. Для определения содержания и порядка проведения мероприятий по снижению потерь необходимо предварительно выявить основные недостатки построения и функционирования сети.

Оценим влияние на величину потерь ЭЭ в сетях низкого напряжения таких параметров, как нагрев проводов и кабельных линий, сопротивления контактных соединений коммутационных аппаратов, температура окружающей среды, на основе данных 218 схем предприятий машиностроительной отрасли. В качестве примера рассмотрим участок механического цеха.

Система цехового электроснабжения участка механического цеха представляет собой смешанную схему, состоящую из радиальных (РЛ) и магистральных линий (из четырёх распределительных шинопроводов). В табл. 1 показаны основные схемные и режимные характеристики оборудования участка механического цеха с учетом числа коммутационных аппаратов, установленных на линиях.

Таблица 1

## Схемные и режимные характеристики оборудования механического цеха

Фирма – производитель оборудования	Кол-во коммутационных аппаратов на одной линии	Кол-во линий сети	Пределы изменения длины линии, м	Пределы изменения сечения линии, мм <sup>2</sup>	Пределы изменения мощности приемника ЭЭ, питающегося от линии, кВт	Пределы коэффициента загрузки линии сети
Отечественный производитель	1	48	3 ÷ 10	10 ÷ 185	17 ÷ 150	0,66 ÷ 0,82
	2	4	8 ÷ 10	185 ÷ 240	202 ÷ 680	0,78 ÷ 1
	3	1	10	35	40	0,72

Нагрузочные потери ЭЭ в элементе трехфазной сети сопротивлением  $R$  находят по выражению

$$\Delta W_n = 3R \int_0^T I^2(t) dt, \quad (1)$$

где  $I(t)$  – полный ток в элементе в момент времени  $t$ .

Точное определение потерь ЭЭ за интервал времени  $T$  возможно при известных значениях параметра  $R$  и функции времени  $I(t)$  на всем интервале.

Примечательно, что сопротивление проводов ответвлений от шинопроводов вычисляется как сопротивление радиальных сетей и затем учитывается в выражении для эквивалентного сопротивления шинопровода:

$$R_{ЭШ} = \left[ r_{20} \cdot l \cdot \frac{1}{6} \left( 1 + \frac{1}{n} \right) \left( 2 + \frac{1}{n} \right) + r_n \right] \cdot [1 + \alpha(\theta - \theta_0)] + \frac{r_k}{n}, \quad (2)$$

где  $r_{20}$  – сопротивление одного метра шинопровода при 20 °С, мОм;  $l$  – длина шинопровода, м;  $n$  – количество приемников, присоединенных к шинопроводу;  $r_n$  – сопротивление провода ответвления от шинопровода, мОм;  $r_k$  – сопротивление коммутационного аппарата ответвления, мОм;  $\alpha$  – температурный коэффициент увеличения сопротивления, 1/°С;  $\theta$  – температура шинопровода, °С;  $\theta_0$  – температура окружающей среды, °С.

Известно, что сопротивление радиальных сетей, в том числе и ответвлений от шинопровода, зависит от его температуры:

$$R = \frac{\rho}{s} \cdot l \cdot [1 + 0,004 \cdot (\theta - 20)] + \sum r_k, \quad (3)$$

где  $\rho$  – удельное электрическое сопротивление проводника, мОм·м;  $l$  – длина проводника, м;  $s$  – поперечное сечение проводника, мм<sup>2</sup>;  $\theta$  – температура нагрева проводника, °С;  $\sum r_k$  – сумма сопротивлений контактов коммутационных аппаратов, установленных на линии.

Средняя длина линии

$$l_{cp} = \frac{\sum_{i=1}^n l_i}{n}, \quad (4)$$

Квадрат среднеквадратичного коэффициента загрузки линий сети

$$k_3^2 = \frac{\sum_{i=1}^n k_{3i}^2}{n}, \quad (5)$$

где  $k_{3i} = I_i / I_{номi}$  – коэффициент загрузки  $i$ -й линии;  $I_i$  – ток в  $i$ -й линии, А;  $I_{номi}$  – номинальный ток в линии  $S_i$ -го сечения, А.

Таким образом, эквивалентное сопротивление радиальных сетей, в том числе и ответвлений от шинпровода, вычисляем по выражению:

$$R = [r_{э20} \cdot l \cdot [1 + 0,004 \cdot (\theta_{жс} - 20)] + \sum r_k] \cdot \frac{1}{n}, \quad (6)$$

$$\theta_{жс} = k_3^2 \cdot (80 - \theta_0) + \theta_0, \quad (7)$$

где  $\theta_{жс}$  – температура жилы кабеля; 80 – допустимая температура нагрева жилы кабеля.

Общее сопротивление разветвленной сети с учетом числа шинпроводов

$$R_{об} = \frac{R_э \cdot \frac{1}{m} \cdot R_{эш}}{R_э + \frac{1}{m} \cdot R_{эш}}, \quad (8)$$

где  $m$  – число магистральных линий.

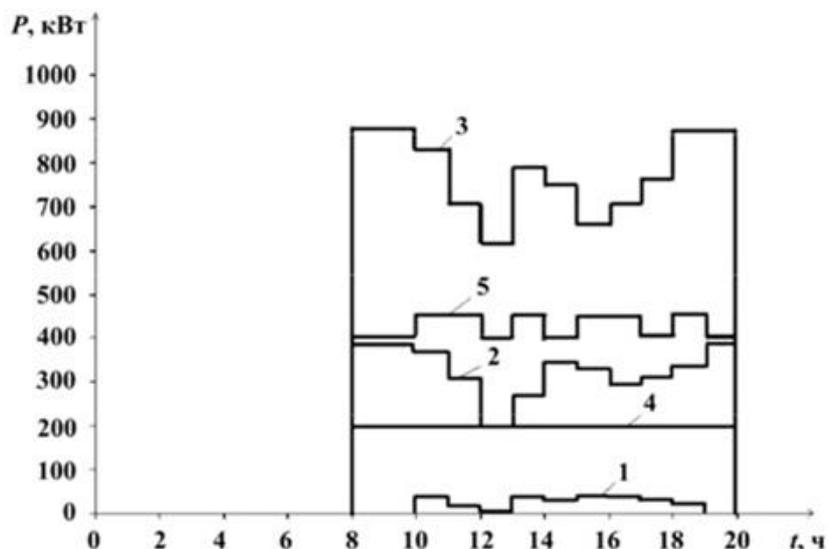
Таблица 2

Аналитические зависимости сопротивлений низковольтных коммутационных аппаратов от номинального тока

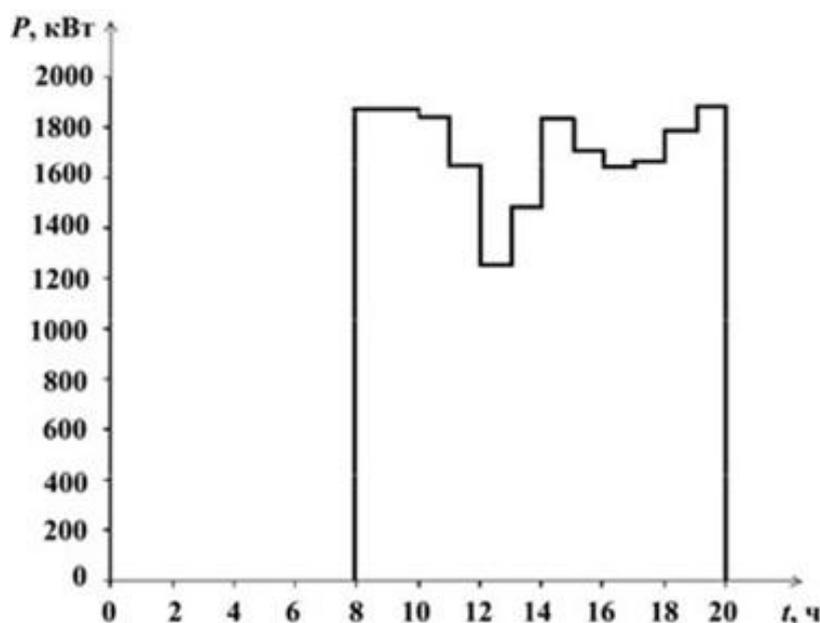
Аппараты	Номинальный ток $I_H$ , А	Аналитическая зависимость сопротивления от номинального тока
Автоматические выключатели и контакторы	$< 60$	$r_k = 307 / I_H$
	$\geq 60$	$r_k = 349 / I_H$
Магнитные пускатели	$< 70$	$r_k = 825 / I_H$
	$\geq 70$	$r_k = 760 / I_H$
Предохранители	$\geq 200$	$r_k = 68 / I_H$
Рубильники и пакетные выключатели	Любое значение	$r_k = 125 / I_H$

Электрическая нагрузка участка механического цеха имеет переменный характер, поэтому потери мощности и ЭЭ в линиях зависят от изменения нагрузки. Суточный график электрических нагрузок участка механического цеха показан на рис. 1 и рис. 2. В связи с этим потери ЭЭ будем рассчитывать по величине среднеквадратичного тока  $I_{СК}$ , который представляет собой эквивалентный ток, проходящий по линии за интервал времени  $T$  и вызывает те же

потери мощности и ЭЭ, что и действительный изменяющийся за то же время ток.



**Рис. 1. Суточный график нагрузок электроприемников механического цеха:**  
1 – кран; 2 – токарные станки; 3 – фрезерные станки; 4 – вентиляторы; 5 – компрессоры



**Рис. 2. Общий суточный график электрических нагрузок механического цеха**

Полученные результаты представлены в табл. 4, где также указана погрешность определения потерь ЭЭ без учета таких параметров, как нагрев проводов и кабельных линий, сопротивления контактных соединений коммутационных аппаратов, температура окружающей среды.

Таблица 3

## Расчет первого шинопровода

Наименование	Расчет
Сумма сопротивлений контактов коммутационных аппаратов, установленных на линиях ответвлениях от шинопровода	$\sum r_k = 2 \cdot \frac{307}{100} + 9 \cdot \left( \frac{349}{35} + \frac{825}{40} \right) = 281,5 \text{ мОм}$
Длина линий, отходящих от шинопроводов	$l_{cp} = (2 \cdot 5 + 3 \cdot 9) / 11 = 3,4 \text{ м}$
Эквивалентное удельное сопротивление ответвлений при 20° С	$r_{\Sigma 20} = 31,3 \cdot \frac{2 \cdot 5 + 3 \cdot 9}{9 \cdot 3 \cdot 10 + 2 \cdot 5 \cdot 50} = 1,5 \text{ мОм}$
Квадрат среднеквадратичного коэффициента загрузки линий ответвлений	$k_3^2 = \frac{2 \cdot 0,72^2 + 0,66^2 \cdot 9}{11} = 0,46$
Температура жилы кабеля а) если не учитывать температуру окружающей среды $\theta_0$	$\theta_{жс} = 0,46(80 - 20) + 20 = 47,7 \text{ °С}$ $\theta_{жс} = k_3^2 \cdot 80 = 0,46 \cdot 80 = 36,9 \text{ °С}$
Эквивалентное сопротивление РЛ от шинопроводов	$r_n = (1,1 \cdot 3,4(1 + 0,004(47,7 - 20))) \cdot 1 / 11 = 0,5 \text{ мОм}$
Сопротивление 1 м шинопровода при 20° С	$r_{20} = \frac{52}{I_H} = \frac{52}{400} = 0,13 \text{ мОм}$
Эквивалентное сопротивление шинопровода	$r_{\Sigma ш} = \left[ 0,13 \cdot 33 \cdot \frac{1}{6} \left( 1 + \frac{1}{11} \right) \cdot \left( 2 + \frac{1}{11} \right) + 0,5 \right] \cdot [1 + 0,004 \cdot (57,4 - 20)] + \frac{281,5}{11} = 26,7 \text{ мОм}$
Сумма сопротивлений контактов коммутационных аппаратов на РЛ, отходящих от шин РУ	$\sum r_k = 3 \cdot \frac{307}{320} + \frac{307}{80} + \frac{125}{100} + \frac{68}{100} = 8,6 \text{ мОм}$
Средняя длина РЛ, отходящих от РУ	$l_{cp} = 40 / 4 = 10 \text{ м}$
Удельное сопротивление линий при 20° С	$r_{\Sigma 20} = 31,3 \cdot \frac{4 \cdot 10}{3 \cdot 10 \cdot 185 + 10 \cdot 35} = 0,21 \text{ мОм}$
Квадрат среднеквадратичного коэффициента загрузки линий	$k_3^2 = \frac{3 \cdot 0,82^2 + 0,72^2}{4} = 0,63$
Температура жилы кабеля а) без учета $t_{окр.ср}$	$\theta_{жс} = 0,63(80 - 20) + 20 = 57,8 \text{ °С}$ $\theta_{жс} = k_3^2 \cdot 80 = 0,63 \cdot 80 = 50,5 \text{ °С}$
Эквивалентное сопротивление	$R_{\Sigma} = (0,21 \cdot 10(1 + 0,004(57,8 - 20))) \cdot 1 / 4 = 2,8 \text{ мОм}$
Сумма сопротивлений контактов коммутационных аппаратов на РЛ, отходящих от шин РУ к шинопроводу 1	$\sum r_k = \frac{307}{400} + \frac{125}{400} = 1,08 \text{ мОм}$
Общее сопротивление разветвленной сети с учетом числа шинопроводов:	$R_{об} = \frac{R_{\Sigma} \cdot \frac{1}{m} \cdot R_{\Sigma ш}}{R_{\Sigma} + \frac{1}{m} \cdot R_{\Sigma ш}} = \frac{2,8 \cdot \frac{1}{4} \cdot 97,2}{2,8 + \frac{1}{4} \cdot 97,2} = 2,49 \text{ мОм}$
Среднеквадратичный ток $I_{СК}$	$I_{СК} = \sqrt{4928,04} = 70,2 \text{ А}$ $I_{СК}^2 = \frac{23 \cdot 70,17^2 + 24 \cdot 23,22^2 + 3 \cdot 254,13^2 + 4 \cdot 97,71^2}{53} = 4928,04 \text{ А}$
Потери ЭЭ за 12-часовой рабочий день	$\Delta W = (3 \cdot 2,49 \cdot 70,2^2 \cdot 12) / 1000 = 441,5 \text{ кВт} \cdot \text{ч}$

Таблица 4

## Погрешность определения потерь электроэнергии механического цеха

Режим определения потерь ЭЭ в сетях низкого напряжения механического цеха	$R_э$ , мОм	$R_{эш}$ , мОм	$R_{об}$ , мОм	$W$ , кВт·ч	$\delta_p$ , %
С учетом всех параметров сети	2,8	21,1	1,93	441,5	
Без учета сопротивления контактных соединений	0,61	1,2	0,31	21,3	95,2
Без учета нагрева шинпроводов и кабельных линий	2,65	21,87	1,89	424,3	3,8
Без учета температуры окружающей среды	2,76	22,46	1,95	440,5	0,2

## Выводы

1. При анализе системы цехового электроснабжения участка механического цеха учитывались конструктивные и эксплуатационные характеристики: количество коммутационных аппаратов, сечение, длина, коэффициент загрузки и нагрузка линии.

2. Потери ЭЭ были рассчитаны для участка механического цеха с учетом нагрева проводов и кабельных линий, сопротивления контактных соединений коммутационных аппаратов и температуры окружающей среды.

4. Результаты расчетов подтверждают необходимость учета сопротивления контактных соединений коммутационных аппаратов при определении потерь ЭЭ в системах цехового электроснабжения, иначе величина потерь становится сильно заниженной и погрешность вычислений доходит до 95% (табл. 4). Влияние других параметров на погрешность вычислений не так значительно.

## Библиографический список

1. Железко, Ю.С. Выбор мероприятий по снижению потерь электроэнергии в электрических сетях / Ю.С. Железко - М.: Энергоатомиздат, - 1989. - 20 с.
2. Грачева, Е.И. Расчет сопротивления стягивания контактных соединений / Е.И. Грачева, О.В. Наумов // Известия вузов. Проблемы энергетики. – 2007. – №1-2. – С. 147– 153.
3. Герасименко, А.А. Передача и распределение электрической энергии / А.А. Герасименко, В.Т. Федин // Феникс. – 2006. – С. 707 – 713.
4. Грачева, Е.И. Исследование показателей безотказности низковольтных коммутационных аппаратов электрических сетей / Е.И. Грачева, А.И. Федотов., О.В. Наумов // Изв. вузов. / Проблемы энергетики. – 2013. - №9-10. – С. 73-80.
5. Конюхова, Е.А. Надежность электроснабжения промышленных предприятий: производственно-практическое издание / Е.А. Конюхова, Э.А. Киреева. – М.: Энергопрогресс, 2001. – 92 с.
6. Vartanian, R. Performance Analysis of a Ferrite Based Fractional Horsepower Permanent Magnet Assisted SynRM for Fan and Pump Applications / R. Vartanian, Y. Deshpande, H. Toliyat // Proceedings of the International Conference on Electric Machines & Drives Conference (IEMDC 2013), Chicago, IL, USA, 12–15 May 2013. – P. 1405–1410.
7. Ahonen, T. Effect of electric motor efficiency and sizing on the energy efficiency in pumping systems / T. Ahonen, S. Orozco, J. Ahola // Proceedings of the International Conference on Power Electronics and Applications (EPE'16 ECCE Europe), Karlsruhe, Germany, 5–9 September 2016. – P. 1–9.

- 
8. **Kulkarni, V.G.** Modeling and analysis of stochastic systems / V.G. Kulkarni. - CRC Press, - 2016.
  9. **Lu, X.** Domino of the smart grid: An empirical study of system behaviors in the interdependent network architecture // X. Lu, W. Wang, J. Ma, L. Sun // IEEE International Conference on Smart Grid Communications (SmartGridComm). – 2013. – P. 612 – 617.
  10. **Puterman, M. L.** Markov decision processes: discrete stochastic dynamic programming / M. L. Puterman. - John Wiley & Sons. - 2014.

УДК 621.311

Е.И. Грачева, О.В. Наумов

**АНАЛИЗ МЕТОДОВ РАСЧЕТА ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ НАГРУЗОК  
ПРОМЫШЛЕННЫХ ОБЪЕКТОВ**

Казанский государственный энергетический университет

Приведен сравнительный анализ методов расчета нагрузок: по установленной мощности, коэффициенту спроса, среднеквадратичной мощности, коэффициенту формы графика нагрузки, средней мощности, коэффициенту максимума (метод упорядоченных диаграмм), удельной нагрузке на единицу производственной площади. Дана оценка достоинств и недостатков, а также погрешностей данных методов. Предлагаются рекомендации по их использованию в процессе эксплуатации.

A comparative analysis of load calculation methods is given: by installed power, demand factor, root-mean-square power, load form factor, average power, maximum factor (ordered chart method), unit load per unit of production area. The estimation of advantages and disadvantages, as well as errors of the above methods is given. Recommendations on their use and application during operation are proposed.

**Ключевые слова:** электрические сети, расчет нагрузок, методическая погрешность, установленная мощность, электроприемники.

**Key words:** electrical networks, load calculation, methodical error, installed power, electrical receivers.

Высокие темпы развития энергетики требуют максимальной эффективности капиталовложений и материальных средств. Определение электрических нагрузок - наиболее ответственный расчет, выполняемый при проектировании систем электроснабжения промышленных предприятий. Результаты расчета в значительной степени определяют объемы инвестирования в проектируемые объекты.

Расчетная максимальная мощность, которая потребляется электроприемниками предприятия, всегда меньше суммы номинальных мощностей этих приемников. Это объясняется неполной загрузкой мощностей электроприемников, одновременностью их работы, обеспечением условий труда обслуживающего персонала. Корректное определение ожидаемых электрических нагрузок существующими методами – важнейшее положение формирования рациональной системы электроснабжения. Можно констатировать, что нарушения названной корректности, допущенные в ходе расчета нагрузок, сводят на нет усилия создателей системы электроснабжения в этом направлении и приводят к неэффективному использованию капитальных затрат в энергетическое строительство.

При проектировании систем электроснабжения применяются следующие основные методы расчета электрических нагрузок [1]:

- по установленной мощности и коэффициенту спроса;

- среднеквадратичной мощности и коэффициенту формы графика нагрузки;
- средней мощности и коэффициенту максимума (метод упорядоченных диаграмм).
- удельному расходу электроэнергии на единицу продукции или заданному объему выпуска продукции за определенный период времени;
- удельной нагрузке на единицу производственной площади.

**Метод коэффициента спроса.** Наиболее прост и широко распространен. Для определения расчетных нагрузок необходимо знать установленную мощность  $P_{\text{ном}}$  группы приемников, коэффициенты мощности  $\cos\varphi$  и коэффициенты спроса  $K_c$  данной группы, определяемые по справочной литературе.

Расчетную нагрузку группы однородных по режиму работы приемников определяют по выражению

$$P_p = K_c P_{\text{ном}}. \quad (1)$$

Величина коэффициента спроса  $K_c$  принимается постоянной, не зависящей от практически встречающегося числа электроприемников в группе, что вносит значительную погрешность в расчет. Такое допущение приемлемо лишь при достаточно большом числе электроприемников.

Определение расчетной нагрузки по установленной мощности и коэффициенту спроса является приближенным методом расчета, поэтому его применение рекомендуют для предварительных расчетов и определения общезаводских нагрузок на уровнях шин главной понизительной подстанции и на границе раздела энергосистем.

**Метод упорядоченных диаграмм** - основной для определения расчетных нагрузок промышленных предприятий. По данному методу расчетная активная нагрузка электроприемника на всех ступенях питающих и распределительных сетей (включая трансформаторы и преобразователи) определяется по средней мощности и коэффициенту максимума по выражению [2]

$$P_p = K_M \cdot P_{\text{ср.м}} = K_M \cdot \sum_{i=1}^n K_{\text{и}i} \cdot P_{\text{ном.}i}, \quad (2)$$

где  $K_M$  - коэффициент максимума,  $K_M = f(n_{\text{э}}, K_{\text{и}})$ ;  $n_{\text{э}}$  - эффективное число электроприемников, т.е. число однородных по режиму работы электроприемников, одинаковой мощности, которые обуславливают ту же расчетную нагрузку, что и рассматриваемая группа различных по номинальной мощности и режиму работы электроприемников;  $P_{\text{ср.м}}$  - средняя активная мощность;  $K_{\text{и}}$  - коэффициент использования;  $\sum_{i=1}^n P_{\text{ном.}i}$  - сумма номинальных мощностей приемников электроэнергии.

Многолетний расчет электрических нагрузок по методу упорядоченных диаграмм показал, что расчетная нагрузка превышает фактическую в 1,5-2,5 раза.

**Определение расчетной нагрузки по среднеквадратичной мощности и коэффициенту форм.** В основе метода лежит равенство расчетной и среднеквадратической нагрузки. Данный метод может применяться для определения расчетных нагрузок цеховых шинопроводов, на шинах низшего напряжения цеховых трансформаторных подстанций, на шинах распределительных устройств напряжением 10кВ, когда значение коэффициента формы  $K_{\phi}$  находится в пределах 1,0-1,2.

Расчетную нагрузку группы приемников определяют из выражений:

$$P_p = K_{\phi} P_{\text{ср.м}}, \quad (3)$$

где  $P_p$  – расчетное значение активной мощности;  $K_{\phi}$  – коэффициент формы графика активной мощности;  $P_{\text{ср.м}}$  – расчетное значение средней мощности группы электроприемников за наиболее загруженную смену;

$$Q_p = K_{\phi} Q_{\text{ср.м}} \text{ или } Q_p = P_p \text{tg}\varphi, \quad (4)$$

где  $Q_{\text{ср.м}} = P_{\text{ср.м}} \text{tg}\varphi$ ;  $Q_p$  – расчетное значение реактивной мощности;  $\text{tg}\varphi$  – коэффициент реактивной мощности, соответствующий средневзвешенному  $\cos\varphi_{\text{с.вз}}$  узла нагрузки;

$$S_p = \sqrt{P_p^2 + Q_p^2}, \quad (5)$$

где  $S_p$  – расчетное значение полной мощности.

Коэффициент формы определяется по выражению [3]

$$K_{\phi} = \frac{P_{\text{ск}}}{P_{\text{ср}}}, \quad (6)$$

где  $P_{\text{ск}}$  – активная среднеквадратичная мощность;  $P_{\text{ср}}$  – среднее значение нагрузки.

### **Метод удельной нагрузки на единицу производственной площади.**

Применим при проектировании электрических сетей цехов, характеризующихся большим числом приемников малой и средней мощности, равномерно распределенной по рабочей площади цеха.

Расчетная нагрузка группы электроприемников по удельной мощности определяется по выражению [4]:

$$P_p = P_{\text{уд}} \cdot F, \quad (7)$$

где  $P_{\text{уд}}$  – удельная расчетная мощность на  $1\text{м}^2$  производственной площади;  $F$  – площадь размещения группы приемников.

Все перечисленные методы определения расчетных нагрузок применяются при расчетах симметричных трехфазных нагрузок.

Данный метод широко применяется в проектировании систем цехового электроснабжения, но результаты расчета по этой методике могут значительно отличаться от фактических электрических нагрузок, что связано с огромным количеством типов потребителей, недостаточным уровнем исследований их электрических нагрузок, значительным усреднением удельных электрических нагрузок для групп объектов.

К общим недостаткам настоящего метода можно отнести: ограниченность его области применения, так как он действует только для тех предприятий, для которых он разработан; отсутствие достаточного количества опытных данных; нет связи расчетной нагрузки от количества электроприемников; не учитываются различные режимы работы электроприемников, вероятностный характер их графиков нагрузки.

Таблица 1

## Возможные погрешности методов расчета нагрузок

Метод расчета нагрузок	Погрешность $\delta$ , %
По установленной мощности и коэффициенту спроса	5,9
По среднеквадратичной мощности и коэффициенту формы графика нагрузки	0
По средней мощности и коэффициенту максимума (метод упорядоченных диаграмм)	70
По удельной нагрузке на единицу производственной площади	23,5

Таблица 2

## Достоинства и недостатки исследуемых методов расчета нагрузок

Метод расчета	Достоинства метода	Недостатки метода
По установленной мощности и коэффициенту спроса	Рекомендован для предварительных расчетов и определения общезаводских нагрузок	Является приближенным методом расчета в отличие от метода по среднеквадратичной мощности и коэффициенту формы графика нагрузки
По среднеквадратичной мощности и коэффициенту формы графика нагрузки	Наиболее достоверный метод расчета, учитывает изменение нагрузочных характеристик потребителей во времени	Необходимо наличие информации о динамике графиков нагрузки потребителей
По средней мощности и коэффициенту максимума (метод упорядоченных диаграмм)	Не требует значительных затрат в получении исходной информации	Неправильное определение средней расчетной нагрузки по причине применения справочных данных коэффициентов использования характерных категорий электроприемников
По удельной нагрузке на единицу производственной площади	Целесообразно применять для определения расчетной нагрузки на стадии проектного задания при технико-экономическом сравнении вариантов, а также для других ориентировочных расчетов	Требование равномерности распределения нагрузок по площади цеха

## Выводы

1. Для предварительных расчетов и определения промышленных нагрузок для системы электроснабжения промышленных предприятий на уровнях шин ГПП и на границе раздела энергосистем возможно применение методов расчета по установленной мощности и коэффициенту спроса  $K_c$ , при ориентировочных расчетах на высших ступенях системы электроснабжения возможно применение методов расчета по установленной мощности и коэффициенту спроса  $K_c$ .

2. Для определения расчетных нагрузок по отдельным группам электроприемников и узлам с напряжением до 1 кВ в цеховых сетях следует использовать метод упорядоченных диаграмм показателей графиков нагрузок, так как рассматриваемый метод обладает достаточной простотой в получении исходных данных при нестационарном, как правило, характере графика нагрузок.

3. Для определения расчетных нагрузок на высших ступенях системы электроснабжения (начиная с цеховых шинопроводов и шин цеховых трансформаторных подстанций, заканчивая линиями, питающими предприятие) следует использовать методы расчета, основанные на использовании средней мощности и коэффициенту формы  $K_f$ , как обладающие наибольшей точностью, необходимой для расчета нагрузок на шинах распределительных устройств и главной понизительной подстанции.

## Библиографический список

1. **Кудрин, Б.И.** Расчет электрических нагрузок потребителей: история, состояние, комплексный метод / Б.И. Кудрин // Промышленная энергетика. – 2015. -№5. – С. 14-22.
2. **Башмаков, Д.М.** Расчет электрических нагрузок промышленных предприятий и задачи его совершенствования / Д.М. Башмаков, Э.М. Каждан // Инструктивные указания по проектированию электротехнических промышленных установок – №3. С. 7-11.
3. **Шидловский, А.К.** Расчеты электрических нагрузок систем электроснабжения промышленных предприятий / А.К.Шидловский, Г.Я. Вагин, Э.Г. Куренный. – М.: Энергоатомиздат, 1992. – 224 с.
4. **Гужов, Н.П.** Системы электроснабжения / Н.П. Гужов, В.Я. Ольховский, Д.А. Павлюченко. – Ростов н/Д.: Феникс, 2011. – 382 с.

УДК 621.314.222.76

А.Б. Дарьенков, В.В. Соколов, И.А. Липужин, В.Л. Мельников,  
Д.А. Бадугин

## ДИНАМИЧЕСКИЕ РЕЖИМЫ РАБОТЫ ТРАНСФОРМАТОРНОГО РЕГУЛЯТОРА НАПРЯЖЕНИЯ ПРИ КОМПЕНСАЦИИ ПРОДОЛЬНЫХ И ПОПЕРЕЧНЫХ ВОЗМУЩЕНИЙ В ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СЕТИ

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Для регулирования напряжения в электрической сети может быть использован трансформаторный регулятор напряжения (ТРН). Авторами разработана физическая модель участка электрической сети с ТРН и описана ее конструкция. ТРН вводит в сеть вольтдобавочное напряжение, за счет которого можно скомпенсировать отклонения напряжения по амплитуде (продольное регулирование) и фазе (поперечное регулирование). В программе SamSim разработаны математические модели участка сети с ТРН. Результаты моделирования динамических режимов работы ТРН позволили определить параметры продольных и поперечных возмущающих воздействий, которые могут быть скомпенсированы ТРН.

To regulate the voltage in the electrical grid can be used transformer voltage regulator (TVR). The authors developed a physical model of the electric grid section with TVR and described its design. TVR enters the network of the booster voltage, which can compensate for voltage deviation in amplitude (longitudinal voltage control) and phase (transversal voltage control). The program SamSim developed mathematical models of the grid section with TVR. The results of simulation of dynamic modes of TVR allowed to determine the parameters of longitudinal and transverse perturbing effects, which can be compensated by TVR.

**Ключевые слова:** регулирование напряжения, трансформаторный регулятор напряжения, продольное регулирование, поперечное регулирование.

**Key words:** voltage regulation, transformer voltage regulator, longitudinal voltage control, transversal voltage control.

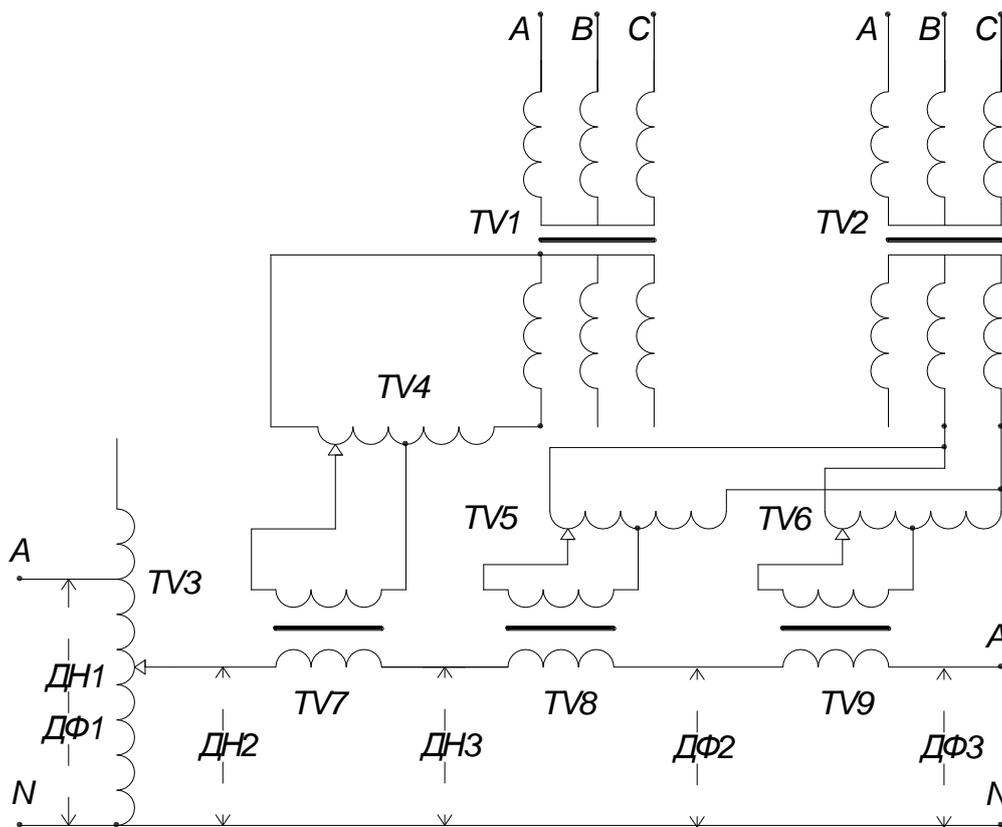
Ключевое направление развития электроэнергетики России связано с созданием интеллектуальной энергосистемы, характеризующейся возможностью автоматического управления потоками активной и реактивной мощности в электрических сетях всех классов напряжений. Управление потоками мощности позволяет снизить дефицит электроэнергии, увеличить пропускную способность линий электропередачи и уровень надежности электроснабжения, повысить эффективность использования электрической энергии.

