

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ 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 2017

УДК 550.534.524

А 437

А 437 **Актуальные проблемы электроэнергетики:** сб. ст./ Нижегород. гос. техн. ун-т им. Р.Е. Алексеева.–Нижний Новгород, 2017.–212 с.

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 и предназначен для научных и инженерно-технических работников, занимающихся проблемами соответствующих направлений.

В сборник включены материалы III Всероссийской (XXXVI Региональной) научно-технической конференции «Актуальные проблемы электроэнергетики». Конференция проведена в рамках Программы развития опорного университета.

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ:

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

УДК 550.534.524

ISBN 978-5-502-00908-9

© **Нижегородский государственный
технический университет
им. Р.Е. Алексеева, 2017**

СОДЕРЖАНИЕ

Секция 1. ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ ПАРАМЕТРОВ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ.....	5
Чивенков А.И., Вихорев Н.Н., Алёшин Д.А. Регулирование фазового угла напряжения задания.....	5
Дарьенков А.Б., Варыгин И.А. Особенности тепловых режимов двунаправленных ключей матричного преобразователя частоты.....	9
Корнев Н.С., Минеев К.В., Назаров А.В., Османов Р.Р., Титов В.Г. Выбор оптимального источника питания для КВЧ радиоинтерферометрического комплекса.....	13
Рогинская Л.Э., Горбунов А.С. Исследование источника питания для индукционной обработки металлических заготовок.....	16
Багрецов И.В., Соколов В.В., Юрлов М.Е. Транзисторный преобразователь для двухзонного тягового электропривода.....	21
Башев А.А. Об исследовании нелинейной системы на основе модели Вольтерра.....	25
Башев А.А. Применение аппарата мгновенной мощности в электротехнических цепях..	29
Кочеганов Д.М., Абузьяров Т.Х. Широтно-импульсный преобразователь для электропривода малых транспортных средств.....	34
Секция 2. АВТОМАТИЗИРОВАННЫЙ ЭЛЕКТРОПРИВОД.....	39
Дарьенков А.Б., Бычков Е.В., Комраков Д.А., Абузьяров Т.Х., Кочеганов Д.М. Физическая модель электротехнического комплекса гибридной электроустановки.....	39
Дарьенков А.Б., Кочеганов Д.М., Байков А.И., Абузьяров Т.Х. Применение математического моделирования для анализа функционирования ветроканала автономной гибридной электростанции.....	43
Дарьенков А.Б., Самоявчев И.С. Техничко-экономические аспекты рекуперации тепла в окрасочных цехах автозавода «ГАЗ».....	49
Титов В.Г., Серебряков А.В., Стеклов А.С. Математическая модель синхронного генератора при различных значениях сопротивления изоляции.....	55
Титов В.Г., Кобяков Д.С. Цифровой электропривод на базе бесколлекторного двигателя постоянного тока.....	61
Смирнов А.Ю., Зимин А.Ю. Вопросы конструирования и расчёта бесконтактных синхронных двигателей для шагового привода позиционирования регулирующих органов.....	67
Смирнов А.Ю., Зимин А.Ю. Исследование работы одноимённо-полюсной индукторной машины в составе электропривода.....	72
Гордеев Б.А., Охулков С.Н., Плехов А.С., Осмехин А.Н., Мишанов Е.А. Измерение динамической вязкости магнитореологических жидкостей в ротационном вискозиметре частотным методом.....	77
Гордеев Б.А., Охулков С.Н., Плехов А.С., Осмехин А.Н. Влияние девиации частоты отражённого от вибрирующей поверхности ультразвукового сигнала на его спектр.....	88
Федоров О.В. Становление технико-экономического образования студентов ИНЭЛ.....	93
Сугаков В.Г., Варламов Н.С. Цифровое фазосмещающее устройство и его области применения на объектах водного транспорта.....	99
Байков А.И., Жеребцов А.Л., Ковалев Д.В., Кочеганов Д.М. Математическая модель мощного синхронного двигателя с учетом параметров системы электроснабжения.....	104
Коробко Г.И., Шилов М.П. Разработка и моделирование синхронизатора для включения синхронного генератора на параллельную работу с сетью.....	111
Кобяков Д.С. Цифровые системы управления электроприводами.....	117

Секция 3. ЭФФЕКТИВНОСТЬ СИСТЕМ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКИ И ЭКОНОМИЯ ЭНЕРГОРЕСУРСОВ.....	122
Лоскутов А.Б., Лоскутов А.А., Зырин Д.В., Толчин П.А. Анализ методов расчета зон защиты от прямого удара молнии промышленных зданий и сооружений.....	122
Лоскутов А.Б., Лоскутов А.А., Зырин Д.В., Демидова А.С. Моделирование режимов работы распределительной сети с различными источниками распределенной генерации.....	128
Соснина Е.Н., Асабин А.А., Кралин А.А., Крюков Е.В. Тиристорный регулятор величины и фазы вольтодобавочного напряжения в распределительных электрических сетях 6-10 кВ.....	132
Соснина Е.Н., Шалухо А.В., Кечкин А.Ю., Шумский Н.В. Разработка лабораторного стенда для изучения режимов функционирования виртуальной электростанции.....	137
Соснина Е.Н., Веселов Л.Е. Энергоэффективная система генерирования электроэнергии на основе ТОТЭ.....	144
Куликов А.Л., Вуколов В.Ю., Колесников А.А. Анализ методов реализации централизованных дифференциальных защит электрических сетей.....	149
Осокин В.Л., Папков Б.В. Оценка надёжности объектов электроэнергетики на основе теории нечётких множеств.....	154
Шиханов И.С., Карпов А.С., Ярошевич В.В. Особенности работы платформы labview в высоковольтной электроэнергетике.....	160
Грачева Е.И., Шагидуллин А.В. Оценка эффективности мероприятий по снижению электропотребления на промышленных предприятиях.....	164
Рогинская Л.Э., Гусаков Д.В. Электромагнитные параметры трехфазного трансформатора с витым магнитопроводом.....	169
Кралин А.А., Крюков Е.В. Моделирование фазоповоротного устройства с продольным и поперечным регулированием в Matlab Simulink.....	175
Севостьянов А.А., Маслова Н.С. Анализ динамики изменения потерь электрической энергии и мероприятий по их снижению.....	180
Гардин А.И., Логачев А.Е. Универсальный лабораторный стенд «Автоматизированные системы контроля и учета электроэнергии».....	185
Гардин А.И., Савельев И.А. Исследование работы фазоповоротных устройств в электрических сетях среднего напряжения.....	191
Гардин А.И., Савельев И.А. Универсальный лабораторный стенд «Учет электрической энергии».....	196
Шагидуллин А.В. Зоны учета-неучета сопротивлений контактных соединений низковольтных коммутационных аппаратов.....	201
Сидорова А.В., Семенов Д.А. Определение Р-фактора математическим методом.....	206

Секция 1. ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ ПАРАМЕТРОВ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ

УДК 621.314

А.И. Чивенков, Н.Н. Вихорев, Д.А. Алёшин

РЕГУЛИРОВАНИЕ ФАЗОВОГО УГЛА НАПРЯЖЕНИЯ ЗАДАНИЯ

Нижегородский государственный технический университет им Р.Е. Алексеева

Статья посвящена разработке схемотехнических решений построения модуля регулирования фазового угла напряжения задания систем управления преобразователями параметров электрической энергии, обеспечивающих расширение их функциональных возможностей.

The article is devoted to the development of technical solutions to build a module control phase angle of the voltage set control systems of converters of electric energy parameters that expand their functionality.

Ключевые слова: синхронизация, регулирование, фазовый угол, напряжение задания.
Key words: synchronization, regulation, phase angle, voltage assignments.

Современные тенденции развития силовых полупроводниковых приборов и микропроцессорной техники позволяют значительно расширить функциональные возможности преобразовательных устройств в системах электроснабжения. Установки регулирования параметров напряжения в электрических сетях, потоков мощности, компенсации реактивных токов, высших гармонических составляющих могут быть сформированы в едином схемотехническом решении - преобразователь переменного напряжения с промежуточным звеном постоянного тока.

Входные цепи питания формируются как активный выпрямитель с регулируемой величиной и фазовым углом потребляемого тока. Емкостной накопитель звена постоянного тока – с функцией стабилизации напряжения на конденсаторах в заданном диапазоне напряжений. Выходной преобразователь – инвертор напряжений. Для обеспечения рабочих функций активного выпрямителя и инвертора требуется синхронизация потребляемых токов и выходных напряжений с параметрами напряжений питающих сетей. Причём преобразователь параметров переменных напряжений должен быть реверсируемый по отношению к направлению передаваемого потока мощности.

Материалы данной статьи посвящены разработке схемотехнического решения модуля регулирования фазового угла и амплитуды задающего напряжения системы управления транзисторами преобразователя (как активного выпрямителя, так и инвертора), синхронизированных с напряжениями питающих сетей.

Устройство для регулирования фазового угла импульсов управления, подаваемых на ключевой регулирующий элемент преобразователя, и его принцип работы известны [1]. Если в цепь, состоящую из последовательно соединенных активного резистора R и конденсатора C , приложить переменное синусоидальное напряжение с амплитудой U , то его составляющие U_R и U_C также будут находиться в квадратуре (рис. 1). При изменении одновременно или отдельно величин R и C векторы U_R и U_C также будут изменяться по величине, но угол между ними всегда будет оставаться равным 90° . Это означает, что точка A перемещается по полуокружности, опирающейся на диаметр, равный U . Величина отрезка OA при любом соотношении R и C остается неизменной, а фазовый угол можно регулировать от 0 до 180° .

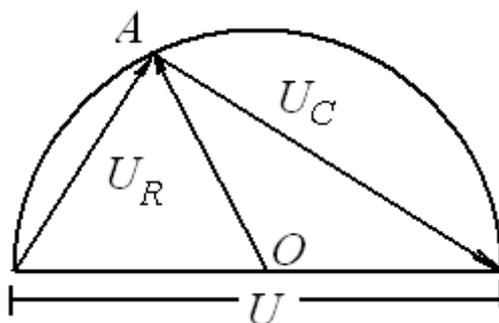


Рис. 1. Диаграмма регулирования фазового угла напряжения

Одной из востребованных функций преобразователя параметров напряжений, установленных в сетях электроснабжения, является возможность ограничения токов короткого замыкания в линии электропередач, для реализации которой требуется введение дополнительной ЭДС с вектором напряжения, направленным встречно вектору ЭДС сети как с опережающим, так и с отстающим фазовым углом.

Следовательно, требуется модуль, позволяющий регулировать фазовый угол задающего напряжения в диапазоне ± 180 эл. градусов. Использование пропорционального инвертирующего усилителя с подключенной на входе RC цепью позволяет сформировать на выходе операционного усилителя амплитудонезависимый сигнал с заданным фазовым углом. [2] С целью обеспечения автоматизации регулирования в RC цепи с регулируемыми параметрами, резистор заменён на полевой транзистор. Предлагаемое схемотехническое решение фазорегулятора (блок 1) представлено на рис. 2.

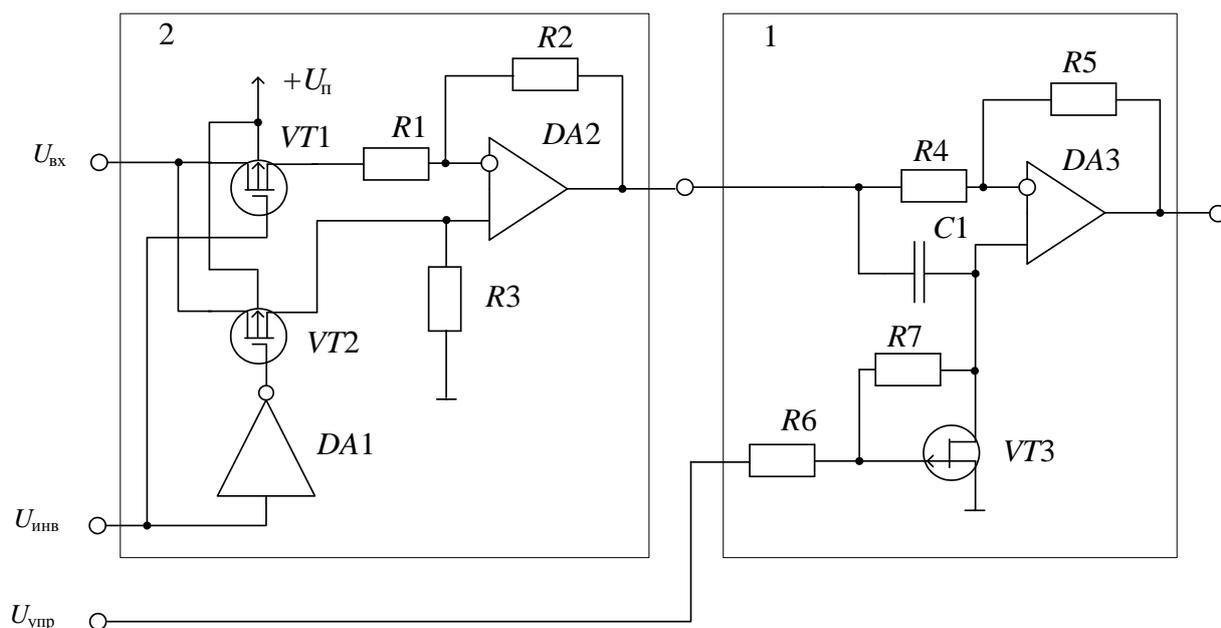


Рис. 2. Модуль регулирования фазового угла задающего напряжения

Блок 1 регулирования фазового угла выполнен на операционном усилителе $DA3$. Регулирование фазового сдвига входного напряжения производится путем изменения уровня напряжения управления $U_{упр}$, прикладываемого к затвору полевого транзистора $VT3$, включенного последовательно с конденсатором $C1$ во входной цепи усилителя. При этом независимость коэффициента передачи напряжения по амплитуде от параметров цепи регулирования фазового угла сдвига обеспечивается наличием отрицательной обратной связи $DA3$. Блок обеспечивает фазовый угол сдвига выходного напряжения по отношению к входному в диапазоне 0-180 эл. градусов в сторону отставания с учётом инверсии.

Чтобы обеспечить регулирование фазового угла сдвига в сторону опережения, необходимо предварительно проинвертировать входное напряжение. Блок 2 предназначен для обеспечения прямой или инверсной передачи входного напряжения на вход блока 1 регулирования фазового угла. Управление прямой или инверсной передачей осуществляется за счёт переключения транзисторных ключей $VT1$, $VT2$ на входе операционного усилителя $DA2$, работающего в режимах инвертирующего усилителя с коэффициентом передачи равным 1, либо в режиме повторителя напряжения. Если $VT1$ находится в открытом состоянии, а $VT2$ закрыт, то блок 2 обеспечивает инверсную передачу напряжения. При обратном состоянии ключей осуществляется прямая передача напряжения.

Для управления характером передачи входного напряжения предназначен дополнительный вход $U_{инв}$, причем на затворы обоих полевых транзисторов подаются взаимноинверсные логические сигналы управления «0» и «1» посредством инвертора $DA1$.

На вход модуля регулирования фазового угла задающего напряжения подаётся напряжение, пропорциональное напряжению питающей сети, величина которого может быть изменена при помощи простейшего делителя с переменным резистором.

Таким образом, напряжение питающей сети является опорным, за счёт чего обеспечивается синхронизация работы преобразовательного устройства с сетью, а модуль регулирования фазового угла позволяет реализовать полный диапазон регулирования ± 180 эл. градусов опорного напряжения и расширяет область применения устройств преобразования параметров напряжения.

Библиографический список

1. **Кушнир, Ф.В.** Электрорадиоизмерения / Ф.В. Кушнир. – Л.: Энергоатомиздат, 1983. – 258 с.
2. **Горошков, Б.И.** Радиоэлектронные устройства: справочник / Б.И. Горошков. – М.: Радио и связь, 1984. – 201 с.

УДК 621.314

А.Б. Дарьенков, И.А. Варьгин

ОСОБЕННОСТИ ТЕПЛОВЫХ РЕЖИМОВ ДВУНАПРАВЛЕННЫХ КЛЮЧЕЙ МАТРИЧНОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ ЧАСТОТЫ

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Рассмотрены особенности процесса термоциклирования в двунаправленных ключах однокаскадного матричного преобразователя частоты. Показано, что температура двунаправленных ключей зависит от частоты напряжения питания и выходного напряжения преобразователя, а наихудший с точки зрения нагрева режим имеет место при частоте выходного напряжения, равной частоте напряжения питания.

The article describes the features of thermal process in the bi-directional switches of a single-stage matrix converter. It is shown that the temperature of bidirectional switches is a function of the input and output frequency of the converter. In general, the worst operating condition occurs when the output frequency is equal to the input frequency.

Ключевые слова: матричный преобразователь частоты, двунаправленный ключ, тепловой режим.

Key words: matrix converter, bidirectional switch, thermal process.

Матричный преобразователь частоты (МПЧ) [1] относится к группе непосредственных преобразователей частоты (НПЧ), главной особенностью которых является отсутствие звена постоянного тока [2,3]. Основой силовой части МПЧ является двунаправленный ключ (ДК) [4], как правило, выполненный на основе двух *IGBT*-транзисторов, связанных эмиттерами. Исследование тепловых процессов в ДК и нахождение зависимости между температурой и параметрами выходного напряжения МПЧ и тока нагрузки позволяет определить как максимальную выходную мощность МПЧ, так и область безопасной работы преобразователя.

На рис.1 приведены диаграммы процессов термоциклирования ДК МПЧ при $f_{\text{вых}}=5, 30, 45$ и 50 Гц, полученные с использованием тепловой модели *IGBT*, аналогичной представленной в [5]. Как видно из рис.1, при $f_{\text{вых}} \neq 50$ Гц имеет место циклический равномерный нагрев ДК. Подобный эффект наблюдается при всех $f_{\text{вых}} \neq n \cdot f_{\text{вх}}$, где n – целое число. При $f_{\text{вых}}=50$ Гц, напротив, имеет место неравномерный нагрев ДК. Фактически, когда частота выходного напряжения МПЧ равна частоте напряжения питания, выходной ток не распределен равномерно между ДК. Распределение выходного тока МПЧ между его ДК зависит от угла смещения между векторами входного и выходного напряжения и коэффициента мощности нагрузки [6].