При параллельной работе синхронных источников энергии переменного тока с разными значениями амплитуды и сдвига фаз напряжения на общую нагрузку возникают перетоки активной и реактивной мощности. Они дополнительно загружают линии электропередач и вызывают потери энергии. В настоящее время для выравнивания напряжений по уровню и фазе разрабатываются полупроводниковые регуляторы напряжений [1], промышленное

внедрение которых требует всестороннего теоретического исследования, математического моделирования рабочих и аварийных режимов и верификации результатов имитационного моделирования на физической модели.

### Трансформаторный регулятор напряжения

Авторами разработана физическая модель участка электрической сети с трансформаторным регулятором напряжения (ТРН) (рис. 1) [2, 3]. ТРН включается в линию электропередачи и, регулируя напряжение по продольной и поперечной составляющим, осуществляет выравнивание напряжения сети по амплитуде и фазе.



**Рис. 1. Структурная схема участка электрической сети с ТРН:**

TV1, TV2 – шунтовые трехфазные трансформаторы; TV3 - TV6 – автотрансформаторы с электрическим приводом ползунка; TV7 – TV8 – серийные трансформаторы; ДН1-ДН3 – датчики действующих значений напряжений; ДФ1-ДФ3 – датчики фаз напряжений

В роли сети (A, N) выступает однофазный источник питания с фазным номинальным напряжением  $U_{\text{ф.ном}} = 220$  В. Для демонстрации принципа работы ТРН в сеть искусственно вводится возмущающее воздействие и на вход ТРН поступает напряжение сети, измененное по амплитуде и фазе. Для введения возмущения использованы автотрансформаторы TV3 и TV5 (через трансформатор TV8) соответственно. Автотрансформаторы имеют электрический привод ползунка-переключателя. Предел изменения амплитуды напряжения составляет  $\pm 20\%$  от  $U_{\text{ф.ном}}$ , а сдвига фаз  $\pm 15$  эл. град.

Выравнивание напряжений и их фаз осуществляется по двум координатам векторов: продольной и поперечной. Продольная позволяет отрегулировать действующее значение синфазного напряжения в сети, а поперечная – фазу.

Регулирование действующего напряжения при продольных возмущениях обеспечивается ТРН за счет вольтодобавки (или вольтоотбавки) напряжения автотрансформатором  $TV4$  через серийный трансформатор  $TV7$ . Максимально-допустимая добавка составляет  $\Delta U_{рн} = \pm 44$  В, что соответствует  $20\% U_{ф.ном}$ .

Регулирование фазы напряжения при поперечных возмущениях (компенсация фазового сдвига) обеспечивает вольтодобавка напряжения, сдвинутого на  $+90$  или  $-90$  эл. град. по отношению к напряжению сети.

Для этого на вторичную обмотку серийного трансформатора  $TV9$  с помощью автотрансформатора  $TV6$  подается напряжение  $U_{рф}$ . Максимальный фазовый сдвиг  $\pm 15$  эл. град. при  $U_{ф.ном} = 220$  В обеспечивается при добавке напряжения  $\Delta U_{рф} = \pm 58,95$  В.

Для питания автотрансформаторов  $TV4$ - $TV6$  служат шунтовые трансформаторы  $TV1$ - $TV2$ , которые имеют разные уровни напряжений фазных обмоток для продольной и поперечной компенсации. Контроль уровней и фаз напряжений производится соответствующими датчиками.

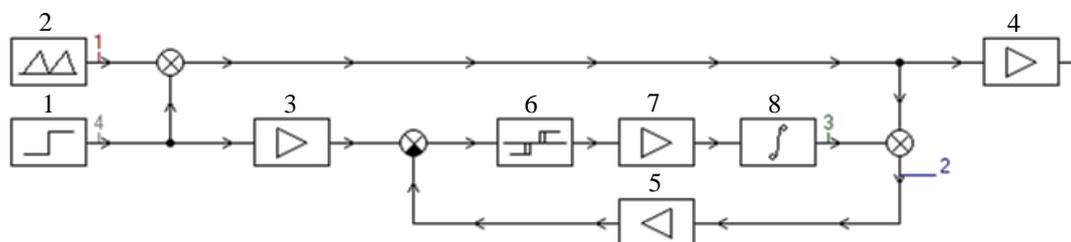
Целью исследований является математическое моделирование процессов, происходящих в электрической сети с ТРН, и определение параметров возмущающих воздействий, которые могут быть скомпенсированы ТРН за счет продольного и поперечного регулирования.

### Математическая модель

Для моделирования режимов работы ТРН при продольном и поперечном регулировании разработаны математические модели в программе *SamSim*.

#### Продольные возмущения

Математическая модель участка электрической сети при отработке продольных возмущений приведена на рис. 2. Измеряемые сигналы указаны с помощью точек 1-4.



**Рис. 2. Математическая модель участка электрической сети при моделировании продольных возмущений:**

1 – источник питания; 2 – источник синусоидального возмущающего напряжения; 3 - 5 – датчики напряжения ДН1, ДН2 и ДН3; 6 – трехпозиционный релейный регулятор с гистерезисом; 7, 8 – трансформаторный регулятор напряжения

Источник питания моделируется действующим значением фазного напряжения. Датчики напряжений ПИН-4/20-Д – пропорциональными звеньями с коэффициентом передачи  $K_{рн} = 10 / 220 = 0,0455$ , который определяется по паспортным данным с учетом того, что датчик выдает сигнал в 10 В при напряжении 220 В.

В качестве источника возмущающего поперечного напряжения использован источник с треугольным законом изменения. Это допущение позволит в дальнейшем повторить проведенные опыты на физической модели ТРН и сравнить результаты математического моделирования с экспериментом.

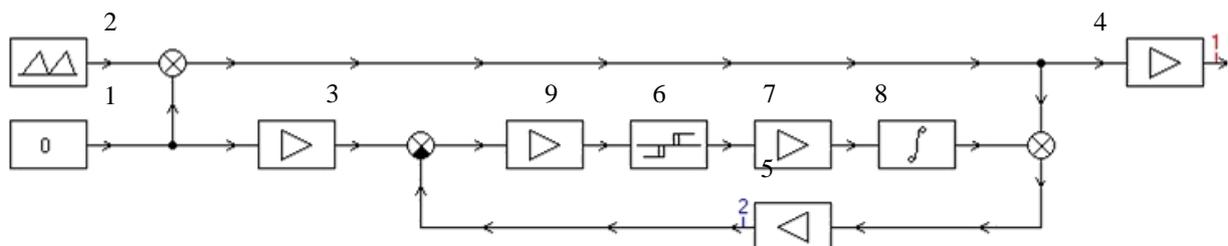
Трансформаторный регулятор напряжения моделируется пропорциональным  $K$  и интегрирующим звеном с постоянной времени  $T$ , учитывающей его быстродействие. Максимальная величина вольтодобавки (вольтоотбавки)  $\Delta U_{рв} = 44$  В учитывается коэффициентом передачи пропорционального звена на входе интегратора  $K = 44$ .

Паспортное быстродействия ТРН соответствует постоянной времени  $T = 10$  с, что аналогично времени, которое требуется электроприводу для перевода ползунка автотрансформатора из нулевого положения в максимальное (крайнее).

Трехпозиционный регулятор с гистерезисом моделирует программно-управляемый контроллер системы управления ТРН и имеет порог включения / отключения 0,1 и 0,05 В, что соответствует  $\pm 1$  и  $\pm 0,5$  % от  $U_{ф.ном}$ .

### Поперечные возмущения

Математическая модель участка электрической сети при обработке поперечных возмущений приведена на рис. 3.



**Рис. 3. Схема модели участка электрической сети при моделировании поперечного возмущающего сигнала:**

1 – фазовый угол напряжения сети; 2 – источник треугольного возмущающего напряжения; 3 - 5 – датчики фаз сетей ДФ1, ДФ2 и ДФ3; 6 – трехпозиционный релейный регулятор с гистерезисом; 7, 8 – трансформаторный регулятор напряжения; 9 – датчик сдвига фаз

Датчики фаз напряжения преобразуют отклонения фаз контролируемых напряжений в электрический сигнал (напряжение). Датчики фаз моделируются пропорциональными звеньями. Поскольку начальный фазовый угол напряжения сети равен 0, датчик фазы формирует нулевой сигнал.

Коэффициент передачи датчика фазы  $K_{дф}$  определяется из расчета, что фазовый сдвиг в 15 эл. град. имеет место при действующем значении

напряжения поперечного возмущения 58,95 В, а сам датчик имеет линейную характеристику  $K_{дф} = 15 / 58,95 = 0,2545$ .

Коэффициент передачи датчика сдвига фаз выбран из условия, что максимальный выходной сигнал реального датчика в 2,5 В имеет место при максимальном сдвиге фаз в 25 эл. град. Тогда  $K_{дсф} = 2,5 / 25 = 0,1$ .

Источник возмущающего поперечного напряжения моделируется действующим значением напряжения.

Трансформаторный регулятор напряжения моделируется также, как при отработке продольных возмущений, с учетом условия, что максимальное напряжение поперечной компенсации  $\Delta U_{рф} = \pm 58,95$  В.

Трехпозиционный регулятор с гистерезисом имеет порог включения / отключения 0,1 и 0,05 В соответственно, что определяет ошибку регулирования в 1 и 0,5 эл. град.

### Результаты моделирования

В результате моделирования получены осциллограммы сигналов при изменении амплитуды и фазы питающего напряжения (при продольных и поперечных возмущениях). Осциллограммы позволяют определить динамические характеристики (скорости восстановления амплитуды и фазы напряжения) ТРН и предельные параметры возмущений, которые могут быть скомпенсированы ТРН.

#### *Продольные возмущения*

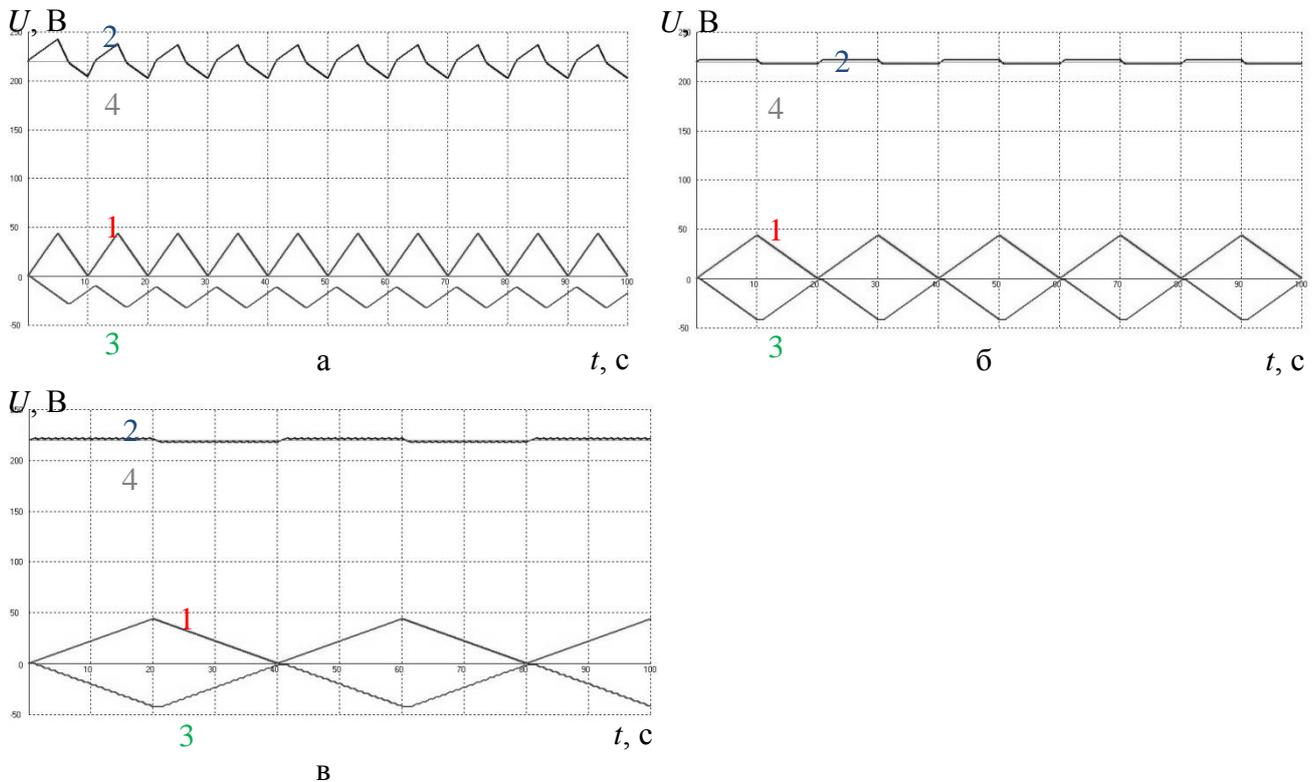
Осциллограммы сигналов при треугольном продольном возмущающем сигнале с амплитудой  $\Delta U_f = 44$  В и временем нарастания  $T_f = 5; 10$  и  $20$  с приведены на рис. 4.

На вход сети подается напряжение 220 В (4). Осциллограммы получены при максимально возможной вольтодобавке ТРН  $\Delta U_{рн} = 44$  В и быстродействию трансформаторного регулятора  $T = 10$  с.

Лучом (3) отмечена вольтодобавка ТРН (напряжение первичной обмотки серийного трансформатора АТЗ). Лучом (2) – напряжение после ТРН. Лучом (1) отмечено треугольное возмущающее напряжение. Если скорость изменения возмущающего сигнала превышает быстродействие ТРН (рис. 4, а), трансформаторный регулятор напряжения не успевает его компенсировать. Вольтодобавка, формируемая ТРН, изменяется «почти» в противофазе с возмущением. Результирующее выходное напряжение пульсирует с частотой возмущающего сигнала, но с амплитудой в 30 В, вместо необходимых 44 В. Форма напряжения после ТРН практически совпадает с формой возмущающего сигнала.

На рис. 4, б изображена ситуация, когда скорость изменения возмущающего сигнала совпадает с быстродействием ТРН (время нарастания сигнала  $T_f$  равно быстродействию ТРН). В этом случае вольтодобавка ТРН (луч 3) находится в противофазе с возмущением и практически полностью его компенсирует. Ползунок автотрансформатора постоянно перемещается. Напряжение

после ТРН (луч 4) имеет отклонение от номинального значения  $\pm 2,27$  В, вызванное зоной нечувствительности трехпозиционного релейного регулятора.



**Рис. 4.** Осциллограмма напряжений на участке электрической сети с ТРН при треугольном возмущающем напряжении с параметрами  $\Delta U_f = 44$  В,  $T_f = 5$  с (а); 10 с (б); 20 с (в)

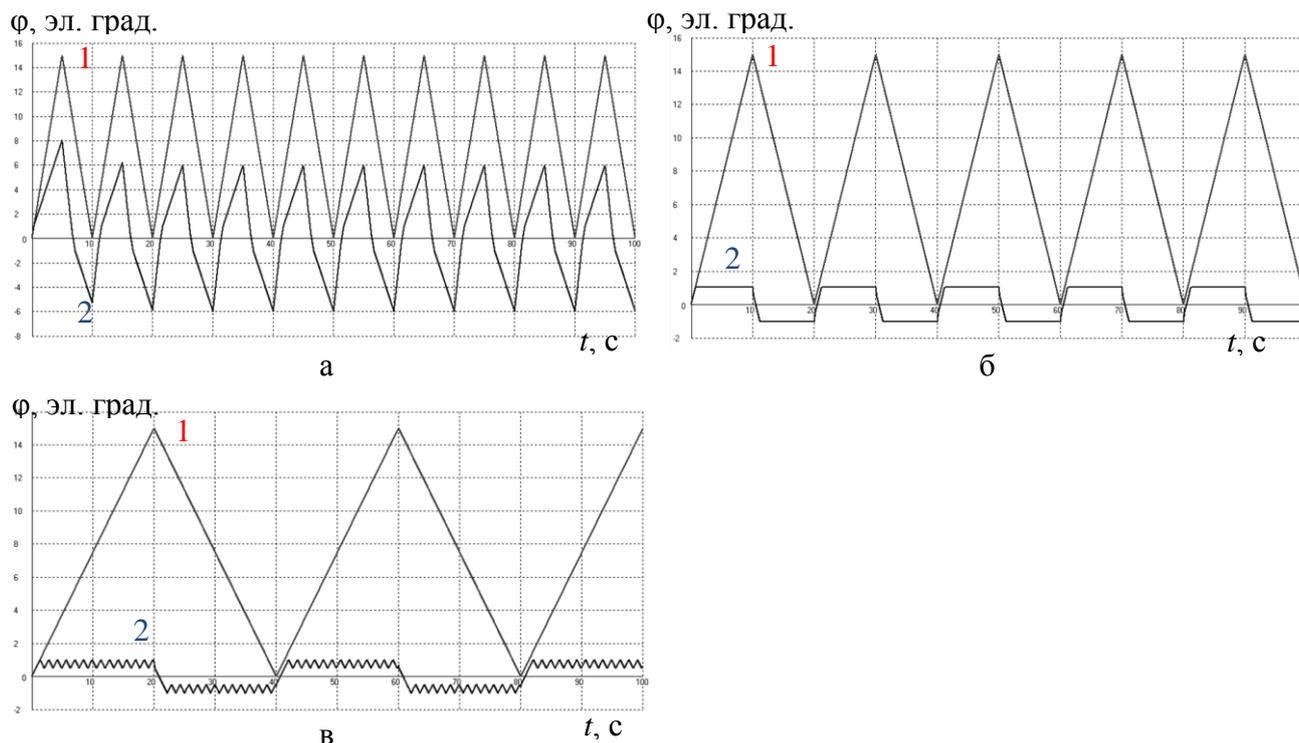
При снижении скорости возмущающего сигнала менее быстродействия ТРН (рис. 4, в), вольтдобавка ТРН также компенсирует возмущение. Напряжение на выходе ТРН колеблется в пределах  $\pm 2,22$  В. Это обусловлено тем, что в отличие от случая на рис. 4, б электропривод ползунка автотрансформатора работает в режиме старт-стоп.

#### *Поперечные возмущения*

Осциллограммы сигналов при отработке треугольного поперечного возмущения с амплитудой  $\Delta U_f = 58,95$  В и временем нарастания сигнала  $T_f = 5$ ; 10 и 20 с приведены на рис. 5.

Фазовый угол сети изначально задан равным 0. Сдвиг напряжения по фазе  $\Delta \varphi_f = 15$  эл. град задается треугольным сигналом возмущающего действующего напряжения  $\Delta U_f = 58,95$  В (луч 1). Параметры ТРН: максимально-возможная вольтдобавка  $\Delta U_{рф} = \pm 58,95$  В (что соответствует сдвигу фаз в 15 эл. град), быстродействие трансформаторного регулятора  $T = 10$  с.

Из рис. 5, а видно, что для сигнала с временем нарастания возмущения  $T_f = 5$  с фактический сдвиг фаз между напряжениями до и после ТРН (луч 2) в установившемся режиме колеблется в диапазоне  $\pm 6$  эл. град., что является недопустимым.



**Рис. 5. Осциллограмма поперечных возмущений:**  
луч 1 с параметрами  $\Delta\varphi_f = 15$  эл. град.,  $T_f = 5$  с (а); 10 с (б); 20 с (в)  
и фактический сдвиг фаз напряжений (луч 2) до и после места установки ТРН

## Выводы

С помощью математической модели участка электрической сети с ТРН установлены параметры возмущающих воздействий, которые могут быть скомпенсированы ТРН в результате продольного и поперечного регулирования.

За счет формирования вольтодобавки ТРН в противофазе с возмущающим сигналом возможно добиться практически полной компенсации возмущений по амплитуде и фазе напряжения. Для этого быстродействие ТРН должно быть не меньше скорости изменения возмущающих воздействий.

## Библиографический список

1. Солнцев, Е.Б. Разработка имитационной модели тиристорного регулятора напряжения / Е.Б. Солнцев, С.А. Петрицкий, С.Н. Юртаев // Интеллектуальная электротехника. – 2018. – № 4 (4). – С. 90 – 99.
2. Патент РФ на полезную модель № 188135, Лабораторный стенд для исследований режимов работы участка электрической сети с регулятором напряжения / Е.Н. Соснина [и др.]. Заявл. 2018145438 от 20.12.2018 г.; Опубл. 01.04.2019. – Бюл. № 10.
3. Лабораторный стенд для исследования параметров электроэнергии при применении полупроводникового регулятора напряжения в распределительной электросети среднего напряжения (6-10-20 кВ) / А.Б. Дарьенков [и др.] // Актуальные проблемы электроэнергетики: сб. науч. ст. – 2018. – С. 95 – 101.

УДК 621.31

И.П. Карпов

## ЗАПРЕТ АВТОМАТИЧЕСКОГО ПОВТОРНОГО ВКЛЮЧЕНИЯ ВЫКЛЮЧАТЕЛЯ КОНТАКТНОЙ СЕТИ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА ДВУХПУТНОГО УЧАТКА

Филиал ОАО «РЖД» Трансэнерго Горьковская дирекция по энергообеспечению  
Дорожная электротехническая лаборатория

Рассмотрена возможность повторного включения выключателя контактной сети в зависимости от величины измеряемого наведённого напряжения в бестоковую паузу. Представленное изобретение запрета автоматического повторного включения (АПВ) относится к системе автоматизации тягового электроснабжения железных дорог - к устройствам автоматизации питающих линий контактной сети переменного тока.

The possibility of re-switching the contact circuit breaker depending on the value of the measured induced voltage in the dead-end pause is considered. The present invention of the prohibition of automatic re-inclusion refers to the automation system of traction power supply of Railways, namely to the automation devices of the supply lines of the AC contact network.

**Ключевые слова:** автоматизация тягового электроснабжения, контроль короткого замыкания, наведенное напряжение, повторное включение.

**Key words:** automation of traction power supply, short circuit control, induced voltage, re-switching.

### Контроль наведённого напряжения

Контроль короткого замыкания (КЗ) в отключенной контактной сети является частью процесса автоматизации электроснабжения [1-5]. Применяемые на Горьковской железной дороге методы контроля [6-7] основаны на измерении наведённого напряжения в линии после аварийного отключения выключателя фидера. Источником контролируемого напряжения служит измерительный трансформатор, установленный за выключателем в сторону линии. По опыту эксплуатации, подтверждённому множеством натуральных экспериментов, было установлено, что при отсутствии повреждения наведённое напряжение находится в интервале 3-5 кВ в зависимости от состояния (включен или отключен) смежного пути и линии «два провода-рельс» (ДПР), а также от токов нагрузки, протекающих по ним. При наличии повреждения наведённое напряжение резко снижается до 100-300 В и также зависит от влияющих линий.

## Устройство запрета АПВ

Известно устройство контроля КЗ в контактной сети переменного тока двухпутного участка железной дорог [7]. Рассмотрим устройство запрета АПВ выключателя контактной сети переменного тока двухпутного участка железной дороги, являющееся его глубокой модернизацией и устраняющее недостаток прототипа- возможность ложного запрета АПВ при восстановлении изоляции в бестоковую паузу.

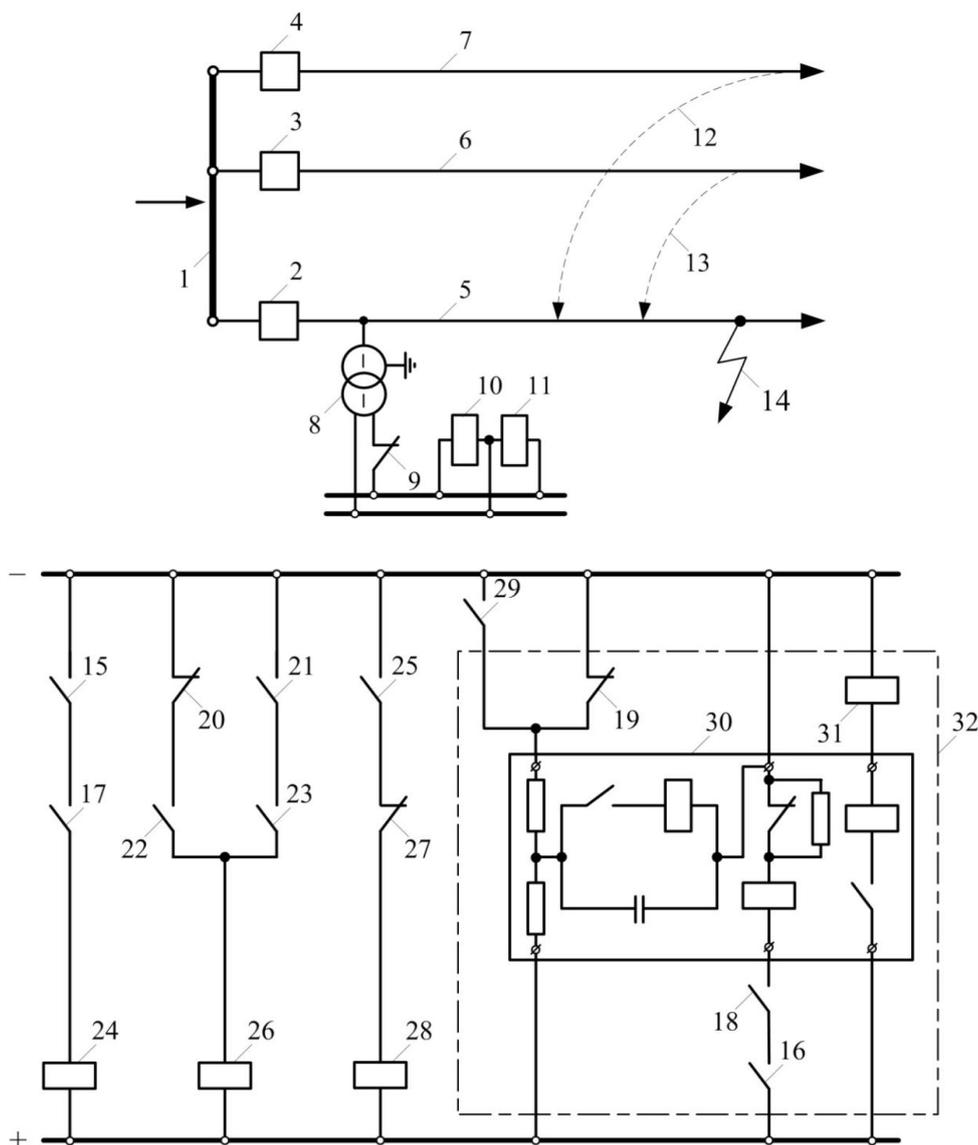
Схема изобретения представлена на рис. 1 (принято, что наведенное напряжение контролируется на контактной сети первого пути).

### Работа устройства запрета АПВ

После аварийного отключения второго выключателя питающей линии контактной сети (фидера) собирается цепь питания реле времени 24, выдержка реле времени выбирается меньше уставки времени устройства АПВ 32 фидера (например, меньше на 0,5с). Замыкающий контакт реле времени 25 включен последовательно в цепь катушки второго промежуточного реле 28, замыкающий контакт 29 которого включен в цепь блокировки АПВ 32. При фиксации наведённого напряжения меньше уставки реле напряжения (первого 10 или второго 11) собирается цепь питания первого промежуточного реле 26 либо через замыкающий контакт 22 первого реле напряжения, либо через замыкающий контакт 23 второго реле напряжения (в зависимости от состояния второго выключателя 3). Устройство в течение выдержки времени реле времени 24 ждёт восстановления изоляции, и только, если измеренное наведённое напряжение всё ещё меньше уставки реле напряжения 10 или 11, запретит автоматическое повторное включение через блокировку АПВ, путём замыкания контакта 29. В случае, если изоляция восстановится, повторное включение будет разрешено, так как в этом случае контакт 29 останется разомкнутым.

Рассмотрим несколько случаев при КЗ на контактной сети 5 первого пути.

*1-й случай. Длительное устойчивое КЗ.* При КЗ отключаются выключатели 2 и 3. Подаётся напряжение на реле времени 24, пошёл отсчёт времени. Электромагнитное влияние будет определяться только линией ДПР 7, т.е. электрическим влиянием, которое не будет превышать 200 В при наличии КЗ. При отключении выключателя 2 размыкающий блок-контакт 9 будет замкнут, и наведенное напряжение будет подано на катушку первого реле напряжения 10 (второе реле напряжения не рассматриваем, так как блок-контакт 21 второго выключателя разомкнут). Уставка первого реле напряжения 300 В, а наведенное напряжение менее 300 В. Поэтому первое реле напряжения с катушкой 10 остаётся в неработающем состоянии (контакт 22 разомкнут), промежуточное реле 26 также будет отключено, размыкающий контакт 27 останется замкнутым, что приведёт к срабатыванию второго промежуточного реле 28 через время, равное выдержке реле времени, замыкающий контакт 29 соберёт цепь блокировки АПВ, повторного включения не будет.



**Рис. 1. Схема устройства запрета АПВ:**

1 – шины 27,5 кВ тяговой подстанции; 2, 3 – первый и второй выключатели присоединений питающих линий контактной сети первого и второго путей; 4 – выключатель присоединения питающей линии ДПР; 5, 6 – питающие линии контактной сети первого и второго путей; 7 – питающая линия ДПР; 8 – трансформатор напряжения контроля наведенного напряжения; 9 – размыкающий блок-контакт первого выключателя (при отключенном выключателе блок-контакт замкнут); 10 – катушка первого реле напряжения с замыкающим контактом 22; 11 – катушка второго реле напряжения с замыкающим контактом 23; 12 – электромагнитное влияние линии ДПР на контактную сеть первого пути; 13 – электромагнитное влияние контактной сети второго пути на контактную сеть первого пути; 14 – короткое замыкание; 15, 16 – замыкающие контакты реле-повторителя отключенного положения первого выключателя присоединения питающей линии контактной сети; 17, 18, 19 – замыкающие и размыкающие контакты реле фиксации команды управления первым выключателем присоединения питающей линии контактной сети; 20, 21 – размыкающий и замыкающий блок-контакты второго выключателя присоединения питающей линии контактной сети (при отключенном выключателе размыкающий блок-контакт замкнут); 24 – катушка реле времени с замыкающим контактом 25; 26 – катушка первого промежуточного реле с размыкающим контактом 27; 28 – катушка второго промежуточного реле с замыкающим контактом 29; 30 – устройство повторного включения РПВ-58; 31 – электромагнит включения выключателя; 32 – устройство АПВ первого выключателя присоединения питающей линии контактной сети

*2-й случай. Нет устойчивого КЗ.* При КЗ отключается только выключатель 2. Собирается цепь питания реле времени 24, пошёл отсчёт времени. Электромагнитное влияние определяется линией 7 ДПР и контактной сетью 6 второго пути, в этом случае наведенное напряжение при отсутствии КЗ превышает 3 кВ. При отключении выключателя 2 размыкающий блок-контакт 9 будет замкнут и наведенное напряжение подается на катушку второго реле напряжения 11 (первое реле напряжения не рассматриваем, так как блок-контакт 20 второго выключателя разомкнут). Уставка второго реле напряжения 500 В, а наведенное напряжение более 500 В. Поэтому второе реле напряжения с катушкой 11 срабатывает (контакт 23 замкнут), и при замкнутом блок-контакте 21 второго выключателя 3 будет подано напряжение на промежуточное реле 26, контакт которого 27 разомкнётся. Если через время, равное выдержке реле времени, наведенное напряжение не уменьшится ниже уставки, второе промежуточное реле 28 останется отключенным, его контакт 29 останется разомкнутым, тем самым разрешив повторное включение.

*3-й случай. Длительное устойчивое КЗ.* При КЗ отключается только выключатель 2. Собирается цепь питания реле времени 24, пошёл отсчёт времени. Электромагнитное влияние определяется линией 7 ДПР и контактной сетью 6 второго пути, в этом случае наведенное напряжение при наличии КЗ не превышает 400 В. При отключении выключателя 2 размыкающий блок-контакт 9 будет замкнут, и наведенное напряжение будет подано на катушку второго реле напряжения 11 (первое реле напряжения не рассматриваем, так как блок-контакт 20 разомкнут). Уставка второго реле напряжения 500 В (увеличенная уставка второго реле напряжения учитывает дополнительное электрическое и магнитное влияние смежного пути на величину наведённого напряжения), а наведенное напряжение менее 500 В. Поэтому второе реле напряжения с катушкой 11 остаётся в несработавшем состоянии (контакт 23 разомкнут), промежуточное реле 26 будет отключено. Далее, всё как в 1 случае, запрет АПВ.

*4-й случай. КЗ было устойчивым, но изоляция восстановилась за период выдержки времени реле времени 24 устройства.* Всё происходит аналогично 1-му или 2-му случаям, но к моменту замыкания контакта реле времени 25 контакт 27 размыкается (наведённое напряжение стало выше уставки первого или второго реле напряжения и первое промежуточное реле оказалось отключено из-за размыкания контакта 22 или 23), соответственно второе промежуточное реле 28 также оказывается отключено, и контакт 29 остаётся разомкнутым, тем самым разрешается АПВ.

Эффективность устройства определяется снижением числа пережогов и объема повреждений контактной подвески в случае устойчивого КЗ, и снижением ложных запретов АПВ при восстановлении изоляции тяговой сети.

### Выводы

1. Вопрос определения наличия КЗ – один из основных в процессе автоматизации электроснабжения.
2. Контроль наведённого напряжения - один из основных показателей контроля КЗ.
3. Устройство запрета АПВ увеличивает надёжность функционирования системы электроснабжения.

### Библиографический список

1. **Фигурнов, Е.П.** Релейная защита: в 2 ч. – М.: ГОУ «Учебно-методический центр по образованию на ж/д транспорте», 2009. Ч. 2. – 135 с.
2. **Герман, Л.А.** Автоматизация электроснабжения тяговой сети переменного тока: монография / Л.А. Герман, В.Л. Герман. - М:МГУПС, - 2014.
3. **Жарков, Ю.И.**, Автоматизация систем электроснабжения. / Ю.И. Жарков, В.Я. Овласюк, Н.Д. Сухопрудский. - М.: Транспорт, 1990.
4. **Герман, Л.А.** Простой способ поиска повреждения на контактной сети переменного тока. / Л.А. Герман // Локомотив. - 2008. - №4. - С.45-46.
5. Патент на изобретение № 2531025 от 07.09.2012. Устройство контроля короткого замыкания в контактной сети переменного тока двухпутного участка железной дороги. / Л.А. Герман, В.Л. Герман, Д.А. Жевлаков, А.Ю. Попов. Опубл. 20.10.2014. Бюл.№29.

УДК 621.3

А.А. Кралин, А.А. Асабин, Е.В. Крюков, В.В. Еременко

**ИМИТАЦИОННАЯ МОДЕЛЬ БЛОКА ФОРМИРОВАНИЯ СИГНАЛОВ  
ДЛЯ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ВТОРОГО УРОВНЯ ТРВДН**

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Приведена имитационная модель блока формирования сигналов для системы управления второго уровня тиристорного регулятора величины и фазы вольтодобавочного напряжения. Модель выполнена в приложении *LabVIEW*.

The article presents a simulation model of the signal generation unit for the control system of the second level of the thyristor regulator of the value and phase of the voltage. The model is made in the LabVIEW application.

**Ключевые слова:** имитационное моделирование, система управления, *LabVIEW*.

**Key words:** simulation modeling, control system, LabVIEW.

Активно-адаптивная система управления тиристорным регулятором величины и фазы вольтодобавочного напряжения (ТРВДН) состоит из систем управления первого и второго уровня. Система управления 2-го (верхнего) уровня предназначена для контроля входных и выходных электрических параметров участка электрической сети в режиме реального времени. Входными сигналами для неё являются значения входных и выходных линейных напряжения ТРВДН, значения линейных токов, активной, реактивной, полной мощности, а также угол сдвига первой гармоники выходного напряжения [1,2].

На этапе проектирования и разработки системы управления для вычисления в режиме реального времени необходимых электромагнитных величин была выбрана кроссплатформенная среда разработки приложений *LabVIEW* фирмы National Instruments [3–5].

Использование графического языка программирования *G* совместно с продуманным графическим интерфейсом значительно упрощает процесс программирования. В данном случае использование среды потокового визуального программирования *LabVIEW* позволяет задавать последовательность операций с помощью блок-диаграмм, которые затем компилируются в машинные коды для дальнейшего исполнения. Организованные графические линии связи между узлами и блоками программы служат для передачи потока данных.

Блок-схема формирования сигналов для системы управления 2-го уровня представлена на рис 1. Входными сигналами данного модуля являются сигналы, пропорциональные мгновенным значениям входных и выходных линейных напряжения и токов, идущие от измерительных трансформаторов ТРВДН.

Выходными сигналами являются действующие значения токов и напряжений, активная  $P$ , реактивная  $Q$ , полная  $S$  мощности, угол сдвига первой гармоники выходного напряжения  $\Theta_{\text{вых}}$ .

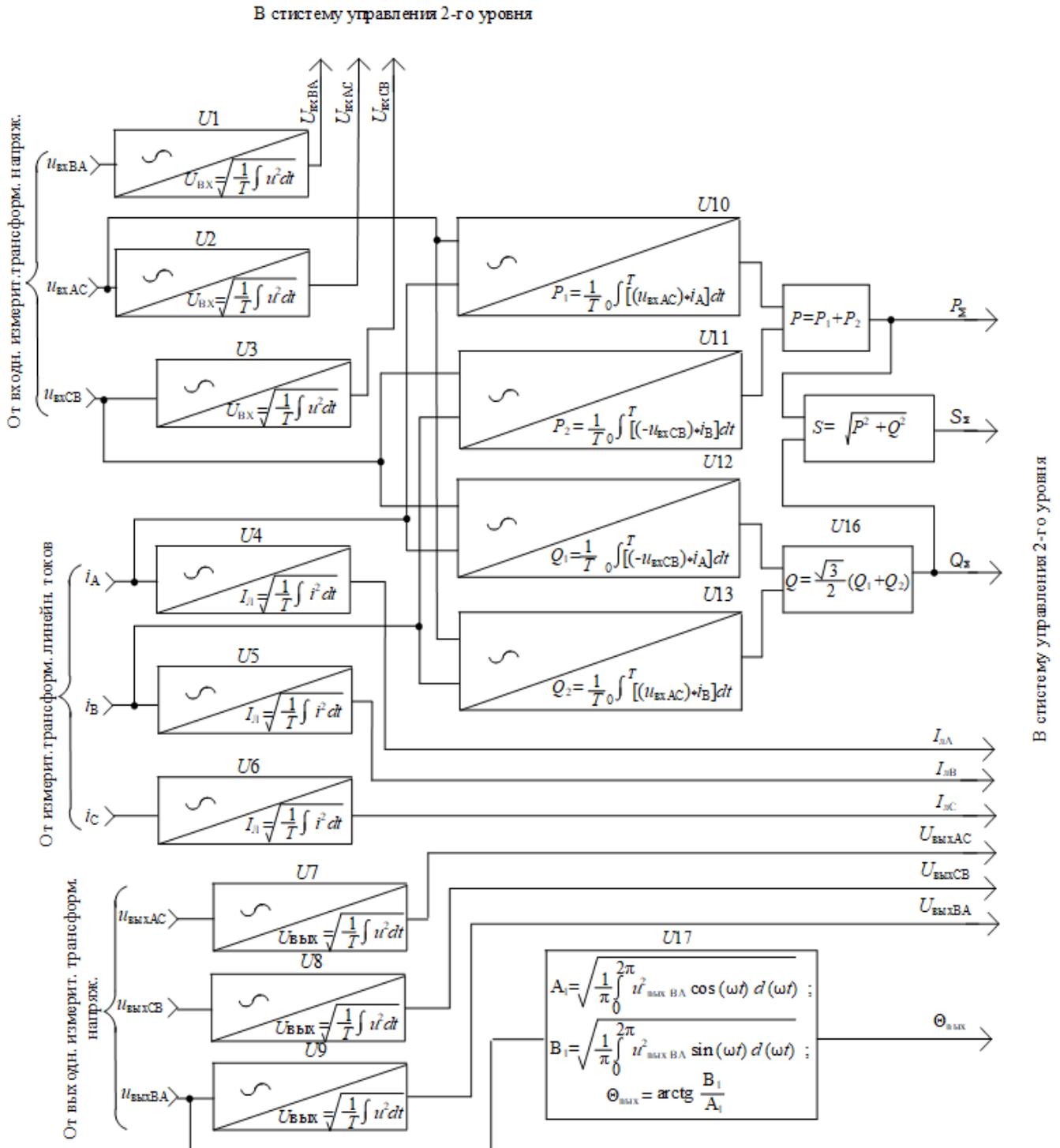


Рис. 1. Блок-схема формирования сигналов для системы управления 2-го уровня

Блок-схема расчета указанных электромагнитных величин, реализованная в *LabVIEW*, представлена на рис. 2.

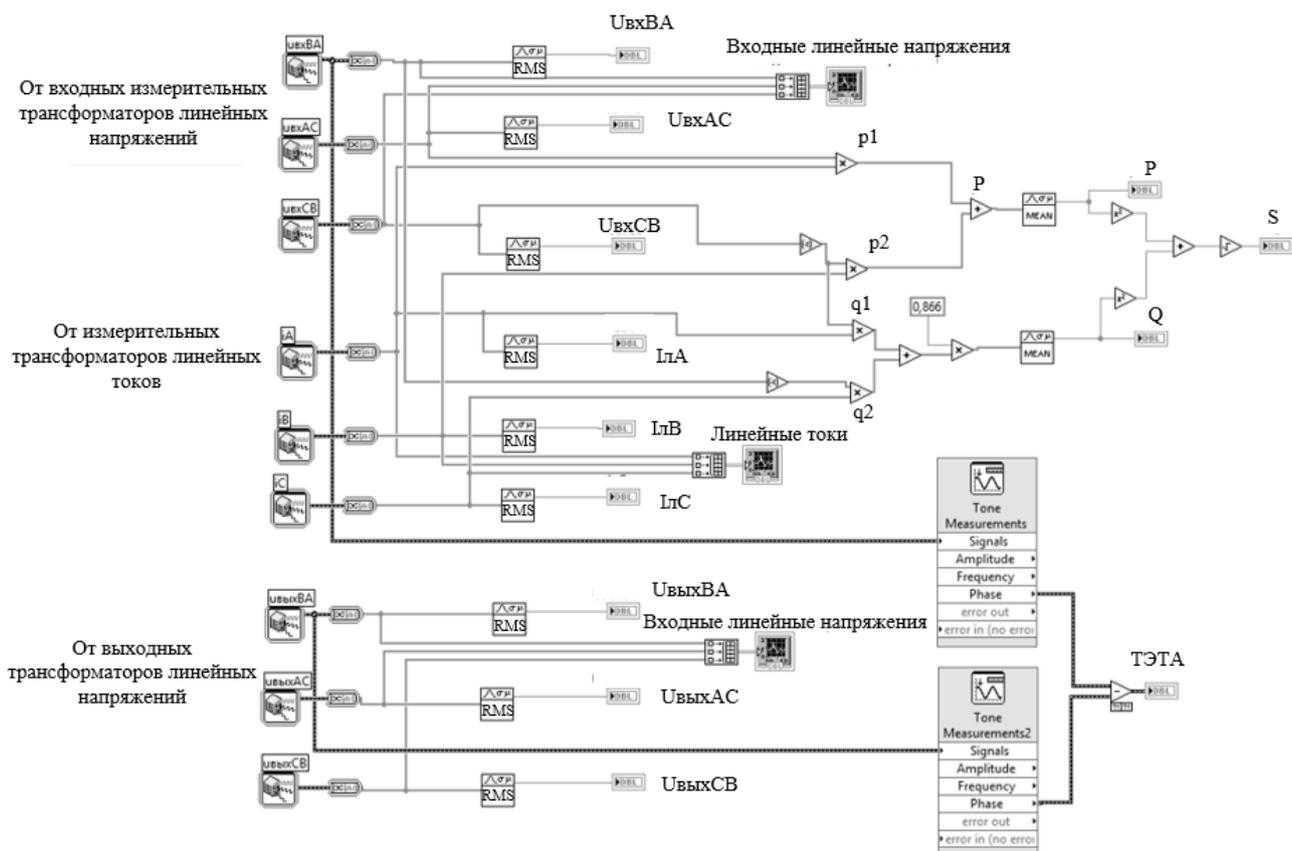


Рис. 2. Блок-схема формирования сигналов для системы управления 2-го уровня, реализованная в *LabVIEW*

Определение действующих значений напряжений и токов выполняется с помощью блоков *RMS* в соответствии с выражениями

$$U = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T u^2 dt}, \tag{1}$$

$$i = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T i^2 dt}. \tag{2}$$

Определение угла сдвига первой гармоники выходного напряжения относительно входного  $\Theta_{\text{вых}}$  выполняется с помощью блоков *Tone Measurements*. Одним из выходных сигналов данного блока является фаза сигнала *Phase*. Разность фаз соответствующих напряжений определит значение  $\Theta_{\text{вых}}$ .

Расчет активной, реактивной и полной мощностей проводился по выражениям:

$$P_1 = \frac{1}{T} \int_0^T u_{\text{вхАС}} \cdot i_A dt, \tag{3}$$

$$P_2 = \frac{1}{T} \int_0^T -u_{\text{вхСВ}} \cdot i_B dt, \tag{4}$$

$$P = P_1 + P_2, \tag{5}$$

$$Q_1 = \frac{1}{T} \int_0^T -u_{\text{вхCB}} \cdot i_A dt, \quad (6)$$

$$Q_2 = \frac{1}{T} \int_0^T u_{\text{вхAC}} \cdot i_B dt, \quad (7)$$

$$Q = \frac{\sqrt{3}}{2} (Q_1 + Q_2), \quad (8)$$

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2}. \quad (9)$$

Для получения осциллограмм мгновенных значений электромагнитных величин, отображения цифровой информации о значениях активных, реактивных и полных мощностей, действующих значений измеряемых напряжений и токов, а также угла сдвига  $\Theta_{\text{вых}}$  первой гармоники выходного напряжения была разработана специальная программа *Host* контроллера *myRIO-1900*. На рис.3 представлена передняя панель указанной программы во время испытаний. Измеряемые сигналы выводятся на экраны трех многолучевых осциллографов *Waveform Chart*. Цифровая информация выводится на экран с помощью блоков *Numeric Indicator*.

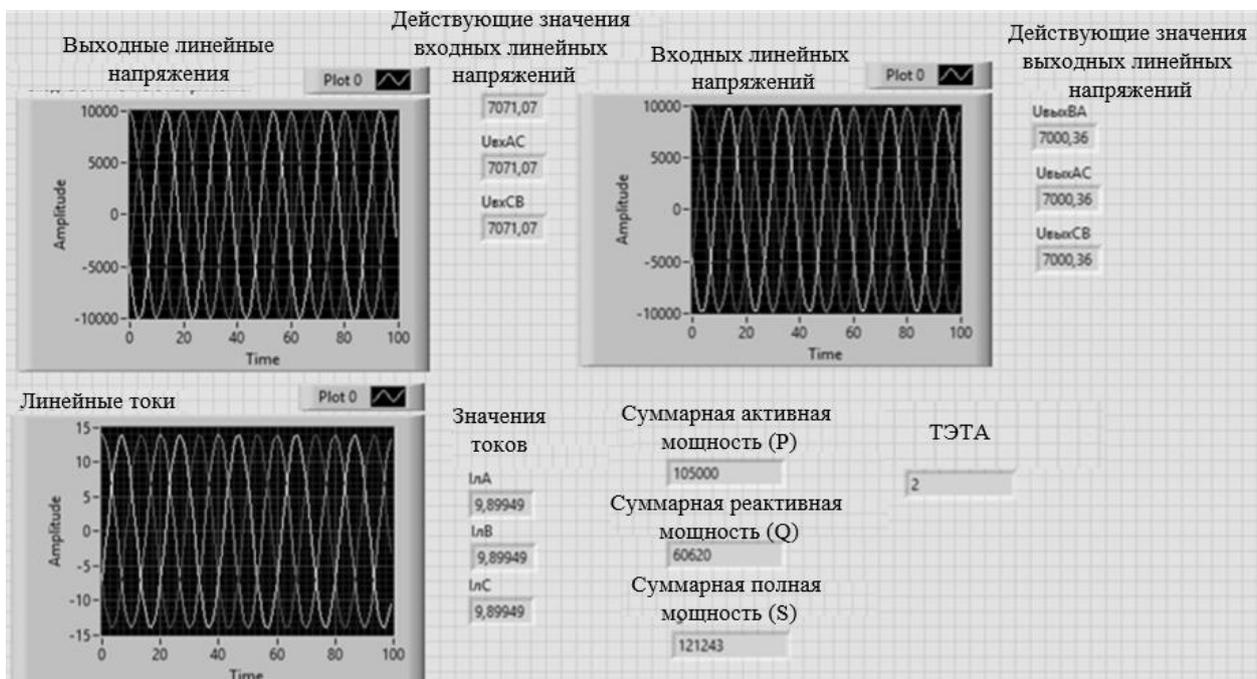


Рис. 3. Передняя панель программы *Host* контроллера *myRIO-1900* во время испытаний

## Выводы

1. Наличие встроенных приборов, возможность разрабатывать системы реального времени с использованием программирования в *LabVIEW*, высокое быстродействие устройства позволяет сделать вывод о том, что использование платформы *NI MyRIO-1900* значительно сократит время на проектирование и отладку системы управления ТРВДН.

2. Подпрограмма формирования сигналов для системы управления 2-го уровня формирует в режиме реального времени сигналы, пропорциональные действующим значениям линейных токов, входных и выходных линейных напряжений ТРВДН, угла сдвига первой гармоники выходного напряжения, значения активной, реактивной и полной мощности.

## Библиографический список

1. Пат. 2621062 Рос. Федерация : МПК G 05F 1/30. Тиристорное фазоповоротное устройство с вольтодобавочным трансформатором для сети среднего напряжения / Е.Н. Соснина, А.А. Асабин, А.А. Кралин, Е.В. Крюков; заявитель и патентообладатель Ниж. гос. техн. ун-т им. Р.Е. Алексеева – № 2016127017; заявл. 06.07.2016; опубл. 31.05.2017. Бюл. № 16.
2. **Stel'Makov, V.N.** Thyristor-controlled phase-shifting devices / V.N. Stel'Makov, V.P. Zhmurov, A.N. Tarasov // Russian electrical engineering, - 2014. V. 85. - N. 1. - P. 10-17.
3. **Жуков, К.Г.** Модельное проектирование встраиваемых систем в Labview / К.Г. Жуков, Е. Д. Баран. – М.: ДМК Пресс, 2011. – 688 с.
4. **Суранов, А.Я.** Labview 8.20: справочник по функциям / А. Я. Суранов. – М.: ДМК Пресс, - 2007. – 536 с.
5. **Баран, Е. Д.** Labview FPGA Реконструируемые измерительные и управляющие системы / Е. Д. Баран. – М.: ДМК Пресс, 2009. – 448 с.

УДК 621.311

Е.В. Крюков, А.В. Иванов, Н.И. Эрдили

**РАЗРАБОТКА ПРОГРАММНОЙ ЧАСТИ ИМИТАЦИОННОГО КОМПЛЕКСА ВИРТУАЛЬНОЙ ЭЛЕКТРОСТАНЦИИ НА БАЗЕ ВОЗОБНОВЛЯЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ ЭНЕРГИИ**

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Приведено описание структуры разрабатываемого программно-аппаратного комплекса виртуальной электростанции (ВиЭС), включающего имитационные модели элементов ВиЭС (генерирующие установки, накопители электроэнергии и потребители). Дана структурная схема ВиЭС с указанием потоков мощности при различных режимах, а также целевые направления оптимизации. Обосновано использования Си-подобных языков при реализации программной части.

Description of the structure of a simulation complex of virtual power plant (VPP), now being developed, is given in the article. The complex includes elements' models of VPP (generating units, power storage units and consumers). There is structure scheme of VPP, specifying power flows for different modes, as well as key direction. Justification for the use of «C» programming language is given in the article too.

**Ключевые слова:** виртуальная электростанция, система управления, распределенная энергетика, возобновляемые источники энергии, умные сети, оптимизация.

**Key words:** virtual power plant, control system, distributed energy, renewable sources of energy, smart grid, optimization.

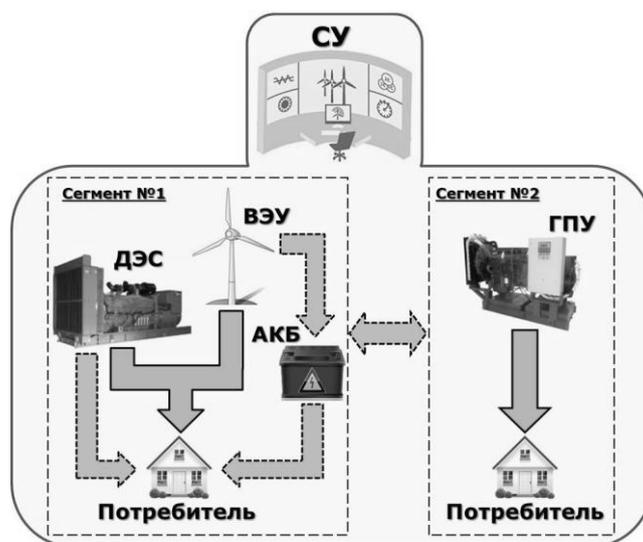
На сегодняшний день основной тенденцией развития электроэнергетической отрасли является переход к распределенной генерации с увеличением доли выработки электроэнергии установками, использующими возобновляемые источники энергии (ВИЭ). При этом распределенные источники и потребители электроэнергии (ЭЭ) объединяются в единый энергокомплекс с применением концепций «интернет энергии» (Internet of Energy), «виртуальная электростанция» (Virtual power plant) и «микросеть» (Microgrid) для повышения эффективности использования мощностей [3], [4]. В основе данных концепций лежит принцип свободного обмена энергией между всеми участниками системы [6].

Для электроэнергетического комплекса России данный подход может являться решением одной из наиболее важных задач – обеспечение надежного электроснабжения территорий, технологически изолированных от Единой энергосистемы [2]. Использование ВИЭ в автономных системах электроснабжения (СЭС) снижает затраты на доставку органического топлива и, как следствие, уменьшает транспортную составляющую конечной цены за кВт·ч, а принцип свободного обмена энергией устраняет необходимость содержания

большого объема резервных мощностей в системе, что также имеет положительный экономический эффект [1].

Ввиду больших экономических и технических рисков, потенциально являющихся источником значительных затрат, а также отсутствия достаточной научно-технической базы, проведение опытно-промышленной эксплуатации подобных энергокомплексов невозможно. По этим причинам необходима разработка имитационного комплекса изолированной СЭС, функционирующего по принципу «виртуальная электростанция» и состоящего из моделей источников и накопителей электроэнергии.

На рис. 1 представлена структурная схема изолированной СЭС.



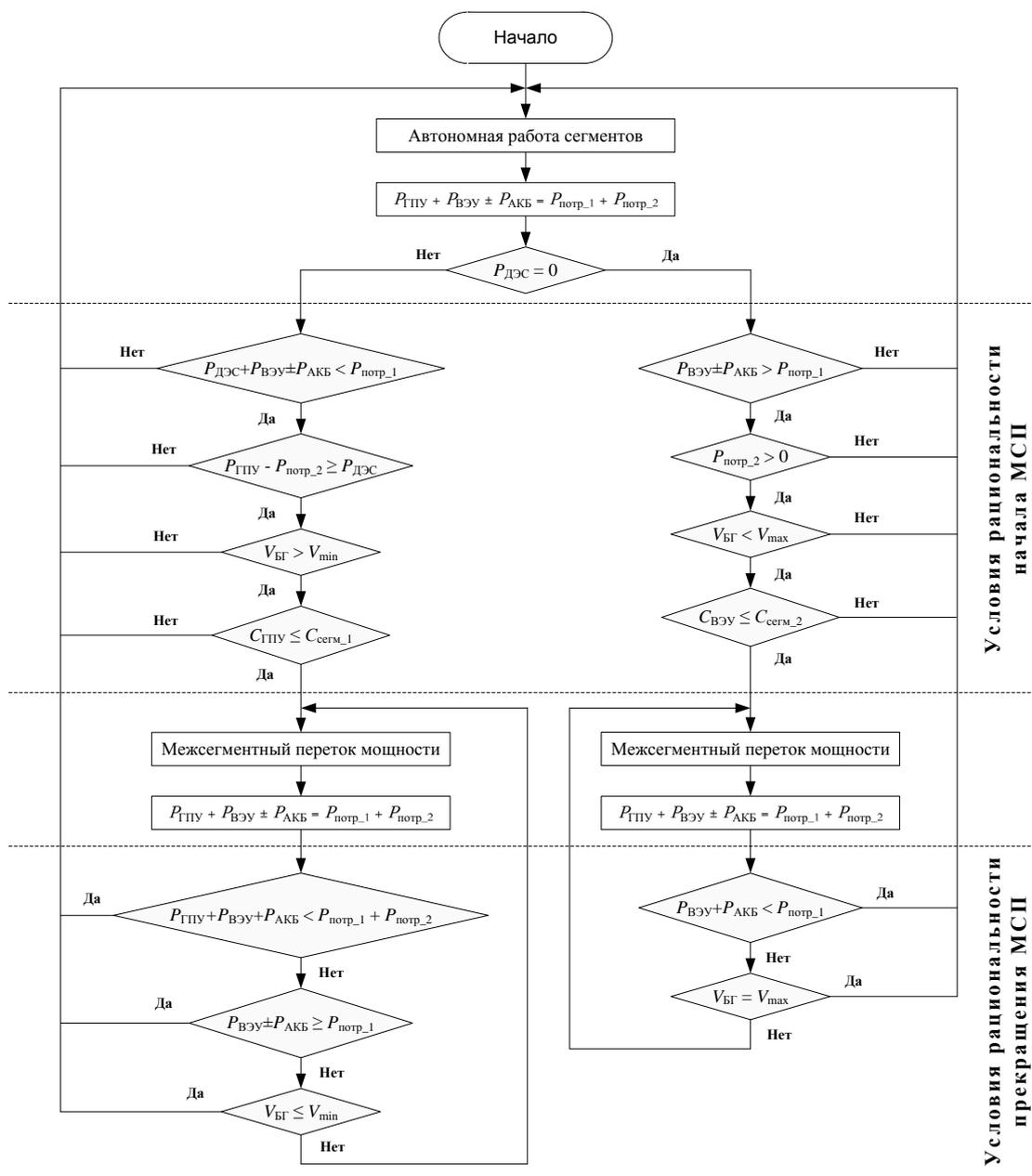
**Рис.1. Структурная схема изолированной СЭС с указанием потоков мощности при различных режимах:**

СУ – система управления; ДЭС – дизельная электростанция; ВЭУ – ветроэнергетическая установка; АКБ – аккумуляторная батарея; ГПУ – газопоршневая установка

В исходном состоянии СЭС сегменты работают автономно. При возникновении каких-либо дисбалансов энергетические потоки должны быть перераспределены системой управления (СУ), обеспечивая наиболее оптимальный режим функционирования СЭС в целом за счет минимизации использования ДЭС с упором на генерирующие мощности на базе ВИЭ. Для смены режимов необходимо последовательное выполнение условий рациональности начала/прекращения межсегментных потоков (МСП) [5], отраженных в представленном на рис. 2 алгоритме работы СЭС.

В основу программной реализации были положены Си-подобные языки – С и С++. Помимо требования достаточной точности имитирования работы реальных энергоустановок, программный код также должен быть легко утилизируемым, то есть иметь возможность вносить изменения и поправки без существенных трудозатрат. С этой целью, а также для упрощения представления имитационной системы используется один из методов объектно-ориентированного подхода к программированию – инкапсуляция.

На рис. 3 представлена архитектура программной части имитационной системы, где каждая отдельная таблица – это объект с набором атрибутов и элемент-функций (данные и действия, используемые и выполняемые в процессе работы). Представленная диаграмма построена аналогично *UML*-диаграммам, где первая строка – имя объекта, вторая – атрибуты, третья – элемент-функции.



**Рис. 2. Алгоритм работы изолированной СЭС:**

$P_{ДЭС}$  – генерируемая мощность ДЭС, кВт;  $P_{ГПУ}$  – генерируемая мощность ГПУ, кВт;  $P_{ВЭУ}$  – генерируемая мощность ВЭУ, кВт;  $P_{АКБ}$  – генерируемая/потребляемая мощность АКБ, кВт;  $P_{потр_1}$  – потребляемая мощность первого сегмента, кВт;  $P_{потр_2}$  – потребляемая мощность второго сегмента, кВт;  $V_{БГ}$  – уровень биогаза, м<sup>3</sup>;  $V_{min}$  – минимально допустимый уровень биогаза, м<sup>3</sup>;  $V_{max}$  – максимально допустимый уровень биогаза, м<sup>3</sup>;  $C_{ГПУ}$  – цена за кВт·ч электроэнергии, вырабатываемой ГПУ, руб.;  $C_{ВЭУ}$  – цена за кВт·ч электроэнергии, вырабатываемой ВЭУ, руб.;  $C_{сегм_1}$  – цена за кВт·ч в первом сегменте, руб.;  $C_{сегм_2}$  – цена за кВт·ч во втором сегменте, руб.

Таким образом, каждый объект имеет собственный интерфейс, с помощью которого осуществляется взаимодействие с другими объектами. В случае корректировки реализации какого-либо отдельного объекта изменения не затронут остальную часть системы.



Рис. 3. Архитектура программной части имитационной системы

Выбранный объектно-ориентированный подход к разработке программной части имитационного комплекса обеспечит достаточную гибкость программного кода, а изменения в реализации какого-либо отдельного объекта не затронут остальную часть кода.

Имитационная модель изолированной СЭС в дальнейшем будет использована для исследования и апробирования концепций «энергетический интернет», «виртуальная электростанция», «микروгрид» и др. Замена реальных энергоустановок имитационными моделями минимизирует технические и экономические риски.

*Работа выполняется при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ (Государственное задание №13.2078.2017/4.6).*

**Библиографический список**

1. **Суслов, К.В.** Развитие систем электроснабжения изолированных территорий России с использованием возобновляемых источников энергии / К.В. Суслов // Вестник ИрГУ. – 2017. – Т.21.– №5– С. 131-142.
2. Энергетическая стратегия России на период до 2035 года. Утверждена распоряжением Правительства Российской Федерации от 13.11.2009. № 1715-р. [электронный ресурс]. – URL: <https://minenergo.gov.ru/node/1026/>. (17.04.18).
3. **Chen, J.** Alternative investments / С. James //Internet of Energy – IoE Investopedia.com [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.investopedia.com/terms/i/internet-energy-ioe.asp>
4. The internet of energy: a web-enabled *SMART GRID* system / N. Bui [et al.] // IEEE Network – 2012. – P. 39-45.
5. Functioning Algorithm of the Stand Alone Power Supply System with Renewable Energy Sources / E.N. Sosnina [et al.] // IEEE Xplore Digital Library. 2019. – P. 45-60.
6. The «smart grid», virtual power plants and the energy revolution: News & Events / U.S. Embassy & Consulates in South Africa. [Электронный ресурс]. – URL: <https://za.usembassy.gov/smart-grid-virtual-power-plants-energy-revolution/>

УДК 621.311

Д.В. Куделина, В.И. Бирюлин

**МЕТОД ДИАГНОСТИКИ И КОНТРОЛЯ СОСТОЯНИЯ ИЗОЛЯЦИИ  
КАБЕЛЬНЫХ ЛИНИЙ**

Юго-Западный государственный университет

Статья посвящена разработке устройства, реагирующего на токи обратной и нулевой последовательности для контроля состояния изоляции кабельных линий. Размещение контролирующих устройств в начале и конце кабельных линий позволит получать более достоверные и обоснованные результаты по определению причины появления этих токов.