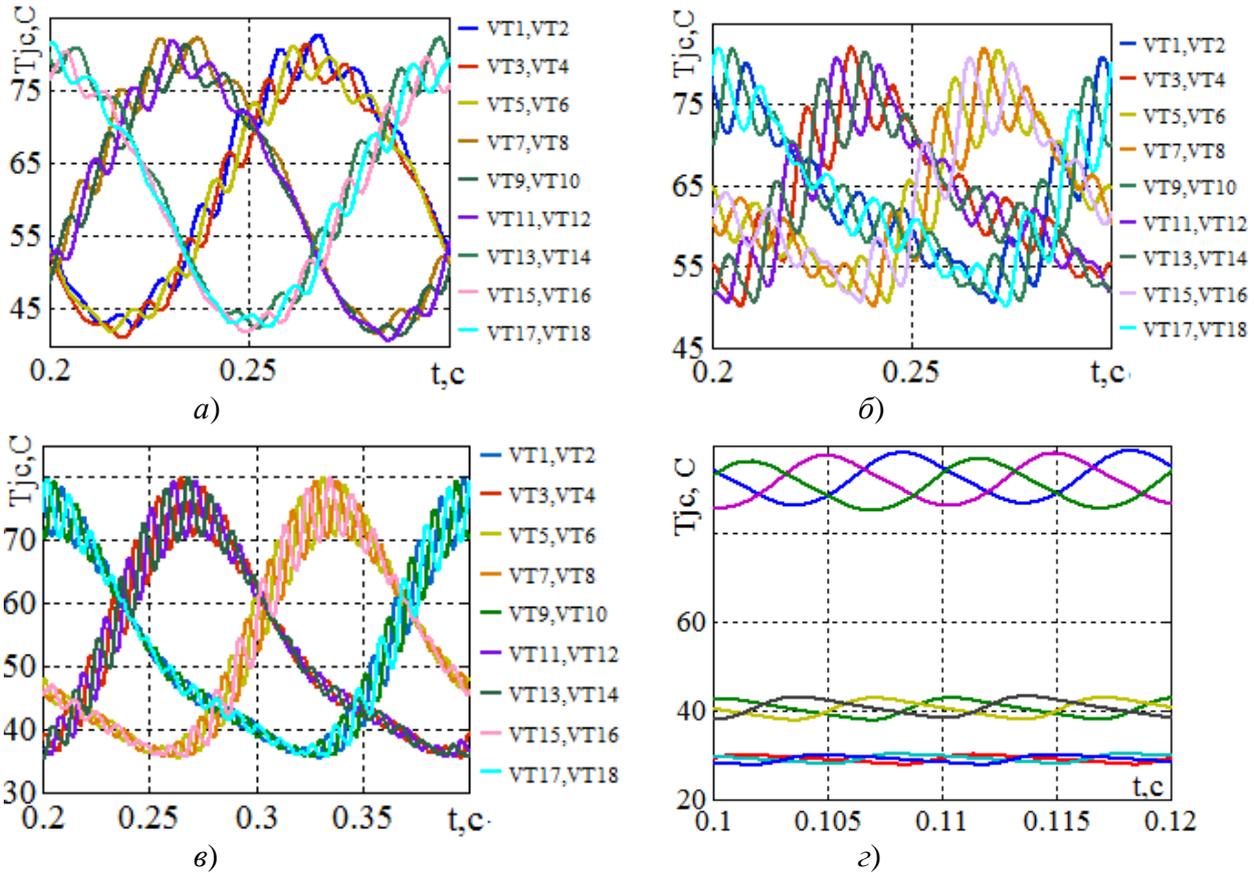


Рис. 1. Диаграммы процесса термоциклирования ДК МПЧ:

a - $f_{\text{вых}}=5$ Гц; *б* - $f_{\text{вых}}=30$ Гц; *в* - $f_{\text{вых}}=45$ Гц; *г* - $f_{\text{вых}}=50$ Гц

Покажем, что режим работы МПЧ с $f_{\text{вых}}=f_{\text{вх}}$ является наихудшим с точки зрения нагрева ДК.

При работе МПЧ в установившемся режиме с заданным коэффициентом передачи напряжения q , потери энергии P одного ДК на периоде переключения T_S зависят от фазы входного и выходного напряжения МПЧ $\varphi_{\text{вх}}$ и $\varphi_{\text{вых}}$ соответственно, т.е. P является периодической функцией с периодом 2π как по $\varphi_{\text{вх}}$, так и по $\varphi_{\text{вых}}$, т.е.:

$$P(\varphi_{\text{вх}}, \varphi_{\text{вых}}) = P(\varphi_{\text{вых}} + 2\pi, \varphi_{\text{вых}}) = P(\varphi_{\text{вх}}, \varphi_{\text{вх}} + 2\pi) \quad (1)$$

при всех $-\infty < \varphi_{\text{вх}}, \varphi_{\text{вых}} < \infty$.

Разложение функции двух переменных в тригонометрический ряд Фурье в комплексной форме даст следующий результат [7,8]:

$$P(\varphi_{\text{вх}}, \varphi_{\text{вых}}) = \sum_{n=0}^{+\infty} \sum_{m=-\infty}^{+\infty} P_{n,m} i^{(n\varphi_{\text{вх}} + m\varphi_{\text{вых}})}. \quad (2)$$

В установившемся режиме $\varphi_{\text{вх}} = \omega_{\text{вх}}t$, $\varphi_{\text{вых}} = \omega_{\text{вых}}t$. Также учитывая, что температура перехода ДК МПЧ может быть найдена через тепловую модель *IGBT*, передаточная функция которой аналогична передаточной функции фильтра нижних частот, можно получить аналитическое выражение температуры перехода ДК МПЧ:

$$J(t) = \sum_{n=0}^{+\infty} \sum_{m=-\infty}^{+\infty} P_{n,m} H(n\omega_{\text{ВХ}} - m\omega_{\text{ВЫХ}}) e^{i(n\omega_{\text{ВХ}} + m\omega_{\text{ВЫХ}})t}. \quad (3)$$

Следует отметить, что амплитуда гармоник $P(t)$ уменьшается пропорционально произведению индексов n и m . Вследствие этого с достаточным приближением можно представить $\mathfrak{Y}(t)$ в виде суммы с конечным числом членов, пользуясь формулой Эйлера $e^{i\varphi} = \cos\varphi + i\sin\varphi$, а также учитывая, что функция $\mathfrak{Y}(t)$ четна по каждому из аргументов [7]:

$$\begin{aligned} J(t) = & P_0 H(0) + 2P_{0,1} H(\omega_{\text{ВЫХ}}) \cos(\omega_{\text{ВЫХ}} t + \varphi_{0,1}) + \dots \\ & \dots + P_{1,-1} H(\omega_{\text{ВХ}} - \omega_{\text{ВЫХ}}) \cos((\omega_{\text{ВХ}} - \omega_{\text{ВЫХ}})t + \varphi_{1,-1}) + \dots \\ & \dots + P_{1,-2} H(\omega_{\text{ВХ}} - 2\omega_{\text{ВЫХ}}) \cos((\omega_{\text{ВХ}} - 2\omega_{\text{ВЫХ}})t + \varphi_{1,-2}) + \dots \\ & \dots + P_{2,-1} H(2\omega_{\text{ВХ}} - \omega_{\text{ВЫХ}}) \cos((2\omega_{\text{ВХ}} - \omega_{\text{ВЫХ}})t + \varphi_{2,-1}). \end{aligned} \quad (4)$$

Из (4) можно получить приближенную оценку максимальной температуры перехода ДК:

$$\begin{aligned} J(t) = & P_0 H(0) + 2P_{0,1} H(\omega_{\text{ВЫХ}}) + P_{1,-1} H(\omega_{\text{ВХ}} - \omega_{\text{ВЫХ}}) + \dots \\ & \dots + P_{1,-2} H(\omega_{\text{ВХ}} - 2\omega_{\text{ВЫХ}}) + P_{2,-1} H(2\omega_{\text{ВХ}} - \omega_{\text{ВЫХ}}). \end{aligned} \quad (5)$$

Как видно из (5), максимальная температура перехода является функцией выходной частоты. Чтобы определить значения $\omega_{\text{ВЫХ}}$, которые предполагают относительный максимум, необходима производная от (5):

$$\begin{aligned} \frac{dJ(t)}{d\omega_{\text{О}}} = & \frac{\tau^2}{R_{jc}^2} \left[2P_{0,1} H^3(\omega_{\text{ВЫХ}})(-\omega_{\text{ВЫХ}}) + P_{1,-1} H^3(\omega_{\text{ВХ}} - \omega_{\text{ВЫХ}})(\omega_{\text{ВХ}} - \omega_{\text{ВЫХ}}) + \dots \right. \\ & \left. \dots + 2P_{1,-2} H^3(\omega_i - 2\omega_{\text{О}})(\omega_i - 2\omega_{\text{О}}) + 2P_{2,-1} H^3(2\omega_i - \omega_{\text{О}})(2\omega_i - \omega_{\text{О}}) \right]. \end{aligned} \quad (6)$$

Следует отметить, что при $\omega_{\text{ВЫХ}} = \omega_{\text{ВХ}}$ значение $J(t)$ в (6) в наибольшей степени определяется

$$H^3(\omega_{\text{ВХ}} - \omega_{\text{ВЫХ}})(\omega_{\text{ВХ}} - \omega_{\text{ВЫХ}}),$$

тогда как другие члены уравнения (6) достаточно малы, чтобы ими можно было пренебречь. Как следствие, равенство $\omega_{\text{ВЫХ}} = \omega_{\text{ВХ}}$ можно рассматривать как приближенное решение уравнения (6), соответствующее относительному максимуму (5). Аналогичным образом могут быть найдены решения $\omega_{\text{ВЫХ}} = 2\omega_{\text{ВХ}}$ и $\omega_{\text{ВЫХ}} = \omega_{\text{ВХ}}/2$.

Таким образом, в общем случае токовая нагрузка на ДК МПЧ распределена равномерно, что является бесспорным преимуществом МПЧ над преобразователями частоты со звеном постоянного напряжения, особенно при низких $f_{\text{ВЫХ}}$ (<20 Гц). В то же время, наибольший нагрев ДК претерпевает при частотах выходного напряжения МПЧ, равных 25, 50 и 100 Гц. Наихудший с точки зрения нагрева ДК режим наблюдается в случае $f_{\text{ВЫХ}} = f_{\text{ВХ}}$. Вследствие этого возникает необходимость снижения максимально допустимой токовой нагрузки на ДК,

и, как следствие, снижение максимального значения мощности, передаваемой через МПЧ в нагрузку при указанных значениях выходных частот МПЧ.

Библиографический список

1. **Сидоров, С.Н.** Матричный преобразователь частоты - объект скалярного управления // Силовая электроника. 2009. №3.
2. **Кондаков, Л.А.** Матричные преобразователи частоты / Л.А. Кондаков, А.А. Щукин // Журнал «ИСУП». 2013. № 1(43).
3. **Морозов, А.И.** Разработка матричного преобразователя частоты / А.И. Морозов, В.К. Барсуков, В.А. Морозов // Интеллектуальные системы в производстве. 2013. № 2 (22). С. 202-207.
4. **Климов, В.** Двухнаправленные ключи в матричных структурах преобразователей частоты переменного тока / В. Климов, С. Климова // Силовая электроника. 2008. №4. С. 58-61.
5. **Кириенко, В.П.** Моделирование тепловых процессов в зарядных устройствах импульсных источников электропитания / В.П. Кириенко, В.В. Ваняев, Е.А. Копелович, С.В. Ваняев // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. 2006. С. 17-25.
6. **Арап, М.** An Approach to the Analysis on Efficiency and Device Control Power Loss Distribution for Matrix Converters / М. Арап [et al.] // in Proceedings of EPE Conference, 2003, ISBN: 90-75815-07-7, no. 509, P. 1-8.
7. **Будак, Б.М.** Фомин С.В. Кратные интегралы и ряды: учеб. / Б.М. Будак. – 3-е изд. – М.: ФИЗМАЛИТ, 2002. – 512 с. – (Курс высшей математики и математической физики. Вып.8).
8. **Фихтенгольц, Г.М.** Курс дифференциального и интегрального исчисления / Г.М. Фихтенгольц. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2001. Т. 3. – 662 с.

УДК 621.314

Н.С. Корнев¹, К.В. Минеев¹, А.В. Назаров¹, Р.Р. Османов¹, В.Г. Титов²**ВЫБОР ОПТИМАЛЬНОГО ИСТОЧНИКА ПИТАНИЯ ДЛЯ КВЧ РАДИОИНТЕРФЕРОМЕТРИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА**ФГУП «ФНПЦ НИИИС им. Ю.Е. Седакова»¹,Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева²

Рассматривается возможность разработки малошумящего источника питания (ИП) для КВЧ радиоинтерферометрического комплекса (РИК), используемого для исследований быстропротекающих процессов. Наиболее оптимальным с точки зрения габаритных размеров, величины КПД и надежности схемотехнической реализации для применения в РИК являются импульсные ИП (ИИП). Приведены результаты математического моделирования основных типов ИИП. Определены уровни пульсаций их выходных напряжений.

The article presents the research results of possibility to develop low-noise power supply (PS) for EHF radiointerferometric complex (RC), used for research of fast processes. Using of pulse PS for RC is the optimal solution, due to its overall dimensions, efficiency value and circuit design reliability. The mathematical modeling results of pulse PS main types are presented. The levels of ripple in their output voltages are determined.

Ключевые слова: источник питания, топология источника питания, обратноходовой преобразователь, прямоходовой преобразователь, уровень пульсаций.

Key words: power supply, topology of power supply, flyback converter, forward converter, ripple level.

В последнее время фундаментальная наука испытывает потребность во все более и более точных измерениях характеристик исследуемых процессов. ФГУП «ФНПЦ НИИИС им. Ю.Е. Седакова» проводит разработку КВЧ радиоинтерферометрических комплексов (РИК), обеспечивающих высокоточные измерения параметров движения (перемещения, скорости) различного рода объектов.

Неотъемлемой частью РИК является источник питания (ИП). Основным требованием, предъявляемым к ИП РИК, является низкий уровень шумов и пульсаций выходного напряжения источника. Это объясняется тем, что уровень регистрируемого прибором сигнала ненамного превышает уровень шумов. Поэтому шумы ИП оказывают существенное влияние на точность обработки сигнала [1]. Предъявляемым требованиям удовлетворяют линейные источники питания (ЛИП). Малый уровень шумов в ЛИП обеспечивается благодаря принципу реализации трансформации первичного (входного) напряжения [2]. Однако их использование в РИК весьма затруднительно из-за плохих экономических и массогабаритных показателей, а также низкого значения КПД.

С точки зрения увеличения КПД и уменьшения габаритов преимуществами обладают ИП на основе высокочастотного резонансного инвертора. Прин-

цип работы резонансного инвертора основывается на переключении ключевых элементов из проводящего состояния в закрытое и обратно в моменты прохождения тока или напряжения через нулевые значения. Однако при работе данных типов источников в режиме холостого хода происходит значительный рост выходного напряжения. В связи с этим требуется принимать дополнительные меры по предотвращению увеличения выходного напряжения на холостом ходе, что ведет к существенному усложнению и удорожанию ИП.

Наиболее подходящим вариантом для питания РИК является импульсный ИП (ИИП). По сравнению с ЛИП он имеет меньшие габариты и больший КПД. В отличие же от ИП, построенного на основе резонансного инвертора, ИИП обладает более простой и дешевой схмотехнической реализацией. Значительным недостатком ИИП является наличие высокочастотных пульсаций в выходном напряжении, которые обусловлены принципом его работы, основанным на методе широтно-импульсного модулирования ключевого элемента источника. При использовании ИИП в РИК возможно распространение кондуктивных помех, создаваемых пульсациями выходного напряжения ИП, непосредственно через кабели питания. Данные помехи будут усиливаться при прохождении через усилительные элементы прибора, поступать в приемный канал РИК, что приведет к увеличению погрешности измерений.

Для оценки влияния ИИП на работу РИК были рассмотрены две наиболее распространенные топологии данных типов преобразователей: обратноходовые (*Flyback converter*) и прямоходовые (*Forward converter*).

На рис. 1, 2 представлены типовые уровни пульсаций выходного напряжения в установившемся режиме для рассматриваемых топологий ИИП, полученные в результате моделирования.

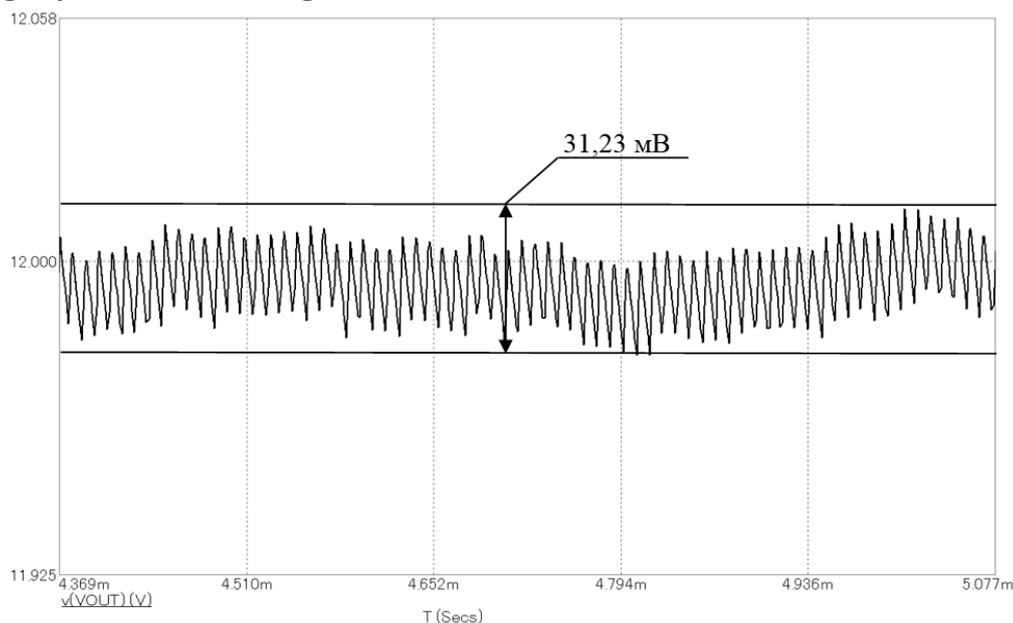


Рис. 1. Пульсации выходного напряжения для обратноходовой топологии

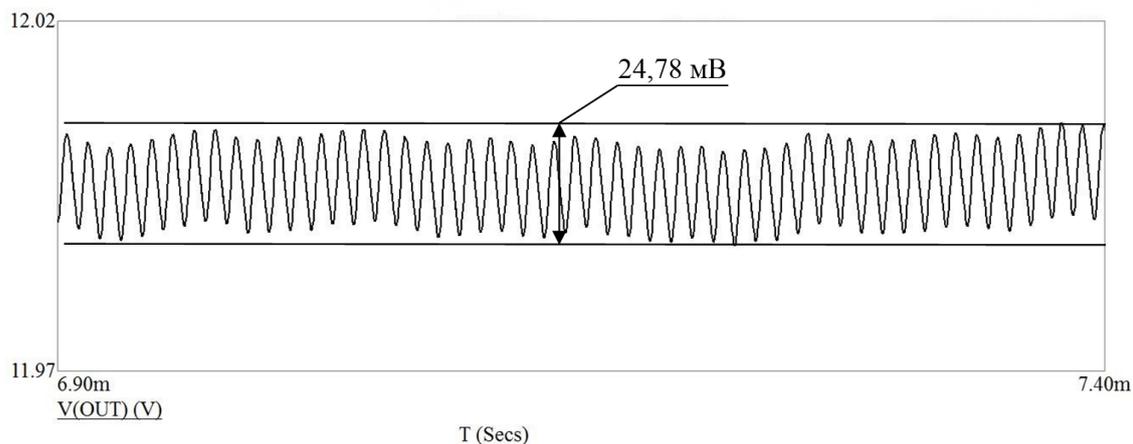


Рис. 2. Пульсация выходного напряжения для прямоходовой топологии

Из рис. 1 видно, что уровень пульсаций для обратноходовых ИИП составляет 25-35 мВ. Пульсации установившегося выходного напряжения для прямоходового ИИП (рис. 2) не превышают 20-25 мВ, что на 30% меньше, чем у обратноходового ИИП.

Исходя из приведенных значений пульсаций, можно сделать вывод, что для применения в РИК, наиболее подходящим является ИИП с прямоходовой топологией.

При этом необходимо проработать вопрос о максимально возможном подавлении пульсаций выходного напряжения преобразователей. Одним из возможных решений является установка на выходе ИИП режекторного фильтра с центральной частотой, равной частоте ШИМ прямоходового преобразователя, что, как показали результаты математического моделирования, позволит уменьшить пульсации выходного напряжения до приемлемого уровня в 1 мВ.

Библиографический список

1. **Корнев, Н.С.** Проблемные вопросы разработки малошумящего импульсного источника питания для полигонного радиоинтерферометрического комплекса / Н.С. Корнев, К.В. Минеев, А.В. Назаров [и др.] // Материалы XXII Международной научно-технической конференции. – Н.Новгород, 2016. – С.214. – 1 CD-ROM.
2. **Гуревич, В.И.** Вторичные источники электропитания: анатомия и опыт применения / В.И. Гуревич // Электротехнический рынок, 2009. №1(25). С. 50-54.

УДК 621.314.57

Л.Э. Рогинская, А.С. Горбунов

ИССЛЕДОВАНИЕ ИСТОЧНИКА ПИТАНИЯ ДЛЯ ИНДУКЦИОННОЙ ОБРАБОТКИ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ЗАГОТОВОК

Уфимский государственный авиационный технический университет

Приведены особенности и преимущества индукционного нагрева. Описана исследуемая электротехнологическая установка, рассмотрено назначение ряда ее элементов. Произведено компьютерное моделирование комплекса в программе *Matlab*, получены осциллограммы токов и напряжений на элементах. Рассмотрены особенности работы высокочастотных источников питания по полученным осциллограммам.