The article is devoted to the consideration of a device which reacts to reverse and zero-sequence currents for monitoring the state of insulation of the cable lines. Placement of monitoring devices at the beginning and the end of the cable lines will allow obtaining more reliable and valid results in determining the cause of the occurrence of these currents.

**Ключевые слова:** кабельная линия, изоляция, обратная последовательность, нулевая последовательность.

**Key words:** cable line, insulation, reverse sequence, zero sequence.

Материалы, применяемые для создания изоляции кабельных линий, достаточно уязвимы к различным факторам, воздействующим на нее в течение всего срока работы [1-4]. При длительной эксплуатации в кабелях неизбежно возникают процессы старения изоляции. Под действием этих процессов происходит снижение электрической прочности изоляции, что при неблагоприятных условиях снижение электрической прочности изоляции может привести к возникновению пробоя или аварийного режима, требующего отключения поврежденной линии от электрической сети с последующим ее ремонтом. Это создает перерыв в электроснабжении различных потребителей.

В настоящее время большая часть энергетического оборудования, в том числе и кабельных линий, имеет значительный срок эксплуатации и используется на пределе своих возможностей. По данным, приведенным в [5], наибольший износ оборудования приходится на распределительный сетевой сегмент – до 70%.

В настоящее время применяются различные способы контроля состояния изоляции кабельных линий [6,7] – измерение сопротивления изоляции, испытание повышенным выпрямленным напряжением, проведение испытания изоляции напряжением сверхнизкой частоты [8].

Чтобы повысить надежность электроснабжения потребителей и одновременно снизить число кабелей, повреждающихся при проведении профилактических испытаний изоляции повышенным напряжением, целесообразно использовать неразрушающие методы испытаний и диагностики кабелей в

условиях эксплуатации. Данные методы диагностики базируются на периодических измерениях наиболее значимых характеристик изоляции.

Но приведенные способы требуют применения специального дорогостоящего оборудования и могут применяться для испытаний и диагностики состояния изоляции кабельных линий, в отключенном состоянии. Поэтому разработка методов контроля состояния изоляции кабельной линии, находящейся под рабочим напряжением, является актуальной задачей.

В настоящее время для контроля состояния изоляции работающих кабельных линий применяются устройства, работающие на сравнении токов нулевой последовательности, измеряемых с помощью трансформаторов тока нулевой последовательности, установленных на контролируемых линиях [11, 12]. Линия с ослабленной изоляцией какой-либо фазы относительно земли будет иметь наибольшее значение тока нулевой последовательности, что должно служить основанием для более пристального внимания к ней с возможным привлечением дополнительных средств контроля состояния изоляции. Между тем, частота возникновения замыканий между фазами кабельных линий является сопоставимой с возникновением замыканий фаз на землю [13], поэтому повреждения междуфазной изоляции достаточно распространенное явление, требующее постоянного контроля.

Оценка состояния изоляции между фазами может быть получена с применением контроля токов обратной последовательности, возникающих при значительном снижении междуфазной изоляции. Такое сочетание контролируемых параметров обеспечит постоянный мониторинг изоляции фаз как по отношению к земле, так и отношению друг к другу. Но при работе подобных систем возникает проблема, связанная с возможным влиянием на них несимметричной нагрузки или возникновением повреждений вне кабельных линий, но сопровождающихся протеканием токов нулевой последовательности через контролируемую кабельную линию.

Выполнение процессов обработки результатов измерений, диагностики текущего состояния изоляции контролируемой кабельной линии производится программным обеспечением, работающим как своеобразный диагностический программный комплекс, позволяющий обоснованно диагностировать техническое состояние контролируемых кабельных линий. Таким образом, предлагаемый комплекс состоит из аппаратных средств и программного обеспечения, в состав которого входит диагностический редактор. Он должен обеспечивать автоматизированное диагностирование состояния изоляции контролируемых кабельных линий.

Подсистема сбора данных, как и различные устройства контроля изоляции, должна устанавливаться в начале контролируемой линии. Такой вариант исполнения может рекомендоваться для внедрения при недостаточном объеме денежных средств или же в тех случаях, когда состояние изоляции кабельной линии заведомо ниже, чем у изоляции присоединения, питающего кабельную линию. В этом случае возникновение токов обратной и нулевой последовательности в контролируемой линии будет однозначно связано с процессами,

протекающими в ее изоляции, и позволит иметь дополнительную информацию для оценки ее состояния. При примерно одинаковом состоянии изоляции линии и присоединения нельзя однозначно установить источник появления данных токов. Также причиной появления токов обратной и нулевой последовательности может служить несимметрия нагрузки.

На основании метода симметричных составляющих [14] несимметричные токи нагрузки могут представляться как три последовательности: прямая, обратная и нулевая в комплексной форме:

$$\begin{aligned} \dot{I}_{A1} &= I_1 e^{j(0+\varphi_1)}; \dot{I}_{B1} = I_1 e^{j(-2\pi/3+\varphi_1)}; \dot{I}_{C1} = I_1 e^{j(2\pi/3+\varphi_1)}; \\ \dot{I}_{A2} &= I_2 e^{j(0+\varphi_2)}; \dot{I}_{B2} = I_2 e^{j(2\pi/3+\varphi_2)}; \dot{I}_{C2} = I_2 e^{j(-2\pi/3+\varphi_2)}; \\ \dot{I}_{A0} &= I_0 e^{j\varphi_0}; \dot{I}_{B0} = I_0 e^{j\varphi_0}; \dot{I}_{C0} = I_0 e^{j\varphi_0}. \end{aligned} \quad (1)$$

В этом случае можно сделать обоснованный вывод, что же является причиной возникновения данных токов – снижение уровня изоляции контролируемой линии, возникновение ослабленной изоляции вне зоны контроля, или же несимметричная нагрузка – не предоставляется возможным.

Для обеспечения правильного выявления причины появления токов обратной и нулевой последовательности предлагается использовать систему контроля состояния изоляции, состоящую на постоянной основе или временно из двух комплектов (рис. 1).

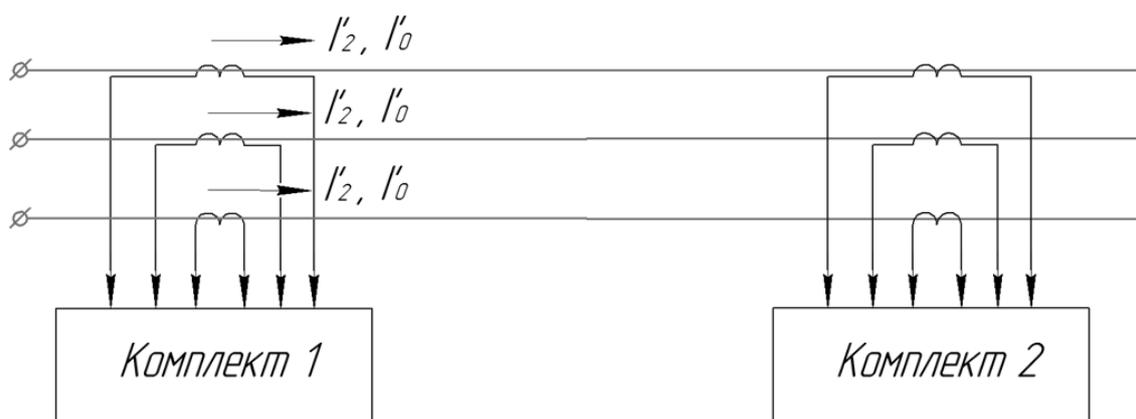


Рис. 1. Автоматизированная система для контроля изоляции

Рассмотрим распределение токов в такой системе при появлении значительной несимметрии нагрузки или же ослабления изоляции вне контролируемой кабельной линии (рис. 2).

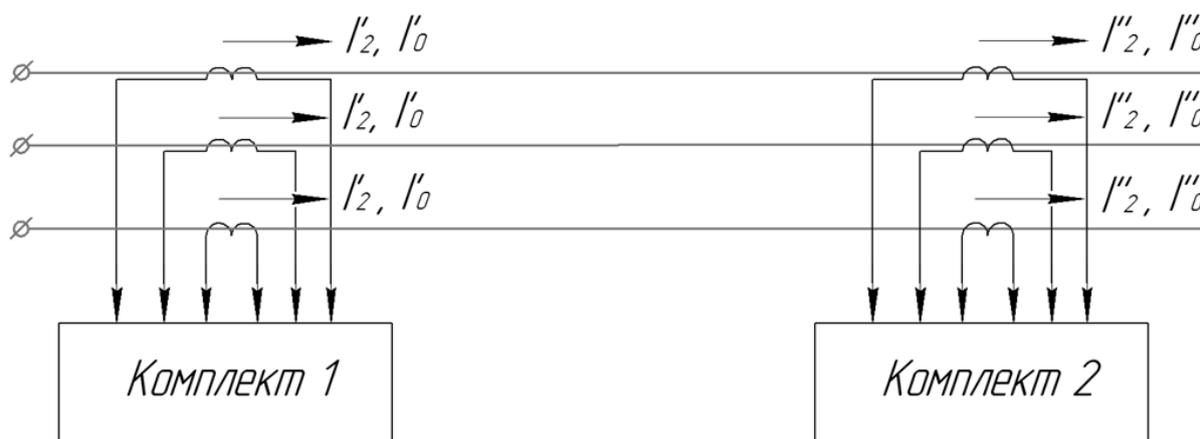


Рис. 2. Распределение токов при несимметричной нагрузке

Как видно из рис. 2, при нормальной изоляции контролируемой кабельной линии токи обратной и нулевой последовательности определяются следующим образом:

$$\begin{aligned} I_{\text{обр.посл}} &= I_2' - I_2'' \approx 0, \\ I_{\text{нул.посл}} &= I_0' - I_0'' \approx 0. \end{aligned} \quad (2)$$

Приведенные разности токов в начале и конце линии станут отличными от нуля только при ослаблении изоляции контролируемой линии. Поэтому такой принцип реализации контроля состояния изоляции обеспечивает реагирование только в случае возникновения и развития дефектов на кабельной линии.

Такое выполнение подсистемы сбора информации позволит четко определять причины возникновения токов обратной и нулевой последовательности. При ослаблении изоляции контролируемой линии уровень этих токов будет выше в начале линии, чем в ее конце, даже при наличии пониженного уровня изоляции вне линии или несимметричной нагрузке.

Размещение второго комплекта подсистемы сбора информации в конце защищаемой линии может производиться не на постоянной основе, а в случаях, когда комплект, установленный в начале линии, начинает фиксировать токи обратной и нулевой последовательностей.

Дополнительным преимуществом подобного метода является то, что в случае реализации подобных комплектов на микроконтроллерах или микрокомпьютерах (например микроконтроллеров ATmega) можно использовать токоизмерительные клещи. Это резко повышает оперативность применения подобных устройств, так как нет нужды в трансформаторах тока нулевой последовательности.

Обработку полученной информации по токам фаз линии следует обрабатывать в цифровой форме, что позволит легко рассчитывать токи прямой, обратной и нулевой последовательности и делать обоснованные выводы о состоянии изоляции контролируемых кабельных линий [15].

Приведенный метод нахождения оценки состояния изоляции дает возможность находить данную оценку без влияния на нее других причин

появления в электрической сети токов обратной и нулевой последовательности. Такой подход позволяет находить более достоверные результаты состояния изоляции по сравнению с применением аналогичных по назначению моделей, ориентированных на обработку только значений токов нулевой последовательности, измеренных в начале линии.

### Библиографический список

1. Электротехнический справочник: в 4 т. Т.1. Общие вопросы. Электротехнические материалы; под. общ. ред. профессоров МЭИ В.Г.Герасимова и др. – М.: Изд-во МЭИ, - 2003. – 440 с.
2. Кабели и провода. Основы кабельной техники / А. И. Балашов [ и др.]; под общ. ред. И. Б. Пешкова. – М.: Энергоатомиздат. 2009. – 470 с.
3. **Таджибаев, А.И.** Оценка технического состояния кабелей и кабельных сетей. / А.И.Таджибаев, В.А. Канискин, А.А. Пугачев. – СПб.: ПЭИПК. 2007. – 173 с.
4. **Уиди, Б.** Кабельные линии высокого напряжения: пер. с англ. / Б. Уиди – М.: Энергоатомиздат, - 1983. – 232 с.
5. **Куделина Д.В.** Система непрерывного контроля изоляции энергетических объектов / Д.В. Куделина // Auditorium. - 2017. – № 2 (14). – С. 124–131.
6. **Привалов, И.Н.** Методы испытаний и диагностики силовых кабельных линий напряжением до 35 кВ / И.Н. Привалов // Изв. НИИПТ. -2004. № 60. – С. 30–42.
7. Диагностика и мониторинг кабельных сетей среднего напряжения / К.П. Кадомская [и др.] // Электротехника. – 2000. – № 11. – С. 48–51.
8. Прокладка, эксплуатация и диагностика силовых кабелей с изоляцией из сшитого полиэтилена на напряжение 1–10 кВ. Европейский опыт // Рынок Электротехники. – 2006. – № 2. – С. 19–30.
9. **Канискин, В.А.** Кабели 10 кВ с бумажно-пропитанной изоляцией. Неразрушающий метод диагностики / В.А. Канискин, С.А. Коцур, И.Н. Привалов // Новости электротехники. 2005. - №5 (35). – С. 53–62.
10. Неразрушающие методы испытаний и диагностики кабельных линий с бумажно-пропитанной изоляцией / В.А. Канискин [и др.] // Перенапряжения и надежность эксплуатации электрооборудования; материалы Международ. научно-технич. конф. – Будапешт. 2005. – С. 73–91.
11. **Платонов, В.В.** Определение мест повреждения на трассе кабельной линии. / В.В. Платонов. – М.: Энергоатомиздат, 1993. – 265 с.
12. **Шабад, М.А.** Расчеты релейной защиты и автоматика распределительных сетей. / М.А. Шабад. – СПб.: ПЭИПК, 2003. – 350 с.
13. **Пикин, Д. Г.** Анализ статистики аварий и отказов в электрических сетях напряжением 6 кВ энергосети г. Мурманска / Д.Г. Пикин // Прикладные исследования и технологии: междунар. конф. (9–23 мая 2014, Москва). - М.: Изд-во МТИ, 2014. - С. 38–41.
14. **Авербух, А.М.** Примеры расчетов неполнофазных режимов и коротких замыканий. / А.М. Авербух. – Л.: Энергия, 1979. – 184 с.
15. **Куделина, Д.В.** Прогнозирование развития региональной энергетической системы / Д.В. Куделина // Научные ведомости Белгородского государственного университета. Сер. Экономика. Информатика. – 2016. – № 9 (230). - С. 129–134.

УДК 621.316.925.1

А.Л. Куликов, А.А. Лоскутов, М. Митрович

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ СРАБАТЫВАНИЯ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ОРГАНОВ МНОГОМЕРНОЙ РЕЛЕЙНОЙ ЗАЩИТЫ С УЧЕТОМ ДОПУСТИМЫХ И АВАРИЙНЫХ РЕЖИМОВ**

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Рассматривается метод повышения чувствительности многомерной релейной защиты за счет совместного использования более чем одного информационного признака (абсолютное значение тока, абсолютное значение напряжения, фаза между током и напряжением, активная и реактивная мощность)). При этом определяются параметры срабатывания отдельных одномерных измерительных органов на основе накопления статистических данных при имитационном моделировании в программном комплексе *Matlab/Simulink*.

A method for increasing the sensitivity of multidimensional relay protection is considered by sharing more than one information feature (absolute current value, absolute voltage value, phase between current and voltage, active and reactive power)). At the same time, the trigger parameters of individual one-dimensional measuring fault detectors were determined. It based on the accumulation of statistical data during simulation in the *Matlab/Simulink* software package.

**Ключевые слова:** многопараметрическая релейная защита, параметры срабатывания, статистика, измерительные органы.

**Key words:** multiparameter relay protection, trigger parameters, statistics, measuring fault detectors.

Массовый переход от электромеханической элементной базы на микропроцессорную создает предпосылки для разработки новых методов организации релейной защиты (РЗ) и повышения показателей технического совершенства. Несмотря на то, что цифровые технологии получают все большее распространение, в том числе и на подстанциях [1-2], принципы функционирования РЗ, методы ее организации остаются в своем большинстве заимствованными от электромеханических реле.

Современные электрические сети – это сложные, многоконтурные системы, в которых количество источников питания и новых активных элементов существенно увеличилось. Непрерывное развитие новых технологий (возобновляемые источники энергии, *FACTS* и др.), внедрение цифровой техники приводят к усложнению режимов энергетических систем и повышают требования к чувствительности РЗ.

Известны методы повышения распознаваемости аварийных режимов, основанные на применении многомерной (многопараметрической) РЗ [3-5], а также подходы для организации логической части «специальных схем защиты» (Special Protection Schemes (SPS)) [6] и «резервируемых защит» (Protection Redundancy) [7].

### Цель исследования

Повышение чувствительности РЗ возможно благодаря совместному использованию более чем одного параметра (абсолютное значение тока, амплитуда напряжения и др.) как источника информации [3-5]. Для этого в терминале РЗ реализуется несколько одномерных измерительных органов (ИО). Однако важным является способ объединения сигналов отдельных ИО, который увеличивает распознаваемость аварийных режимов. За счет сочетания сигналов на выходах отдельных ИО и эффекта многомерности может быть достигнуто увеличение чувствительности РЗ.

Цель статьи – определение параметров срабатывания, характерных для различных измерительных органов РЗ, с учетом областей допустимых и аварийных режимов на основе распознавания по критерию Байеса.

Для решения поставленной задачи используется статистический подход, включающий формирование законов распределения признаков срабатывания РЗ, критерий минимизации среднего риска принятия решения.

### Постановка задачи

Средствами накопления статистических данных для «обучения» релейной защиты служат имитационные модели энергообъектов [3,4]. Для реализации нового метода цифровой РЗ, основанного на статистическом подходе, необходимо знать вероятностные характеристики каждого ИО в отдельности [4,5]. При проведении экспериментов исследуется имитационная модель смежной воздушной линии (ВЛ 2) электропередачи 220 кВ с учетом размещения РЗ в начале ВЛ1 (рис. 1), реализованная в *Matlab/Simulink* (рис.2).

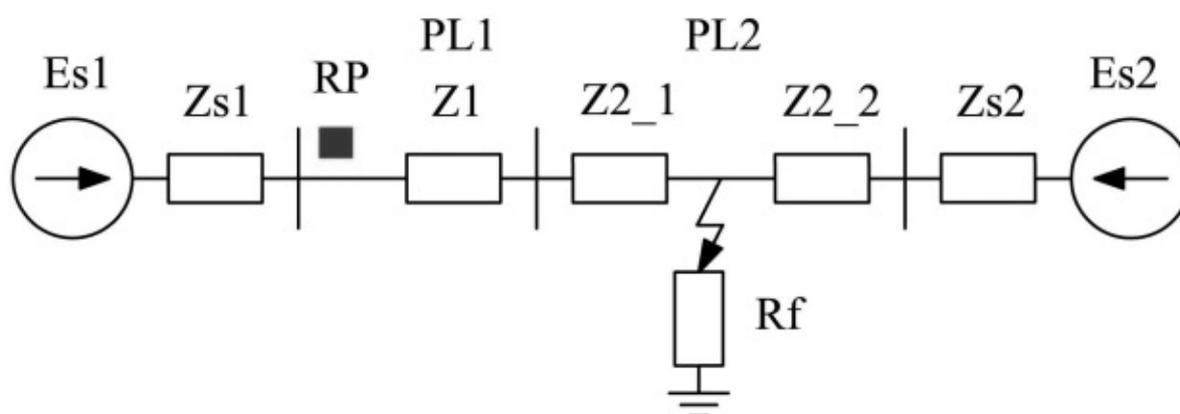


Рис. 1. Схема замещения моделируемого участка сети

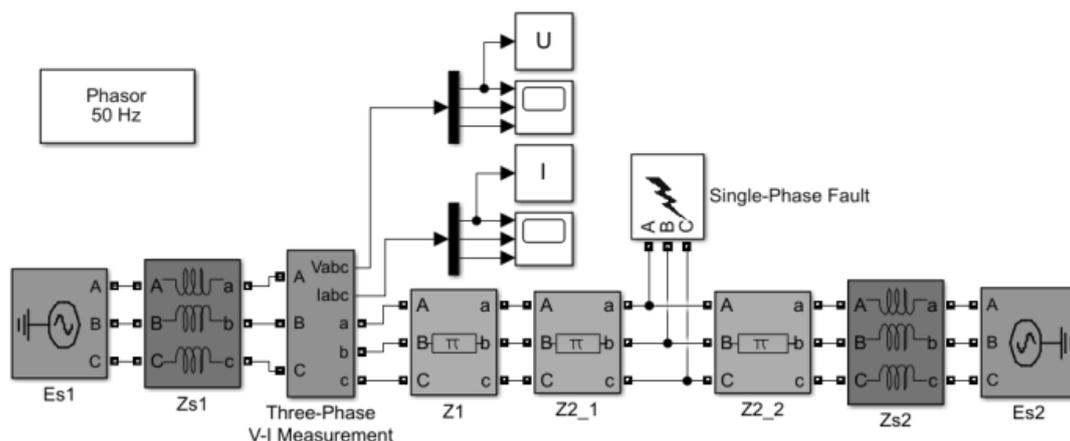


Рис. 2. Имитационная модель моделируемого участка сети в *Matlab/Simulink*

Для получения требуемой статистики по режимам работы модели сети, параметры элементов необходимо разделить на фиксированные и интервальные (табл. 1), варьируемые в заданных диапазонах. Индексами «1» и «0» отмечены параметры прямой и нулевой последовательностей.

В табл. 1 вошли следующие коэффициенты, задающие диапазон изменения напряжения энергосистем и угла фазового сдвига между ними:

$$k_1 = Es1 / U_{ном}, k_2 = Es2 / U_{ном}, \delta = \arg(Es1 / Es2). \quad (1)$$

Таблица 1

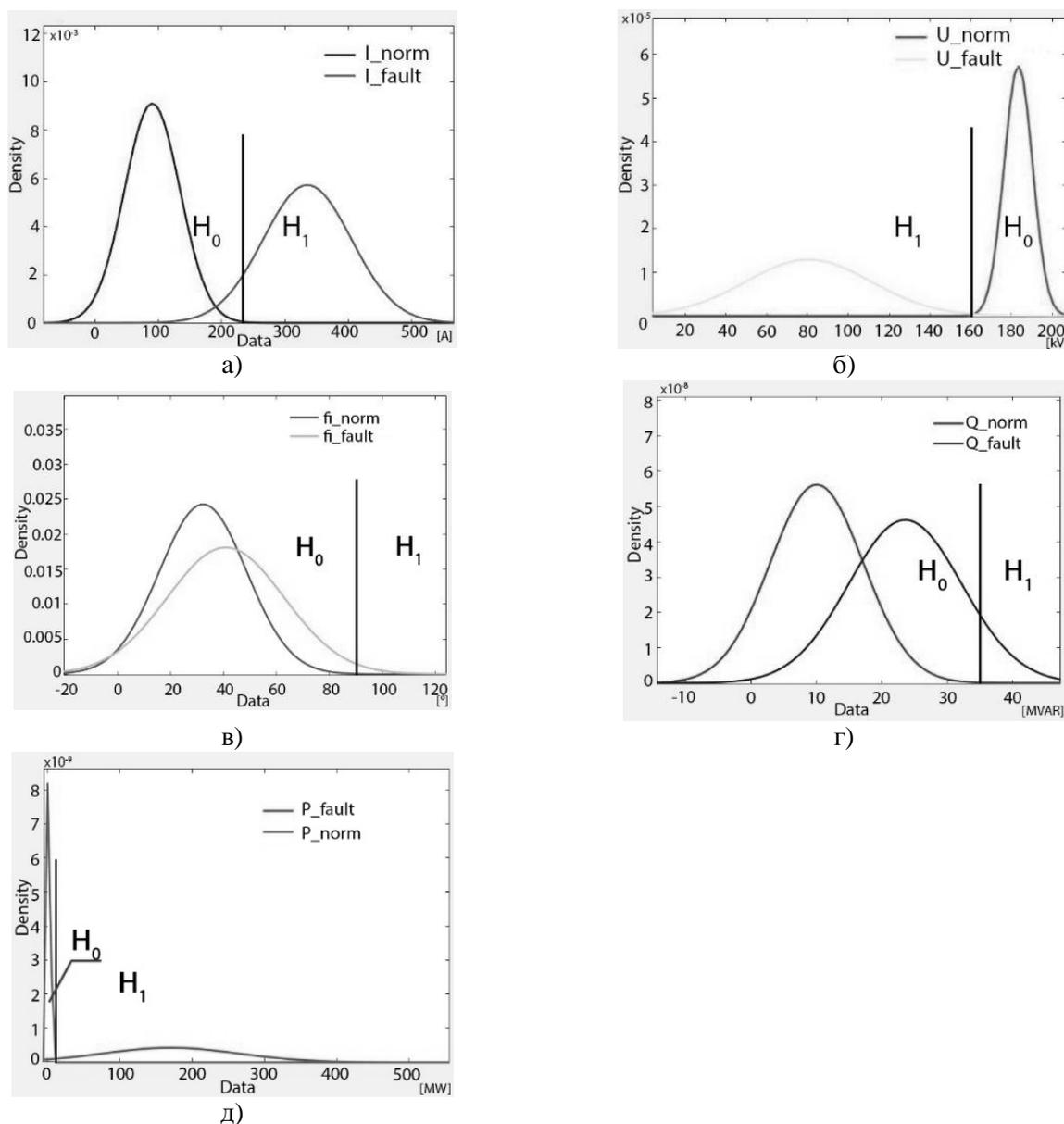
#### Параметры элементов модели

Фиксированные		Интервальные		Интервальные		Интервальные	
Параметр	Значение	Параметр	Значение	Параметр	Значение	Параметр	Значение
$U_{ном}, \text{кВ}$	220	$R_1^{1,2}, \text{Ом/км}$	0.13 ( $\pm 0.1$ )	$X_I^{s1}, \text{Ом}$	37.1 ( $\pm 2$ )	$\delta, ^\circ$	-20°... 20°
$L_1, \text{км}$	100	$R_0^{1,2}, \text{Ом/км}$	0.28 ( $\pm 0.1$ )	$X_0^{s1}, \text{Ом}$	35 ( $\pm 2$ )	$K_1$	0.95...1.05
$L_2, \text{км}$	80	$X_1^{1,2}, \text{Ом/км}$	0.43 ( $\pm 0.2$ )	$R_I^{s2}, \text{Ом}$	8.37 ( $\pm 1$ )	$K_2$	0.95...1.05
$b_1^{1,2}, \text{См/км}$	$j2.58 \cdot 10^{-6}$	$X_0^{1,2}, \text{Ом/км}$	0.1328 ( $\pm 0.2$ )	$R_0^{s2}, \text{Ом}$	5.13 ( $\pm 1$ )	$R_f, \text{Ом}$	0.1...40
$b_0^{1,2}, \text{См/км}$	$j1.78 \cdot 10^{-6}$	$R_I^{s1}, \text{Ом}$	9.3 ( $\pm 1$ )	$X_I^{s2}, \text{Ом}$	33.48 ( $\pm 2$ )	$l_{line}$	0.0001...0.9999
$U_{ном}, \text{кВ}$	220	$R_0^{s1}, \text{Ом}$	5.7 ( $\pm 1$ )	$X_0^{s2}, \text{Ом}$	31.5 ( $\pm 2$ )	-	-

При моделировании проводилось 10 000 итераций однофазных коротких замыканий вдоль смежной линии электропередачи (ВЛ2).

Защита РЗ должна быть чувствительна при однофазных КЗ в резервной зоне (зона ВЛ2). Моделирование проведено с учетом пяти одномерных измерительных органов исследуемой РЗ: ИО1 - по абсолютному значению тока; ИО2 - по абсолютному значению напряжения; ИО3 - по фазе между током и напряжением; ИО4 - по реактивной мощности; ИО5 - по активной мощности. Для отображения измерений РЗ по каждому ИО были построены графики плотности вероятности распределения параметров режимов (рис.3). На этих графиках горизонтальные оси представляют собой измерения наблюдаемых параметров ИО в допустимых и аварийных режимах в резервной зоне (смежной линии ВЛ2). В зависимости от чувствительности ИО больше или меньше

степень пересечения плотностей вероятности допустимых и аварийных режимов. Это определяет возможности по распознаванию текущего режима РЗ.



**Рис. 3. Определение уставочных значений при Байесовском критерием принятия решений:**

- a* - ИО1 - по абсолютному значению тока, *б* - ИО2 - по абсолютному значению напряжения,  
*в* - ИО3 - по фазе между током и напряжением, *г* - ИО4 - по реактивной мощности,  
*д* - ИО5 - по активной мощности

### **Определение параметров срабатывания РЗ для областей допустимых и аварийных режимов**

Для объединения сигналов от различных ИО предполагается сведение задачи распознавания аварийных режимов каждого ИО к бинарной (двухгипотезной) статистической задаче [4,5,8]. При этом осуществляется

проверка двух гипотез:  $H_0$  – означает, что на вход ИО поступил измеряемый сигнал, характерный для нормального режима;  $H_1$  – на вход ИО поступил измеряемый сигнал, характерный для аварийного режима.

Для обеспечения правильного решения бинарной задачи распознавания необходимо соответствующее задание уставочных значений, разделяющих области допустимых и аварийных режимов. Главное требование при определении уставок - недопущение срабатывания защиты во всех возможных нормальных режимах (рис. 3) [3-5]. Байесовский критерий принятия решений позволяет обеспечить полную отстройку от всех допустимых режимов [9]. Для каждого ИО были определены и проверены гипотезы: если измерение попадает в область допустимых режимов, то принимается гипотеза  $H_0$ ; если измерение попадает в область аварийных режимов (факт наличия КЗ), то принимается гипотеза  $H_1$ .

Выбор параметров срабатывания позволяет оценить уровень чувствительности РЗ для каждого ИО. При этом  $p_1$  – это вероятность срабатывания РЗ при КЗ. Вероятность несрабатывания при КЗ равна  $q_1=1-p_1$ . Согласно основному требованию при выборе уставок (не допущение срабатывания защиты в нормальных режимах) вероятность срабатывания РЗ: при гипотезе  $H_0$  равна  $p_0 = 0$  и вероятность несрабатывания при гипотезе  $H_0$  равна  $q_0=1$ . Вероятности распознавания режима для каждого ИО при заданных уставочных значениях сведены в табл. 2.

Таблица 2

#### Вероятность распознавания режима для различных измерительных органов

Измерительный орган	Параметр	$p_1$ (о.е.)	$p_1$ (%)	$q_1$ (о.е.)	$q_1$ (%)
ИО1 - по абсолютному значению тока	$I_m$	0.8801	88.01	0.1199	11.99
ИО2 - по абсолютному значению напряжения	$U_m$	0.9893	98.93	0.0107	1.07
ИО3 - по фазе между током и напряжением	$\varphi$	0.02	2	0.98	98
ИО4 - по реактивной мощности	$Q$	0.0799	7.99	0.9201	92.01
ИО5 - по активной мощности	$P$	0.7358	73.58	0.2642	26.42

#### Выводы

1. Определены параметры срабатывания для пяти измерительных органов многомерной РЗ с учетом допустимых и аварийных режимов при распознавании по критерию Байеса.
2. Вероятность распознавания аварийного режима для различных

измерительных органов отличается. Для ИО2 по напряжению она является очень высокой (почти 99%), в то время как для ИО3 по фазе между током и напряжением очень низкой (всего 2%).

3. Проведенные модельные эксперименты и полученные статистические данные дают основу для формирования методов объединения сигналов измерительных органов для повышения чувствительности релейной защиты. Разработка алгоритмов РЗ, учитывающих интеграцию сигналов измерительных органов, является перспективным направлением дальнейших исследований.

### Библиографический список

1. **Лоскутов, А.Б.** Проблемы перехода электроэнергетики на цифровые технологии / А.Б. Лоскутов // Интеллектуальная электротехника. - 2018. - №1. - С. 9-27.
2. **Kulikov, A.L.** Combining of Travelling Wave Methods and Methods Based on Emergency Mode Parameters Estimation for Improvement of Relay Protection / A.L. Kulikov, A.A. Loskutov, P.S. Pelevin // 14th International Scientific-Technical Conference APEIE (2-6 Oct. 2018, Novosibirsk, Russia) 2018. P. 193–198.
3. **Лямец, Ю.Я.** Эффекты многомерности в релейной защите / Ю.Я. Лямец [и др] // Электричество. – 2011. - № 9. - С. 48-54.
2. **Куликов, А.Л.** Стохастические алгоритмы защит дальнего резервирования распределительных электроустановок потребителей / А.Л. Куликов, А.Н. Клюкин // Промышленная энергетика. - № 5. - 2012. - С. 32-38.
3. **Sharygin, M.V.** The Effect of Combining Information of Relay Protection Fault Detectors / M. V. Sharygin, A. L. Kulikov // Power Tech. and Eng. 52 (5). - P. 597-604.
4. **Ahmed, S.K.** Special Protection Schemes: A Survey and Vision for the future / S.K. Ahmed, S.P. Karthikeyan, S.K Sahoo // Applied Mechanics and Materials. -2016. - №39. - P. 49-53.
5. **Thomas, M.K.** Implementation of the Security-Dependability Adaptive Voting Scheme / M.K. Thomas // Thesis of Master of Science in Elec. Eng. (29 April). – 2011 - P. 132.
6. Ensuring Relay Selectivity in Power Supply Systems using the Bayesian Method of Hypothesis Testing / A.B. Loskutov [et al.] // IJAER. - 2017. - V. 12. - № 24. - P. 15420-15431.
7. **Ван Трис, Г.** Теория обнаружения, оценок и модуляции. Т.1. Теория обнаружения, оценок и линейной модуляции: пер. с англ.; под ред. проф. В. И. Тихонова. - М.: Сов. радио. 1972. - 744 с.

УДК 621.311.1

А.Л. Куликов, М.В. Шарыгин, А.А. Ворошилов

**МЕТОД РАСПОЗНАВАНИЯ ТРЕНДА ГРАФИКА НАГРУЗКИ  
В АВТОМАТИКЕ ОТКЛЮЧЕНИЯ СИЛОВЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ**

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Рассматривается статистический метод, основанный на проверке гипотез для прогнозирования тренда графика нагрузки. Прогнозирование тренда графика нагрузки необходимо для определения целесообразности отключения части трансформаторной мощности ПС с целью снижения потерь.

The article discusses a statistical method based on hypothesis testing to predict the trend of the load curve. prediction of the trend of the load curve is necessary to determine the feasibility of disconnecting part of the transformer power PS.

**Ключевые слова:** автоматика, потери электроэнергии, тренд, график нагрузки, прогнозирование, гипотеза, плотность вероятности.

**Key words:** automatics, electric power losses, trend, load graph, forecasting, hypothesis, probability density.

Проблема сокращения потерь электроэнергии в электрических сетях РФ весьма актуальна. Наиболее эффективным методом снижения потерь на понижительных подстанциях (ПС) является отключение трансформаторов в часы минимума нагрузки. При эксплуатации трансформаторов ПС с низким средним коэффициентом загрузки доля потерь холостого хода значительно возрастает и к.п.д. ПС снижается. Соответственно для снижения потерь холостого хода и повышения экономичности передачи электроэнергии необходимо повысить средний коэффициент загрузки трансформаторов за счет временного отключения части трансформаторов ПС и перевода всей нагрузки на трансформаторы, оставшиеся в работе. В настоящее время такой метод снижения потерь достигается последовательным действием оперативного персонала.

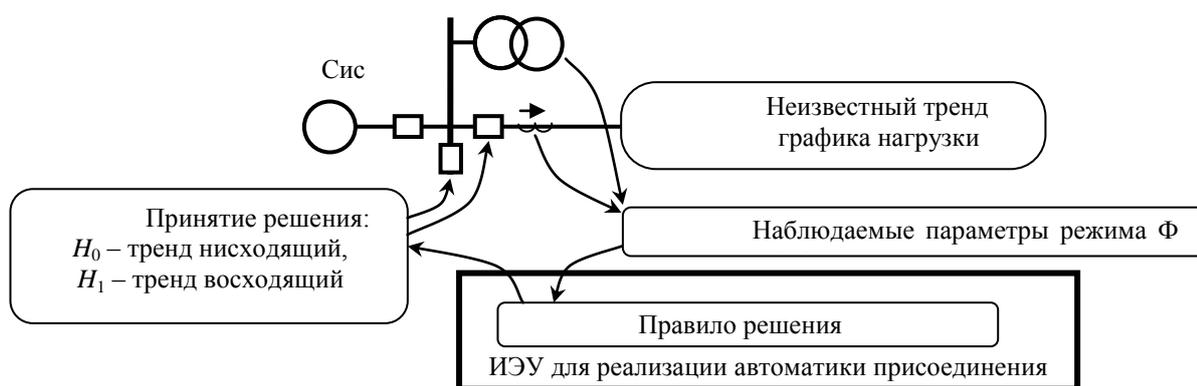
В современной электроэнергетике активно развивается, совершенствуется и внедряется технология «цифровой подстанции», подразумевающая использование новых информационных потоков между цифровыми терминалами и первичным оборудованием. Одна из задач «цифровой подстанции» - оптимизация потерь электрической энергии в оборудовании. На основе современных интеллектуальных устройств (ИЭУ или *IED*) возможно создание новой автоматики нормального режима – автоматики отключения силовых трансформаторов, выполняющей переключения силовых трансформаторов на ПС в зависимости от текущей трансформируемой мощности с целью снижения потерь электроэнергии.

Очевидно, что для максимально эффективного функционирования такой автоматики нормального режима требуется отслеживание тренда графика нагрузки ПС. Прогнозирование необходимо для исключения ложных и излишних переключений при изменениях нагрузки (суточных, сезонных и др.). Разработка точного метода прогнозирования тренда графика нагрузки - цель настоящего исследования.

Однако для поставленной цели известные методы [1, 3] прогнозирования нагрузки либо не применимы, либо излишне громоздки, поскольку достаточно прогнозировать лишь только тренд графика нагрузки – будет ли он возрастать в ближайшие часы или снижаться. Вместе с тем, точность прогноза должна быть весьма велика на весь срок прогнозирования (от нескольких часов до десятков часов при выраженных суточных неравномерностях графика нагрузки ПС).

Разрабатываемый метод прогнозирования должен также автоматически адаптировать правило принятия решения при качественном изменении структуры графика нагрузки, например, изменении количества смен, режима работы производства, потребителей.

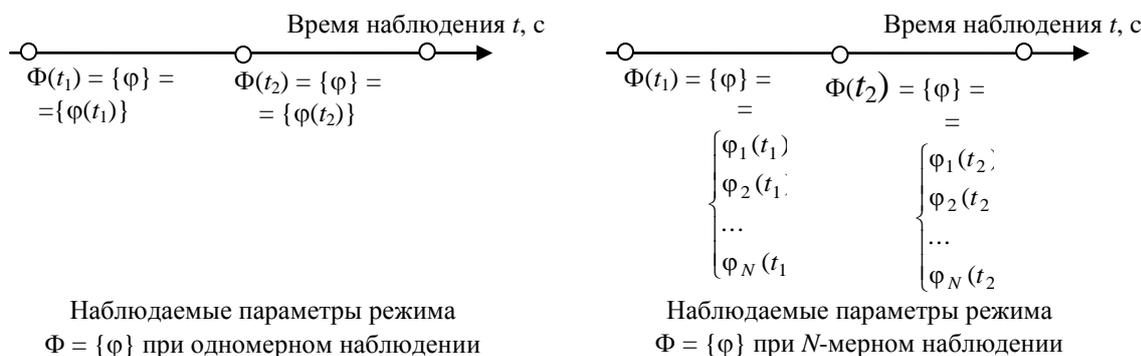
Перспективны адаптивные методы прогнозирования тренда графика нагрузки, основанные на критериях принятия решения статистической теории обнаружения [2]. Основные компоненты простейшей системы распознавания тренда графика нагрузки приведены на рис. 1. Устройство защиты (ИЭУ) «наблюдает» с заданной частотой за параметрами режима секции (или отдельного присоединения) – током, напряжением и др. Используя полученные значения параметров наблюдений и заданное правило решения, ИЭУ классифицирует наблюдаемый режим как режим с нисходящим трендом графика нагрузки или с восходящим трендом графика нагрузки. Соответственно распознанному тренду ИЭУ принимает решение либо о блокировании перевода нагрузки на один силовой трансформатор ПС, либо о его разрешении.



**Рис.1. Элементы двухгипотезной задачи распознавания тренда графика нагрузки присоединения (секции шин)**

В любой произвольный момент  $t$  за режимом присоединения производится наблюдение за параметрами режима  $\Phi(t) = \{\varphi\}$  (рис. 2). В общем случае пространство наблюдаемых параметров может быть многомерным – одно

наблюдение тогда представляется матрицей-вектором и обозначается  $\Phi = \{\varphi_1, \varphi_2, \dots, \varphi_i, \dots, \varphi_N\}$ , где  $N$  – количество наблюдаемых параметров режима;  $\varphi_i$  –  $i$ -й параметр (например действующее значение гармоники 50 Гц тока присоединения в момент времени наблюдения для некоторого заданного «окна» данных). Для простоты формирования пространства параметра наблюдения  $\varphi_i$  зададим действительным числом.



**Рис. 2. Наблюдаемые параметры режима  $\Phi = \{\varphi\}$  при одномерных и многомерных наблюдениях**

С точки зрения простейшего варианта построения автоматики отключения силовых трансформаторов ПС в любой произвольный момент наблюдения  $t$  за режимом присоединения принимаются лишь две гипотезы оценки тренда графика нагрузки:

– гипотеза  $H_1$  – событие принадлежности текущего режима к восходящему тренду в течение ближайшего заданного промежутка времени  $\tau$ , а значит, график нагрузки будет повышаться в течение интервала времени  $\tau$ ;

– гипотеза  $H_0$  – событие принадлежности текущего режима к нисходящему тренду в течение ближайшего заданного промежутка времени  $\tau$ , а значит, график нагрузки будет понижаться в течение  $\tau$ .

Представим, что мы знаем, в какие моменты времени  $t$  существует нисходящий тренд графика нагрузки (справедлива гипотеза  $H_0$ ), а в какие моменты времени  $t$  – восходящий тренд графика нагрузки (справедлива гипотеза  $H_1$ ). Тогда мы можем отсортировать все наблюдения  $\varphi_i$  и отнести их либо к множеству нисходящего тренда, либо к множеству восходящего тренда. Представив эти множества в виде функций, мы получим функцию плотности  $p_{H_0}(\varphi_i|H_0)$ , что это наблюдение  $\varphi_i$  соответствует гипотезе  $H_0$ , и функцию плотности  $p_{H_1}(\varphi_i|H_1)$ , что это наблюдение  $\varphi_i$  соответствует гипотезе  $H_1$ . Площадь под каждой функцией равна единице.

Функции плотности распределения  $p_{H_1}(\Phi|H_1)$  и  $p_{H_0}(\Phi|H_0)$  или их части называются «статистикой» и являются основой для анализа и принятия решения. Для каждого места установки, ПС, секции и т.д. функции  $p_{H_1}(\Phi|H_1)$  и  $p_{H_0}(\Phi|H_0)$  должны определяться индивидуально.

Конкретный вид правила решения и его формирование зависят от используемого критерия и метода проверки гипотез.

Основная идея статистического подхода, основанного на методах проверки гипотез, применительно к рассматриваемой автоматике отключения силовых трансформаторов, заключается в следующем. Пусть устройство защиты (ИЭУ) «наблюдает» с заданной частотой за параметрами режима. Пусть пространство наблюдаемых параметров является многомерным. Тогда правило решения представляет собой способ разбиения пространства наблюдений  $\Psi$  на две части:  $\Psi_0$  и  $\Psi_1$ . Если текущее наблюдение  $\Phi$  попадает в область  $\Psi_0$ , то однозначно принимается гипотеза  $H_0$ , если текущее наблюдение  $\Phi$  попадает в область  $\Psi_1$ , то принимается гипотеза  $H_1$ . Граница, разделяющая  $\Psi$  на две части  $\Psi_0$  и  $\Psi_1$ , или правило получения границы будет являться уставкой автоматики.

Необходимо отметить, что каждое наблюдение  $\Phi$  в пространстве наблюдений  $\Psi$  обладает двумя параметрами: значением плотности вероятности  $p_{H_0}(\Phi|H_0)$ , что это наблюдение  $\Phi$  соответствует гипотезе  $H_0$ , и значением плотности вероятности  $p_{H_1}(\Phi|H_1)$ , что это наблюдение  $\Phi$  соответствует гипотезе  $H_1$ .

Предположим, что эти функции плотностей вероятности нам известны на всем пространстве наблюдений  $\Psi$ . Если эти функции не пересекаются, то мы получаем идеальную автоматику, распознающую тренд графика нагрузки трансформаторов. Действительно, ведь в этом случае любое текущее наблюдение  $\Phi$  будет принадлежать:

- либо области с  $p_{H_0}(\Phi|H_0) = 0$  и  $p_{H_1}(\Phi|H_1) \neq 0$ , а это значит, что тренд однозначно восходящий в течение ближайшего заданного промежутка времени  $\tau$ ;
- либо области  $p_{H_0}(\Phi|H_0) \neq 0$  и  $p_{H_1}(\Phi|H_1) = 0$ , что тренд однозначно нисходящий;
- либо  $p_{H_0}(\Phi|H_0) = 0$  и  $p_{H_1}(\Phi|H_1) = 0$ , что тренд не определен (требуется продолжение наблюдений).

## Выводы

1. Эффективным методом снижения потерь является временное отключение недогруженных трансформаторов на понизительных подстанциях. Для этого целесообразно использование автоматики нормального режима, выполняющей переключения в зависимости от текущей трансформируемой мощности.
2. С целью устранения излишних переключений и повышения эффективности работы автоматики отключения трансформаторов ПС требуется прогнозировать тренд графика нагрузки.
3. Разработанный статистический метод распознавания тренда графика нагрузки обладает высокой точностью, а также является эффективным

средством для снижения излишних переключений автоматики снижения потерь в трансформаторной группе понизительных ПС и повышения надежности электроснабжения.

#### Библиографический список

1. Методы прогнозирования электропотребления в распределительных сетях (обзор) / А.М. Абдурахманов [и др.] // Электротехника: сетевой электронный научный журнал. – 2016. – Т. 3. - №1. - С.3-23.
2. **Ван Трис, Г.** Теория обнаружения, оценок и модуляции. Т.1. Теория обнаружения, оценок и линейной модуляции: пер. с англ.; под ред. проф. В. И. Тихонова. - М.: Сов. радио. – 1972. - 744 с.
3. **Куликов, А. Л.** Определение уставок релейной защиты и автоматики, основанное на статистическом байесовском методе проверки гипотез / А. Л. Куликов, М. В. Шарыгин // Электричество. – 2017. – № 7. – С. 20 – 29.
4. **Куликов, А. Л.** Обеспечение селективности релейной защиты в системах электроснабжения на основе байесовского метода проверки гипотез/ А. Л. Куликов, М. В. Шарыгин // Электричество. – 2017. – № 9. – С. 24 – 33.
5. **Куликов, А. Л.** Применение статистического подхода для адаптации автоматики отключения потребителей к их фактической нагрузке / А.Л. Куликов, М.В. Шарыгин // Электрические станции. – 2016. – №12. – С. 36 – 40.
6. Метод распознавания фактической нагрузки фидеров, отключаемых для ликвидации дефицитов мощности в микросетях / А.Л. Куликов [и др.] // Релейная защита и автоматизация. – 2017. – № 1 (26). – С. 35–39.

УДК 621.3

А.Б. Лоскутов, А.С. Демидова, О.А. Пронина, К.Е. Чумарин

**РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМА УПРАВЛЕНИЯ ЗАМКНУТЫМИ СЕТЯМИ С УСТРОЙСТВАМИ РЕГУЛИРОВАНИЯ ПОТОКОВ МОЩНОСТИ**

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

В статье описаны подходы к построению интеллектуальных сетей микрогрид с источниками распределенной генерации. Предложено применение формализованной топологии распределительной сети 6-20 кВ в виде гексагональной сети. Представлен алгоритм управления режимом многоконтурной сети, реализующий свою работу непрерывно в реальном времени. В основе алгоритма лежит метод расчета режима работы сети на основе законов Кирхгофа. Метод позволяет производить расчет токов в линиях и узлах ячеек сети в нормальном и аварийном режиме, результаты которого формируют библиотеку решений.

In article approaches to creation of intellectual networks microgrid with sources the distributed oscillation are described. Application of the formalized topology of the distribution network of 6-20 kV in the form of hexagonal network is offered. The control algorithm of the mode of multiple loop network realizing the work continuously in real time is presented. The computational method of a duty of network on the basis of laws of Kirchoff is the cornerstone of an algorithm. The method allows to make calculation of currents in lines and clusters of cells of network in normal and emergency operation which results from library of decisions.

**Ключевые слова:** распределительная сеть, smart grids, алгоритм, активно-адаптивная сеть, твердотельный регулятор напряжения.

**Key worlds:** distribution networks, smart grids, algorithm, active-adaptive networks, Solid-State Voltage Regulator.

В настоящее время для формирования надежного электроснабжения потребителей важная роль отводится интеллектуальным распределительным сетям, способным обеспечить функционирование электротехнического комплекса в случае системообразующих аварий. Появление нового, ранее не свойственного для распределительной сети оборудования, в том числе и работающих параллельно с сетью генерирующих установок, связано с личной заинтересованностью участников энергообмена в снижении своих затрат на энергообеспечение, а также в максимизации прибыли при реализации своих возможностей при процессе генерации электроэнергии. Это стало возможным благодаря появлению доступных технических средств выработки и хранения электрической энергии, в том числе и возобновляемой энергетики.

В данной статье авторами рассмотрены вопросы построения и функционирования сетей микрогрид гексагональной конфигурации, подходы к управлению потоками мощности, разработан алгоритм управления режимом сети.

## Многоконтурные сети гексагональной конфигурации

Электроснабжение крупных городов сегодня характеризуется высокой плотностью электрических нагрузок (выше 15-20 МВт/км<sup>2</sup> в центральных городских районах); ростом количества потребителей, расположенных на ограниченной площади при дефиците нагрузок; сложностью прокладки новых коммуникаций; растущими требованиями к надежности, категорийности электроснабжения городских потребителей, экологии и качеству электроэнергии.

Авторами в [1, 2, 3] проведен анализ различных топологий для сетей микрогрид 6-20 кВ. Предложена концепция сети с гексагональной конфигурацией, которая имеет формализованную топологию по сравнению с существующими радиальными сетями. В основе гексагональной распределительной сети (ГРС) лежит универсальный узел нагрузки. Сеть на рис. 1 позволяет равномерно распределить нагрузки по территории, а также поддерживать уровень напряжения и снизить потери в сети.

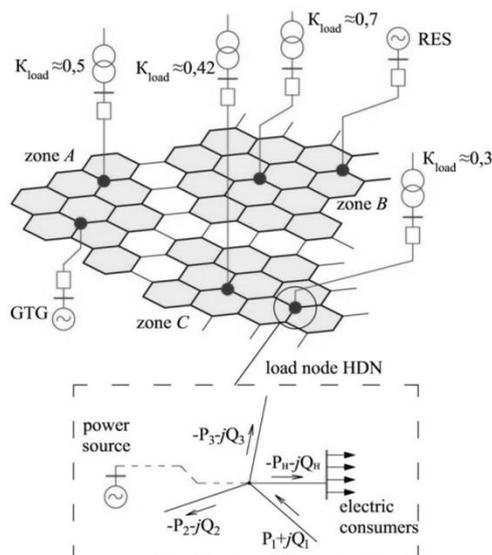


Рис. 1. Принцип построения ГРС

Организация узла нагрузки позволяет формировать типовые подстанции с цифровым управлением, разрабатывать универсальные алгоритмы управления и функционирования в нормальных и аварийных режимах. Кроме этого, еще одним преимуществом является способность выравнивания графиков нагрузок различных источников.

## Методы вычисления режимов замкнутых сетей

Для схемы электрической сети известной конфигурации необходимо определить напряжения в узлах, а также токи, потоки и потери мощности в ветвях при заданном напряжении в одном из узлов, называемом опорным, для удобства записи уравнений, совмещенным с балансирующим узлом (БУ) (как правило,

шины электростанции или крупной подстанции энергосистемы) и известных нагрузках в остальных узлах сети, заданных в токах или мощностях.

В современной практике в зависимости от конфигурации сети, заданных исходных параметров сети используются различные методы расчета режимов сетей. Примером могут служить метод узловых напряжений, метод Гаусса, Зейделя и Ньютона [4].

Для расчета режима многоконтурной распределительной сети гексагональной конфигурации (рис. 2) авторами был выбран метод расчета по законам Кирхгофа в матричной форме.

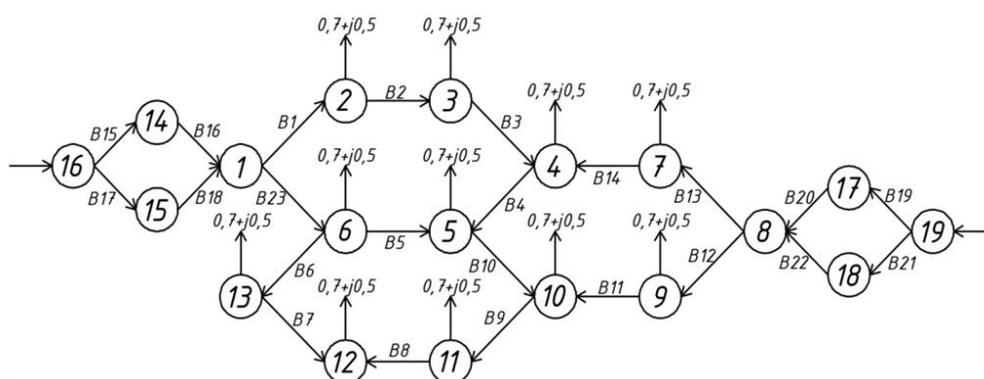


Рис. 2. Направленный граф исследуемой сети

По первому закону Кирхгофа

$$M \cdot I_B = -J_Y, \quad (1)$$

где  $M$  - матрица инцидентий;  $I_B$  - вектор-столбец токов ветвей;  $J_Y$  - задающий ток в узле.

Матрица инцидентий исследуемой сети строится по направленному графу, в котором учитывается направление линий относительно узлов.

Каждая  $i$ -я строка матрицы  $M$  показывает, какие ветви  $j$  (где  $j = 1, 2, \dots, m$ ) связаны с данным узлом  $i$  и как они направлены. Если ввести в рассмотрение вектор-столбец токов ветвей  $I_B$  (где  $I_B = [I_1, I_2, I_3, \dots, I_m]^T$ ), то произведение  $i$ -й строки матрицы  $M$  на вектор-столбец токов ветвей  $I_B$ , полученное по правилам действий с матрицами, даст алгебраическую сумму токов, сходящихся по ветвям в  $i$ -м узле, и эта сумма должна быть равна задающему току в узле  $J_{yi}$ , т.е. получаем выражение 1-го закона Кирхгофа для соответствующего узла  $i$ .

Для обобщенного аналитического представления конфигурации расчетной схемы замещения электрической сети (или в терминах теории графов - связности направленного графа, соответствующего схеме замещения сети) при записи 2-го закона Кирхгофа (2) служит матрица соединений ветвей в независимые контуры  $N$  - вторая матрица инцидентий «контуры-ветви».

$$N \cdot Z_B \cdot I_B = N \cdot E_B, \quad (2)$$

где  $Z_B$  - матрица сопротивлений ветвей;  $I_B$  - матрица токов ветвей;  $E_B$  - ЭДС ветви.

Уравнения состояния электрической сети по законам Кирхгофа (1) и (2) связаны общим вектором искоемых неизвестных - токов ветвей - и образуют систему из  $t$  уравнений с  $n$  неизвестными:

$$\begin{cases} M \cdot I_B = -J_Y & , \\ N \cdot Z_B \cdot I_B = N \cdot E_B & . \end{cases} \quad (3)$$

Решение системы уравнения дает данные о действующем режиме сети, которые используются в алгоритме управления режимом многоконтурной сети.

### Алгоритм управления режимом замкнутой сети

Данный алгоритм способен оптимизировать режим сети в реальном времени, выполняя многократный расчет режима (рис.3).

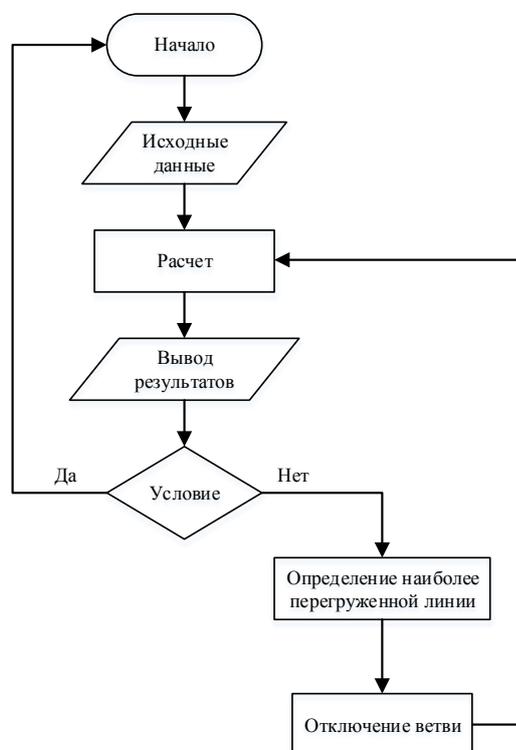


Рис. 3. Блок-схема алгоритма управления режимом сети

Расчет сети по алгоритму происходит непрерывно, благодаря чему формируется библиотека возможных событий режимов работы. При возникновении аварийных ситуаций устройство определяет поврежденную линию и посылает управляющий сигнал, таким образом, используются решения из библиотеки и разгружается та ветвь, которая перегружает линию и локализуется авария, производя деление сети. Далее снова происходит расчет и сравнение с условиями нормальной работы сети. Деление сети оказывает существенное влияние на режимы, устойчивость и надежность работы энергосистемы, а также на потери мощности и энергии в сетях.

### Алгоритм управления режимом замкнутой сети

На сегодняшний день существует тенденция внедрения в многоконтурные распределительные сети новых интеллектуальных устройств на базе полупроводниковых элементов. Эти устройства работают на основе технологии гибких электрических сетей *Flexible Alternating Current Transmission Systems (FACTS)*. Управление режимом сети с помощью *FACTS* устройств позволяет увеличивать пропускную способность линий, обеспечивать резервирование электроснабжения, а также безопасное управление потоками мощности [5].

Включение в сеть *FACTS* устройств делает возможным регулирование аварийного режима без отключения линии. Установка в питающих узлах гексагональной распределительной сети данных устройств позволяет производить совместную работу устройства и алгоритма управления режимом замкнутой сети. Подверженная аварии линия может быть разгружена посредством управляющего сигнала алгоритма управления для воздействия на мощность устройством.

На базе технологии *FACTS* в НГТУ им. Р.Е. Алексеева разрабатывается твердотельный регулятор напряжения (ТРН) для сетей электроснабжения среднего напряжения, который позволяет гибко управлять потокораспределением мощностей систем электроснабжения (рис.4).

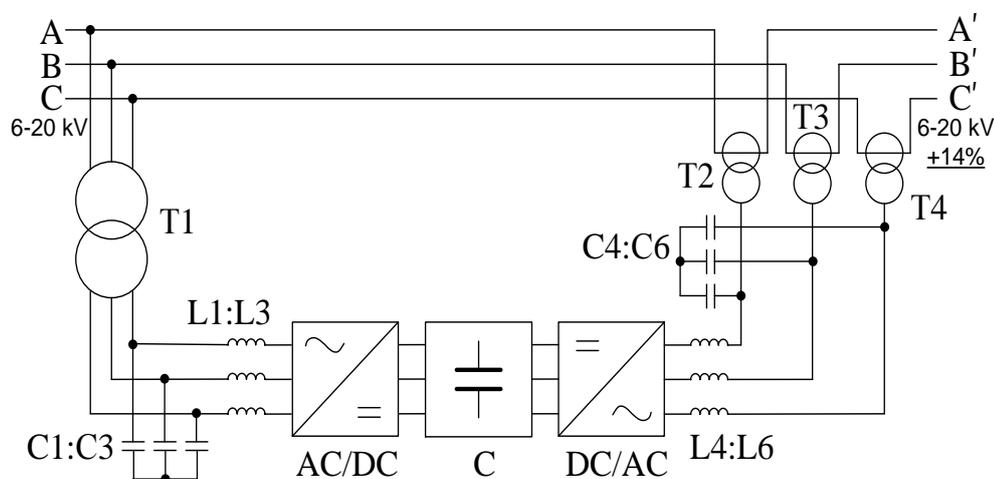


Рис. 4. Принципиальная схема ТРН

Принципиальная схема ТРН включает вольтодобавочный трансформатор (ВДТ), предназначенный для комплексного регулирования потоков как активной, так и реактивной мощностей (рис.1), а также звено выпрямителя и инвертора. Регулирование происходит благодаря изменению амплитуды и угла поворота фазы напряжения сети путем добавления вольтодобавки [10].

### Выводы

1. Предложены основные принципы формирования и функционирования ГРС, позволяющие сформировать сеть с равномерно распределенными нагрузками. Это способствует уменьшению потерь и стабилизации уровня напряжения всей сети.
2. Предложен метод расчета режима замкнутой сети, способный определять места повреждения исследуемой сети. Этот метод является составной частью алгоритма управления электрическими сетями 6-10(20) кВ.
3. Разработан новый алгоритм управления режимом замкнутой сети. Данный алгоритм обеспечивает работоспособность энергосистемы посредством деления сети.
4. В ходе исследований было замечено, что устройства регулирования потоков мощности типа ТРН могут выступать в качестве токоограничивающих.

*Работа выполняется при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (Соглашение № 14.574.21.0167 о предоставлении субсидии от 26.09.2017 г., уникальный идентификатор проекта RFMEFI57417X0167).*

### Библиографический список

1. Li , Z. Global Energy Interconnection / Z. Li // Academic Press. - 2015. -№1. - 396 С.
2. Лоскутов, А.Б. Разработка и исследование гибкой интеллектуальной электрической сети среднего напряжения, основанной на гексагональной структуре / А.Б. Лоскутов, А.А. Лоскутов, Д.В. Зырин / Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. - 2016. - № 3. - С. 85-94.
3. Моделирование режимов работы распределительной сети с различными источниками распределенной генерации / А.Б. Лоскутов [и др.] // Актуальные проблемы электроэнергетики. - 2017. - №5. - С.128-131.
4. Татаров, В.И. Электроэнергетика.: комплекс учебно- методич. матер. / Е.И. Татаров; - Н. Новгород: НГТУ им Р.Е. Алексеева. - 2009. Ч. 2.– 109 с.
5. Исследование режимов работы распределительных сетей 6-20 кВ в зависимости от числа и мест подключения твердотельных регуляторов напряжения / А.Б. Лоскутов [и др.] // Технические науки: материалы докл. – Н.Новгород: НГТУ им Р.Е. Алексеева. - 2018. – 420 с.

УДК 621.311

О.В. Маслеева, Е.В. Крюков, Н.И. Эрдили

## ОЦЕНКА ЭКОЛОГИЧЕСКОЙ СОСТАВЛЯЮЩЕЙ ЖИЗНЕННОГО ЦИКЛА ВОЗОБНОВЛЯЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ ЭНЕРГИИ

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Разработана методика определения экологической оценки жизненного цикла возобновляемых источников энергии (ВИЭ). Проведен инвентаризационный анализ материалов, необходимых для изготовления энергоустановок ВИЭ, установлены единичные процессы, из которых состоит жизненный цикл. Проведена оценка воздействия на окружающую природную среду по следующим направлениям: потребление природных ресурсов, загрязнение атмосферы, водных ресурсов, почвы, физическое загрязнение, расход электроэнергии. Установлено, что наихудшими экологическими показателями характеризуются солнечные энергоустановки.