Features and advantages of induction heating are given. We described researched electrotechnological system, the designation of a number of its elements is considered. We made computer simulation of electrotechnological system in *Matlab* program, oscillograms of currents and voltages on elements are received. We considered features of operation of high-frequency power supplies according to the received oscillograms.

Ключевые слова: индукционный нагрев, трансформатор, выпрямитель, преобразователь.

Key words: induction heating, transformer, rectifier, converter.

В современном машиностроении широко используются различные технологические процессы, связанные с термической обработкой изделий на основе сплавов из цветных и черных металлов.

Среди множества методов термообработки материалов особое место занимает обработка металлов токами повышенной и высокой частоты. Среди них необходимо отметить открытую и вакуумную плавку в индукционных печах, нагрев заготовок под ковку, штамповку, нагрев деталей для термической обработки (закалка, отпуск, отжиг), нагрев заготовок при изготовлении режущего инструмента и многое другое [1].

Общим признаком всех названных и неназванных технологических процессов является индукционный нагрев, т.е. передача электрической энергии непосредственно в нагреваемый объект, для чего необходимо иметь специальное оборудование, а именно: источник питания высокой или повышенной частоты (например, тиристорный преобразователь частоты), индуктор, направляющий высокочастотную энергию генератора в нагреваемое тело и другое оборудование [1]. Тиристорный преобразователь частоты - это статическое электротехническое устройство, предназначенное для преобразования переменного тока одной частоты в переменный ток другой частоты [2].

С целью анализа электромагнитных процессов в высокочастотных источниках питания для индукционных установок удобно использовать программный пакет *Matlab* с библиотеками *Simulink* и *SimPowerSystems*.

Исследуемая модель источника питания состоит из трехфазной сети 380 В промышленной частоты, тиристорного выпрямителя с системой управления, фильтрового дросселя, высокочастотного инвертора, согласующего трансформатора, высокочастотного колебательного контура из индуктора и компенсирующей батареи конденсаторов [3].

При эксплуатации тиристорных преобразователей частоты, выполненных на базе инверторов со встречно-параллельными диодами, возникает вопрос о необходимости согласования инвертора с нагрузочным колебательным контуром (нагрузкой), это связано с тем, что выходное напряжение инвертора нестандартно и при питании преобразователя от силовой трехфазной сети 50Гц, 380В составляет 260...300 В [1].

Согласование выходного напряжения инвертора с номинальным напряжением серийно выпускаемых индукторов можно осуществлять путем применения специального промежуточного высокочастотного трансформатора, тогда согласование с нагрузкой может быть реализовано за счет рационального выбора коэффициента трансформации этого трансформатора. При этом следует учитывать, что использование высокочастотных трансформаторов снижает КПД индукционной установки, повышает ее габариты и стоимость [1].

В работе для решения задач улучшения КПД преобразователей и снижения массогабаритных показателей предложено применение согласующего трансформатора с магнитопроводом, выполненным на базе аморфных и нанокристаллических сплавов. Сокращение габаритов и улучшение КПД согласующих устройств обеспечивается тем, что аморфные и нанокристаллические сплавы имеют высокую индукцию насыщения и низкие удельные магнитные потери при высоких частотах питающего напряжения - это позволяет добиться снижения потерь в трансформаторах, увеличения их КПД, и уменьшения массогабаритных показателей [4].

Параметры несимметричного одноячейкового инвертора и ферромагнитных модулей были рассчитаны ранее и считаются известными. В данной модели полупроводниковые элементы – тиристор VS и диод VD приняты идеальными. Импульсы управления тиристором подаются от генератора прямоугольных импульсов, моделируемого в виде блока *Pulse Generator*. Коммутирующий дроссель L_K совместно с коммутирующим конденсатором C_K применяются для образования колебательного резонансного контура при коммутации тока в полупроводниковых приборах с неполной управляемостью. Сглаживающий дроссель, моделируемый в виде активно-индуктивного модуля с сопротивлениями R_d, L_d , используется в качестве фильтра на выходе выпрямителя. Новый высокоэффективный согласующий высокочастотный трансформатор представлен блоком *Saturable Transformer*, в нем заложены параметры его обмоток и магнитного материала в виде реальной характеристики намагничивания. Нагрузочный индукторно-конденсаторный контур состоит из индуктора, моделируемого в виде активно-индуктивного контура с сопротивлениями R_n, L_n , и компенсирующей батареи конденсаторов C_n [3]. Модель источника питания представлена на рис. 1.

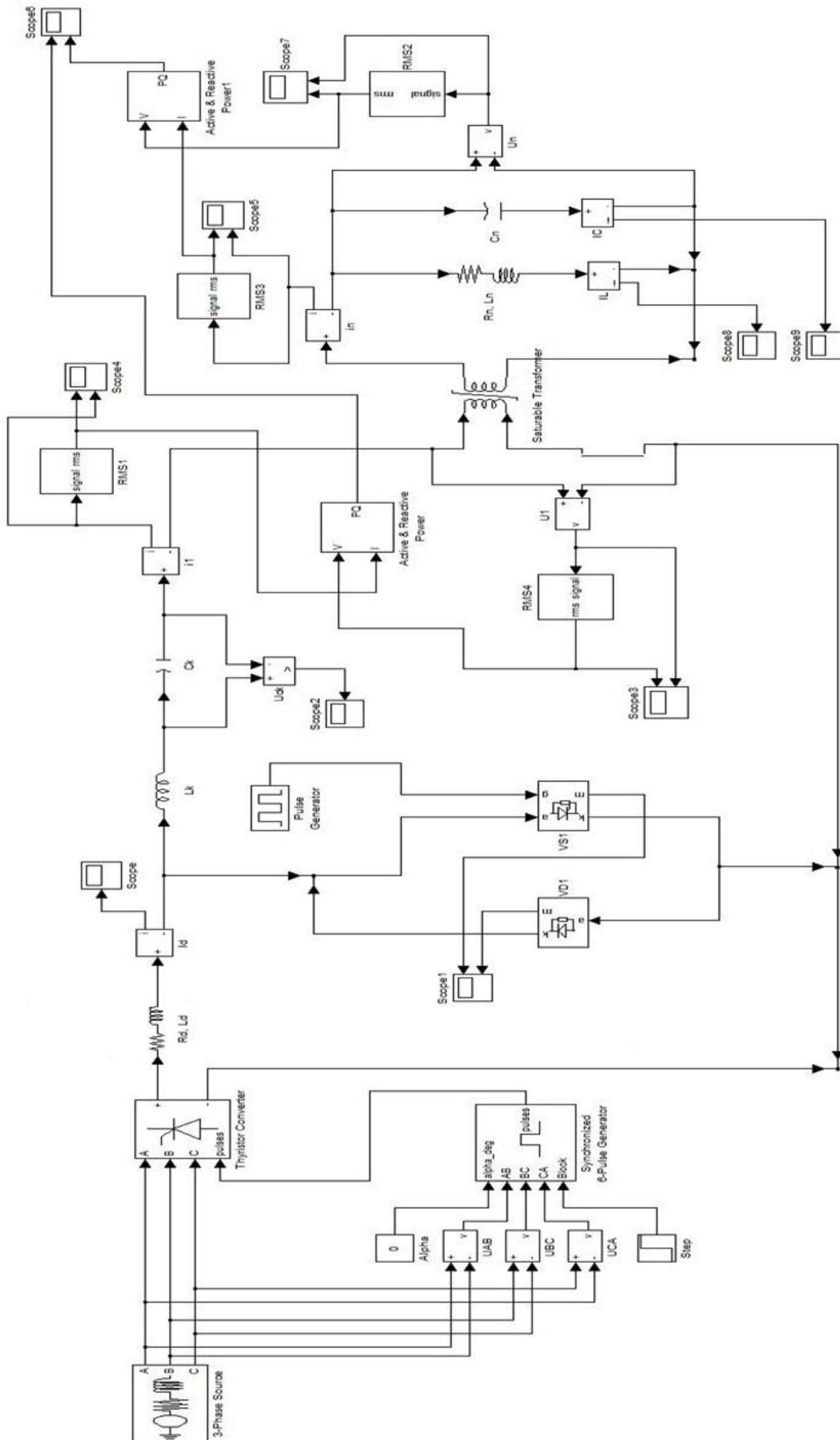


Рис. 1. Модель источника питания

В результате моделирования были получены осциллограммы напряжений и токов в обмотках согласующего высокочастотного трансформатора, тока в индукторе, напряжения в полупроводниковых приборах и др. (рис. 2).

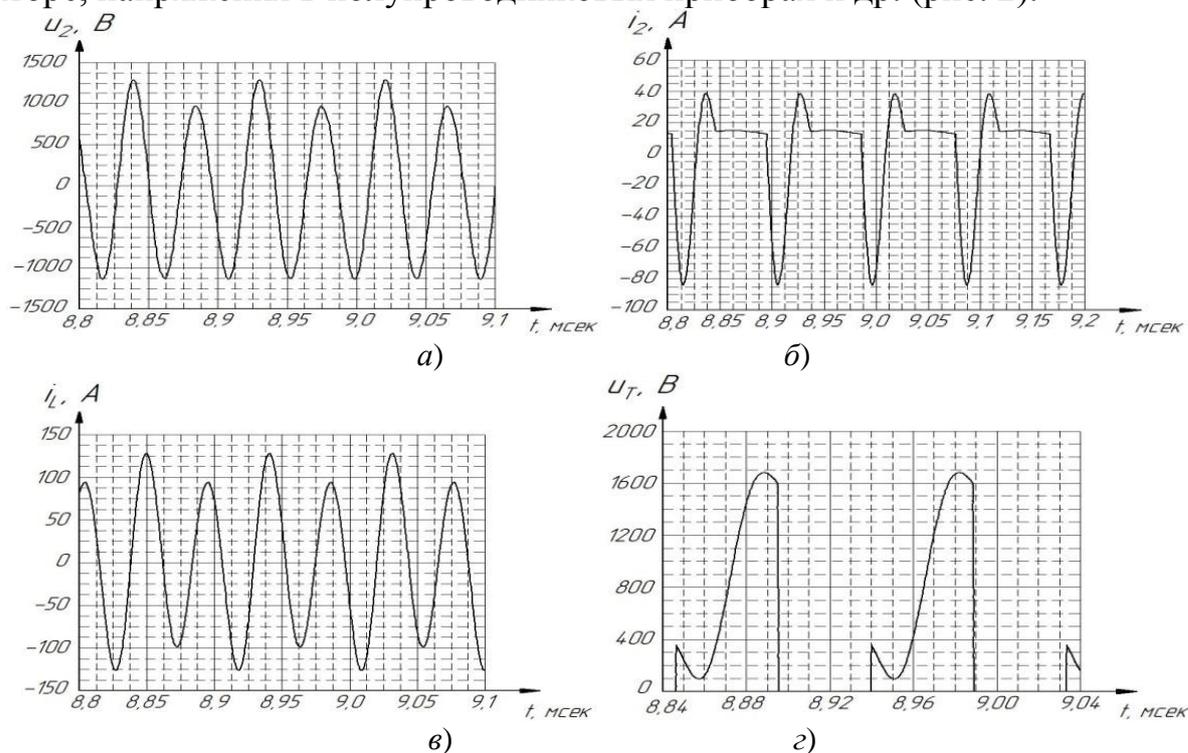


Рис. 2. Осциллограммы:

a – напряжения на вторичной обмотке трансформатора; *б* – тока во вторичной обмотке трансформатора; *в* – тока в индукторе; *г* – напряжения на тиристоре

По результатам моделирования было получено, что напряжения на обмотках трансформатора и соответственно на активно-индуктивном контуре, а также ток индуктора близки к синусоидальным, их частота в два раза больше, чем частота управления полупроводниковым прибором. Ток вторичной обмотки трансформатора часть периода близок к синусоиде, часть – образуется за счет протекания постоянного тока, перезаряжающего коммутирующий конденсатор [1]. Обратное напряжение на тиристоре прикладывается к нему в моменты паузы в его работе, когда тиристор и обратный диод заперты.

Таким образом, при помощи компьютерного моделирования в пакете *Matlab* возможно эффективное исследование электромагнитных процессов в высокочастотных источниках питания для индукционных нагревательных установок с определением их основных параметров.

Библиографический список

1. Тиристорные преобразователи частоты / А. К. Белкин [и др.]. – М.: Энергоатомиздат, 2000. – 263 с.
2. Элементы индукционных установок / А. К. Белкин [и др.]; под ред. Ю. М. Гусева. – М.: Энергоатомиздат, 2007. – 140 с.

3. **Рогинская, Л.Э.** Высокочастотный источник питания для электротехнологий / Л. Э. Рогинская, Р. Р. Исмагилов, А. С. Горбунов // Физико-математическое моделирование систем: материалы VII Междунар.семинара. – Воронеж: ГОУ ВПО «Воронежский государственный технический университет», 2011. Ч. 2. – С.189–194.
4. **Стародубцев, Ю.Н.** Теория и расчет трансформаторов малой мощности / Ю. Н. Стародубцев. – М.: ИП РадиоСофт, 2005. – 320 с.

УДК 621.314

И.В. Багрецов¹, В.В. Соколов², М.Е. Юрлов²**ТРАНЗИСТОРНЫЙ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ ДЛЯ ДВУХЗОННОГО ТЯГОВОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА**АО Нижегородский масложировой комбинат¹,
Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева²

Рассмотрены этапы разработки двухзонного транзисторного преобразователя с микропроцессорной системой управления и регулирования. Наиболее значимым конструктивным решением является размещение силовых элементов на основной печатной плате, это позволяет снизить перенапряжения на транзисторах до нескольких десятков вольт. Данный преобразователь предназначен для управления двухзонным тяговым электроприводом.

The article considers the stages of development of a two-zone transistor converter with a microprocessor control and regulation system. The most significant design solution is the placement of power elements on the main PCB, this allows reducing overvoltages on transistors to several tens of volts. This converter is designed to control a two-zone traction electric drive.

Ключевые слова: транзисторные преобразователи, драйверы управления, печатная плата, двухзонное регулирование скорости.

Key words: transistor converters, drivers, control PCB, dual-zone speed regulation.

Тяговые электроприводы для автономных транспортных средств строятся на базе машин постоянного или переменного тока. В современных электромобилях тяговым двигателем является двигатель переменного тока - асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором либо синхронный двигатель на постоянных магнитах. В легких низковольтных транспортных средствах (гольф-кары) и в специализированных машинах (электропогрузчики, штабелеры) находят применения двигатели постоянного тока с возбуждением от постоянных магнитов или с электромагнитным возбуждением.

Регулирование скорости вращения тяговых двигателей постоянного тока осуществляется за счет широтно-импульсного регулирования выходного напряжения якорной цепи, а в двигателях с электромагнитным возбуждением и обмотки возбуждения [1].

В статье рассматриваются вопросы, связанные с разработкой, конструированием и изготовлением транзисторного преобразователя [2] для двухзонного тягового электропривода легкого транспортного средства. Мощность тягового электродвигателя - 3 кВт, напряжение якоря - 42 В, номинальный ток якоря - 75 А, номинальные напряжение и ток цепи возбуждения - 8 В и 10 А соответственно.

На рис.1 приведена функциональная схема транзисторного тягового электропривода с двухзонным регулированием скорости [3]. Источником энергии являются четыре аккумуляторных батареи (АКБ) типа AGM optima yellow

тор емкостью 75 Ач. Емкостной фильтр на основе электролитических и керамических конденсаторов снижает коммутационные перенапряжения на транзисторах, обусловленные индуктивностью цепей, соединяющих транзисторный преобразователь с АКБ.

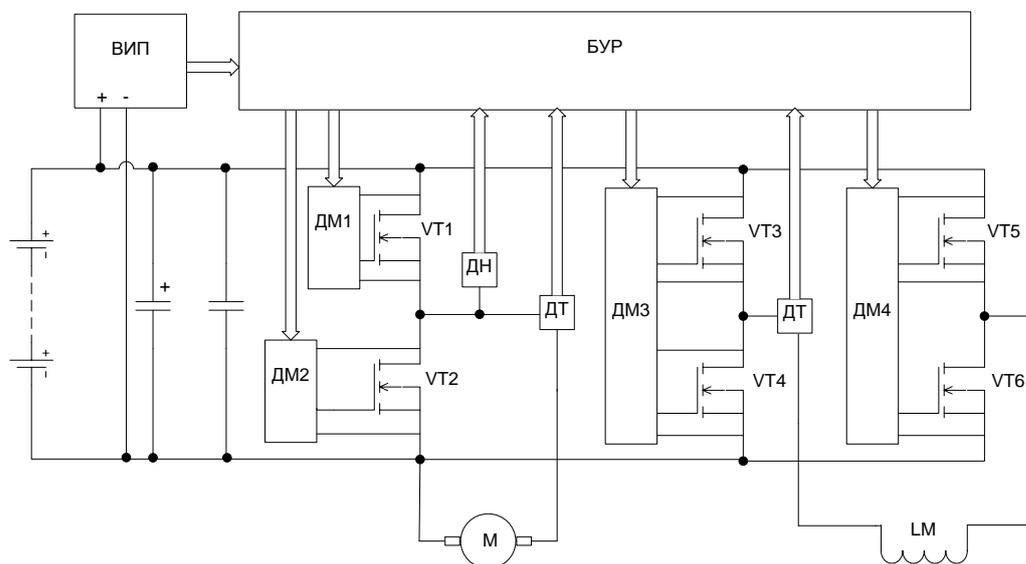


Рис. 1. Функциональная схема транзисторного преобразователя

Транзисторный преобразователь для якорной цепи двигателя – нереверсивный, построен по полумостовой схеме. Транзисторная стойка VT1,VT2 построена на мощных полевых МОП-транзисторах (максимальный кратковременный ток - 150А, несущая частота ШИМ – 16 кГц). Управление транзисторами этого преобразователя осуществляется драйверами HCPL316J с гальванической развязкой и независимыми для каждого драйвера источниками питания выходных цепей (+18В, -7В). Драйверы этих транзисторов имеют защиту от коротких замыканий. При срабатывании защиты формируется сигнал аварии, поступающий в схему управления, что приводит к полной блокировке управляющих импульсов. Отрицательное напряжение - 7В, прикладываемое к затворам транзисторов при выключении, ускоряет процесс запираания транзисторов, снижает динамические потери, повышает КПД преобразователя.

Транзисторный преобразователь для цепи возбуждения – реверсивный с возможностью ослабления поля. Построен такой преобразователь по мостовой схеме (две транзисторные стойки на полевых МОП-транзисторах VT3 - VT6). Номинальный ток цепи возбуждения – 10 А, несущая частота ШИМ – 16 кГц.

Алгоритм управления транзисторами мостового преобразователя цепи возбуждения – несимметричный. Транзисторы каждого полумоста открываются в противофазе, «мертвое» время задается в программе микроконтроллера. При одновременном включении верхних и нижних транзисторов на выходе будет нулевое напряжение, соответствующее нулевому сигналу управления. Изменение уровня сигнала управления вызывает изменение относительной продолжительности включения транзисторных ключей, что приводит к формиро-

ванию выходного напряжения. Следует отметить, что при таком алгоритме управления выходное напряжение формируется методом однополярной ШИМ, а частота выходных импульсов удваивается (относительно частоты включения транзисторов), что снижает уровень пульсаций выходного тока.

Драйверы для управления транзисторами рассматриваемого преобразователя - HCPL316J, но в отличие от якорного преобразователя выходные цепи этих драйверов выполнены по схеме с бустрептным питанием и имеют один общий источник питания (+18 В). Это сделано с целью экономии. При номинальном напряжении возбуждения скважность импульсов составляет 20%, а максимальная скважность не будет превышать 90%.

Двухзонная система регулирования, построенная по подчиненному принципу, и системы управления транзисторными широтно-импульсными преобразователями для якорной цепи и обмотки возбуждения реализованы на 32-разрядном микроконтроллере STM.

Необходимые напряжения для питания узлов управления и регулирования формируются вторичным источником питания (ВИП), который построен по обратноточковой схеме с частотой преобразования 500 кГц и допускает изменение входного напряжения в широких пределах. Суммарная мощность источников - 15 Вт.

Известно, индуктивность проводников печатных плат линейно зависит от длины и при толщине медной фольги 35 мкм составляет 1 нГн на 1 мм. При токах нагрузки в 100 А и высокой скорости переключения силовых транзисторов перенапряжения на индуктивности в 1 мкГн достигают сотни вольт.

При разработке конструкции преобразователя принято решение разместить силовые элементы на основной («материнской») печатной плате (рис. 2), используя слои двухсторонней печатной платы в качестве силовых шин. Такое решение позволило свести к минимуму индуктивность силовых цепей преобразователя и тем самым уменьшить перенапряжения на транзисторах до нескольких десятков вольт.

Узлы управления и регулирования, выполненные в виде отдельных модулей, интегрируются на «материнской» плате с помощью разъемов. Такое решение позволяет индивидуально проводить проверку и настройку каждого узла, оперативно заменять его при ремонте.

При конструировании «материнской» печатной платы особое внимание уделено отводу тепла от силовых транзисторов. Все транзисторы установлены на одном тепловоде через изолирующие прокладки. Верхний край тепловода плотно соприкасается с радиатором, вмонтированным в верхнюю крышку бокса, в котором установлена «материнская» плата с модулями. Фото смонтированной «материнской» платы с модулями и бокса с преобразователем приведены на рис. 3.

Подключение силовых цепей (АКБ, якорной цепи, обмотки возбуждения) осуществляется с помощью силовых клемм. Управляющие линии педалей газа поступают по CAN-шине с блока управления движением (БУД).

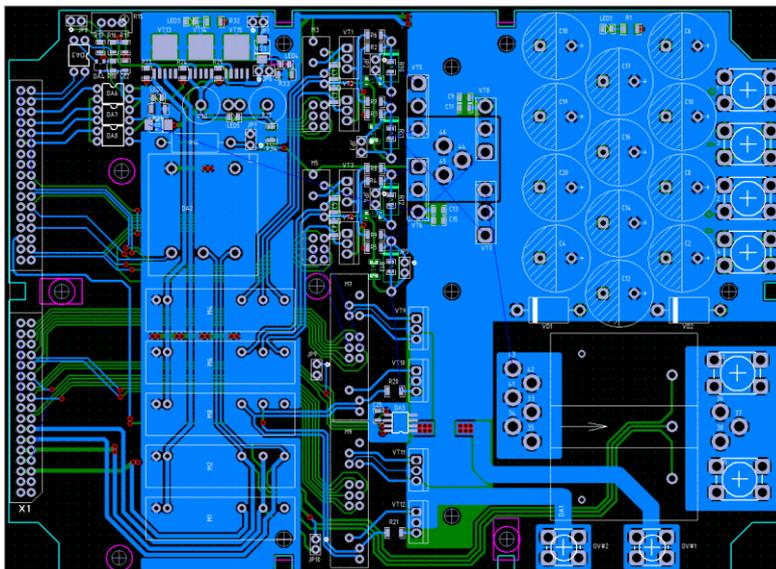


Рис. 2. «Материнская» печатная плата транзисторного преобразователя



Рис. 3. Фото транзисторного преобразователя

Разработанный транзисторный преобразователь для двухзонного тягового электропривода готов к испытаниям.

Библиографический список

1. **Анучин, А.С.** Системы управления электроприводов: учебник для вузов / А.С. Анучин. – М.: Издательский дом МЭИ, 2015. – 373 с.
2. **Мелешин, В.И.** Транзисторная преобразовательная техника / В.И. Мелешин. – М.: Техносфера, 2005. – 632 с.
3. **Юрлов, М.Е.** Двухзонный тяговый электропривод с микропроцессорным управлением / М.Е. Юрлов, И.В. Багрецов, В.В. Соколов // Актуальные проблемы электроэнергетики: сб. научно-технич. ст.; НГТУ. Н.Новгород, 2016. С. 97-102.

УДК 621.5

А.А. Башев

ОБ ИССЛЕДОВАНИИ НЕЛИНЕЙНОЙ СИСТЕМЫ НА ОСНОВЕ МОДЕЛИ ВОЛЬТЕРРА

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Рассматривается нелинейная система с переменными параметрами. Решение уравнения системы представляется функциональным рядом Вольтерра. Рассмотрены условия сходимости ряда.

A nonlinear system with variable parameters is considered. Solving the equation of the system is a functional Volterra series. Conditions for the convergence of the series are considered.

Ключевые слова: функциональный ряд Вольтерра, система линейных уравнений с переменными коэффициентами.

Key words: Volterra Functional series, the linear system of time-varying equations.

Рассмотрим фазовую систему переменного тока как систему ФАПЧ, у которой $\theta_1(t) = \Omega_n t$ (рис. 1). Системы с фазовой модуляцией и фазовым детектированием по характеру и принципу действия соответствуют широкому классу систем: систем ФАПЧ, систем выделения несущей для синхронного и корреляционного приема, для деления и умножения частоты, систем управления двигателями и т.д. На рис. 1 приведена блок-схема системы с фазовой модуляцией и синусным фазовым детектированием. Предполагается, что устройство $\Phi(p)$ – низкочастотный каскад, обладающий только интегрирующим действием, т.е. $\Phi(p)=1/p$. Эта система эквивалентна некоторой идеализированной системе ФАПЧ, у которой управляющий элемент обладает интегрирующим действием, а фильтр нижних частот имеет передаточную функцию равную 1. Полагая $\varphi_0 = 0$, следящие системы с фазовым управлением описываются уравнением типа (1):

$$\frac{P}{K_0} + (1 + \cos 2\omega_0 t) \sin \varphi(t) + \sin 2\omega_0 t \cos \varphi(t) - \sin 2\omega_0 t = \frac{\Omega_n}{K_0}. \quad (1)$$

Решением уравнения (1) является ряд Вольтерра (2):

$$\varphi = \sum_{k=1}^{\infty} \varphi_k. \quad (2)$$

Подставим (2) в (1) и представим нелинейные функции степенными рядами, а приравнивая члены одинакового порядка слева и справа, получим бесконечную систему линейных нестационарных уравнений для составляющих ряда (2):

$$\left\{ \begin{array}{l} \varphi_1(t) + k_0 (1 + \cos 2 \omega_0 t) \varphi_1(t) = \Omega_H; \\ \varphi_2(t) + k_0 (1 + \cos 2 \omega_0 t) \varphi_2(t) = \frac{K_0}{2!} \varphi_1 2 \sin 2 \omega_0 t; \\ \varphi_3(t) + k_0 (1 + \cos 2 \omega_0 t) \varphi_3(t) = \frac{K_0}{3!} (1 + \cos 2 \omega_0 t)^3 + \\ \quad + K_0 \sin 2 \omega_0 t \varphi_1(t) \varphi_2(t). \\ \quad \quad \quad \dots \\ \quad \quad \quad \dots \end{array} \right. \quad (3)$$

Будем решать уравнения этой системы методом свертки. Уравнение для определения импульсной переходной функции представлено далее:

$$\dot{y}(t, \tau) + K_0 (1 + \cos 2 \omega_0 t) y(t, \tau) = \delta(t, \tau). \quad (4)$$

Для его решения воспользуемся методом перехода к интегральному виду. Интегральное уравнение для рассматриваемой системы имеет вид:

$$y(t, \tau) = \lambda(t - \tau) - K_0 \int_{\tau}^t \lambda(t - \xi) \cos 2 \omega_0 \xi \cdot y(\xi, \tau) \cdot d\xi. \quad (5)$$

Здесь $\lambda(t - \tau)$ – импульсная переходная функция системы с усредненными во времени коэффициентами.

Предполагая устойчивость усреднённой системы, решим интегральное уравнение (5) методом итераций. Для системы с идеализированным фильтром уравнение (5) следует записать в виде:

$$y(t, \tau) = e^{-K_0(t-\tau)} - K_0 \int_{\tau}^t e^{-K_0(t-\xi)} \cos 2 \omega_0 \xi \cdot y(\tau, \xi) \cdot d\xi, \quad (6)$$

тогда

$$y_0(t, \tau) = \lambda(t - \tau) = e^{-K_0(t-\tau)}, \quad (7)$$

$$\begin{aligned} y_1(t, \tau) &= e^{-K_0(t-\tau)} - K_0 \int_{\tau}^t e^{-K_0(t-\xi)} \cos 2 \omega_0 \xi \cdot y_0(\tau, \xi) \cdot d\xi = \\ &= e^{-K_0(t-\tau)} \left[1 - \frac{K_0}{2 \omega_0} (\sin 2 \omega_0 t - \sin 2 \omega_0 \tau) \right]. \end{aligned} \quad (8)$$

Полагая $(\frac{K_0}{2 \omega_0})^2$ малым по сравнению с $(\frac{K_0}{2 \omega_0})$, можно ограничиться такой точностью и предположить:

$$y(t, \tau) \approx y_1(t, \tau) = e^{-K_0(t-\tau)} \left[1 - \frac{K_0}{2 \omega_0} (\sin 2 \omega_0 t - \sin 2 \omega_0 \tau) \right]. \quad (9)$$

Используя метод свертки, найдем выражения для функционалов $\varphi_K(t)$ ($i = 1, 2, \dots$):

$$\varphi_1(t) = \int_0^t y(t, \tau) \Omega_H d\tau \approx \frac{\Omega_H}{K_0} (1 - e^{-K_0 t}) \left(1 - \frac{K_0}{2 \omega_0} \sin 2 \omega_0 t \right), \quad (10)$$

$$\varphi_2(t) = \frac{K_0}{2} \int_0^t y(t, \tau) \sin 2 \omega_0 \tau \varphi_1^2(\tau) d\tau =$$

$$\begin{aligned}
 &= \frac{K_0}{2} \int_0^t e^{-K_0(t-\tau)} \left[1 - \frac{K_0}{2\omega_0} (\sin 2\omega_0 t - \sin 2\omega_0 \tau) \right] \left(\frac{\Omega_H}{K_0} \right)^2 \cdot \\
 &\quad \cdot (1 - e^{-K_0\tau})^2 \cdot \left(1 - \frac{K_0}{2\omega_0} \sin 2\omega_0 \tau \right)^2 \sin 2\omega_0 \tau d\tau = \\
 &= \left(\frac{\Omega_H}{K_0} \right)^2 \left[\frac{K_0^2}{4\omega_0} e^{-K_0 t} t + \frac{K_0}{4\omega_0} (\cos 2\omega_0 t - e^{-K_0 t}) \right]. \tag{11}
 \end{aligned}$$

Вычисление $\varphi_1(t)$ и $\varphi_2(t)$ проводилось с точностью до членов порядка $\left(\frac{\Omega_H}{K_0}\right)^2$, в предположении, что члены порядка $\left(\frac{\Omega_H}{K_0}\right)^3$ и выше пренебрежительно малы. Поэтому ограничимся двумя этими членами в ряде Вольтерра, т.е., предположим, что:

$$\begin{aligned}
 \varphi(t) &\approx \varphi_1(t) + \varphi_2(t) = \\
 &= \left(\frac{\Omega_H}{K_0} \right) (1 - e^{-K_0 t}) \cdot \left(1 - \frac{K_0}{2\omega_0} \sin 2\omega_0 t \right) + \left(\frac{\Omega_H}{K_0} \right)^2 \cdot \\
 &\quad \cdot \left[\frac{K_0^2}{4\omega_0} e^{-K_0 t} t + \frac{K_0}{4\omega_0} (\cos 2\omega_0 t - e^{-K_0 t}) \right]. \tag{12}
 \end{aligned}$$

Заметим, что в функционалах $\varphi_3, \varphi_4,$ и т.д. можно выделить множитель $\frac{\Omega_H}{K_0}$ в 3-й, 4-й и т.д. степенях соответственно. Согласно положениям относительно сходимости ряда Вольтерра, сформированным в научной литературе [2], можно утверждать, что ряд $\varphi(t) = \sum_{K=1}^{\infty} \varphi_K(t)$ сходится при $\frac{\Omega_H}{K_0} \leq \rho < 1$. Причем ρ можно взять тем ближе к единице, чем выше (при фиксированном K_0) частота ω_0 . Действительно, чем больше ω_0 , тем ближе наша идеализированная система к идеализированной системе с постоянными параметрами. Для последней ряд Вольтерра сходится при $\frac{\Omega_H}{K_0} < 1$, т.е. ρ можно взять сколь угодно близким к единице.

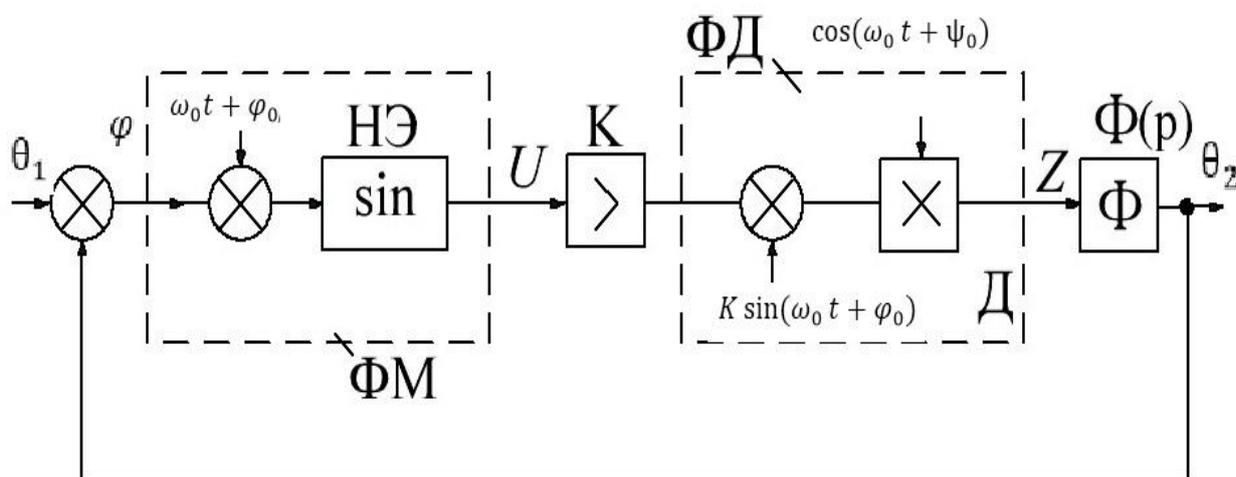


Рис. 1. Модель системы фазовой автоподстройки частоты

Библиографический список

1. **Шахгильдян, В.В.** Фазовая автоподстройка частоты / В.В. Шахгильдян, А.А. Ляховкин. – М.: Связь, 1966.
2. **Ван Трис Г.** Синтез оптимальных нелинейных систем управления / Г. Ван Трис. – И.Л., М., 1964.
3. **D'Angelo Н.** Determination of the impulsive response of two classes of linear time – varying systems / Н. D'Angela, Т. Higgins – IEEE Ynt.: Conv. Record, 1965. Pt 7.

УДК 621.372

А.А. Башев

ПРИМЕНЕНИЕ АППАРАТА МГНОВЕННОЙ МОЩНОСТИ В ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИХ ЦЕПЯХ

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Показаны некоторые возможности применения метода мгновенной мощности в задачах анализа электротехнических цепей. В качестве примера применения теоремы Телледжена рассмотрена нелинейная резистивная цепь, состоящая из нелинейных резисторов с возрастающими монотонными вольт-амперными характеристиками.

The article possibilities of application of instantaneous power method in the analysis of chain theory. As an example of the application of the Telledzhen theorem, a nonlinear resistive circuit consisting of nonlinear resistors with increasing monotonic current-voltage characteristics is considered.

Ключевые слова: мгновенная мощность, теорема Телледжена.

Key words: instantaneous, a Tellegens theorem.

При рассмотрении нелинейных электрических цепей часто требуется априорная качественная информация о свойствах данного класса цепей. Нужны, например, сведения о единственности и устойчивости решения, иметь предварительные оценки максимальных напряжений, токов, мощностей, выделяемых на элементах цепей, характере нелинейностей, возникновении периодических решений и т.д.

В настоящее время наиболее эффективным способом получения информации об общих свойствах цепи является использование энергетических соотношений, представленных в виде теоремы Телледжена [1,2]. Одним из достоинств теоремы Телледжена является достаточно общий ее характер, допускающий применение к нелинейным цепям.

Для произвольной электрической цепи с сосредоточенными параметрами с выбранными опорными напряжениями ветвей u_k и токов i_k (следовательно, $u_k(t)i_k(t)$ есть мощность, передаваемая цепью ветви k в момент времени t) теорема Телледжена утверждает, что

$$\sum_k u_k i_k = 0. \quad (1)$$

Единственное требование к u_k , что они удовлетворяют второму закону Кирхгофа, а токи i_k , удовлетворяют первому закону Кирхгофа. Природа элементов, или фактически, какие элементы будут иметь u_k и i_k , абсолютно не имеет значения для справедливости теоремы Телледжена. Сила теоремы в том факте, что u_k и i_k произвольны, исключая ограничения из законов Кирхгофа.

Дадим несколько примеров того, как эта теорема в специальных случаях приводит к интересным результатам для цепей, содержащих нелинейные сопротивления, катушки индуктивности и конденсаторы.

Теорема Телледжена может быть использована для изучения однозначности и в электрических цепях. Доказательство свойства однозначности должно показывать, какие устанавливаются граничные и начальные условия.

В качестве примера применения теоремы Телледжена рассмотрим нелинейную резистивную цепь, состоящую из нелинейных резисторов с возрастающими монотонными вольт-амперными характеристиками:

$$u_k = f_k(i_k).$$

При постоянном входном напряжении U токи во всех ветвях определены и можно утверждать, что найденный режим в цепи будет единственным. Предположим, что существуют два режима u'_k, i'_k и u''_k, i''_k , тогда из свойств функции f_k имеем:

$$(u''_k - u'_k)(i''_k - i'_k) \geq 0. \quad (2)$$

Равенство нулю достигается, когда

$$i''_k = i'_k; u''_k = u'_k, \quad (3)$$

но i'_k и i''_k сами по себе удовлетворяют первому закону Кирхгофа, то ему удовлетворяет и разность $(i''_k - i'_k)$. И по теореме Телледжена:

$$\sum_k (u''_k - u'_k)(i''_k - i'_k) = 0. \quad (4)$$

Так как источник в обоих режимах не меняется, то $U'' - U' = 0$, а для остальных составляющих выполняется (2). Следовательно, каждое слагаемое в (4) должно равняться нулю, откуда следует соотношение (3), подтверждающее существование одного режима. Рассмотрим вопрос, при каких условиях, наложенных на нелинейные элементы, в цепи были возможны или невозможны автоколебания. Теорема Телледжена может указать в ряде случаев на невозможность автоколебаний и тем самым отбросить заведомо ложные пути исследования [3].

Покажем, что в цепи, состоящей из линейных резисторов и нелинейных емкостей с монотонно возрастающими кулон-вольтами характеристиками, при постоянном входном напряжении автоколебания невозможны.

Согласно теореме Телледжена:

$$\sum_k (u''_k - u'_k)(i''_k - i'_k) = 0. \quad (5)$$

Если некоторая система функций удовлетворяет второму закону Кирхгофа, то и их производные так же удовлетворяют второму закону Кирхгофа. Тогда теорему Телледжена можно записать:

$$\sum_k \left[\frac{d}{dt} (u''_k - u'_k) \right] (i''_k - i'_k) = 0. \quad (6)$$

Пусть периодические колебания имеют период T .

Проинтегрируем (6) от τ до $\tau + T$:

$$\int_{\tau}^{\tau+T} \sum_k \left[\frac{d}{dt} (u_k'' - u_k') \right] (i_k'' - i_k') dt = 0. \quad (7)$$

В (7) слагаемые, соответствующие резисторам R_k :

$$\left[\frac{d}{dt} (u_k'' - u_k') \right] (i_k'' - i_k') = R_k \left[\frac{d}{dt} (i_k'' - i_k') \right] (i_k'' - i_k'),$$

откуда

$$\int_{\tau}^{\tau+T} \left[\frac{d}{dt} (u_k'' - u_k') \right] (i_k'' - i_k') dt = \frac{R_k}{2} (i_k'' - i_k')^2 \Big|_{\tau}^{\tau+T} = 0.$$

Равенство нулю объясняется тем, что по условию $i_k'' - i_k'$ есть периодическая функция, а следовательно, верхний и нижний предел одинаковы.