A method for determining the environmental assessment of the life cycle of renewable energy sources has been developed. The materials that make up the alternative energy sources were identified, then the individual processes that make up the life cycle were established. We conducted an assessment of the impact on the environment in the following areas: consumption of natural resources, air pollution, water pollution, soil pollution, physical pollution, power consumption. The worst environmental indicators are characterized by solar power installation in their environmental assessment of the life cycle.

**Ключевые слова:** окружающая среда, жизненный цикл, возобновляемые источники энергии.

**Key words:** environment, life cycle, renewable energy sources.

Успешное развитие экономики любой страны напрямую связано с ростом потребления энергии. При существующем уровне научно-технического прогресса энергопотребление может быть покрыто за счет использования органических топлив (уголь, нефть, газ), гидроэнергетики и атомной энергетики, что приводит к загрязнению окружающей среды и парниковому эффекту.

Согласовать постоянный рост энергопотребления с ростом отрицательных последствий энергетики, учитывая, что в ближайшее время человечество ощутит ограниченность ископаемого топлива, можно двумя способами: экономией энергии и развитием экологически более чистых видов производства энергии.

Решить проблему, вероятно, способно развитие альтернативных видов энергетики, особенно базирующихся на использовании возобновляемых источников. Однако для реализации политики данного направления необходимо тщательно изучить техническую, экономическую и экологическую составляющие.

Как известно, возобновляемые источники энергии практически не загрязняют окружающую природную среду в процессе эксплуатации. Вопрос о

загрязнении в процессе производства и утилизации возобновляемых источников изучен недостаточно.

Одним из методов экологической оценки является метод «оценки жизненного цикла» (ОЖЦ). Оценка жизненного цикла включает в себя: рассмотрение всего жизненного цикла продукта, начиная от добычи сырья, включая производство энергии, материала и изготовление, до применения продукта и последующего прекращения его использования и окончательной утилизации.

Для проведения ОЖЦ необходимо собрать следующие данные:

- входные энергетические и материальные потоки по каждому этапу;
- продукцию и отходы;
- выбросы в воздух, сбросы в воду и почву и другие виды загрязнения окружающей среды.

В качестве возобновляемых источников энергии были изучены ветровые и солнечные станции, мини-ГЭС.

Этапы жизненного цикла энергоустановок (ЭУ) показаны на рис. 1 и включают в себя добычу полезных ископаемых, производство ЭУ и их эксплуатацию. Также на рисунке показано загрязнение атмосферы, воды и почвы.

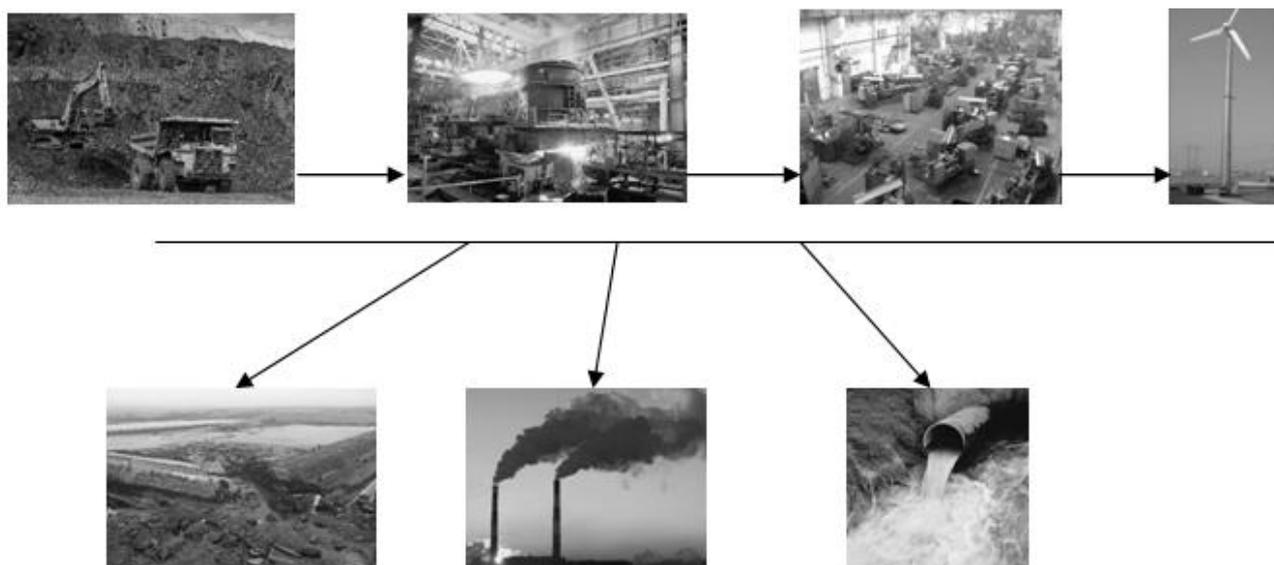


Рис. 1. Этапы жизненного цикла энергоустановок

Для разработки экологической оценки жизненного цикла были определены материалы, из которых состоят энергоустановки:

- ветровые станции: генератор (сталь, медь), лопасти (пластик), опора (сталь);
- мини-ГЭС: генератор (сталь, медь), гидротурбина (сталь), корпус (сталь);
- солнечные батареи: солнечный модуль (кремний), корпус (алюминий, стекло), опора (сталь).

Далее установили единичные процессы, из которых состоит жизненный цикл:

- добыча полезных ископаемых (железной, медной руд, бокситов, газа);
- производство материалов (стали, меди, кремния, стекла, пластмасс);
- производство источников энергии;
- процесс утилизации (стали, меди, стекла, пластмасс).

Оценку воздействия на окружающую природную среду проводили по следующим направлениям:

- потребление природных ресурсов (полезных ископаемых, энергетических ресурсов, воды, земельных ресурсов),
- загрязнение атмосферы (вредные вещества, парниковые газы) ;
- загрязнение водных ресурсов (изменение физико-химических свойств, водного баланса источника, гидрологического режима водного объекта);
- загрязнение почвы (образование отходов);
- физическое загрязнение (шум, тепловое загрязнение);
- расход электроэнергии.

Были рассмотрены следующие типы альтернативных ЭУ мощностью 30 кВт (табл.1):

- ветровые ЭУ марки «Муссон»;
- солнечная ЭУ марки Saana 250 LM3 MBW 120 модулей;
- мини-ГЭС марки ИНСЭТ Пр 30.

Исходными данными для расчета являются массы материалов, из которых состоят ЭУ. Массы материалов были взяты из технических данных на ЭУ и приведены в табл. 1.

**Таблица 1**

**Массы материалов, из которых состоят энергоустановки**

Материал	Масса материалов ЭУ, кг		
	ВЭУ	СЭУ	Мини-ГЭС
Сталь	3056	6000	1962
Медь	38		38
Алюминий		276	
Стекло		1920	
Кремний		340	
Пластмасса	100		
Всего:	3184	8536	2000

В работе [1] приведены результаты расчета потребления природных ресурсов, воды и расхода электроэнергии. Расчет по природным ресурсам выполнен исходя из массы материалов, используемых для производства ЭУ, и удельных величин образования отходов на всех этапах жизненного цикла. Расчет потребления воды на производство ЭУ выполнен согласно удельным нормам водопотребления на технологические операции.

Расчет расхода электроэнергии (табл. 2) производили на основе массы составляющих материалов энергоустановки и удельного расхода электрической энергии.

Таблица 2

## Расход электроэнергии по этапам жизненного цикла ЭУ

Тип ЭУ	Расход электроэнергии кВт. час			
	Всего	Добыча	Производство	Утилизация
ВЭУ	4983	976	3322	684
СЭУ	21174	2021	16957	2195
Мини-ГЭС	3235	636	2154	445

Результаты исследования [2] теплового загрязнения окружающей среды проводили исходя из КПД установок для г. Нижний Новгород.

Также была проведена оценка эмиссии парниковых газов на всех этапах жизненного цикла возобновляемых источников энергии [4]. При оценке учитывались эмиссии парниковых газов: углекислого газа ( $\text{CO}_2$ ), закиси азота ( $\text{N}_2\text{O}$ ), метана ( $\text{CH}_4$ ).

Результаты акустического расчет ветровых установок приведены в работе [3], они позволяют определить размер санитарной зоны для физического загрязнения.

### Сточные воды

Норма водоотведения определяется нормой водопотребления и потерями воды в процессе ее использования в соответствии с принятой схемой водоснабжения производства. При установлении нормы водоотведения учитывается: целесообразность извлечения и использования ценных примесей, содержащихся в сточных водах, необходимая степень очистки сточных вод от загрязнений, требования, предъявляемые к производственной воде при применяемой системе водоснабжения.

Расчет сброса сточных вод на производство ЭУ выполнен согласно удельным нормам на технологические операции (табл. 3).

Таблица 3

## Результаты расчета объёма сточных вод в процессе жизненного цикла энергоустановок

Тип ЭУ	Объём сточных вод, м <sup>3</sup>			
	Добыча	Производство	Утилизация	Всего
ВЭУ	27	63	17	107
СЭУ	33	306	34	372
Мини-ГЭС	2	36	11	49

### Отчуждение территории для размещения ЭУ

В процессе эксплуатации ветровые и солнечные установки, мини-ГЭС, биоэнергетика и мини-ТЭЦ не являются источниками загрязнения почвы. Но для их размещения необходимо провести отчуждение земель определенной площади, которая зависит от вида и мощности станции. Удельные площади представлены в табл. 4.

Согласно СанПиН 2.2.1/2.1.1.1200-03 "Санитарно-защитные зоны и санитарная классификация предприятий, сооружений и иных объектов", санитарно-защитная зона (СЗЗ) отделяет территорию промышленной площадки от жилой застройки и обязательный элемент любого объекта, который является источником воздействия на среду обитания и здоровье человека. Размеры СЗЗ определяются в соответствии с действующими санитарно-эпидемиологическими нормами допустимых уровней (табл. 4).

Таблица 4

Площади станций и размер санитарно-защитной зоны

Вид ЭУ	Удельная площадь, м <sup>2</sup>	Размер санитарной зоны, м
Солнечные	300	0
Ветровые	6000	50 (по шуму)
Мини-ГЭС	0	0

А площади изъятых земель ранее были заняты естественными экологическими системами, которые включают определенные виды животных и растений. Строительство станции может изменить ареал обитания, что может привести к изменению состава экологической системы.

### Выводы

1. ОЖЦ позволяет провести экологическое сравнение источников энергии на всех этапах начиная добычей полезных ископаемых, производства энергоустановок, включая этап получения теплоэлектроэнергии и утилизации отработанного оборудования.

2. ОЖЦ позволяет оценить воздействие по следующим составляющим: потребление природных ресурсов, отчуждение территории, образование отходов, потребление воды, сброс сточных вод, выброс вредных веществ в атмосферный воздух, эмиссия парниковых газов, тепловое загрязнение, шум, расход электроэнергии.

3. Результаты расчета экологического воздействия ОЖЦ альтернативных источников энергии на окружающую природную среду сведены в табл. 5.

4. Результаты расчета ОЖЦ источников энергии показывают:

- наибольшая масса природных ресурсов необходима солнечным ЭУ,

- максимальная площадь электростанции у ветровых ЭУ;
- наибольшая масса отходов образуется у солнечных ЭУ;
- максимальное водопотребление необходимо солнечным ЭУ;
- максимальный объем сточных вод образуется у солнечным ЭУ;
- наибольшая эмиссия парниковых газов у солнечным ЭУ;
- максимальные тепловые загрязнения характерны для солнечных ЭУ;
- наибольший расход электроэнергии необходим солнечным ЭУ.

5. Наихудшими экологическими показателями характеризуются солнечные ЭУ при их экологической оценке жизненного цикла.

6. При выборе источника энергии необходимо учитывать не только технические и экономические характеристики энергоустановки, но и их воздействие на окружающую среду в процессе изготовления, эксплуатации и утилизации.

*Таблица 5*

**Результаты расчета ОЖЦ альтернативных источников энергии**

Направление воздействия	ВЭУ	СЭУ	Мини-ГЭС
Масса природных ресурсов, т	17,1	40,2	12,0
Площадь станции, м <sup>2</sup>	200	10	0
Размер санитарной зоны, м	50	0	0
Потребление воды, м <sup>3</sup>	319	999	233
Масса отходов, т	13,9	31,7	10,0
Объем сточных вод, м <sup>3</sup>	77	342	49
Эмиссия парниковых газов, т СО <sub>2</sub>	4,7	12,2	2,9
Тепловое загрязнение, ГДж/кВт.год	9	28	5
Расход электроэнергии, кВт.час	4983	21174	3235

**Библиографический список**

1. **Соснина, Е.Н.** Сравнительная экологическая оценка установок нетрадиционной энергетики / Е.Н. Соснина, О.В. Маслеева, Е.В. Крюков //Теплоэнергетика. – 2015. – №8. - С. 3-10.
2. **Маслеева, О.В.** Тепловое воздействие альтернативных источников на окружающую среду / О.В. Маслеева, А.Г. Воеводин, Г.В. Пачурин // Современные наукоёмкие технологии. - 2015. - №3- С. 51-54.
3. **Соснина, Е.Н.** Акустическое воздействие ветроэнергетических установок на окружающую среду/ Е.Н. Соснина, О.В. Маслеева, Г.В. Пачурин //Экология и промышленность России. - 2013. - № 9.- С. 8-11.
4. **Маслеева, О.В.** Эмиссия парниковых газов при экологической оценке возобновляемых источников энергии / О.В. Маслеева, Г.В.Пачурин, Е.В. Крюков // Фундаментальные исследования.- 2015.- № 11.-С. 709-714.

УДК 621.311

И.А. Палкин, Ю.В. Монаков

## АВТОМАТИЗАЦИЯ РАСЧЕТОВ ТОКОВ КОРОТКОГО ЗАМЫКАНИЯ В ТИПОВЫХ ЗАДАЧАХ

Национальный исследовательский университет «МЭИ»

На основе программного комплекса *Mathcad* разработана программа для расчета трехфазных токов короткого замыкания (ТКЗ) в заданном узле, включающая в себя расчетную схему, состоящую из отдельно взятых блоков, для которых разработана база данных исходных параметров элементов. Программа позволяет варьировать количество блоков в расчетной схеме, а также их параметры. Алгоритм расчета основан на методе узловых потенциалов, позволяющем автоматизировать расчет типовых задач.

A program, based on software complex *Mathcad*, was developed for three-phase short-circuit currents (SCC) calculations, which includes a design model consisting of individual blocks for which was developed a database of the input parameters of the elements. The program allows to vary the number of blocks in the calculation model, as well as their parameters. Usage of this program will optimize the educational process, excluding from the duties of the tutor routine procedures.

**Ключевые слова:** трехфазный ток короткого замыкания, метод узловых потенциалов, цифровые технологии, оптимизация.

**Key words:** three-phase short-circuit currents, the node-potential method, digital technologys, optimization.

### Введение

С целью повышения автоматизации эффективности образовательного процесса разрабатывается огромное количество вспомогательных программ, позволяющих качественно изменить процесс работы преподавателя со студентами. Подобным примером является и система дистанционного обучения (СДО) в НИУ «МЭИ» [1]. В рамках учебной дисциплины «Электромагнитные переходные процессы» на кафедре «Электрически станции» НИУ «МЭИ» разработан алгоритм для автоматизации составления и решения типовых задач. Данный алгоритм использует высокую вариативность исходных данных и схем и позволяет сразу получить расчетное задание со всеми промежуточными и конечными результатами.

### Разработка схемы для генерации вариантов

Расчет проведен на основании рабочей схемы (рис. 1). Схема включает в себя 9 отдельных блоков, имеющих общий узел, который также является местом короткого замыкания. Отдельным блоком считается совокупность

электроустановок, таких как генератор, трансформатор и т.п., гальванически связанных между собой и подключенных к одному общему узлу. Каждый такой блок имеет собственную базу данных с несколькими вариантами исходных параметров оборудования. Расчетные схемы из блоков составлялись таким образом, чтобы находящиеся в них блоки были согласованы по уровням напряжения.

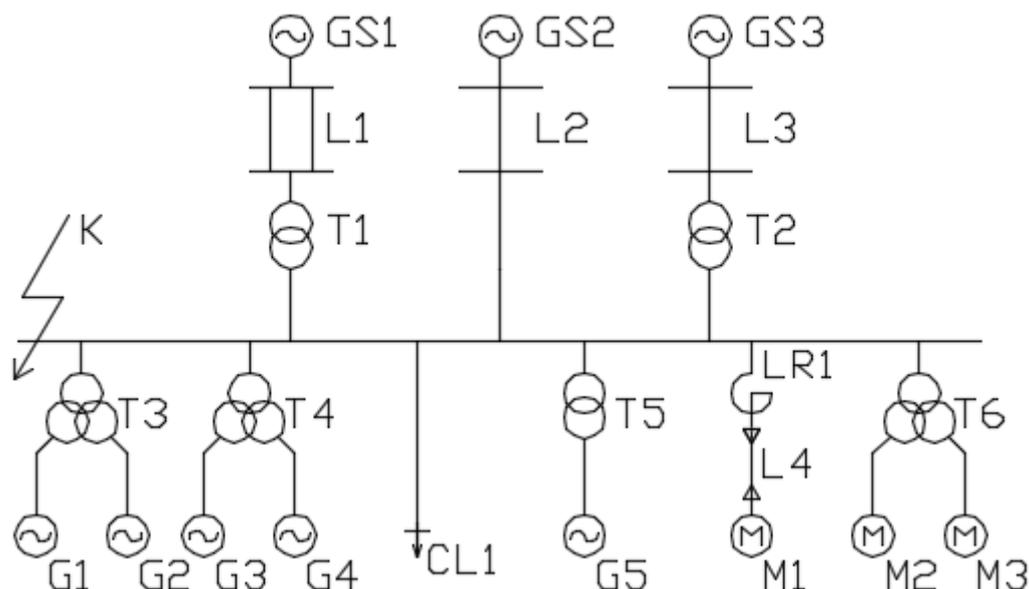


Рис. 1. Рабочая схема

### Разработка алгоритма расчета типовых задач

Для описания предложенных схем разработана математическая модель, представляющая собой систему уравнений в матричном виде для метода узловых потенциалов [2], в которую входят следующие матрицы:

1. Матрица соединений «А» размера  $(q - 1) \times p$ , где  $q$  – количество узлов;  $p$  – количество ребер. В данной матрице  $i$ -я строка соответствует узлу  $i$ , а  $j$ -й столбец соответствует ребру  $j$ ; элемент  $A_{ij}$  равен:

- 0, если ребро  $j$  не присоединено к узлу  $i$ ;
- 1, если ребро выходит из узла;
- -1, если ребро входит в узел.

Для каждого ребра задается направление тока, и именно от этого направления зависят понятия «входит» и «выходит».

2. Диагональная матрица проводимостей «Y» размера  $p \times p$ , где диагональный элемент  $Y_{ii}$  равен проводимости  $i$ -го ребра; недиагональные элементы равны нулю.

3. Матрица-столбец источников тока «J» размера  $p \times 1$ , где каждый элемент равен току соответствующего источника.

4. Матрица-столбец источников ЭДС «E» размера  $p \times 1$ , где каждый элемент равен ЭДС соответствующего источника.

Величины в матрицах источников ЭДС и источников тока равны:

- 0, если источник отсутствует в данном ребре;
- положительны, если направление источника совпадает с направлением тока в ребре;
- отрицательны, если направление источника не совпадает с направлением тока в ребре.

Чтобы определить количество ребер и узлов в матрицах, составляется эквивалентная схема замещения фрагмента сети (рис. 2).

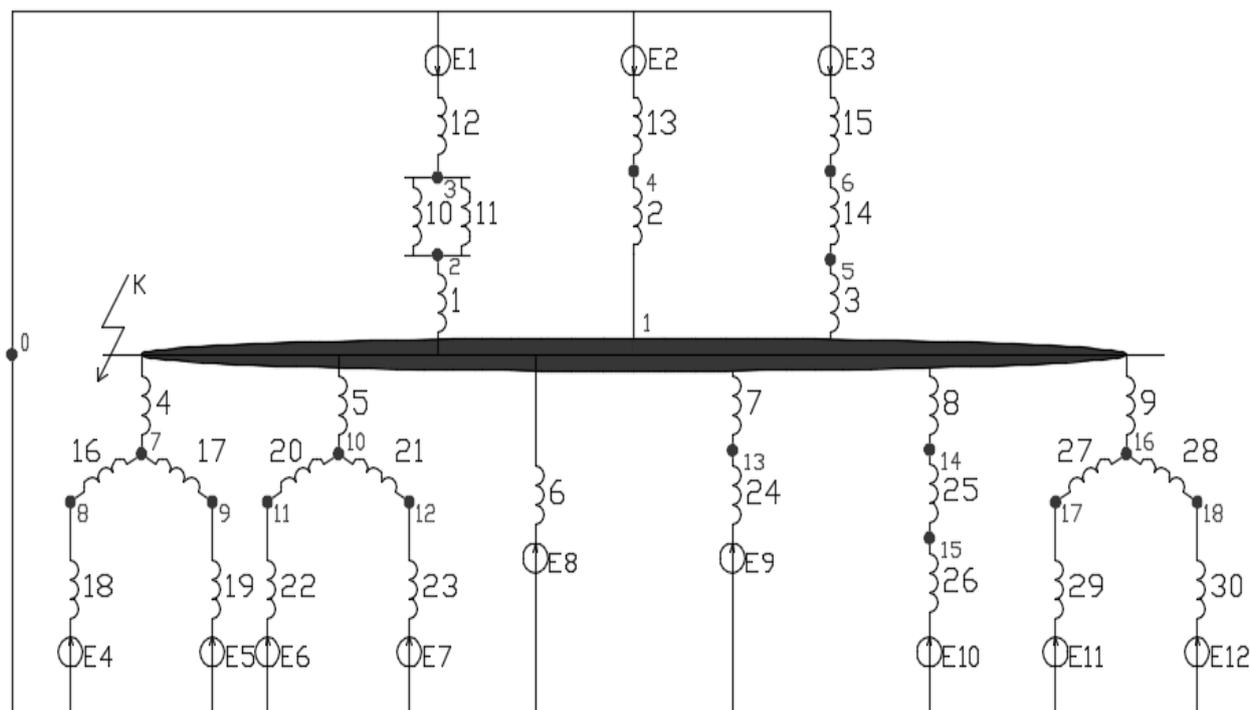


Рис. 2. Эквивалентная схема замещения фрагмента сети

Расчет параметров элементов схемы замещения производится в системе относительных единиц [3, 4, 5]. При проведении расчетов выбираются: блоки, из которых сформируется расчетная схема, исходные параметры блока, базисные напряжения на каждой ступени и базисная мощность. По результатам расчетов 240 вариантов заданий была сформирована база данных, содержащая исходные параметры оборудования, промежуточные и конечные результаты расчета токов короткого замыкания.

## Выводы

1. Сформирована и описана рабочая схема участка электрической системы, на базе которой предполагается формировать задачи. Для решения задач, формирующихся на основе рабочей схемы, разработан алгоритм расчета на базе программного комплекса *Mathcad*.

2. Полученная база данных реализована в программе *Microsoft Access*. Для удобства работы с этой базой данных сформированы две формы запроса: бланк задания и бланк с результатами.

**Библиографический список**

1. Система дистанционного обучения Прометей. [Электронный ресурс]  
URL: <http://dot.mpei.ru:8081/portal/>
2. Теоретические основы электротехники: учебник для вузов в 3 т. / К.С. Демирчян [и др.] – СПб.: Питер, 2003. Т. 1.
3. **Крючков, И.П.** Короткие замыкания и выбор электрооборудования: учеб. пособие для вузов / И.П. Крючков, В.А. Старшинов, Ю.П. Гусев – М.: Изд. дом МЭИ, 2012.
4. ГОСТ Р 52735-2007. Короткие замыкания в электроустановках. Методы расчета в электроустановках переменного тока напряжением свыше 1 кВ.- М.: Стандарт Информ. 2007.

УДК 621.311.153.001.24

Д.Ю. Платонов, Н.Д. Голубева, В.П. Степанов

**ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЕ ПОТЕРИ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ В СИСТЕМАХ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ПОРТОВ, ВЫЗЫВАЕМЫЕ РАБОТОЙ КРАНОВ**

Самарский государственный технический университет

Приводится оценка дополнительных расчетных потерь электроэнергии в электрических сетях, питающих краны речных портов. Показано, что дополнительные расчетные потери электроэнергии составляют от 10 до 46% и обусловлены увеличением дисперсионной составляющей расчетных потерь электроэнергии. Результаты работы предполагается использовать для совершенствования методики оценки расчетных потерь электроэнергии в системах электроснабжения речных портов.

The estimation of additional calculation of electrical energy in the electrical network feeding the cranes in river ports. It is shown that the additional calculated power losses are from 10 to 46% and are due to an increase in the dispersion component of the calculated power losses. The results of the work are expected to be used to improve the methodology for assessing the estimated power losses in the power supply systems of river ports.

**Ключевые слова:** краны речных портов, графики электрической нагрузки, корреляционная функция графика, расчетные потери электрической энергии, дисперсионная составляющая расчетных потерь электрической энергии.

**Key words:** river port cranes, electric load diagrams, correlation function of the diagram, calculated losses of electric energy, the dispersion component of the calculated losses of electric energy.

Актуальность работы обуславливается тем, что расчетные потери электроэнергии (ЭЭ) не могут быть измерены, а определяются только расчетным путем.

В системах электроснабжения (СЭС) речных портов краны являются наиболее мощными электроприемниками с номинальной мощностью от 30 до 200 кВт и напряжением питания 0,38 кВ. Графики электрической нагрузки (ГЭН) кранов речных портов имеют случайный и резкопеременный характер с коэффициентом формы  $K_{\phi} > 1,1$ . [1]

Причина - возникновения дополнительных расчетных потерь электроэнергии в элементах СЭС речных портов, питающих краны, в использовании для оценки расчетных потерь ЭЭ ступенчатых, а не исходных ГЭН.

$$\Delta W_{a1} = 3I_c^2 K_{\phi\theta}^2 RT_p, \quad (1)$$

где  $I_c$  - средняя нагрузка;  $R$  - активное сопротивление электрической сети;  $K_{\phi\theta}$  - коэффициент формы ступенчатого графика, характеризующий его неравномерность;  $T_p$  - расчетное время, за которое определяются расчетные потери ЭЭ.

Из [1] известно соотношение для  $K_{\phi\theta}$  ступенчатого ГЭН

$$K_{\phi\theta}^2 = 1 + \frac{DI_\theta}{I_c^2}, \quad (2)$$

где  $DI_\theta$  - дисперсия ступенчатого  $I_\theta(t)$  ГЭН.

Подставляя (2) в (1), получаем, что потери активной ЭЭ можно представить в виде двух составляющих:

$$\Delta W_{a1} = 3I_c^2 RT_p + 3DI_\theta RT_p = \Delta W_c + \Delta W_{D\theta}, \quad (3)$$

где  $\Delta W_c$  и  $\Delta W_{D\theta}$  составляющие расчетных потерь ЭЭ, обусловленные средней и дисперсионной нагрузкой ступенчатого ГЭН.

Для оценки  $\Delta W_{D\theta}$  исходные ГЭН кранов представляются вероятностной моделью в виде случайного стационарного марковского процесса с корреляционной функцией (КФ) вида [2]

$$K(\tau) = DIe^{-\alpha|\tau|} \left( \cos \omega\tau - \frac{1}{k_\omega} \sin \omega\tau \right) \quad (4)$$

и постоянной времени корреляции

$$T_k = \frac{2e^{\frac{-\pi}{2k_\omega}} e^{\frac{1}{k_\omega} \arccos \frac{k_\omega}{\sqrt{1+k_\omega^2}}}}{\alpha \sqrt{1+k_\omega^2} \left[ 1 - e^{\frac{-\pi}{k_\omega}} \right]}, \quad (5)$$

где  $\alpha$ -коэффициент затухания (уменьшения) вероятностной взаимосвязи между ординатами исходного графика;  $\omega$ -собственная частота колебания КФ;  $k_\omega = \omega/\alpha$ - коэффициент колебательности КФ и ГЭН.

Заметим, что параметры  $\alpha$  и  $\omega$  в (4) и (5) имеют статистический смысл: для неэрготических случайных ГЭН они относятся к ансамблю графиков, их численные значения могут не совпадать со значениями для отдельных графиков [3]. Так, для навалочного груза, согласно экспериментальным исследованиям  $\alpha = 0.023 \div 0.026$ , а  $\omega = 0,083$ . [2] Коэффициент колебательности  $k_\omega$  принимает достаточно устойчивое значение и изменяется в узком пределе от 3,2 до 3,6. [2] Время корреляции  $T_k$  по (5) изменяется в пределах от 38 до 78 мин.

Для оценки неравномерности ступенчатого  $I_\theta(t)$  ГЭН воспользуемся выражением из [1]:

$$DI_{\theta} = \frac{2}{\theta^2} \int_0^{\theta} d\tau \int_0^{\tau} K(\tau) d\tau, \quad (6)$$

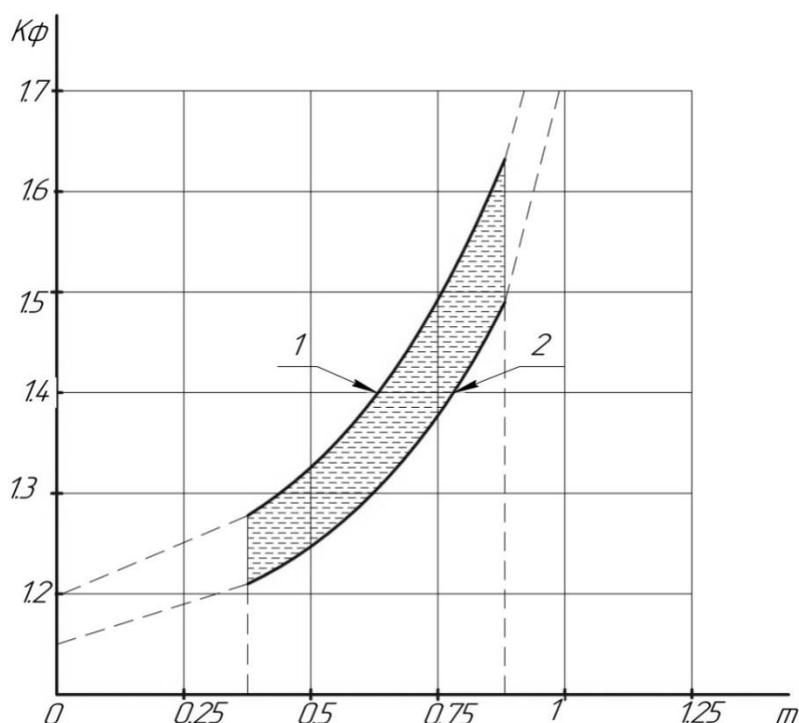
Тогда коэффициент формы  $K_{\phi}$  исходного графика с КФ вида (4), отражающий научную новизну работы, получается подстановкой  $DI_{\theta}$  ступенчатого ГЭН, согласно [4]

$$DI_{\theta} = \frac{2DI}{m^2(1+k_{\omega}^2)} \left( 1 - e^{-m} \cos(k_{\omega}m) - \frac{1}{k_{\omega}} e^{-m} \sin(k_{\omega}m) \right), \quad (7)$$

в выражение (2)

$$K_{\phi} = \sqrt{1 + \frac{m^2(K_{\phi\theta}^2 - 1)(1 + k_{\omega}^2)}{2 \left[ 1 - e^{-m} \cos(k_{\omega}m) - \frac{1}{k_{\omega}} e^{-m} \sin(k_{\omega}m) \right]}} \quad (8)$$

Результаты расчетов по (8) восстановленных  $K_{\phi}$  исходного ГЭН кранов при навалочном грузе представлены на рис 1. Область значений  $K_{\phi}$ , ограниченная предельными значениями  $K_{\phi\theta} = 1,15 \div 1,2$  и  $m = 0,33 \div 0,88$ , охватывает работу речных кранов с грузоподъемностью от 3 до 16 т при работе с навалочным грузом.