Для ветвей с емкостью $i_k' = 0$, так как это ток через емкость при постоянном напряжении на ней. Пусть u_k'' и i_k'' связаны соотношением:

$$i_k'' = \frac{d}{dt} [g(u_k'')],$$

где $g(u_k'')$ - однозначная кулон-вольтная дифференцируемая, строго монотонно возрастающая функция, тогда:

$$i_k'' = \frac{\partial f(u_k'')}{\partial u_k''} \frac{du_k''}{dt}; \quad \frac{\partial f(u_k'')}{\partial u_k''} \geq 0,$$

так как $u_k' = \text{const}$, то

$$\frac{du_k'}{dt} = 0.$$

И тогда получим:

$$\int_{\tau}^{\tau+T} \left[\frac{d}{dt} (u_k'' - u_k') (i_k'' - i_k') \right] dt = \int_{\tau}^{\tau+T} \frac{du_k''}{dt} i_k'' dt = \int_{\tau}^{\tau+T} \frac{\partial f u_k''}{\partial t} \left(\frac{\partial u_k''}{\partial t} \right)^2 dt \geq 0. \quad (8)$$

Слагаемое, соответствующее источнику напряжения, равно нулю, так как для него $u_k'' = u_k' = U$.

То есть в выражении (7) правая часть равна нулю, а все слагаемые левой части положительные. Они должны быть равны нулю по отдельности. Следовательно, (8) необходимо заменить на равенство, но отсюда следует, что $u_k'' = \text{const}$, т.е. периодических колебаний в цепи быть не может.

Аналогично можно доказать невозможность автоколебаний в цепях, содержащих линейные резисторы, нелинейные индуктивные элементы с монотонно возрастающей вебер-амперной характеристикой и источниками постоянного напряжения или тока.

Рассмотрим еще пример применения теоремы Телледжена к цепи, состоящей из линейных емкостей, индуктивностей и нелинейных резисторов при входном воздействии $u(\varphi) = U_m \sin \omega t$. Пусть в цепи установился периодический режим с периодом, равным периоду внешнего воздействия. Запишем теорему Телледжена в следующей форме:

$$\sum_k \frac{du_k}{dt} \frac{di_k}{dt} = 0,$$

$$\frac{1}{T} \int_0^T \left[\sum_k \frac{du_k}{dt} \frac{di_k}{dt} \right] dt = 0. \quad (9)$$

Рассмотрим по отдельности слагаемые (9), относящиеся к источнику напряжения, индуктивным, емкостным элементам и резисторам. Пусть индекс $k = 1$ относится к источнику, т.е. $u_1(t) = u(t) = U_m \sin \omega t$, а $i_1(t)$ - входной ток. Пусть первая гармоника входного тока равна $I_m \sin(\omega t + \varphi)$. Тогда активная мощность на входе цепи, т.е. средняя мощность, отдаваемая источником и потребляемая цепью, будет:

$$P = -\frac{U_m I_m}{2} \cdot \cos \alpha. \quad (10)$$

Напомним, что знак минус здесь объясняется тем, что направление тока источника в теореме Телледжена предполагается противоположным общепринятому.

Слагаемые в выражении (9), соответствующие $k = 1$, равны:

$$\frac{1}{T} \int_0^T \frac{du_1}{dt} \frac{di_1}{dt} dt = \omega^2 \left(-\frac{U_m I_m}{2} \cos \varphi \right). \quad (11)$$

Сравнивая (10) и (11), получаем, что

$$\frac{1}{T} \int_0^T \frac{du_1}{dt} \frac{di_1}{dt} dt \omega^3 P. \quad (12)$$

Пусть теперь индекс $k = \mu$ соответствует в (9) индуктивности L_μ . Тогда

$$\frac{1}{T} \int_0^T \frac{du_\mu}{dt} \frac{di_\mu}{dt} dt = \frac{1}{T} \int_0^T \frac{du_\mu}{dt} \frac{1}{L_\mu} u_\mu dt = \frac{1}{TL_\mu} \int_0^T u_\mu du_\mu = 0.$$

Равенство нулю следует из того, что в силу периодического характера верхний и нижний пределы в последнем интеграле равны, среднее значение функции за период = 0. Итак, все слагаемые в (9), соответствующие индуктивностям, равны.

Совершенно аналогично доказывается, что слагаемые в (9), соответствующие емкостям, также равны нулю:

$$\frac{1}{T} \int_0^T \frac{du_q}{dt} \frac{di_q}{dt} dt = \frac{1}{T} \int_0^T \frac{du_q}{dt} \frac{1}{C_q} u_q dt = \frac{1}{C_q} \int_0^T u_q du_q = 0.$$

Таким образом, в (9) остаются лишь слагаемые, соответствующие резисторам. Поэтому окончательно получаем:

$$\omega^3 P = \sum_k \frac{1}{T} \int_0^T \frac{du_k}{dt} \frac{di_k}{dt} dt$$

или

$$P = \frac{1}{\omega^3} \sum_k \frac{1}{T} \int_0^T \frac{du_k}{dt} \frac{di_k}{dt} dt. \quad (13)$$

Здесь суммирование ведется по всем индексам k , соответствующим резисторам. Таким образом, получаем формулу активной мощности в виде:

$$P = \sum_k \frac{1}{T} \int_0^T u_k i_k dt.$$

Приведем пример: пусть на заданной нелинейной резистивной нагрузке требуется получить периодическое напряжение заданной формы $u(t)$. При этом источник напряжения является синусоидальным и формирование требуемого напряжения должно производиться с помощью цепи, включенной между источником и нагрузкой. Из изложенного ясно, что поставленная задача разрешима только в том случае, если выполняется равенство:

$$\int_0^T u(t) i(t) dt = \frac{1}{\omega^2} \int_0^T \frac{du(t)}{dt} \frac{di(t)}{dt} dt,$$

где $u(t)$ и $i(t)$ – напряжение и ток на нелинейном резисторе.

Ток $i(t)$ можно вычислить по заданным $u(t)$ и вольт–амперной характеристике нелинейного резистора.

Библиографический список

1. **Tellegen, B.D.H.** A general Network Theorem, with Applection – «Phillips Res.Rept», August, 1952, V.7 P. 259-269.
2. **Пенфилд, П.** Энергетическая теория электрических цепей / П. Пенфилд. – М.: Энергия, 1974. – 152 с.
3. **Данилов, Л.В.** Теория нелинейных электрических цепей / Л.В. Данилов, П.Н. Матханов, Е.С. Филлипов. – Л.: Энергоатомиздат, 1990. – 256 с.

УДК 62-835

Д.М. Кочеганов, Т.Х. Абузяров

ШИРОТНО-ИМПУЛЬСНЫЙ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ ДЛЯ ЭЛЕКТРОПРИВОДА МАЛЫХ ТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВ

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Статья посвящена разработке и изготовлению тягового транзисторного электропривода с микропроцессорной системой управления на базе микроконтроллера *ATMEGA8535*. Приведено описание архитектуры основных элементов микроконтроллера и функциональных особенностей программного обеспечения. Представлены преимущества разработанного ШИП для электропривода малых транспортных средств.

The article devoted to the development and manufacturing of DC electric drive with microprocessor control system. The architecture of the main elements of the microcontroller and the functional features of the software are described. Advantages of the developed SHIP for electric drives of small vehicles are presented.

Ключевые слова: микропроцессорная система управления, электропривод постоянного тока, ШИП, *ATMEGA*, программирование на *C*, моделирование микропроцессорных устройств.

Key words: microprocessor control system, DC electric drive, pulse-width modulated DC-DC power converter, *ATMEGA*, *C* programming, modeling microprocessor devices.

В настоящее время важной тенденцией развития мировой транспортной системы является использование автомобилей с гибридными и электрическими силовыми установками. Небольшие электромобили упрощённой конструкции (электрокары, электропогрузчики и т. п.) широко применяются для перевозки грузов и персонала на вокзалах, в цехах и больших магазинах, а также как аттракцион. В данном случае все недостатки в виде малого запаса хода и скорости, высокой собственной стоимости батарей и массы, перекрываются такими преимуществами, как отсутствие вредных выхлопов и шума, что принципиально важно для работы в закрытых помещениях с людьми.

Целью данной работы является разработка и изготовление широтно-импульсного преобразователя для электропривода малых транспортных средств, обеспечивающего работу в режимах регулятора тока и регулятора ЭДС с рекуперативным торможением.

Для выполнения поставленной задачи была составлена функциональная схема электропривода, выбрана элементная база, разработана и изготовлена печатная плата, создана управляющая программа, проведены испытания электропривода.

Функциональная схема электропривода представлена на рис. 1.

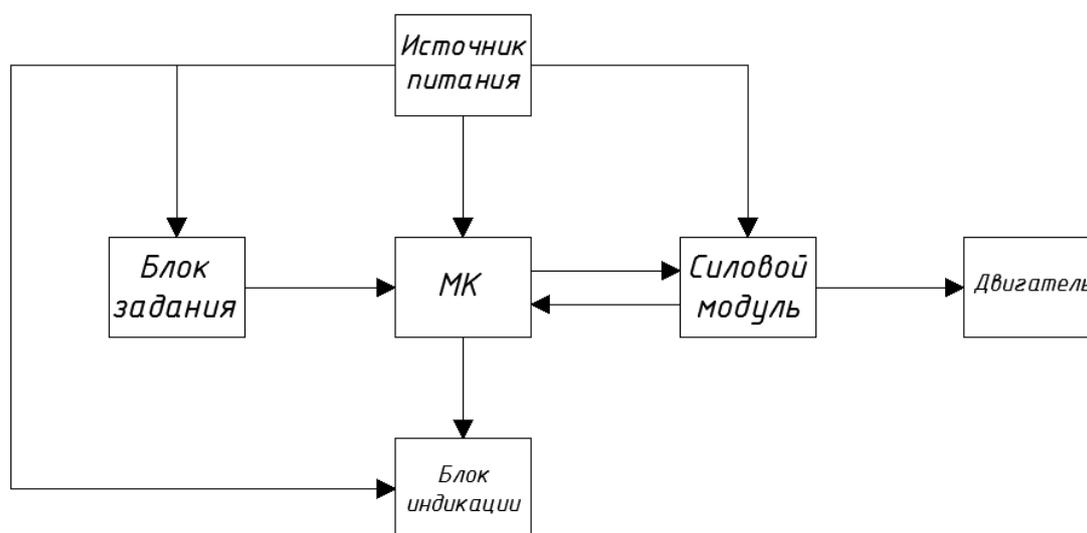


Рис. 1. Функциональная схема электропривода

Состав и назначение блоков следующие. Источник питания осуществляет питание схемы, состоит из аккумуляторных батарей и микросхемных стабилизаторов напряжения.

Блок задания производит формирование сигналов управления для микроконтроллера и состоит из задатчиков газа и тормоза, органов управления электроприводом.

Микроконтроллер выполняет обработку сигналов управления работой преобразователя, расчет сигналов регуляторов, выработку сигналов управления силовым модулем и блоком индикации. Применяется высокопроизводительный микроконтроллер с малым энергопотреблением *ATMEGA 8535*.

Блок индикации предназначен для вывода информации о работе привода и состоит из двухстрочного символьного жидкокристаллического дисплея и индикационных светодиодов.

Силовой модуль представляет собой прямоходовой обратимый широтно-импульсный преобразователь (ШИП) с контактным реверсом. Состоит из устройства логической блокировки, исключающего одновременное включение силовых транзисторов, а также драйверов верхнего и нижнего силовых транзисторов, верхнего и нижнего силовых *MOSFET*-транзисторов, шунтирующего конденсатора, датчика напряжения, датчика тока, автоматического выключателя цепи нагрузки, транзисторных каскадов катушек реле направления.

Печатная плата ШИП (рис. 2) помещается в закрытый металлический корпус, в котором предусмотрены разъемы для подключения силового модуля и удаленных органов управления.

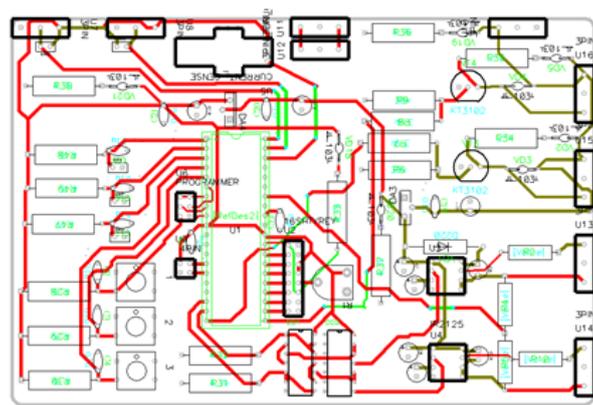


Рис. 2. Печатная плата ШИП

Управляющая программа написана на языке *C* и выполняет следующие основные процедуры:

- подготовительные операции: подключение библиотек, инициализация переменных, настройка портов и дисплея, определение режима работы;
- запуск цикла работы микроконтроллера: опрос кнопок «Старт», «Стоп», «Смена направления»;
- расчет регуляторов.

В режиме регулятора тока считывается сигнал обратной связи по току, и по-разностному уравнению вычисляется необходимая скважность управляющих импульсов для верхнего силового транзистора (двигательный режим работы) или нижнего силового транзистора (режим рекуперативного торможения). Для компенсации нелинейности внешней характеристики преобразователя при рекуперативном торможении используется регулятор тока с адаптивным токоограничением в функции ЭДС двигателя. В режиме регулятора ЭДС дополнительно считывается сигнал обратной связи по ЭДС, величина задания для регулятора тока рассчитывается по разностному уравнению.

Проведена проверка работоспособности электропривода. Осциллограммы импульсов управления силовыми транзисторами при включении (рис. 3) и отключении (рис. 4) торможения подтверждают корректность работы выдержки времени, исключаяющей одновременное отпирание силовых транзисторов и протекание сквозного тока.

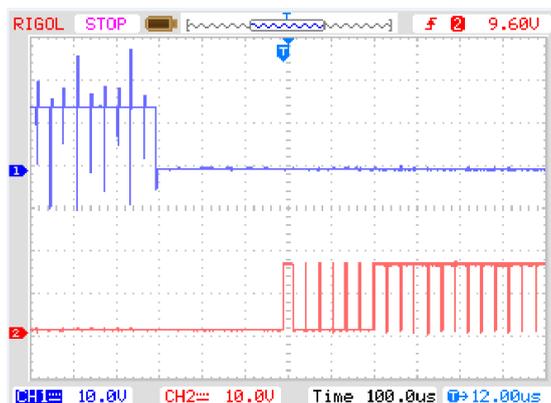


Рис. 3. Импульсы управления при включении торможения

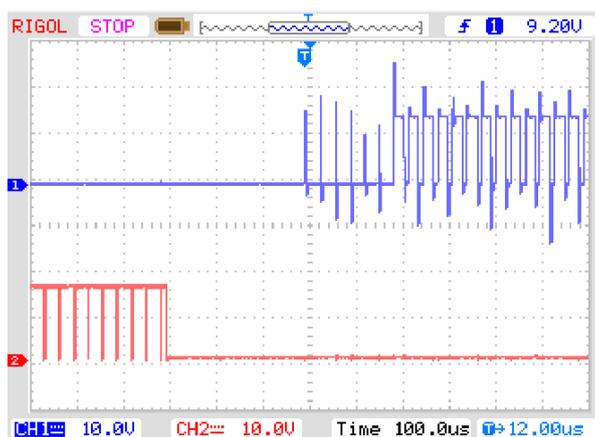


Рис. 4. Импульсы управления при отключении торможения

Проверка правильности оптимизации контуров регулирования осуществляется по осциллограммам сигналов датчика тока и датчика напряжения при ступенчатом приложении сигнала задания (рис. 5, 6).

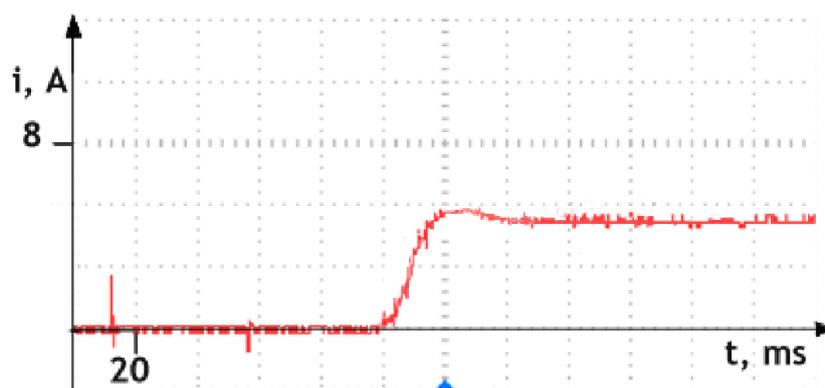


Рис. 5. Переходный процесс в контуре тока

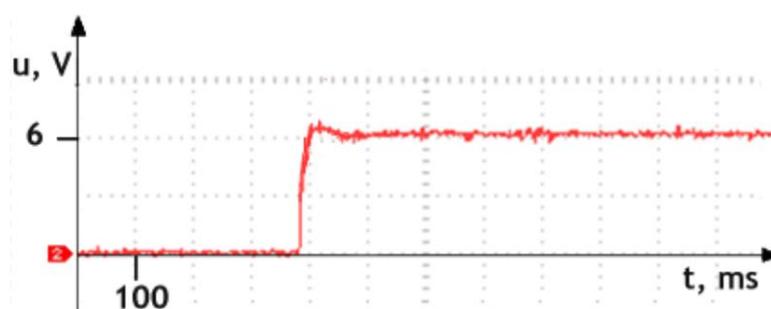


Рис. 6. Переходный процесс в контуре ЭДС

Ток и ЭДС поддерживаются на заданном уровне, длительность и форма переходных процессов оптимальны и соответствуют требуемым (рис. 5, 6).

При продолжительном рекуперативном торможении осуществляется подзарядка аккумуляторных батарей. На рис. 7 представлена осциллограмма сигнала датчика тока при имитации процесса длительного рекуперативного торможения.

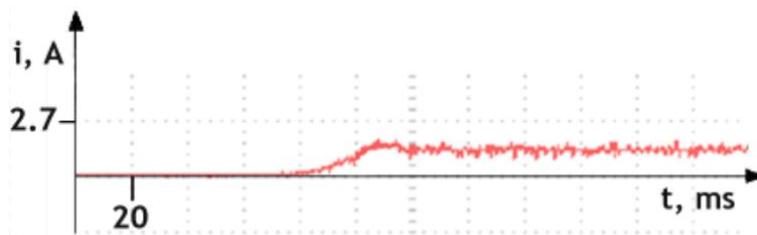


Рис. 7. Осциллограмма тока в процессе рекуперативного торможения

Преимуществами разработанного ШИП для электропривода малых транспортных средств являются:

- универсальность системы управления и возможность работы с двигателями различной мощности;
- простота изменения параметров регуляторов – для изменения параметров используются числовые коэффициенты, не требуется изменение структуры и элементов системы управления;
- возможность рекуперации энергии;
- оптимальность переходных процессов;
- режимы регулятора тока и регулятора ЭДС позволяют использовать электропривод в пилотируемых и беспилотных объектах.

Испытания показали полную работоспособность устройства. Разработанный электропривод установлен на микроэлектромобиль и исправно функционирует.

Библиографический список

1. **Бесекерский, В.А.** Теория систем автоматического регулирования / В. А. Бесекерский, Е. П. Попов. - 3-е изд., испр. – М.: Наука, 1975. – 767 с.
2. **Крутякова, О.А.** Цифровое моделирование электротехнических и электронных устройств [Текст] : монография / О. А. Крутякова, А. Н. Шилин. – М.: Изд. дом Акад. естествознания, 2014. – 131 с.
3. Микроконтроллер ATmega8535 – Atmel [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.atmel.com/images/doc2502.pdf>, свободный. - Загл. с экрана. (дата обращения: 19.05.2016)

Секция 2. АВТОМАТИЗИРОВАННЫЙ ЭЛЕКТРОПРИВОД

УДК 621.316.79

**А.Б. Дарьенков, Е.В. Бычков, Д.А. Комраков, Т.Х. Абузяров,
Д.М. Кочеганов**

ФИЗИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА ГИБРИДНОЙ ЭЛЕКТРОУСТАНОВКИ

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Рассмотрен вариант построения физической модели для разработки и отладки оптимальных алгоритмов работы гибридной автономной электростанции. Представлен способ использования панелей солнечных элементов и контроллеров различных производителей. Выделены отличительные особенности рассматриваемой гибридной электростанции.

A variant of the construction of a physical model for developing and debugging optimal algorithms of hybrid autonomous wind-diesel power plant is considered. Consideration of options for the use of panels of solar cells and controllers from different manufacturers. Distinctive features of the hybrid power plant under consideration.

Ключевые слова: ветрогенератор, дизель-генератор, электростанция, интеллектуальная система управления, солнечная панель.

Key words: wind generator, diesel generator, power, the intelligent control system, solar panel.

По разным оценкам, от 60 до 70 % территории Российской Федерации не охвачены централизованным электроснабжением. На данной территории проживает свыше 20 млн человек, жизнедеятельность которых во многом обеспечивается средствами возобновляемой энергетики.

Использование возобновляемых энергетических ресурсов и реализация программ энерго- и ресурсосбережения является одним из приоритетных направлений развития науки в сфере электроэнергетики в Российской Федерации. Это требует обеспечения максимального КПД работы генерирующих установок и повышения экономии затрат энергии.

Одним из наиболее динамично развивающихся в мире видов возобновляемой энергетики выступает ветроэнергетика. С географической и метеорологической точек зрения не вся территория РФ является благоприятной для эффективного (крупномасштабного) использования ветроэнергетики. В природной зоне центральной России в условиях существенной нестабильности ветровых процессов затруднительно поддерживать номинальные параметры работы возобновляемых энергетических установок. Поэтому более целесооб-

разным представляется использование гибридных установок, которые содержат наряду с возобновляемыми компонентами модули, работающие на основе двигателя внутреннего сгорания (ДВС) и устройства сопряжения с сетью.

Такие установки, как правило, имеют в своем составе мачту с лопастями, синхронный генератор, питающий нагрузку через инвертор, параллельно заряжая аккумуляторную батарею (АКБ) излишками генерируемой энергией, либо отдавая излишки энергии в сеть (в случае ее наличия).

Если при увеличении нагрузки или при уменьшении скорости ветра ветрогенератор не сможет обеспечить требуемых параметров, в работу вводится дизель-генераторная установка (ДГУ).

На рис. 1 представлена функциональная схема разрабатываемой физической модели электротехнического комплекса гибридной электроустановки. Гибридная электростанция состоит из четырех каналов: дизель-генераторной установки (ДГУ), ветроэнергетической установки (ВЭУ), канала солнечного генератора, а также канала накопителя.

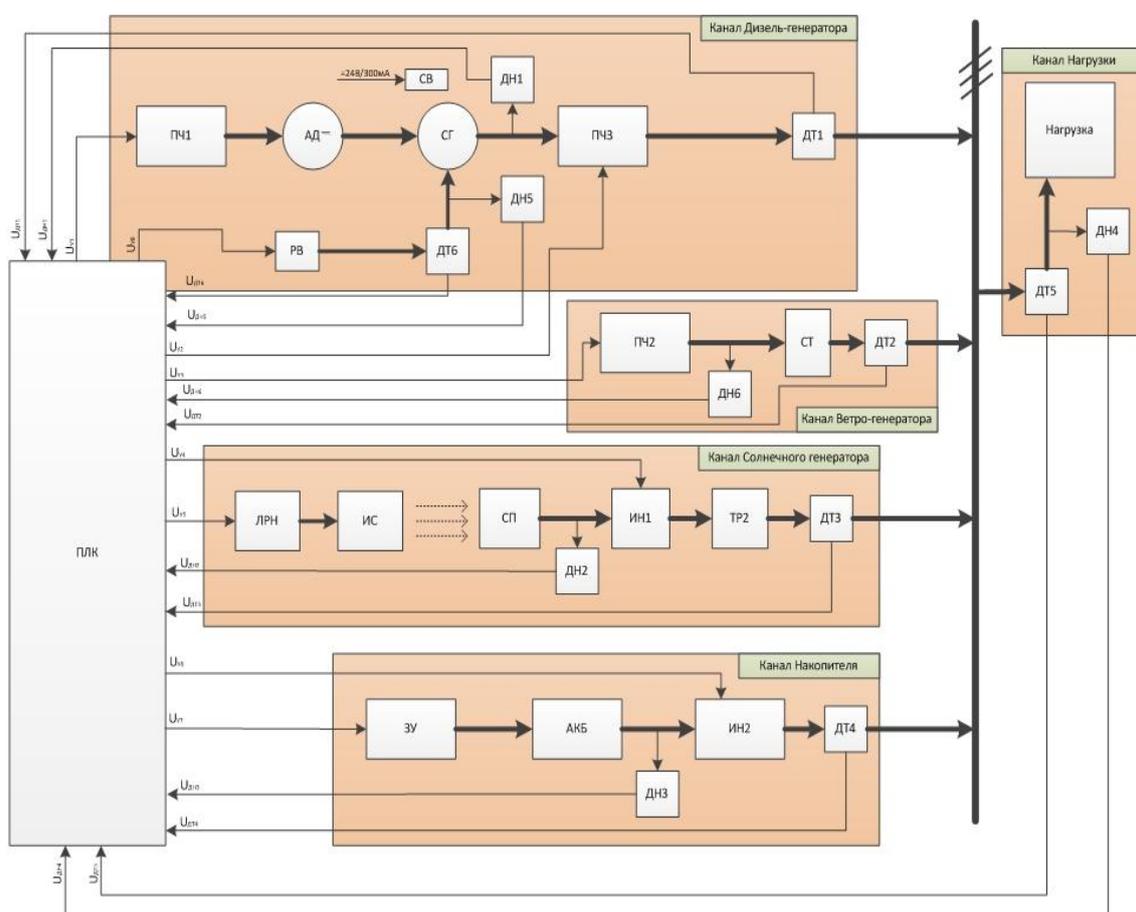


Рис. 1. Структура модели электротехнического комплекса гибридной электроустановки

Как видно из рис. 1, двигатель внутреннего сгорания (ДВС) в канале ДГУ физической модели имитируется связкой «преобразователь частоты (ПЧ1) – асинхронный электродвигатель (АД)». При этом управление ПЧ1 осуществляется с помощью программируемого логического контроллера (ПЛК), управляющая программа которого имитирует поведение ДВС дизель-генераторной уста-

новки (ДГУ). Вал АД соединен с валом трехфазного синхронного генератора, управление током обмотки возбуждения которого также осуществляет ПЛК. СГ питает ПЧЗ, выходное напряжение которого приложено к шине нагрузки.

Канал ВЭУ воссоздан без использования синхронного генератора. Его выходное напряжение имитирует ПЧ2, также управляемый посредством ПЛК, управляющая программа которого содержит характеристики работы СГ в различных условиях канала ветрогенератора. На практике амплитуда выходного напряжения СГ в канале ВЭУ может быть недостаточно велика для синхронизированной работы с каналом ДГУ. Для согласования выходного напряжения канала ВЭУ с шиной нагрузкой используется стабилизатор СТ.

Критериями выбора стабилизатора для данной установки являются:

- трехфазное выходное напряжение;
- широкий диапазон входных напряжений;
- КПД более 95%;
- малое время реакции на изменение входного напряжения;
- высокая надежность;
- непрерывный режим работы;
- высокая степень симметрии выходных напряжений.

В результате, исходя из данных критериев, был выбран стабилизатор отечественного производства HYBRID 3000 фирмы «Энергия». Данный преобразователь отвечает необходимым для работы в составе физической модели требованиям. Кроме того, стабилизатор имеет достаточно компактные размеры, что ведет к уменьшению массогабаритных показателей установки в целом.

Канал солнечного генератора организован посредством линейного регулятора напряжения, питающего источник света ИС, направленный на солнечную панель СП. С помощью инвертора ИН1 энергия постоянного тока преобразуется в энергию переменного тока, а затем с помощью повышающего трансформатора согласуется по напряжению с шиной нагрузки.

Выбор солнечных панелей для физической модели осуществлялся по таким критериям, как: КПД; выходная мощность; напряжение в точке максимальной мощности; размер модуля; и др.

Следует отметить, что в фотоэнергетике есть различные стандартные параметры и тестовые условия, при которых определяются эффективность и производительность солнечных панелей. Одним из таких параметров солнечных модулей является так называемая температура модуля при типичных условиях эксплуатации. (от англ. NOCT – Normal Operating Cell Temperature). Номинальная рабочая температура солнечного элемента (NOCT) измеряется при освещении солнечной панели солнечным светом интенсивностью 800 Вт/м² и температуре воздуха 20°C. Цепь электрическая при этом разомкнута, угол наклона модуля 45° с ориентацией на юг. Чем ниже NOCT, тем лучше будет работать модуль в реальных условиях.

Напряжение солнечного элемента изменяется примерно на 0,08 В на каждый градус изменения его температуры относительно температуры STC (от англ. Standard Test Conditions — стандартные тестовые условия) – 25°C. Поэтому, если напряжение при STC составляет 17 В, то в реальных условиях ра-

боты оно может стать 15 или 16 В. Таким образом, модуль с 43°C NOCT произведет примерно на 3% больше энергии, чем модуль с 50°C NOCT при прочих равных условиях. Из этого следует вывод, что лучшими панелями являются те, которые имеют минимальную NOCT.

Учитывая это, а также ряд других критериев, было принято решение использовать панели CHN15-36M фирмы Chinaland Solar Energy общей максимальной выходной мощностью (STC) 150 Вт.

Отличительной особенностью данной гибридной электростанции является суммирование потоков энергии генераторов по шине переменного тока. Таким образом, организация одновременной работы нескольких генерирующих электроэнергию каналов требует синхронизации выходного напряжения нескольких преобразователей по амплитуде, частоте и фазе. Кроме того, управляющая программа ПЛК, реализующая контроль над работой физической модели гибридной электростанции, включает в себя не только алгоритмы работы самой энергоустановки, но и управление характеристиками ДГУ и ВЭУ.

Для выполнения поставленной задачи используется высокопроизводительный контроллер Unitronics V570-57-T20B серии «Vision OPLC». «Vision OPLC» – программируемые логические контроллеры, которые содержат в своей комплектации встроенную панель управления. Эти контроллеры совместимы с различными типами модулей ввода/вывода «Unitronics». Это позволяет строить системы управления на основе «Vision», способные автоматизировать самые разнообразные варианты применения аналогового и цифрового оборудования. В состав данной панели управления «Vision OPLC» входит сенсорный графический экран, позволяющий организовать эргономичный человеко-машинный интерфейс. Особенностью данной установки является большое количество аналоговых датчиков, за показаниями которых необходимо следить в ходе работы электростанции. Чтобы иметь возможность контролировать необходимые параметры в реальном времени, используется адаптер внешних модулей ввода-вывода EX-A2X I/O Expansion Adapter, а также два модуля внешних аналоговых входов IO-AI8.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ (государственное задание №13.2078.2017/ПЧ).

Библиографический список

1. **Дарьенков, А.Б.** Гибридная ветроэлектростанция на основе дизель-генератора переменной частоты вращения: материалы XIII Международной молодежной научно-технической конференции / С.А. Владимирова, Е.А. Гусева.; НГТУ. – Н. Новгород, 2014. С. 60-61.
2. **Бадугин, Д.А.** Испытательный стенд задатчика экономичного режима ветродизель-электрической станции / Д.А. Бадугин, Е.В. Бычков, А.Б. Дарьенков, В.Л. Мельников, В.В. Соколов: сб. научно-технич. ст. // Актуальные проблемы электроэнергетики; НГТУ, Н.Новгород, 2014. С. 147-151.
3. **Дарьенков, А.Б.** Автономная дизельная электростанция с нейросетевым задатчиком экономичного режима / А.Б. Дарьенков, О.С. Хватов // Промышленная энергетика, 2013. № 12. С. 26-29.

УДК 621.311.001.57

А.Б. Дарьенков, Д.М. Кочеганов, А.И. Байков, Т.Х. Абузьяров**ПРИМЕНЕНИЕ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ
ДЛЯ АНАЛИЗА ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ВЕТРОКАНАЛА
АВТОНОМНОЙ ГИБРИДНОЙ ЭЛЕКТРОСТАНЦИИ**

Нижегородский государственный технический университет им. П. Е. Алексеева

Статья посвящена математическому моделированию работы ветроканала автономной гибридной электростанции. Выполнен спектральный анализ осциллограмм. Проанализированы расчетные диаграммы фазных токов и линейных напряжений на нагрузке при работе преобразователя от трехфазных источников ЭДС.

The article devoted to the mathematical modeling of the wind channel of an autonomous hybrid power plant. Spectral analysis of the oscillograms is performed. Calculated diagrams of phase currents and linear voltages on the load during the operation of the converter from three-phase sources of EMF are analyzed.

Ключевые слова: гибридная электростанция, математическое моделирование, матричный преобразователь частоты, Matlab Simulink.

Key words: hybrid power plant, mathematical modeling, matrix converter, Matlab Simulink.

Совершенствование автономных электростанций, использующих альтернативные источники энергии, является актуальной научно-технической задачей. Определение технико-экономических показателей предлагаемых решений, как правило, выполняется на основе математического моделирования.

При анализе работы гибридных электростанций большое значение имеет учет взаимодействия блоков, образующих один из каналов преобразования энергии, т.е. генераторов, турбин и преобразователей параметров электроэнергии.

В данной работе проводится моделирование процессов функционирования ветроканала автономной гибридной электростанции, в котором, благодаря использованию матричного преобразователя частоты (МПЧ), обеспечивается поддержание параметров выходного напряжения на заданном уровне при изменении параметров ветра. Исследуется работа канала на активно-индуктивную нагрузку при использовании синхронного генератора мощностью 16 кВт.

На рис. 1 представлена принципиальная схема трехфазно-трехфазного матричного преобразователя частоты с нумерацией силовых транзисторов.

Для управления МПЧ применяется следующий алгоритм: выходное напряжение преобразователя формируется из линейного входного напряжения, имеющего максимальное значение на данном временном отрезке.

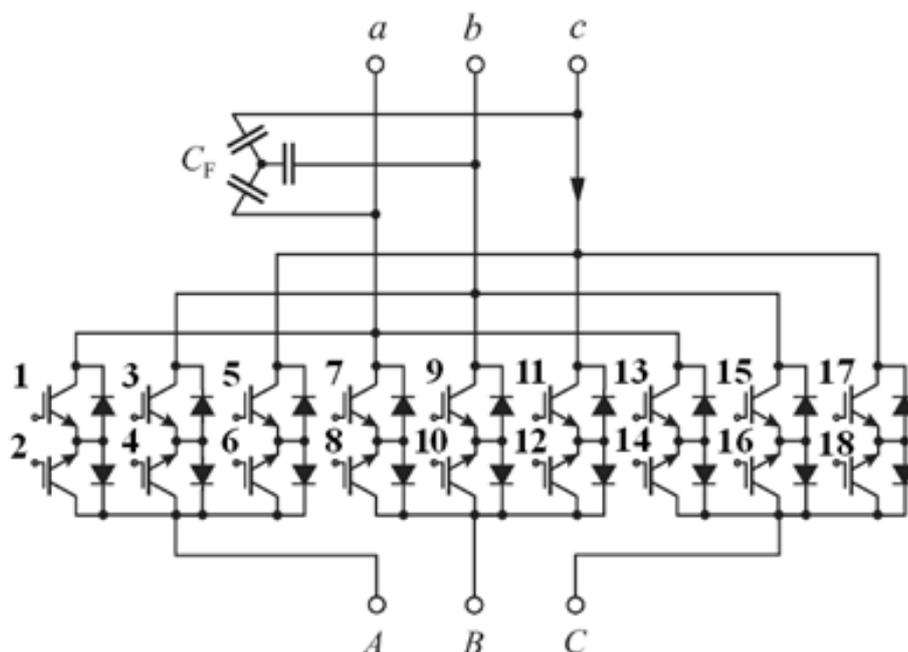


Рис. 1. Принципиальная схема преобразователя

Период входного напряжения разбивается на шесть интервалов, на каждом из которых силовые транзисторы преобразователя находятся в одном из трех положений: всегда включен, всегда выключен, режим модуляции (рис. 2, а). Эквивалентная схема для первого из интервалов приведена на рис. 2, б.

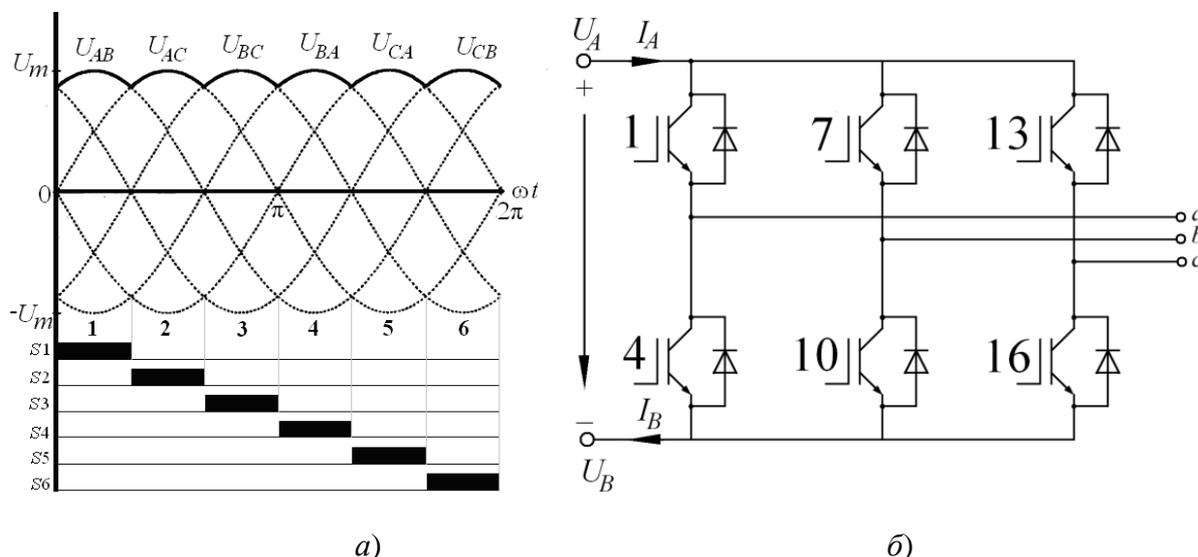
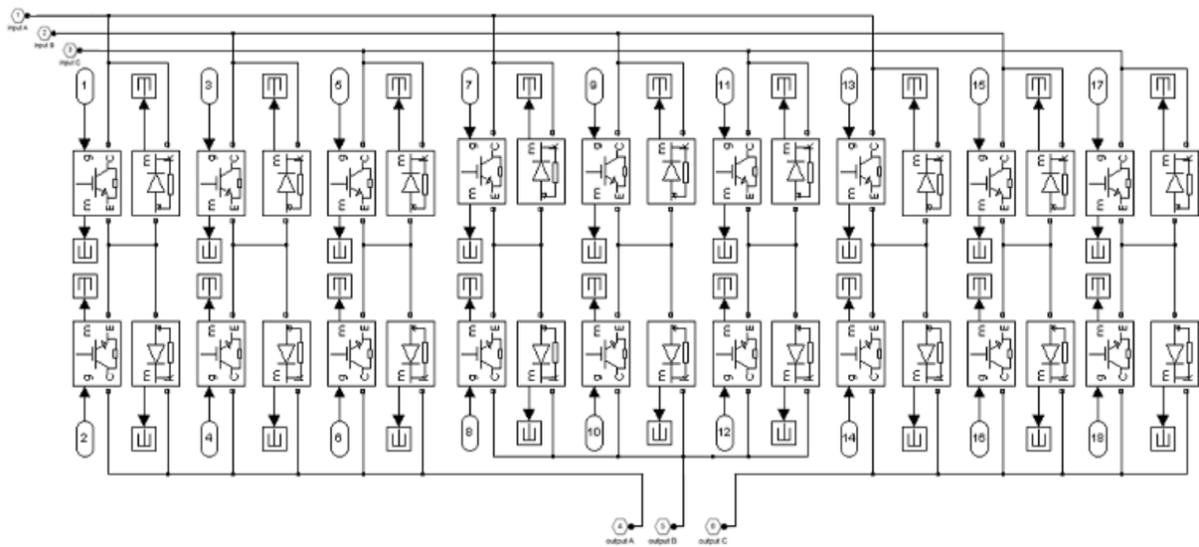