**Рис.1. Зависимость коэффициента формы  $K_{\phi}$  исходного ГЭН от параметра  $m$  и коэффициента формы  $K_{\phi\theta}$  ступенчатого графика:**

1 - кривая с  $K_{\phi\theta} = 1,2$  и  $k_{\omega} = 3,6$ ; 2 - кривая с  $K_{\phi\theta} = 1,15$  и  $k_{\omega} = 3,2$

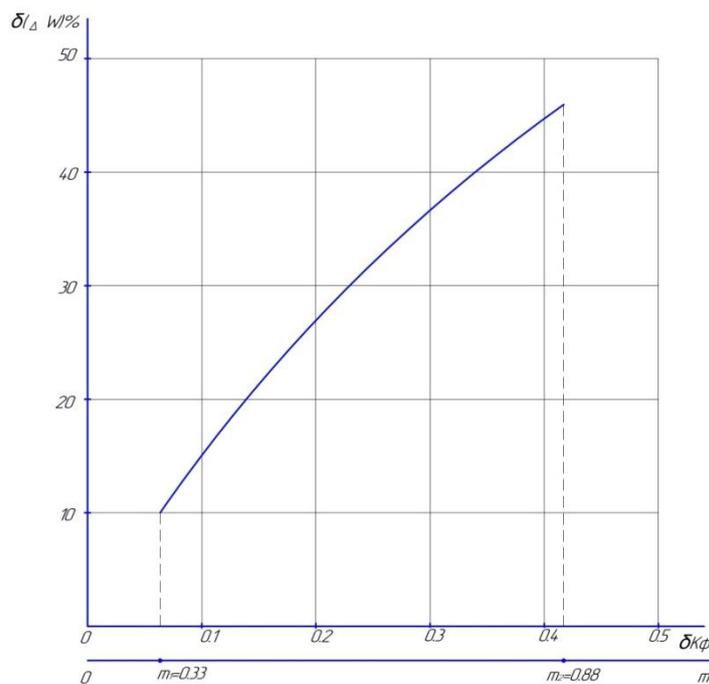
Коэффициент формы  $K_\phi$  исходного графика, согласно рис. 1, увеличивается на величину  $\delta K_\phi = 0,06 \div 0,43$  по выражению [5]

$$\delta K_\phi = K_\phi - K_{\phi\theta} \quad (9)$$

Поэтому дисперсионная составляющая расчетных потерь электроэнергии  $\Delta W_{D\theta}$  по ступенчатым графикам всегда меньше дисперсионной составляющей  $\Delta W_D$  по исходному графику согласно выражению [5]:

$$\delta(\Delta W_a) = \frac{\Delta W_D - \Delta W_{D\theta}}{\Delta W_D} 100\% = \frac{K_\phi^2 - K_{\phi\theta}^2}{K_\phi^2} 100\% . \quad (10)$$

На рис.2 изображена кривая изменения дополнительных расчетных потерь ЭЭ при увеличении  $K_\phi$  на величину  $\delta K_\phi$  или увеличение  $\Delta W_D$  расчетных потерь электроэнергии.



**Рис.2. Зависимость расчетных потерь ЭЭ от увеличения коэффициента формы  $\delta K_\phi$  исходного графика**

### Выводы

Дополнительные расчетные потери электроэнергии обусловлены увеличением дисперсионной составляющей расчетных потерь электроэнергии и находятся в диапазоне от 10 и до 46% для кранов речных портов при работе с навалочным грузом.

---

**Библиографический список**

1. Электрические нагрузки промышленных предприятий / С.Д. Волобринский [и др.] – Л.: Энергия, 1971. – 264 с.
2. **Шошмин, Б.А.** Исследование особенностей электрических нагрузок и разработка методов их расчета для порталных кранов речных портов: автореф. дис. ... канд. техн. наук / Ленинградский ин-т речного и морского транспорта. - Л., 1974. – 24 с.
3. **Вагин, Г.Я.** Электромагнитная совместимость в электроэнергетике. / Г.Я. Вагин, А.Б. Лоскутов, А.А. Севостьянов. – Н. Новгород: НГТУ им. Р.Е. Алексеева, 2004. – 258 с.
4. Оценка расчетных потерь электроэнергии в электрических сетях, питающих специальные промышленные установки / Н.В. Безменова [и др.] // Электротехника, электроэнергетика, электротехническая промышленность. -2005. -№3. - С34-37.
5. **Гордеев, В.И.** Регулирование максимума нагрузки промышленных электрических сетей. / В.И. Гордеев. – М.: Энергоатомиздат, 1986. - 184 с.

УДК 621.311

Н.А. Попкова, А.А. Зубарев

## ВЛИЯНИЕ ИСТОЧНИКОВ РАСПРЕДЕЛЕННОЙ ГЕНЕРАЦИИ НА УРОВЕНЬ ПОТЕРЬ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ В РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЯХ

Белорусский национальный технический университет

В последние годы в мире активно развивается использование источников распределенной генерации. Распределенная генерация (РГ) позволяет поддерживать качество электрической энергии и снижать потери мощности в линиях электропередачи. В работе рассмотрен расчет простейшей электрической сети с установленным источником РГ, показано влияние источника РГ на потери электрической энергии в сети.

The use of distributed generation sources is actively developing in recent years. Distributed energy sources allow maintaining the quality and reducing the power losses in transmission lines. In this paper we consider a simple calculation of the mains source mounted, WP shows the influence of the distributed energy source on electrical energy losses in the network.

**Ключевые слова:** распределенная генерация, потери электроэнергии, распределительные сети.

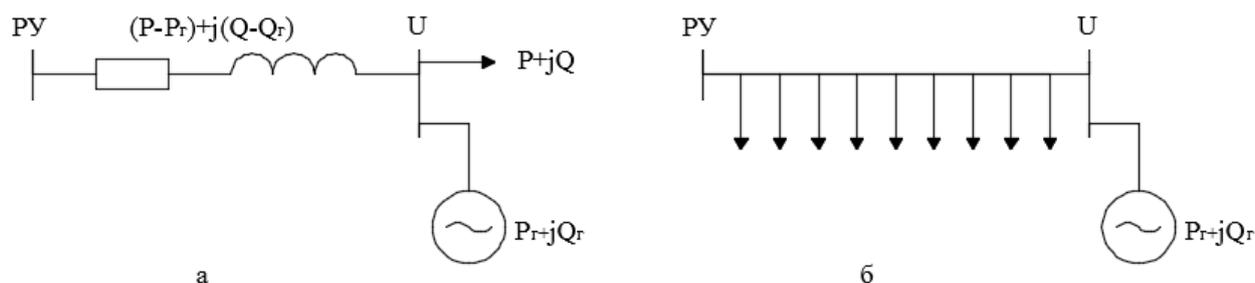
**Key words:** distributed generation, power losses, distribution grids.

На начальном этапе электроэнергетические системы развитых стран развивались по пути повышения уровня централизации электроснабжения, формировались мощные энергетические узлы, которые связывались между собой и с потребителями протяженными линиями электропередачи. Такой подход позволил повысить надежность электроснабжения и качество электроэнергии. Технологии паротурбинных агрегатов традиционных электрических станций развивались путем применения все более высоких параметров пара, что подразумевало использование более совершенных материалов котлов и турбин, при этом единичная мощность установок возрастала, а технико-экономические параметры установок улучшались. Однако рост цен на топливо, износ оборудования, политические и экологические решения не позволяют впредь увеличивать единичную мощность электрических станций, указанные факторы в последние годы стимулируют рост числа установок распределенной генерации (РГ) во всем мире [1]. Под распределенной генерацией понимается совокупность генерирующих объектов малой мощности (от 0,1кВт до 25 МВт), производящих электрическую энергию непосредственно около места подключения (потребителя). Отдаление источника РГ от места подключения зависит от номинального напряжения сети.

Общая установленная мощность подобных установок в Республике Беларусь небольшая, а ее влияние на энергетическую систему пока незначительное.

Необходимо отметить, что использование источников РГ позволяет снизить уровень потерь в локальной электрической сети и выровнять уровень напряжений. Для оценки влияния РГ на работу энергетической системы в данной работе приведен анализ простейшей электрической сети.

На рис. 1 показаны два частных случая представления нагрузки на участке: нагрузка представлена в качестве единичного узла в конце линейного участка и нагрузка равномерно распределена на всем участке электрической сети.



**Рис. 1. Схема электрической сети с установленным источником РГ:**  
*а* – с нагрузкой в конце линейного участка, *б* – с равномерно распределенной нагрузкой на всем участке

Рассмотрим каждый из случаев подробно.

*Первый случай.* К шинам потребителя электрической энергии подключен источник распределенной генерации, тогда поток мощности, протекающей по электрической сети, будет равен  $(P - P_r) + j(Q - Q_r)$ .

Величина, на которую снижаются потери активной мощности в активном сопротивлении линии электропередачи за счет применения компенсирующих устройств, определяется по формуле [2,3]

$$\delta P_{\text{л}} = \Delta P_1 - \Delta P_2, \quad (1)$$

где  $\Delta P_1$  и  $\Delta P_2$  – потери активной мощности в линии до и после присоединения источника распределенной генерации, кВт.

Формула (1) примет вид

$$\delta P_{\text{л}} = \frac{P^2 + Q^2}{U^2} R_{\text{л}} \cdot 10^{-3} - \frac{(P - P_r)^2 + (Q - Q_r)^2}{U^2} R_{\text{л}} \cdot 10^{-3}. \quad (2)$$

где  $R_{\text{л}}$  – активное сопротивление фазы линии, Ом;  $P$  и  $Q$  – активная и реактивная мощность, протекающая по линии до установки источника распределенной генерации, кВт;  $P_r$  и  $Q_r$  – активная и реактивная мощность, вырабатываемая источником распределенной генерации, кВт;  $U$  – действительное напряжение линии электропередачи, кВ.

Для уменьшения потерь активной мощности  $\delta P_{\text{л}}$  должна иметь положительное значение, т.е.  $\delta P_{\text{л}} > 0$ .

После преобразования формула (2) примет следующий вид:

$$\delta P_{\text{л}} = \frac{R_{\text{л}}}{U^2} \cdot 10^{-3} \cdot (2PP_r + 2QQ_r - P_r^2 - Q_r^2). \quad (3)$$

Преобразуем полученное выражение (3), учитывая, что  $\delta P_{л} > 0$ . Выражение  $\frac{R_{л}}{U^2} \cdot 10^{-3}$  в преобразовании больше учитывать не будем, сделав допущение, что данная величина постоянна. Тогда выражение (4) примет вид

$$2(P P_{Г} + Q Q_{Г}) > P_{Г}^2 + Q_{Г}^2. \quad (4)$$

Данное выражение является полным, однако не вносит ясности из-за большого количества показателей. Преобразуем его, выделив полную мощность генерации и нагрузки. Таким образом, выражение (5) примет вид

$$2(S \cdot \cos \varphi \cdot S_{Г} \cdot \cos \varphi_{Г} + S \cdot \sin \varphi \cdot S_{Г} \cdot \sin \varphi_{Г}) > S_{Г}^2. \quad (5)$$

где  $S$  и  $S_{Г}$  -- полная мощность генерации и нагрузки, кВА.

Выделим за скобки  $S$  и  $S_{Г}$ :

$$2S S_{Г} (\cos \varphi \cdot \cos \varphi_{Г} + \sin \varphi \cdot \sin \varphi_{Г}) > S_{Г}^2. \quad (6)$$

Используя стандартное тригонометрическое преобразование и приняв, что  $S_{Г}$ , впрочем, как и  $S$ , является положительной величиной, что позволяет сократить ее без смены знака. Тогда выражение (6) будет выглядеть как:

$$2S \cos(\varphi - \varphi_{Г}) > S_{Г}. \quad (7)$$

Из выражения (7) получим

$$2 \cos(\varphi - \varphi_{Г}) > \frac{S_{Г}}{S}. \quad (8)$$

Из выражения (8) можно сделать вывод, что  $0 < \frac{S_{Г}}{S} < 2$ . Отсюда следует, что потери мощности уменьшатся лишь при соблюдении данного условия. Данный метод решения задачи является простейшим примером представления источника распределенной генерации в качестве PQ-узла.

Рассмотрим случай с равномерно распределенной нагрузкой на всем участке. Для выполнения условия (1) представим [3]

$$\Delta P_1 = \frac{P^2 r_0 l}{3U_{ном}^2}, \quad (9)$$

где  $r_0$  -- удельное активное сопротивление линии, Ом/км;  $l$  -- длина линейного участка, км;  $P$  -- сосредоточенная активная мощность нагрузки, кВт;  $U_{ном}$  -- номинальное напряжение электрической сети, кВ.

Обозначим  $P_{Г} = \alpha P$ , где  $\alpha = \frac{P_{Г}}{P}$ .

При неизменной удельной мощности нагрузки  $P$  примем, что мощность генерации влияет на длину. Тогда суммарные потери мощности в сети будут

$$\Delta P = \int_0^{\alpha L} \frac{(p(L-l))^2 r_0 dl}{U_{ном}^2} + \int_0^{(1-\alpha)L} \frac{(p(L-l))^2 r_0 dl}{U_{ном}^2}, \quad (10)$$

что преобразуется в

$$\Delta P = \frac{p^2 r_0 \alpha^3 L^3}{3U_{ном}^2} + \frac{p^2 r_0 (1-\alpha)^3 L^3}{3U_{ном}^2}. \quad (11)$$

упростим выражение (11)

$$\Delta P = \frac{P^2 r_0 L^3}{3U_{НОМ}^2} \cdot [\alpha^3 + (1-\alpha)^3] \quad (12)$$

что преобразуется в следующее выражение

$$\Delta P = \frac{P^2 r_0 L^3}{3U_{НОМ}^2} \cdot (3\alpha^3 - 3\alpha + 1), \quad (13)$$

или же

$$\Delta P = \frac{P^2 r_0 L^3}{U_{НОМ}^2} \cdot \left[ \left( \alpha - \frac{1}{2} \right)^2 + \frac{1}{12} \right]. \quad (14)$$

Для линий длиной  $L$  с сосредоточенной активной нагрузкой  $P$ , приложенной в ее конце [3], потери мощности

$$\Delta P = \frac{3P^2 r_0 L^3}{U_{НОМ}^2} \cdot \left( \alpha - \frac{1}{2} \right)^2 + \frac{P^2 r_0 L}{4U_{НОМ}^2}; \quad (15)$$

Как видно из приведенной функции (15), потери мощности в сети будут меньше при  $\alpha$ , лежащем в диапазоне  $0 \dots 1$ ; при  $\alpha=0,5$  достигается экстремум функции

$$\Delta P = \frac{P^2 r_0 L}{4U_{НОМ}^2}. \quad (16)$$

Из выражения (16) видно, что при использовании источника распределенной генерации в электрической сети потери мощности уменьшатся в 4 раза. Необходимо отметить, что данный случай применим для источников со стабильной генерацией (прямое сжигание твердого топлива, технологии на природном газе), так как для источников, работающих на возобновляемых источниках энергии (энергия ветра и солнца), необходимо учитывать различные режимы работы генерирующих установок.

### Библиографический список

1. **Федоров, В. К.** Влияние распределенной генерации на потери и качество электрической энергии / В. К. Федоров, Е. Н. Леонов, Д. В. Федоров // Омский научный вестник. - 2016. - №6 (150). - С. 72-76.
2. **Герасименко, А. А.** Передача и распределение электрической энергии: учебное пособие / А. А. Герасименко, В. Т. Федин. – Ростов-н/Д: Феникс; Красноярск: Издательские проекты, - 2006. – 720 с.
3. **Поспелов, Г. Е.** Электрические системы и сети: учебник для студентов энергетических специальностей / Г.Е. Поспелов, В.Т. Федин, П.В. Лычев – Минск: Технопринт, - 2004. – 720 с.

УДК 621.316.728

Е.Н. Соснина<sup>1</sup>, Р.Ш. Бедретдинов<sup>1</sup>, И.А. Липужин<sup>1</sup>, А.И. Смирнов<sup>2</sup>**АКТИВНО-АДАПТИВНАЯ СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ  
ТВЕРДОТЕЛЬНОГО РЕГУЛЯТОРА НАПРЯЖЕНИЯ**Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева<sup>1</sup>,  
ООО «Теком»<sup>2</sup>

Статья посвящена разработке активно-адаптивной системы управления (ААСУ) твердотельного регулятора напряжения (ТРН). Рассмотрены этапы разработки ААСУ ТРН. Для отработки алгоритмов создана имитационная модель сети ААСУ ТРН. Исследование показало, что разрабатываемая ААСУ ТРН способна поддерживать оптимальный режим работы электрической сети.

The article is devoted to an active-adaptive control system (AACS) of solid-state voltage regulator (SSVR) development. The SSVR AACS development stages are considered, The SSVR AACS network simulation model have been created to debugging algorithms. The study has proved that the developed SSVR AACS is able to support the electric network optimal operation mode.

**Ключевые слова:** адаптивное управление, гибкие системы передачи переменного тока, преобразователь напряжения, имитационная модель, интеллектуальная сеть.

**Key words:** adaptive control, flexible AC transmission system, voltage-source converters, simulation model, smart grid.

Реализация концепции *SMART GRID* требует создания быстродействующих интеллектуальных устройств, обеспечивающих активно-адаптивное управление режимами электрических сетей. Для распределительных электрических сетей среднего напряжения (6-20 кВ) это особенно актуально, поскольку они наименее автоматизированы, наиболее протяженны и имеют большую долю источников распределенной генерации.

Коллектив ученых НГТУ ведет разработку твердотельного регулятора напряжения (ТРН), обладающего возможностью оперативного регулирования параметров сети и потоков активной и реактивной мощности в сетях среднего напряжения 6-20 кВ [1, 2]. Внедрение ТРН позволит существенно повысить качество электроснабжения потребителей.

Цель настоящей работы - разработка активно-адаптивной системы управления ТРН и исследование ее работоспособности.

К ААСУ ТРН предъявлялись следующие требования:

- автоматическое и ручное управление перетоками мощности в РЭС как по заранее заданным алгоритмам, так и автоматическое оперативное регулирование параметров сети в соответствии с текущей ситуацией;

- возможность удаленных узлов работать как в составе единой информационной сети при наличии связи с соседними узлами, так и способность

каждого узла осуществлять свою работу по заранее заданным алгоритмам при отсутствии такой связи;

- отслеживание различного рода аварийных ситуаций на элементах сети и информирование о них операторов;
- защищенность информационных потоков в сети передачи данных от не-санкционированных воздействий на них третьих лиц.

### Активно-адаптивная система управления ТРН

ААСУ ТРН состоит из систем низкого и высокого уровня и имеет структуру, показанную на рис. 1.



Рис. 1. Структура ААСУ ТРН

Низкий уровень ААСУ представлен технологической системой управления (ТСУ), реализующей физическое выполнение команд управления ТРН, измерение параметров его функционирования, обмен информацией между соседними ТСУ и ее передачу в вышестоящую систему управления. Управляющие воздействия ТСУ принимает только из вышестоящей системы управления.

На высоком уровне ААСУ находится распределенная система управления (РСУ), которая выполняет функции оперативного управления ТСУ, диагностики состояния ТРН, сбора данных мониторинга и реализации алгоритмов интеллектуального управления сетью с ТРН с целью эффективного управления потоками мощности, повышения качества электроснабжения потребителей и снижения потерь при передаче электроэнергии.

Конкретная топология системы ААСУ группы ТРН зависит от выполняемой задачи. Пример топологии такой системы показан на рис. 2.

На рис. 2 представлено несколько географически распределенных ТСУ. Каждая ТСУ подключена к обслуживаемому ею ТРН. Все ТСУ связаны по выделенным каналам связи в единую сеть, используемую для организации активно-адаптивного управления работой устройств ТРН, а также централизованного управления ТСУ из центральной диспетчерской, где расположена система РСУ.

### Имитационная модель

Для исследования работоспособности ААСУ ТРН разработана ее имитационная модель [3]. Модель позволяет исследовать работу ТСУ и РСУ без реального подключения к ТРН и без реальных каналов связи. Модель эмулирует следующие компоненты: ТРН; каналы связи между РСУ и ТСУ; топологию сети, состоящей из ТСУ с набором соединяющих их каналов связи.

Структурная схема имитационной модели ААСУ ТРН представлена на рис. 3.

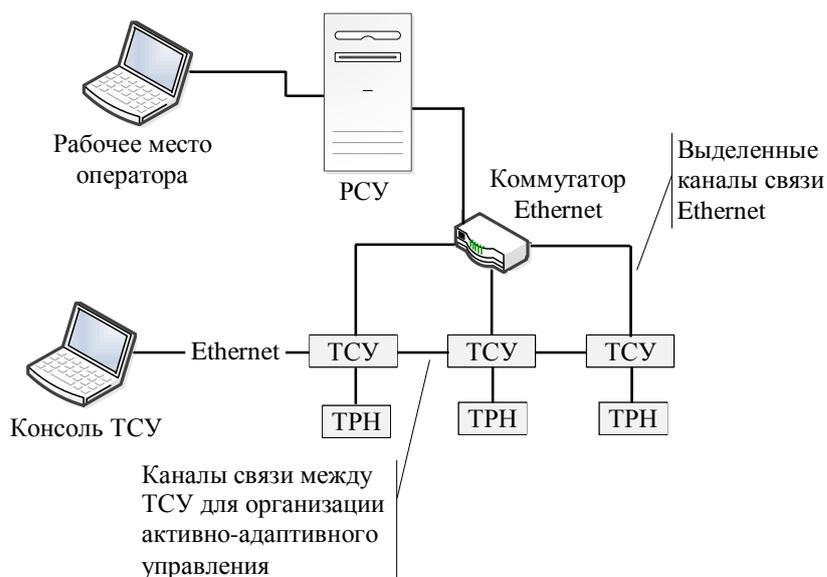


Рис. 2. Структурная схема ААСУ группы ТРН

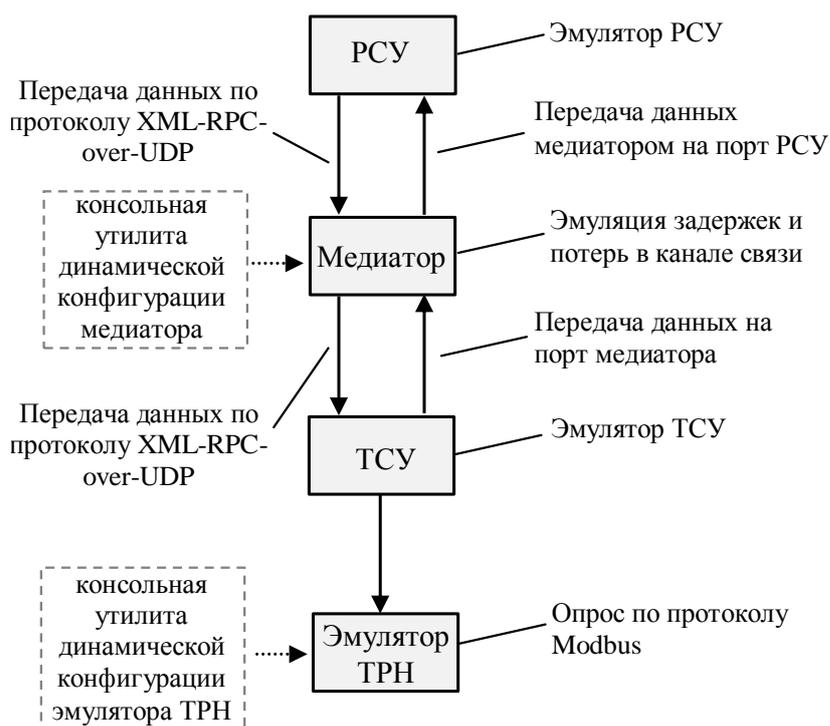
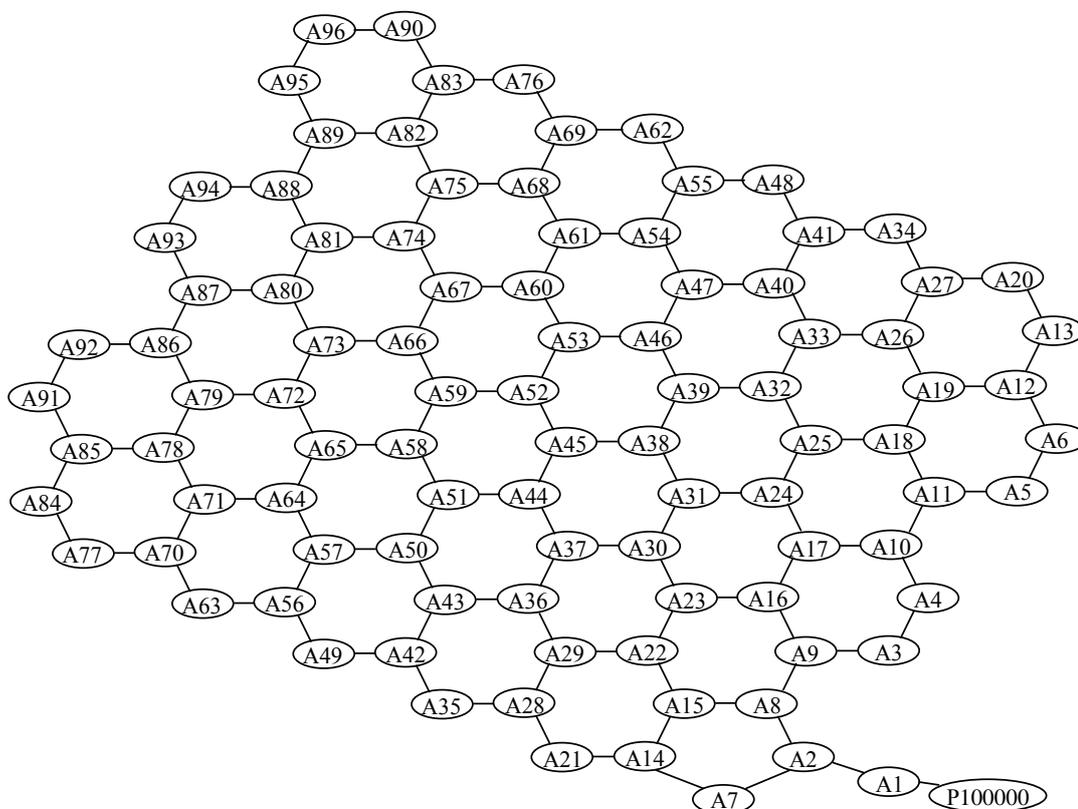


Рис. 3. Структурная схема имитационной модели ААСУ ТРН

Модель состоит из следующих блоков: эмулятор ТРН (отвечает на ModBus-запросы); ТСУ; медиатор – эмулятор каналов связи; РСУ; консольная утилита динамической конфигурации медиатора; консольная утилита динамической конфигурации эмулятора ТРН.

Консольная утилита динамической конфигурации медиатора позволяет динамически изменять настройки параметров каналов связи, эмулируемых медиатором, без перезапуска последнего.

Исследование ААСУ ТРН проведено на эмуляции сети из 96-ти ТСУ, связанных между собой в гексагональную сеть (рис. 4).



**Рис. 4. Исследуемый участок сети с гексагональной структурой:**  
A1-A96 – ТСУ; P100000 – РСУ

Поскольку компоненты имитационной модели должны работать с компонентами ТСУ, то для ее разработки использованы те же технологии, язык программирования и набор инструментов. Поэтому проектирование компонент имитационной модели велось на языке C++. Модель позволяет получить информацию о результатах и параметрах передачи данных (продолжительность задержки, объем потерянных пакетов данных, информация о сбоях) при работе системы управления.

### Результаты исследования

Исследование ААСУ ТРН проведено для нормальных и аварийных режимов работы сети (рис. 4). Было рассмотрено пять сценариев:

- А) нормальный режим работы устройств сети;
- Б) прогнозируемые колебания потребляемой мощности на устройствах сети;
- В) непредвиденные изменения потребляемой мощности на некоторых устройствах сети;
- Г) обрыв линии электропередачи между двумя устройствами ТРН;
- Д) выход из строя одного устройства ТРН.

Режимы работы сети моделировались с помощью консольных утилит динамической конфигурации медиатора и ТРН.

Анализ результатов показал, что в нормальных и аварийных режимах работы сети ААСУ реагирует в соответствии с предъявляемыми к ней требованиями. В нормальных режимах работы (сценарии А, Б, В) происходит обмен информацией между РСУ, ТСУ и элементами электрической сети. В случае необходимости алгоритмы управления РСУ формируют управляющие воздействия. Аварийные режимы работы (обрыв линии, выход из строя ТРН) не приводят к полному отключению потребителей. В случае неэффективности работы ААСУ в автоматическом режиме управление переходит на ручной режим. В целом алгоритмы управления устройствами сети обеспечивают распределение электроэнергии с минимальными потерями.

### Выводы

1. Для исследования работы системы управления ТРН в сети среднего напряжения разработана имитационная модель ААСУ. Особенностью модели является возможность адекватного исследования работы ТСУ и РСУ без реального подключения к ТРН и без реальных каналов связи.

2. Исследование показало, что разрабатываемая ААСУ способна поддерживать оптимальный режим работы сети передачи электрической энергии как при сбоях в системе передачи данных, так и при сбоях в работе электрооборудования сети или подключенных к ней потребителей. Сеть устойчива к сбоям в работе устройств и протоколов передачи данных, она хорошо адаптируется к изменению пропускной способности каналов и изменению связности внутри самой сети. Полученные результаты позволяют говорить о работоспособности ААСУ ТРН и ее соответствии предъявляемым к ней требованиям.

3. ААСУ позволяет собирать оперативную информацию о текущих процессах в электрической сети и передавать ее с помощью PLC-модемов. ААСУ имеет интерфейсы, позволяющие опрашивать устройства, управлять ими и объединять в интеллектуальную сеть. ААСУ позволяет реализовать любые алгоритмы работы в электрической сети среднего напряжения.

*Работа выполняется при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (Соглашение № 14.574.21.0167 о предоставлении субсидии от 26.09.2017 г., уникальный идентификатор проекта RFMEFI57417X0167).*

### Библиографический список

1. Разработка интеллектуального устройства управления параметрами и конфигурацией распределительной электрической сети 6-20 кВ на базе твердотельного регулятора с ШИМ на частоте сети. Этапы 1 – 2 : отчеты о прикладных научных исследованиях (Соглашение о предоставлении субсидии от 26.09.2017 № 14.574.21.0167) / НГТУ; рук.

---

Е. Н. Соснина. – Н. Новгород : НГТУ им. Р.Е. Алексеева, 2017 – 2018. № гос.рег. АААА-А17-117102470020-3.

2. Пат. 178765 РФ. Модуль регулирования фазового сдвига и амплитуды задающего напряжения / А. И. Чивенков, Н. Н. Вихорев, Д. А. Алешин; заявитель и патентообладатель Нижегород. гос. техн. ун-т им. Р. Е. Алексеева. Оpubл. 18.04.2018. Бюл. № 11.
3. Свидетельство о гос. регистрации программы для ЭВМ № 2019610525. Модуль системы управления твердотельного регулятора напряжения / Е.Н. Соснина, А.И.Смирнов, Р.Ш. Бедретдинов; заявл. 20.12.2018; опубл. 11.01.2019.

УДК 621.311

Е.Н. Соснина, А.В. Шалухо, Л.Е. Веселов, В.И. Федорчатенко

## ПРИМЕНЕНИЕ ТОПЛИВНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ В СИСТЕМАХ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексева

Статья посвящена вопросам применения топливных элементов в системах электроснабжения сельскохозяйственных предприятий. Проведен сравнительный анализ различных типов топливных элементов, рассмотрено устройство и преимущества твердооксидных топливных элементов (ТОТЭ). Представлена блок-схема интеграции ТОТЭ в систему электроснабжения сельскохозяйственного предприятия, имеющего возможность выработки биогаза. Предложена математическая модель, связывающая характеристики системы с объемом биогаза и параметрами источников энергии.

The article is devoted to the use of fuel cells (FC) in power supply systems of agricultural enterprises. The comparative analysis of fuel cells different types is carried out, the device and advantages of solid oxide fuel cells (SOFC) are considered. A block diagram of SOFC integration into the power supply system of an agricultural enterprise that has the ability to produce biogas is presented. A mathematical model describing the system characteristics with the volume of biogas and the parameters of energy sources is proposed.

**Ключевые слова:** график нагрузки, математическая модель, твердооксидный топливный элемент, энергоудаленный потребитель, энергоэффективность.

**Key words:** energy efficiency, energy-removed consumer, load graph, mathematical model, solid oxide fuel cell.

Важные задачи государственных программ перспективного развития энергетики России связаны с внедрением и расширением использования нетрадиционных и возобновляемых источников энергии [1-4]. Актуальным направлением в этой сфере является применение биогаза для последующей выработки электрической и тепловой энергии. В качестве сырья для получения биогаза могут быть использованы побочные производственные продукты сельскохозяйственных предприятий (СХП) – навоз, древесные паллеты, щепа, лузги, брикеты и др. При этом актуальным является повышение эффективности преобразования биогаза в энергию.