Рис. 2. Представление МПЧ как автономного инвертора напряжения:
а – интервалы работы; б – эквивалентная схема первого интервала

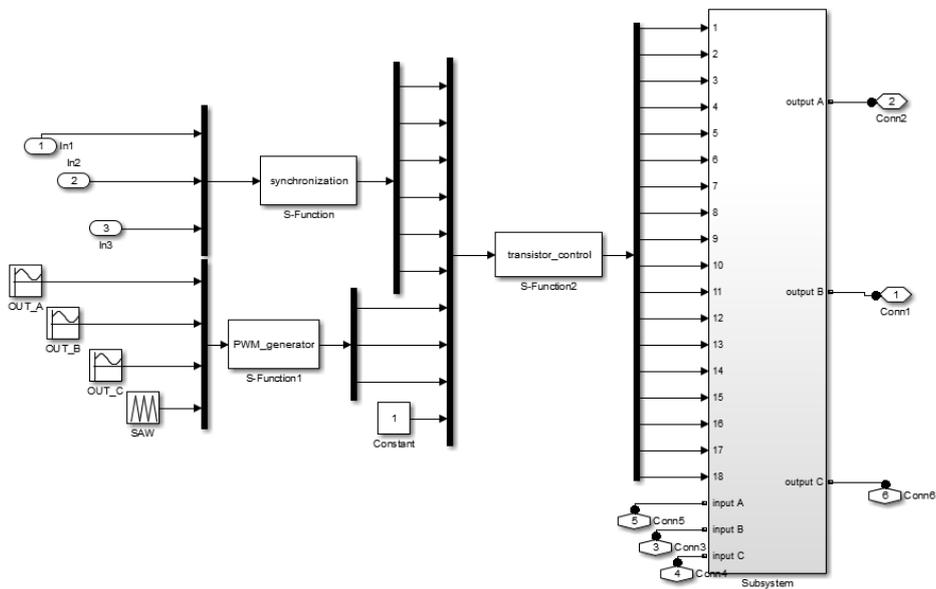
На этом интервале при наибольшем линейном напряжении U_{AB} в режиме модуляции будут находиться транзисторы 1, 7, 13 фазы A и транзисторы 4, 10, 16 фазы B . Транзисторы фазы C находятся в выключенном состоянии, а транзисторы 2, 8, 14 фазы A и 3, 9, 15 фазы B – во включенном для обеспечения возможности протекания обратного тока в нагрузке. Аналогично осуществляется работа на других интервалах.

Моделирование производится в среде *Matlab Simulink*. На рис. 3 представлена модель матричного преобразователя частоты, включающая систему управления, состоящую из блоков *s*-функций, в которых описывается алгоритм управления на языке *MATLAB*, и силовую схему, построенную с использованием стандартных блоков *IGBT*-транзисторов и диодов из библиотеки *SimPowerSystems*.

На рис. 4 показана общая модель ветроканала автономной электростанции, использующая в качестве субблока модель МПЧ, а также включающая в себя блоки синхронного генератора и активно-индуктивной нагрузки.



а)



б)

Рис. 3. Модель МПЧ:

а – силовая схема; б – система управления

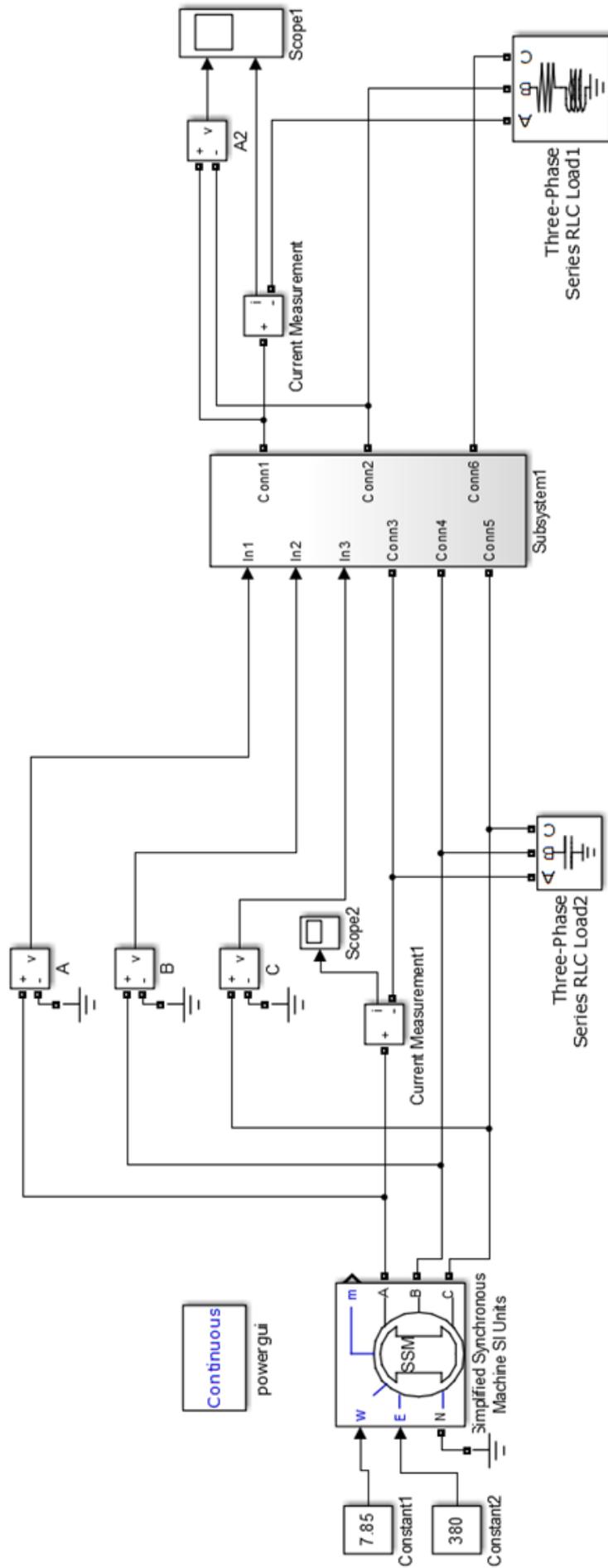


Рис. 4. Модель ветроканала автономной электростанции

Спектральный анализ осциллограмм осуществляется с помощью инструмента *Fast Fourier transform*.

Как непосредственные результаты моделирования представлены расчетные диаграммы фазных токов и линейных напряжений на нагрузке при работе преобразователя от трехфазного источника ЭДС (рис. 5, а) и при питании от генератора, работающего в статическом режиме при постоянной скорости ветра (рис. 5, б).

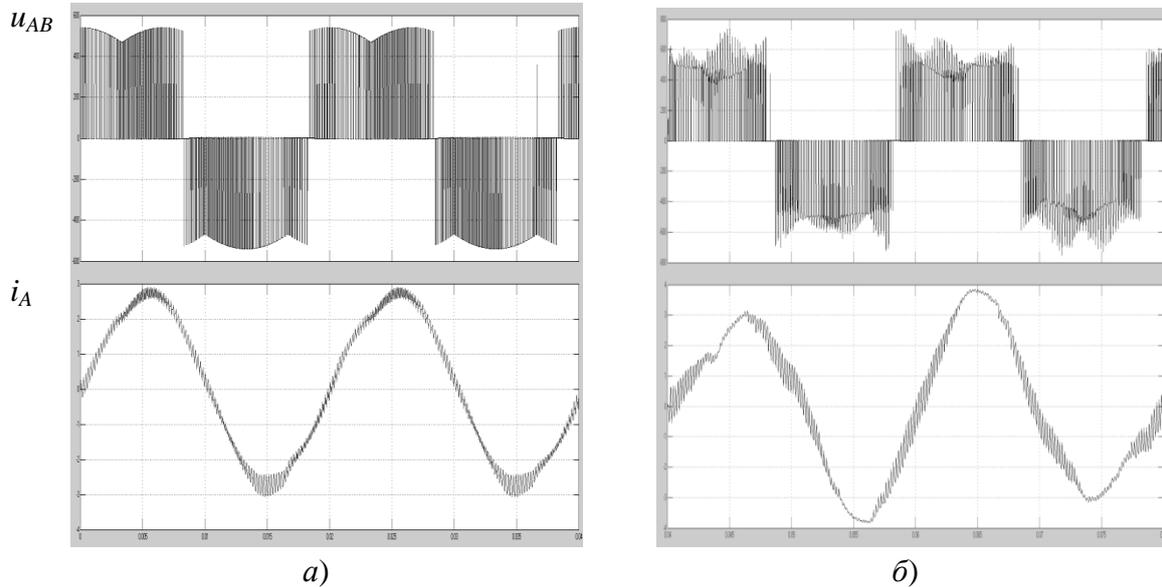


Рис. 5. Осциллограммы линейного напряжения нагрузки (u_{AB}) и фазного тока нагрузки (i_A):

а – при использовании источника ЭДС; б – при использовании синхронного генератора

На рис. 6 приведен спектральный анализ кривой линейного напряжения.

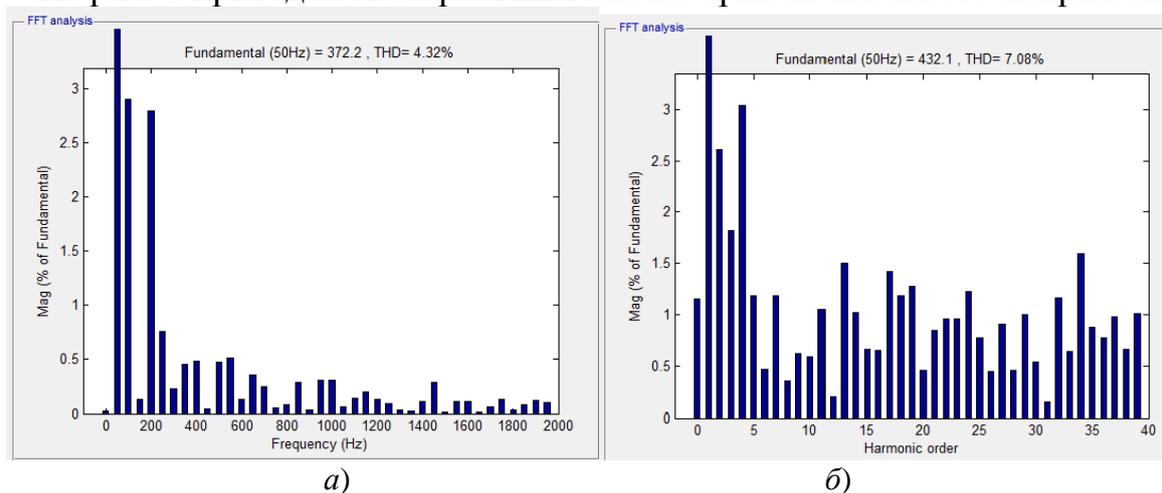


Рис. 6. Результаты спектрального анализа кривых линейного напряжения:

а – при использовании источника ЭДС; б – при использовании синхронного генератора

Форма кривой линейного напряжения нагрузки при использовании синхронного генератора близка к форме кривой напряжения при использовании источника ЭДС.

На рис. 7 приведены результаты спектрального анализа кривой потребляемого тока преобразователя.

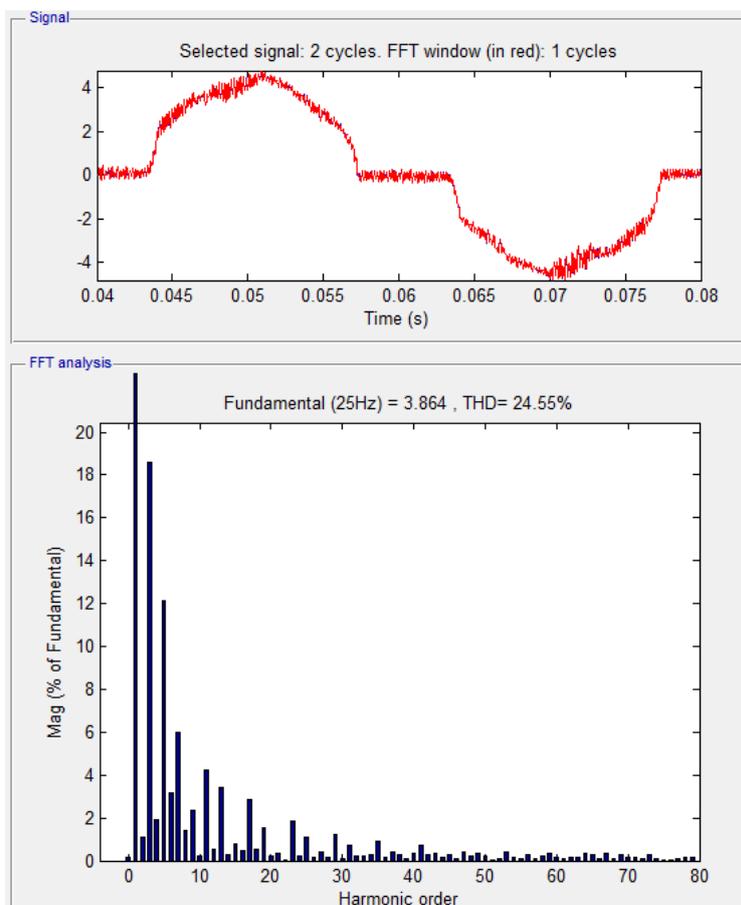


Рис. 7. Результаты спектрального анализа кривой потребляемого тока

СКГС матричного преобразователя частоты с данным алгоритмом управления составил 24.55%, что примерно равняется СКГС преобразователей частоты на базе автономных инверторов. Применение более сложных алгоритмов управления матричным преобразователем позволит значительно уменьшить это значение.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ (государственное задание №13.2078.2017/ПЧ).

Библиографический список

1. Дарьенков, А. Б. Макет матричного преобразователя частоты / А.Б. Дарьенков, О.С. Хватов, Д.А. Корнев, И.А. Варыгин // Материалы XI молодежной научно-технической конференции; НГТУ. – Н. Новгород, 2012. С. 58.
2. Дарьенков, А. Б. Оптимизация алгоритма управления матричным преобразователем частоты / А.Б. Дарьенков, О.С. Хватов, И.А. Варыгин, Д.А. Корнев // Состояние и перспективы развития электротехнологии» (XVII Бенардосовские чтения): материалы международной научно-технической конференции; ИГЭУ им. В.И. Ленина. – Иваново, 2013. Т. 3. С. 65.

УДК 621

А.Б. Дарьенков¹, И.С. Самоявчев²**ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ РЕКУПЕРАЦИИ ТЕПЛА
В ОКРАСОЧНЫХ ЦЕХАХ АВТОЗАВОДА «ГАЗ»**

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева¹,
Автомобильный завод «ГАЗ», Нижний Новгород²

Рассмотрена технология рекуперации энергии от тепловых выбросов промышленных объектов с применением установок на основе органического цикла Ренкина (ОЦР). Описан принцип действия ОЦР-установок. Произведен расчет экономии от использования ОЦР-установки на примере двух окрасочных цехов автомобильного производства. Произведен расчет окупаемости ОЦР-установок.

The article considers the technology of energy recovery from thermal emissions of industrial facilities with the use of installations based on the Organic Rankine Cycle (ORC). The principle of action of the OCR-installations is described. The calculation of savings from the use of the OCR-installation on the example of two paint shops of automobile production is made. The calculation of the recoupment of OCR-installations is made.

Ключевые слова: органический цикл Ренкина, ОЦР, экономия энергии, рекуперация тепловой энергии, расчет окупаемости.

Key words: Organic Rankine Cycle, ORC, energy saving, heat energy recovery, payback calculation.

Промышленные предприятия выбрасывают в окружающую среду большое количество тепловой энергии вместе с потоками продуктов сгорания и охлаждающей жидкости при относительно низкой температуре. Это обстоятельство зачастую крайне неблагоприятно воздействует на окружающую среду, загрязняя ее и приводя к изменению климата. Кроме того, стоимость выброшенной энергии, в конечном итоге, закладывается в себестоимость продукции. Поэтому в последнее время прилагаются большие усилия по утилизации тепловых отходов промышленных предприятий [1].

Для утилизации низкопотенциальной энергии все чаще применяется цикл Ренкина с альтернативными рабочими телами, в качестве которых обычно используются органические вещества: соединения углерода, за исключением карбидов, карбонатов, оксидов углерода и цианидов, с более низкой, чем у воды, температурой кипения. Благодаря этому обстоятельству, появляется возможность реализации цикла Ренкина при относительно низкой температуре. Соответствующий цикл получил название «Органический цикл Ренкина» (ОЦР) - Organic Rankine Cycle. Принято считать, что источник энергии является низкопотенциальным, если его температура не превышает 500-570К (230-300°C). Рабочим телом в ОЦР является вещество, имеющее более низкую, чем у воды, температуру кипения. Благодаря этому, испарение

рабочего тела происходит при относительно низкой температуре, что и позволяет утилизировать низкопотенциальную энергию.

На рис. 1 приведены две схемы, иллюстрирующие идею ОЦР. На рис. 1,а изображена схема ОЦР без регенератора, на рис. 1,б – схема ОЦР с регенератором. Принцип работы установки заключается в следующем. На рис. 1,а насос закачивает рабочее тело в жидком состоянии в нагреватель, где при высоком давлении оно испаряется, далее пар попадает в турбину, в которой, расширяясь, совершает работу. Вал турбины вращается и приводит в действие электрогенератор. Отработанный пар охлаждается, и рабочее тело конденсируется. Далее вещество в жидком состоянии попадает в насос и цикл замыкается. В схеме на рис. 1,б рабочее тело на выходе из турбины попадает в регенератор, где отдает часть тепловой энергии сжатой жидкости, которая направляется в нагреватель. Тепловая энергия может переноситься от источника теплоты к рабочему телу с использованием промежуточного теплоносителя, в качестве которого обычно применяется термальное масло. Использование промежуточного теплоносителя позволяет избежать локального перегрева рабочего тела. При наличии больших потоков энергии в ОЦР эффективнее использование турбины. Если же потоки энергии невелики, предпочтительнее использовать поршневой детандер. Кроме того, поршневые детандеры более приспособлены для работы в условиях флуктуаций тепловых потоков от внешнего источника теплоты.

На рис. 2 представлен общий вид ОЦР-установки, а на рис. 3 - схема потоков энергии от источника бросового тепла к ОЦР-установке и к потребителям.