Современные технологии получения энергии из биогаза связаны с использованием когенерационных энергоустановок на топливных элементах [5]. Преимуществами топливных элементов (ТЭ) являются высокий КПД (по сравнению с традиционными газопоршневыми и газотурбинными установками), экологичность (минимальная концентрация вредных выбросов в атмосферу ввиду отсутствия процесса горения), возможность использования топлива без предварительной специальной подготовки.

Однако, несмотря на преимущества, примеры внедрения ТЭ в системы электроснабжения СХП практически отсутствуют, что связано с рядом технических, экономических и нормативных барьеров.

### Анализ типов топливных элементов

Различают твердополимерные топливные элементы (ТПТЭ); щелочные топливные элементы (ЩТЭ); фосфорно-кислотные топливные элементы (ФКТЭ); карбонатно-расплавленные топливные элементы (КРТЭ) и твердооксидные топливные элементы (ТОТЭ).

Сравнительный анализ рабочих характеристик различных видов ТЭ представлен в табл. 1 [6].

Наиболее перспективным типом ТЭ для внедрения в системы электроснабжения СХП являются ТОТЭ. Кроме высокого КПД, их важное преимущество заключается в возможности работы на многих видах топлива [7]. Они более устойчивы к загрязнениям топлива и универсальны по отношению к типам используемых горючих газов по сравнению с другими типами ТЭ. В качестве исходного топлива для ТОТЭ может использоваться: природный газ, метан, бутан, пропан, бензин, дизельное топливо, уголь, спирты, древесина, торф, стружка, отходы сельхозпроизводства. В топливном процессоре сырье подвергается конверсии (газификации). В результате образуется водородсодержащий горючий газ, который подается в батарею генератора [8].

**Таблица 1**

**Сравнительный анализ различных видов топливных элементов**

Параметр	ТПТЭ	ЩТЭ	ФКТЭ	КРТЭ	ТОТЭ
Рабочая температура $t$ , °С	80-90 °С	50-200 °С	180-230 °С	600-700 °С	900 – 1000 °С
КПД	45%	40-65%	40-80%	55%	45-80%
Тип используемого топлива	Чистый водород	Чистый водород	Чистый водород	Природный газ	Различные виды углеводородного топлива, без преобразования его в водород

Твердооксидные топливные элементы работают при высокой температуре (700 – 1000 °С) и применяются для стационарных установок мощностью от 1 кВт и выше. Они имеют КПД более 50% по выходу электроэнергии, а при учете теплового выхода – до 90%. При сравнительно невысоком потреблении топлива такая установка может работать без обслуживания до 4 лет.

В России разработкой ТОТЭ занимаются РФЯЦ ВНИИТФ, УрО РАН совместно с ООО «Центр промышленных нанотехнологий», компания «Ин-Энерджи».

### Анализ нормативной базы в области топливных элементов

Российская нормативная база в области нетрадиционных и возобновляемых источников энергии преимущественно включает ГОСТы и стандарты на ветровые и солнечные энергоустановки.

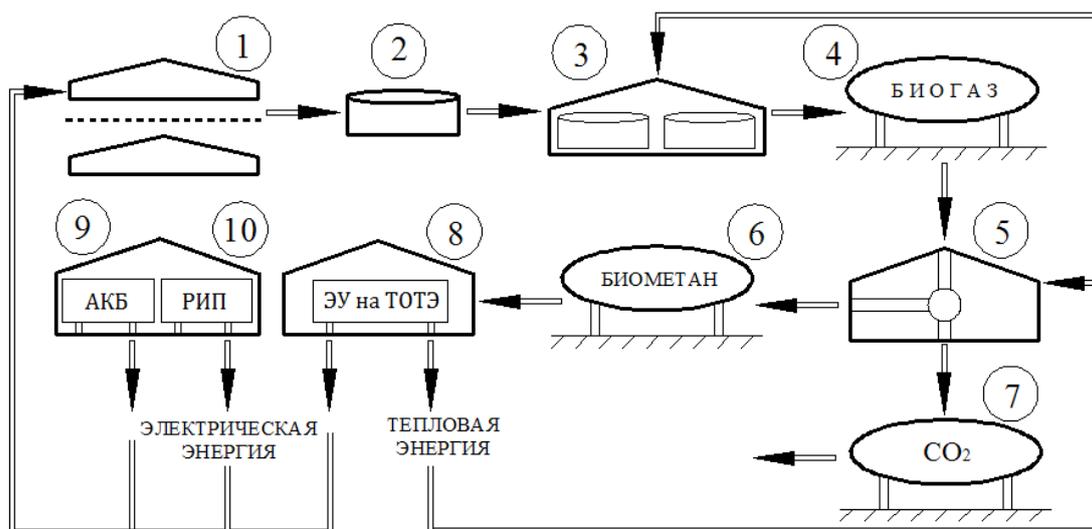
При этом в области ТЭ существует всего несколько общетехнических стандартов, касающихся:

- терминологии;
- классификации;
- первичного топлива для ТЭ;
- дорожных транспортных средств на ТЭ;
- методов испытаний и требований к безопасности.

Отсутствие в России государственных стандартов и нормативных документов по проектированию и применению ТОТЭ является серьезным барьером, препятствующим внедрению этих установок в системы электроснабжения.

### Интеграция топливных элементов в систему электроснабжения

На рис. 1 представлена структурная блок-схема преобразования энергии (от энергии исходной биомассы до электрической и тепловой) на животноводческом СХП, которое вырабатывает биогаз.



**Рис. 1. Структурная блок-схема преобразования энергии на животноводческом СХП:**  
 1 – коровники; 2 – сборник биомассы; 3 – биогазовая установка (метантенки);  
 4 – газгольдер с биогазом; 5 – углекислотная разделительная камера; 6 – газгольдер с биометаном; 7 – газгольдер с CO<sub>2</sub>; 8 – энергоустановка на ТОТЭ; 9 – лаборатория по переработке CO<sub>2</sub>; 10 – система накопления; 11 – газовый электрогенератор (резервный источник питания)

Энергоустановка на ТОТЭ не способна работать по быстроизменяющемуся графику электрической нагрузки, характерному для отечественных СХП малой мощности (до 1 МВт). Данная проблема связана с высокой рабочей температурой ТЭ – требуется значительное время для достижения оптимальных рабочих условий. В результате система медленно реагирует на изменение расхода энергии.

Важной задачей является определение оптимальной структурной схемы (набора источников энергии) системы автономного энергоснабжения предприятия (рис. 1, 8-10) при условии постоянства выработки биогаза на СХП.

### Математическое моделирование системы электроснабжения с энергоустановкой на топливных элементах

Для анализа вариантов интеграции ТОТЭ в систему электроснабжения СХП разработана математическая модель, связывающая характеристики системы с объемом биогаза и параметрами источников (рис. 2).



Рис. 2. Структурная схема математического моделирования системы электроснабжения с энергоустановкой на топливных элементах

Суммарный электрический КПД системы может быть определен по формуле

$$\eta_{\text{сум}} = \eta_{\text{ТОТЭ}} \cdot \frac{P_{\text{ТОТЭ}}}{P_{\text{пик}}} + \eta_{\text{АБ}} \cdot \frac{P_{\text{АБ}}}{P_{\text{пик}}} + \eta_{\text{БГ}} \cdot \frac{P_{\text{БГ}}}{P_{\text{пик}}}, \quad (1)$$

где  $\eta_{\text{ТОТЭ}}$  – номинальный КПД энергоустановки на ТОТЭ (65%);  $\eta_{\text{АБ}}$  – номинальный КПД системы накопления (60%, полученный как КПД ТОТЭ за вычетом электрических потерь в проводниках);  $\eta_{\text{БГ}}$  – номинальный КПД биогазового электрогенератора (30%);  $P_{\text{пик}}$  – пиковая мощность исследуемого предприятия (кВт);  $P_{\text{АБ}}$  – мощность, покрываемая системой накопления (кВт).

Целью будущей работы является исследование различных вариантов построения системы электроснабжения с энергоустановкой на ТОТЭ и обоснование выбора оптимальной схемы.

### Выводы

1. Энергоустановки на ТОТЭ являются перспективным типом энергоустановок для использования в системах электроснабжения СХП, которые нуждаются в утилизации биологических отходов. Важные преимущества

энергоустановок на ТОТЭ: прямое преобразование энергии, отсутствие необходимости в специальной предварительной обработке топлива, экологичность.

2. Однако энергоустановки на ТОТЭ являются низкоманевренными, что создает проблему их использования в системах с изменяющимся суточным графиком нагрузки.

3. Цель будущих исследований - разработка структурных схем интеграции энергоустановки на ТОТЭ в автономную систему электроснабжения СХП и обоснование оптимального сочетания источников при условии постоянства выработки биогаза.

#### Библиографический список

1. **Лоскутов, А.Б.** Проблемы перехода электроэнергетики на цифровые технологии // Интеллектуальная электротехника. – 2018. – № 1. – С. 9-27.
2. Проект «Энергетическая стратегия России на период до 2035 года» (под. ред. от 01.02.2017). – Министерство Энергетики Российской Федерации. [Электронный ресурс]. URL: <https://minenergo.gov.ru/node/1920>
3. Энергоэффективность и развитие энергетики. Государственная программа Российской Федерации. – Постановление Правительства РФ от 15 апреля 2014 года N 321 (под. ред. от 12.01.2018). [Электронный ресурс]. URL: <http://docs.cntd.ru/document/499091759>
4. Энергетическая стратегия России на период до 2030 года. Министерство Энергетики Российской Федерации. - М. - 2009. [Электронный ресурс]. URL: <https://minenergo.gov.ru/node/1026>
5. **Маркеев, Д.С.** Электрохимические генераторы на топливных элементах: последние разработки / Д. С. Маркеев, Д. В. Ростовщикова, Л. Г. Перминова // Молодёжь и наука: Сб. материалов конф. – Красноярск: Сибирский федеральный ун-т. - 2011.
6. Эффективная малая энергетика // Топливные элементы [Электронный ресурс]. URL: <http://www.turbunist.ru/91-jeffektivnaja-malaja-jenergetika-toplivnye.html>
7. Твердооксидные топливные элементы: проблемы, пути решения, перспективы развития и коммерциализации. - М.: Республиканский исследовательский научно-консультационный центр экспертизы. - 2015.
8. Технорама [Электронный ресурс]. URL: <http://technorama.ru/lanthanum-nickel-iron-solid-oxide-fuel-cell.php>

УДК 620.91

А.А. Фролов, Д.А. Павлюченко

**ВЛИЯНИЕ АКТИВНЫХ ПОТРЕБИТЕЛЕЙ С СОБСТВЕННОЙ ГЕНЕРАЦИЕЙ НА РЕЖИМНЫЕ ПАРАМЕТРЫ MICROGRID**

Новосибирский государственный технический университет

Разработана модель распределительной электрической сети MicroGrid в программном комплексе *NEPLAN<sup>®</sup> Electricity*. Проведен анализ влияния собственной генерации активных потребителей на режимные параметры MicroGrid.

A model of the distribution electrical network MicroGrid in the «*NEPLAN<sup>®</sup> Electricity*» software package has been developed. The analysis of the effect of the own generation of active consumers on the operating parameters of the MicroGrid was carried out.

**Ключевые слова:** активный потребитель электроэнергии, управление спросом, микрогрид, распределенная энергетика.

**Key words:** active consumer of electricity, demand response, MicroGrid, distributed energy.

**Концепция активного потребителя в интеллектуальной микросети**

В настоящее время одно из важнейших направлений исследований в области энергетики концентрируется на вопросах расширения использования новых технологий выработки и распределения электрической энергии, создании интеллектуальных сетей *SmartGrid* и микросетей (*MicroGrid*) с распределенной генерацией.

Микросеть (*MicroGrid*) – это небольшая локальная энергетическая система, которая с помощью электрической и информационно-коммуникационной сети объединяет источники распределенной генерации, устройства накопления электрической энергии и потребителей. Микросеть может работать как параллельно с централизованной энергосистемой, так и полностью в автономном режиме [2].

Ключевую роль в интеллектуальной микросети играют так называемые «активные» потребители, обладающие технологической возможностью по управлению своим энергопотреблением и готовые к участию в программах по управлению спросом на электроэнергию (*Demand Response*) [1].

Особенность активных потребителей в интеллектуальной микросети заключается в их заинтересованности в контроле и управлении своей нагрузкой за счет более грамотного управления режимами. Кроме того, в задачи активного потребителя входит управление собственной генерацией: определение степени ее загрузки, объема собственного потребления от нее и объема электроэнергии, поставляемой на продажу в *MicroGrid* (при технической возможности).

Традиционно в электроэнергетике поддержание баланса мощности с целью обеспечения надежного энергоснабжения осуществляется с использованием ресурсов генерации: содержание необходимого объема резервирующей мощности, покрытие пикового спроса за счет загрузки пиковых электростанций (ГЭС, ГАЭС, ТЭС).

При переходе к интеллектуальной энергетике обеспечение балансирования мощности осуществляется за счет реализации свойства «активности» потребителя.

### **Анализ влияния активных потребителей с собственной генерацией на режимы *MicroGrid***

Внедрение локальных источников энергии в распределительную сеть *MicroGrid* оказывает влияние на параметры ее режима работы. В частности, при установке генераторов возможно увеличение значений и/или изменение направлений потоков мощности в линиях, изменение значений напряжений в узлах, увеличение электрических потерь и т.д.

В качестве объекта исследования рассматривался отдаленный промышленный поселок с жилым сектором. Электроснабжение поселка обеспечивается использованием собственных источников электроэнергии. Связь с объединенной энергосистемой отсутствует. Основным источником электроэнергии является дизельная электростанция (ДЭС) с установленной мощностью 5,9 МВт. Кроме ДЭС, электроснабжение поселка обеспечивают две малых ГЭС: МГЭС-1 и МГЭС-2.

Суммарная установленная мощность электростанций поселка составляет 7,6 МВт. Установленная мощность резервных дизельных генераторов крупных промышленных предприятий составляет 4,1 МВт. Ввод резервных мощностей дизельных генераторов производится в случае возникновения аварийной ситуации для обеспечения непрерывного производства крупных предприятий.

К 2025 г. ожидается рост максимума нагрузки электрической сети на 67% относительно отчетной величины 2018 г. (табл. 1). Прирост нагрузки обусловлен вводом в эксплуатацию нового завода, увеличением потребления мощности существующими предприятиями и строительством ряда жилых и общественных зданий.

*Таблица 1*

#### **Прогноз максимума нагрузки на перспективу до 2025 г.**

Наименование	Отчет	Прогнозный период						
	2018 г.	2019 г.	2020 г.	2021 г.	2022 г.	2023 г.	2024 г.	2025 г.
Максимум нагрузки, кВт	3800,0	4726,4	5677,8	5739,6	5904,1	6261,5	6345,9	6345,9

Ввиду небольшой электрической сети, объединяющей источники распределенной генерации, а также наличия потребителей с собственной генерацией

данную электрическую сеть можно рассматривать как *MicroGrid* с активными потребителями электроэнергии.

Распределительная сеть поселка сформирована на напряжении 6 кВ. ЛЭП 6 кВ обеспечивает связь двадцати девяти подстанций 6/0,4 кВ. Распределительное устройство РУ-6 кВ ДЭС является центром питания сети 6 кВ. Распределительная сеть 6 кВ выполнена по кольцевой схеме, работающей в нормальном режиме по схеме разомкнутого кольца. От РУ-6 кВ ДЭС отходят два фидера ЛЭП производственная и ЛЭП городская. ЛЭП 6 кВ выполнены одноцепными воздушными и кабельными линиями.

Расчетная модель распределительной сети *MicroGrid*, выполненная по исходным данным, представлена на рис. 1. Разработка модели велась в программном комплексе *NEPLAN Electricity* [3].

Были проведены расчеты системы электроснабжения для режимов:

- 1) максимальной нагрузки *MicroGrid* на 2018 г.;
- 2) максимальной нагрузки *MicroGrid* на перспективу до 2025 г.;
- 3) максимальной нагрузки *MicroGrid* на перспективу до 2025 г. с учетом генерации активных потребителей.

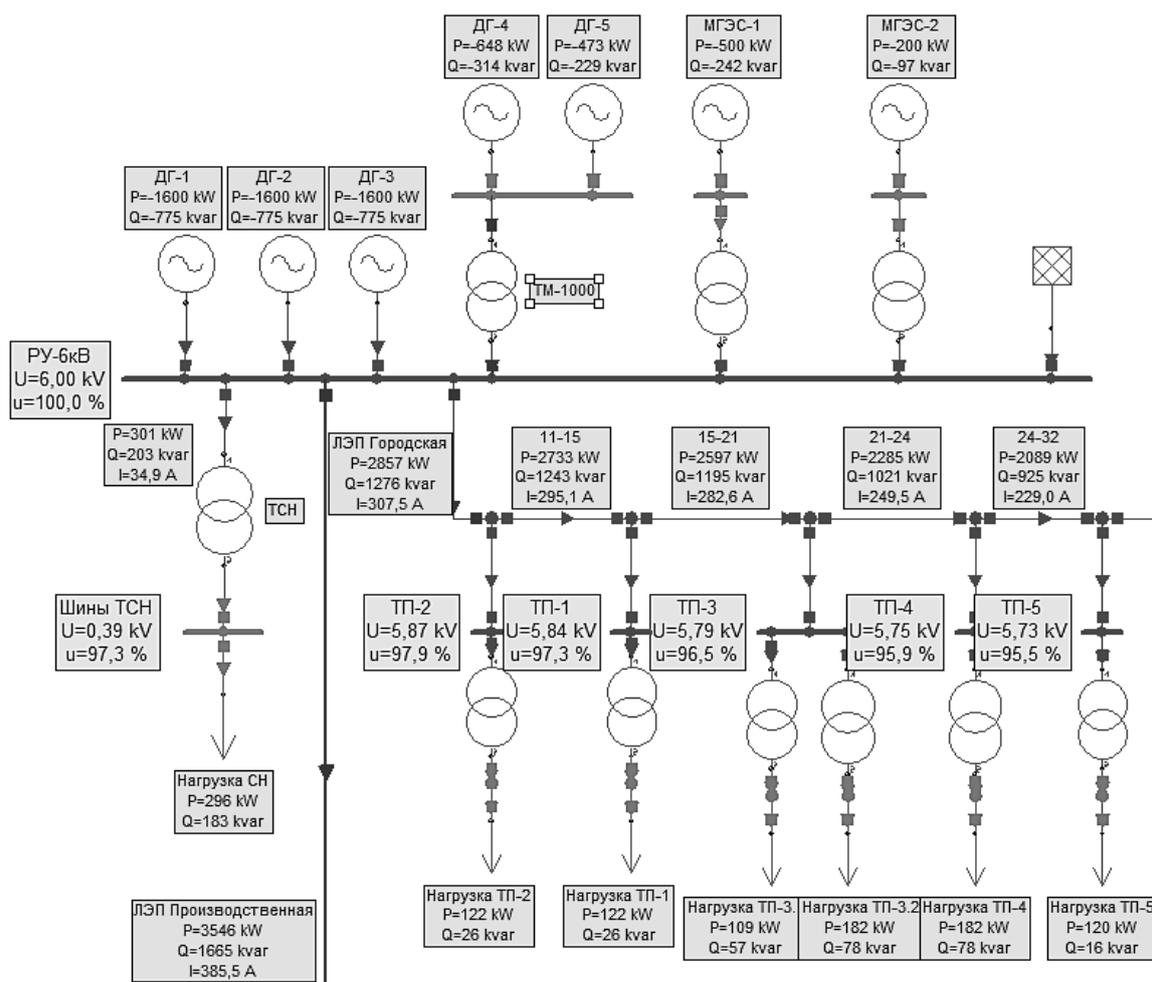


Рис. 1. Фрагмент модели распределительной сети *MicroGrid* в программном комплексе *NEPLAN Electricity*

По результатам расчета 1 потери в элементах сети *MicroGrid* в максимальном режиме составили 140 кВт, то есть составляет 4% от всей вырабатываемой мощности. Потери напряжения в узлах электрической сети 6 кВ не превышают 4,1% от номинального в течение 100% времени интервала в одну неделю, согласно ГОСТ 32144-2013 [4]. Резерв мощности в сети оценивается в 2150 кВт или 56,6% от максимальной нагрузки (достаточный для надежной работы *MicroGrid*).

Расчет 2 показал, что при увеличении нагрузки до 6345,9 кВт, потери активной энергии в сети 6 кВ составили 422 кВт или 6,4% от всей вырабатываемой мощности. Дефицит активной мощности *MicroGrid* составляет 220 кВт. Наибольшее отклонение напряжения в электрической сети 6 кВ на шинах ТП-13 составляет 7,6% от номинального.

Расчет 2 также показывает, что для данного режима имеются перегруженные элементы (рис. 2):

- трансформатор ТМ-1000 на РУ-6кВ – перегрузка на 24,5% по мощности;
- ЛЭП городская – перезагрузка на 24% по длительно допустимому току;
- ЛЭП производственная – перезагрузка на 17% по длительно допустимому току.

От	До	Р потери	Q потери	Р имп	Q имп	Р ген	Q ген	Р нагр	Q нагр
Область/Зо	Област	kW	kVar	kW	kVar	kW	kVar	kW	kVar
Сеть		421,75	820,49	222,35	197,59	6843,35	3404,29	6421,6	2583,8
Зона 1		421,75	820,49	0	0	6843,35	3404,29	6421,6	2583,8
Область 1		421,75	820,49	0	0	6843,35	3404,29	6421,6	2583,8
Уп		Потери акт. мощности по линии	Потери реакт. мощности по линии	Потери акт. мощности на трансформаторе	Потери реакт. мощности на трансформаторе				
kV		kW	kVar	kW	kVar				
6		324,35	296,62	97,39	523,87				
Перегрузки									
Элементы	%	Тип							
ТМ-1000	124,56	2-обм. Трансф							
ЛЭП Городс	124,01	Линия							
ЛЭП Произв	116,81	Линия							
12-16	104,98	Линия							
ID	Узел	U	u	Угол U	Р нагр	Q нагр	Р ген	Q ген	Qшунта
	Имя	kV	%	°	kW	kVar	kW	kVar	kVar
1229790621	ТП-17	5,813	96,88	-0,7	0	0	0	0	0
1229790615	ТП-28	5,858	97,63	-0,5	0	0	0	0	0
1229790340	ТП-10	5,609	93,49	-1,3	0	0	0	0	0
14	РУ-6кВ	6	100	0	0	0	5022,3	2522,3	0
1229789535	РП МГЭ	0,405	101,35	1	0	0	200	96,9	0
1229790633	ТП-27	5,725	95,42	-1,1	0	0	0	0	0
1229790627	ТП-15	5,788	96,47	-0,9	0	0	0	0	0
1229790920	ТП-19	5,584	93,06	-1	0	0	0	0	0

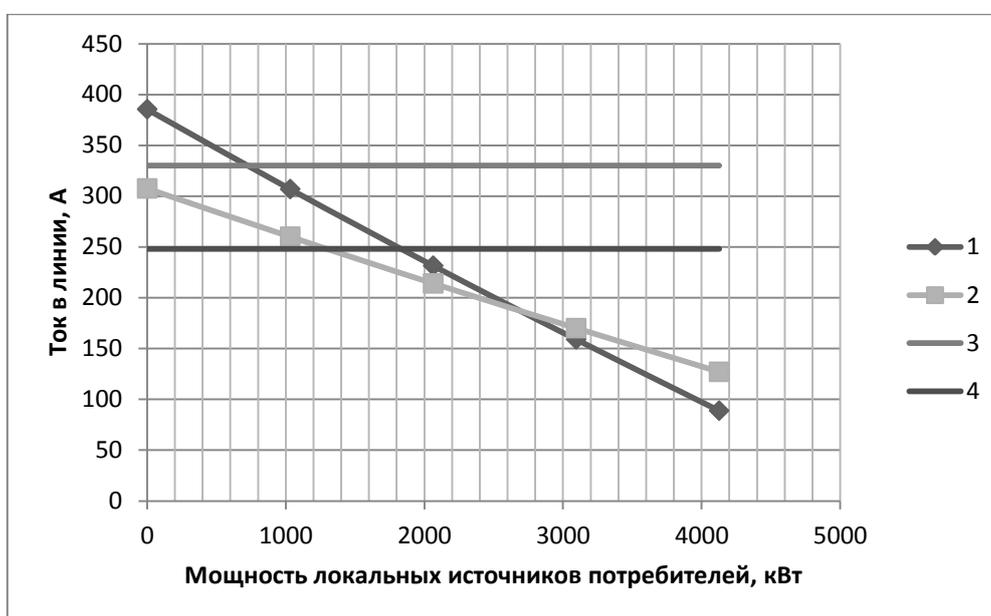
Рис. 2. Результаты расчета в табличном виде

Данный режим недопустим для работы *MicroGrid* и может создавать аварийную ситуацию из-за перегруженных элементов и отсутствия резерва мощности. Таким образом, установка дополнительных генераторов на шинах

РУ-6кВ не исправит ситуацию с перегрузкой линий. Необходимо переустройство всей сети 6 кВ, что приведет к соответствующим затратам.

Рассмотрим режимы работы сети *MicroGrid*, когда резервные генераторы потребителей работают не только на собственную нагрузку, но и нагрузку других потребителей в сети *MicroGrid*. Таким образом, генераторы потребителей выступают в роли основного источника электроснабжения, а распределительная сеть *MicroGrid* – в роли резервного.

На рис. 3 представлен график зависимости токов в фидерных линиях от мощности локальных источников энергии активных потребителей. Видно, что при увеличении мощности генераторов потребителей, уменьшается загрузка магистральных линий. Минимальная мощность локальных генераторов, необходимая для нормальной работы ЛЭП городская и ЛЭП производственная без перегрузок по допустимому току, составляет 1150 кВт.



**Рис. 3. Зависимость тока в линиях от мощности генераторов активных потребителей:**  
1 – ток в фидере ЛЭП производственная; 2 – ток в фидере ЛЭП городская; 3 – наибольший допустимый ток в фидере ЛЭП производственная; 4 – наибольший допустимый ток в фидере ЛЭП городская

На рис. 4 приведена зависимость суммарных потерь активной мощности распределительной сети *MicroGrid* от мощности локальных источников энергии. Минимум потерь соответствует максимальной мощности локальных генераторов 4,1 МВт, при этом потери в распределительной сети 6 кВ уменьшились в 4 раза. Резерв мощности в распределительной сети составляет 4,2 МВт, то есть 65% от максимальной нагрузки. Очевидно, что дальнейшее увеличение мощности локальных источников не имеет смысла, так как это приведет к перераспределению потоков мощности в сети и увеличению суммарных потерь.

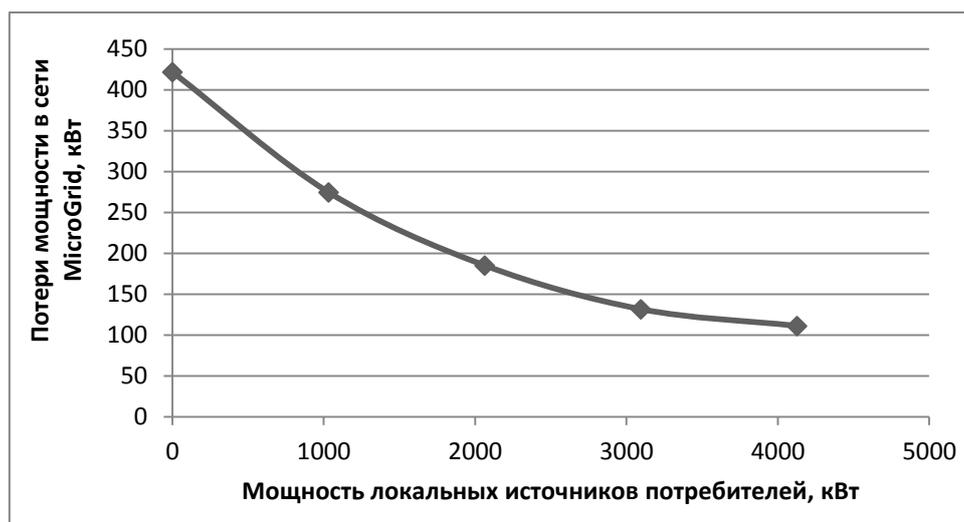


Рис. 4. Зависимость потерь мощности в сети *MicroGrid* от мощности генераторов активных потребителей

На рис. 5 представлен график напряжения на шинах ТП-13 – наиболее удаленной подстанции от центра питания РУ-6кВ ДЭС, в зависимости от мощности генераторов активных потребителей, подключенных к фидеру, питающему данную подстанцию. Напряжение на шинах распределительного устройства ТП-13 при разрешенном отклонении  $\pm 10\%$  от номинального находится в допустимом диапазоне [4].

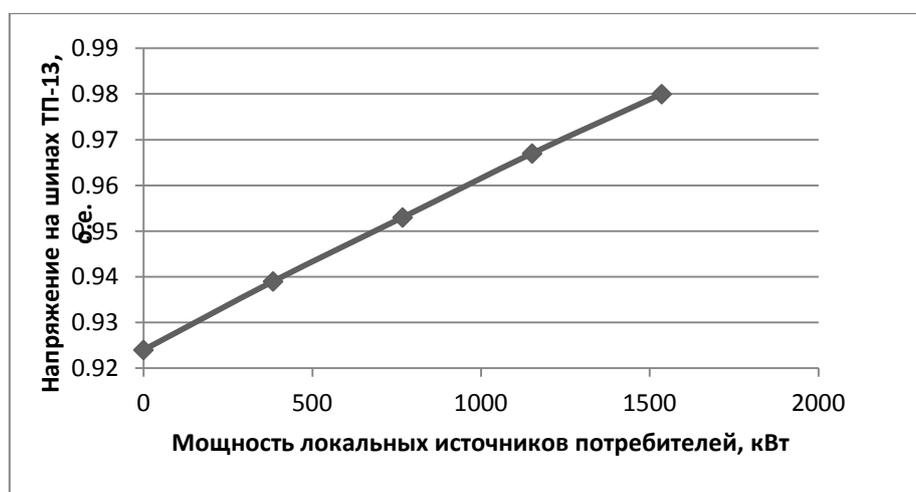


Рис. 5. Зависимость напряжения на шинах ТП-13 от мощности генераторов активных потребителей на ЛЭП городская

### Выводы

Выявлены зависимости потерь мощности, уровней напряжения в узлах и токов в линиях распределительной сети *MicroGrid* от мощности локальных источников энергии активных потребителей. Внедрение локальных источников энергии в *MicroGrid* положительно сказывается на ее работе. Внедрение локальных источников позволяет обеспечить минимальные потери активной

мощности в элементах распределительной сети, уменьшить нагрузку магистральных линий, увеличить резерв мощности путем разгрузки основных генераторов. Однако следует учитывать место подключения и мощность активных потребителей, чтобы это не приводило к перераспределению потоков мощности и увеличению потерь в сети.

#### Библиографический список

1. **Сальникова, Е.А.** Формирование концепции активного потребителя в энергетике: дис. канд. эконом. наук: 08.00.05 / Е.А. Сальникова. – СПб., -2014. – 155 с.
2. **Харченко, В.В.** Положения и принципы формирования генерирующего комплекса микросетей на основе ВИЭ / В.В Харченко, В.А. Гусаров // Вестник аграрной науки Дона. – 2015. – № 4 (32). – С. 70-83.
3. **NEPLAN<sup>®</sup> Company** [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.neplan.ch/>
4. ГОСТ 32144–2013. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. – Введ. 01.07.2014. – М: Стандартиформ, 2014. – С. 1 - 16.

# **АКТУАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКИ**

**ПРОГРАММА РАЗВИТИЯ ОПОРНОГО УНИВЕРСИТЕТА**

Редакторы: О.В.Пугина, Т.В. Третьякова  
Компьютерный набор и вёрстка Е.Н. Бугрова

Подписано в печать 23.07.2019. Формат 60 x 84<sup>1</sup>/<sub>16</sub>.  
Бумага офсетная. Печать офсетная. Усл. печ. л. 17.  
Тираж 100 экз. Заказ

---

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева.  
Типография НГТУ.  
Адрес университета и полиграфического предприятия:  
603950, Нижний Новгород, ул. Минина, 24.