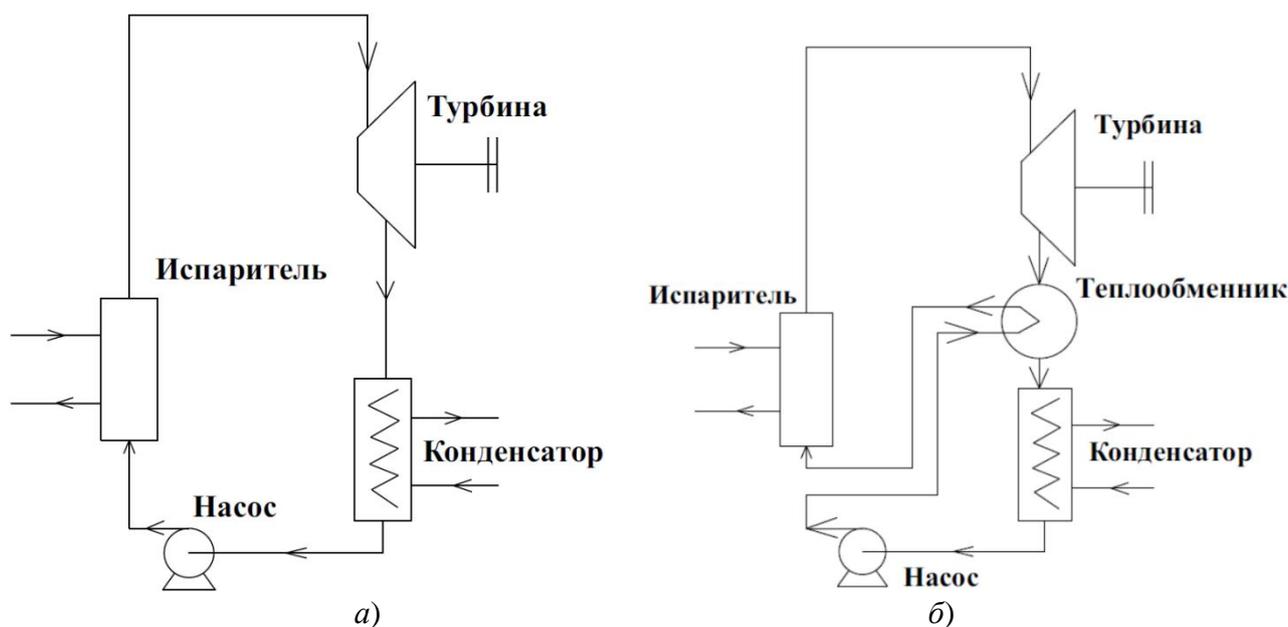


Рис. 1. Схема ОЦР-установки:

а - без регенератора; б - с регенератором

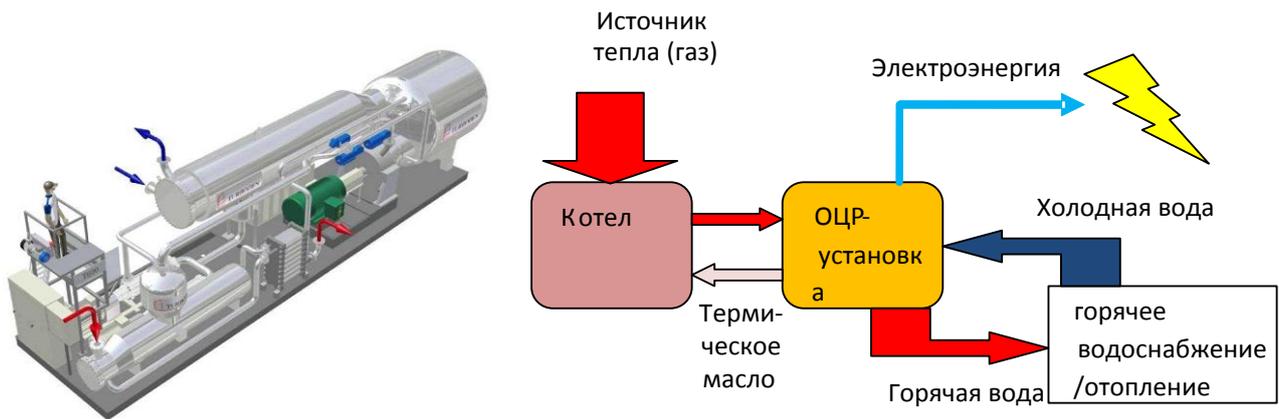


Рис. 2. Рекуперация тепловой энергии с помощью ОЦР-установки

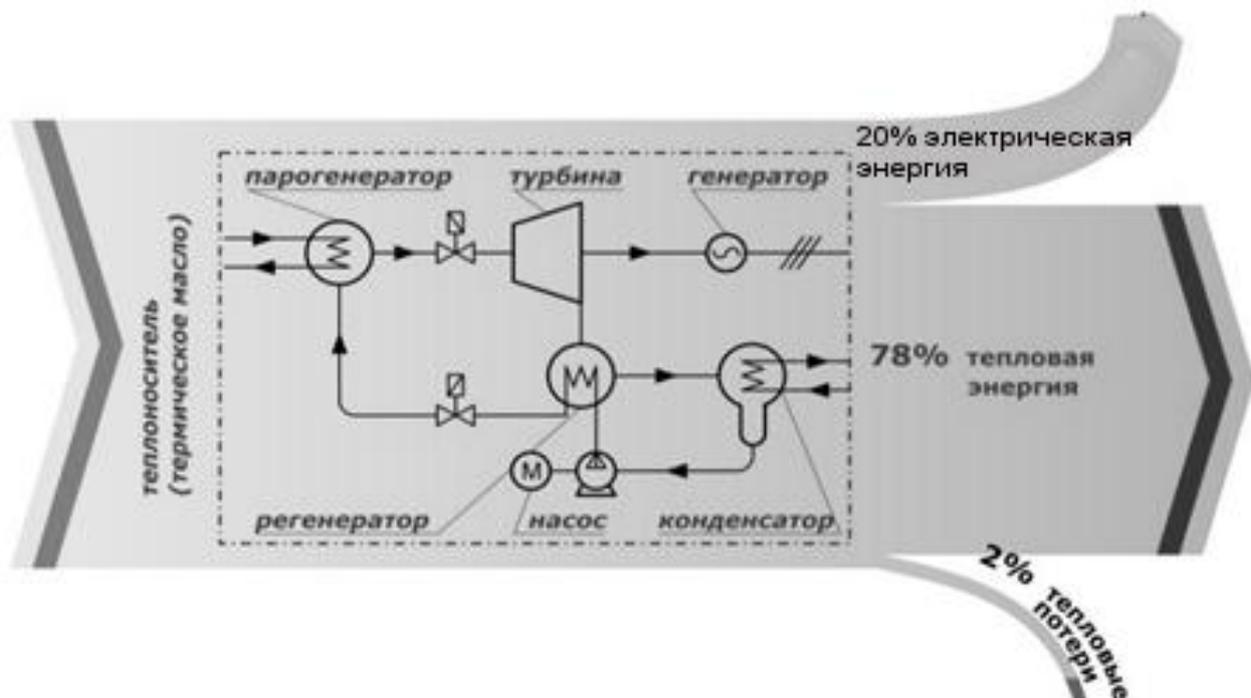


Рис. 3. Энергетическая диаграмма ОЦР-установки

Из приведенной диаграммы следует, что 20% тепловой энергии, переданной ОЦР-установке, может быть преобразовано в электроэнергию, 80% энергии остается в виде тепла и может быть использовано для отопления или горячего водоснабжения. Таким образом, целесообразность применения ОЦР-установок значительно выше там, где существует стабильное потребление тепловой энергии.

В действительности КПД ОЦР-установки по выработке электроэнергии зависит от множества параметров.

В табл. 1 приведена зависимость КПД ОЦР-установок от температуры бросового тепла и охладителя [4], в табл. 2 - расчет количества утилизируемого тепла в цехах окраски № 1 и 2.

Таблица 1

КПД ОЦР-установок

Температура бросового тепла, °C	Температура бросового тепла, °F	Температура охладителя, °C	Температура охладителя, °F	КПД цикла Карно ОЦР-установки, %	КПД ОЦР-установки, %
<38	<100	49	120	-	-
38-93	100-200			12,0	4,0
93-149	200-300			24,4	8,1
149-204	300-400			33,7	11,2
204-260	400-500			41,0	13,7
260-316	500-600			46,8	15,6
316-371	600-700			51,6	17,2
371-427	700-800			55,6	18,5
427-482	800-900			59,0	19,7
482-538	900-1000			61,9	20,6
538-593	1000-1100			64,5	21,5

Для определения количества электроэнергии, которое может быть рекуперировано ОЦР-установкой, рассчитывается количество утилизируемого тепла [2]:

$$Q_B^ч = L \rho_B c_B (t_{in} - t_{out}), \quad (1)$$

где L – расход воздуха; ρ_B – плотность воздуха; c_B – удельная теплоемкость воздуха; t_{in} – температура на входе ОЦР-установки; t_{out} – температура на выходе ОЦР-установки.

Таблица 2

Расчет количество утилизируемого тепла

№ п/п	Параметр	Цех окраски	
		№1	№2
1	Температура воздуха на выходе из трубы (t_{in}), °C	175	205
2	Температура воздуха на выходе ОРС-установки (t_{out}), °C	20	20
3	Объем выбрасываемого воздуха (L), м ³ /ч	47043	31320
4	Удельная теплоемкость воздуха (c_B), Вт/(кг*град)	0,279	0,279
5	Плотность воздуха (ρ_B), кг/м ³	0,79	0,79
6	Количество утилизируемой тепловой энергии,	1,6	1,3
7	Электрический КПД, %	11,2	11,2
8	Электрическая мощность ОРС-установки, МВт	0,18	0,15

На основании данных из табл. 1,2 может быть определено количество электрической и тепловой энергии, рекуперированной ОЦР-установкой, а также произведен расчет суммарной годовой экономии от утилизации бросового тепла (табл. 3).

Таблица 3

КПД ОЦР-установок

№ п/п	Параметр	Цех окраски	
		№1	№2
1	Наработка установки, ч/год	4000	4000
2	Электрическая мощность установки, МВт	0,18	0,15
3	Потребляемая электрическая мощность на освещение, МВт	1,15	0,57
4	Тепловая мощность установки, МВт	1,28	1,02
5	Выработка эл.энергии, МВт*ч/год	718	571
6	Ст-ть эл.энергии, руб/МВт*ч	4500	4500
7	Экономия от выработанной эл.энергии, млн руб/год	3,23	2,57
8	Выработка тепловой энергии для ГВС, МВт*ч/год	5132	4078
9	Потребление тепловой энергии на ГВС, МВт*ч/год	1858	300
10	Ст-ть тепловой энергии для ГВС, руб/МВт*ч	976	976
11	Экономия от выработанной тепловой энергии, млн руб/год	1,8	0,3
12	Σ экономия, млн руб.	5,03	2,87

Ввиду нестабильности и относительно малой мощности потока бросового тепла, в качестве потребителей рекуперированной энергии может использоваться оборудование, не задействованное в технологическом процессе: освещение; горячее водоснабжение.

Как видно из табл. 3, потребление тепловой энергии на горячее водоснабжение в исследуемых цехах значительно меньше вырабатываемого тепла ОЦР-установкой. При этом потребляемая в цехах мощность на освещение в несколько раз превышает мощность ОЦР-установки. Таким образом, реальная экономия от использования ОЦР-установки будет зависеть от инфраструктурных особенностей промышленного объекта, технической возможности и количественных показателей потребления электрической и тепловой энергии.

На основании полученных данных по годовой экономии от вырабатываемой электрической и тепловой энергии, определен период окупаемости ОЦР-установки. Оценка удельных капитальных затрат на киловатт электрической мощности (ОЦР-установка, монтажные работы, теплообменник) в зависимости от электрической мощности ОЦР-установки приведена в табл. 4 [3].

Таблица 4

Удельные капитальные затраты

	Электрическая мощность ОЦР-установки				
	50-500 кВт	500-1000кВт	1-5МВт	5-20МВт	>20МВт
Удельные капитальные затраты*, руб/кВт	261000	232000	174000	145000	121800

* Исходные данные [4] приведены в долларовом выражении, при переводе - курс доллара принят равным 58 руб.

Согласно произведенным расчетам (табл. 5), период окупаемости для исследуемых цехов №1 и №2 автозавода «ГАЗ» составил 10 и 16 лет соответственно. Как было показано ранее, удельные капитальные затраты зависят от мощности ОЦР-установки и тем выше, чем меньше объем бросового тепла.

Таблица 5

Период окупаемости ОЦР-установки

№ п/п	Параметр	Цех окраски	
		№1	№1
1	Экономия от выработанной эл.энергии, млн руб/год	3,23	2,57
2	Экономия от выработанной тепловой энергии, млн руб/год	1,8	0,3
3	Стоимость технического обслуживания*, млн руб/год	0,45	0,45
4	∑ экономия, млн руб	4,6	2,4
5	Расчетная (электрическая) мощность ОЦР-установки, кВт	180	150
6	Удельные капитальные затраты, руб/кВт	261000	261000
7	Капитальные затраты, млн руб	46,98	39,15
8	Период окупаемости, лет	10	16

* Средняя стоимость обслуживания ОЦР-установок на типовых промышленных объектах [3].

Кроме того, важным фактором при оценке целесообразности использования ОЦР-установки являются инфраструктурные особенности промышленного объекта, которые будут определять техническую возможность и объем потребления электрической и тепловой энергии.

Библиографический список

1. **Белов, Г.В.** Органический цикл Ренкина и его применение в альтернативной энергетике / Г.В. Белов, М.А. Дорохова // Наука и образование. – 2014. №2. С. 99-124.
2. **Бухмиров В.В.** Тепловой расчет рекуперативного теплообменного аппарата / В.В Бухмиров, Д.В. Ракутина, Ю.С. Солнышкова, М.В. Пророкова // ФГБОУ ВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина». – Иваново, 2013. – 124 с.
3. **Ricardo, Vescovo.** ORC recovering industrial heat. Turboden. Cogeneration and On-Site Power Production, 2009.
4. **Amelia, Elson.** Waste Heat to Power Market Assessment / A. Elson, R. Tidball, A. Hampson // ICF International, Virginia , 2015.

УДК 621.313.12: 681.518.5

В.Г. Титов, А.В. Серебряков, А.С. Стеклов**МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ СИНХРОННОГО ГЕНЕРАТОРА
ПРИ РАЗЛИЧНЫХ ЗНАЧЕНИЯХ СОПРОТИВЛЕНИЯ ИЗОЛЯЦИИ**

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Разработана математическая модель для определения работоспособности синхронного генератора (СГ) в зависимости от его сопротивления изоляции. В работе показана реализация одного из модулей нейро-нечёткой модели для диагностики технического состояния судового синхронного генератора. Получены поверхности нейро-нечеткого вывода, позволяющие установить зависимости значений степени работоспособности судового синхронного генератора от различных значений сопротивления изоляции.

A mathematical model is developed to determine the efficiency of a ship synchronous generator, depending on its insulation resistance. The work shows the implementation of one of the modules of the neuro-fuzzy model for diagnosing the technical state of the ship synchronous generator. The surfaces of the neuro-fuzzy inference are obtained, which allow one to determine the dependence of the values of the ship's synchronous generator's operational capacity on different insulation resistance values.

Ключевые слова: нечёткое моделирование, синхронный генератор, сопротивление изоляции, диагностика, степень работоспособности.

Key words: Fuzzy modeling, synchronous generator, insulation resistance, diagnostics, degree of efficiency.

При эксплуатации судовых синхронных генераторов большое влияние на ресурс машины оказывает процесс изнашивания деталей. Поэтому рассмотрение основных закономерностей этого процесса и установление зависимости надежности машины от износа или старения ее деталей, лимитирующих ресурс всей машины в зависимости от реальных условий эксплуатации, является важной не только научной, но и практической задачей. Стоимость отказов максимальна у СГ - как по причине высокой собственной стоимости, сложности, надежности, так и по причине нанесения наибольшего ущерба энергетической установке в целом [1].

Электроэнергетическое оборудование состоит из конечного числа элементов, и соответственно в нем может возникнуть конечное число дефектов. Разделение множества состояний на подмножества работоспособных и неработоспособных определяет условие работоспособности, т.е. условие, при выполнении которого электроэнергетическое оборудование может выполнять возложенные на него функции.

Руководствуясь экспертной оценкой [2], получим следующие переменные для оценки степени работоспособности электрической части СГ:

- сопротивление изоляции R_{iz} ;

- отношение активной мощности на входе в СГ к активной мощности на выходе из ССГ в определенный момент времени:

$$P_{\text{ое}} = \frac{P_{\text{вх}}}{P_{\text{вых}}} = \frac{P_{\text{вх}}}{\frac{P_{\text{вх}}}{\eta}}; \quad (1)$$

- отношение реактивной мощности к номинальной реактивной мощности:

$$Q_{\text{ое}} = \frac{Q_{\text{изм}}}{Q_{\text{ном}}}. \quad (2)$$

Для корректной оценки параметров введем диапазон изменения оцениваемых переменных.

Согласно [3], для электрических машин мощностью свыше 1000 кВт сопротивление изоляции, МОм, в нагретом состоянии должно быть не менее рассчитанного по формуле:

$$R_i = \frac{100 \cdot U}{P + 1000}. \quad (3)$$

где U – номинальное фазное напряжение электрической машины, В; P – номинальная мощность электрической машины, кВт (кВА).

В рассматриваемом случае

$$R_i = \frac{100 \cdot 3641}{6751 + 1000} = 47 \text{ МОм}$$

Таким образом, необходимо оценивать значения R_{iz} в диапазоне [0; 47].

Учитывая рекомендации [4], будем оценивать диапазон значений $P_{\text{ое}}$ и $Q_{\text{ое}}$ при отклонении напряжения не более чем на 15% от номинального значения:

- $P_{\text{ое}}$ в диапазоне $\{0,85P_{\text{ое}}; 1,15P_{\text{ое}}\}$;
- $Q_{\text{ое}}$ в диапазоне $\{0,85Q_{\text{ое}}; 1,15Q_{\text{ое}}\}$.

В математической модели определения степени работоспособности электрической части входными переменными являются:

- сопротивление изоляции R_{iz} ;
- отношение активной мощности на входе синхронного генератора к активной мощности на его выходе $P_{\text{ое}}$;
- отношение реактивной мощности к номинальной реактивной мощности $Q_{\text{ое}}$.

Выходом является степень работоспособности электрической части СГ [5].

Для трех входных переменных была составлена структурная схема (рис. 1) для модели нечеткой экспертной системы в пакете *Fuzzy Logic Toolbox* вычислительной среды MATLAB.

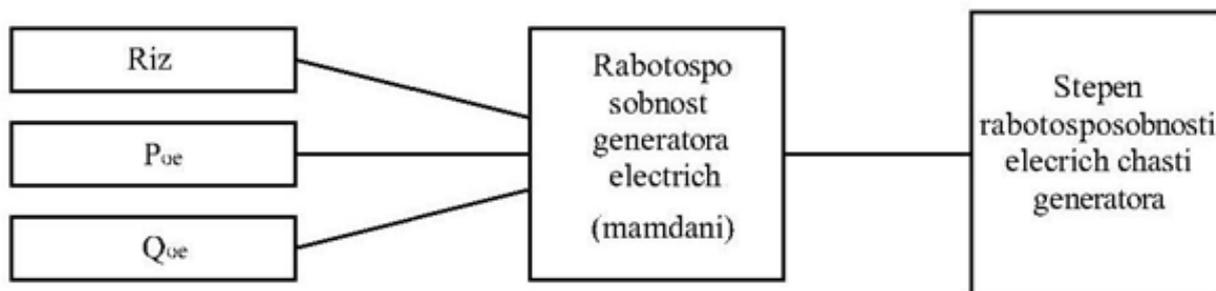


Рис. 1. Структурная схема определения работоспособности электрической части судового синхронного генератора:

Входные переменные: R_{iz} - сопротивление изоляции; P_{oe} - отношение активной мощности на входе СГ к активной мощности на выходе ССГ; Q_{oe} - отношение реактивной мощности к номинальной реактивной мощности; выходная переменная: *Stepen rabotospobnosti electric chasti generatora* – степень работоспособности электрической части ССГ; *Rabotospobnost generatora electric (mamdani)* – нечеткая система Мамдани-Заде

Лингвистическую оценку значения входных переменных P_{oe} и Q_{oe} можно вести с помощью пяти термов: {"очень низкое", "ниже нормы", "норма", "выше нормы", "очень высокое"}, а переменной R_{iz} - с помощью трёх {"очень низкое", "ниже нормы", "норма"} [6].

Выходная переменная "степень работоспособности электрической части синхронного генератора" оценивается в диапазоне от 0 до 100, где 0 – минимальное значение, 100 – максимальное значение степени работоспособности электрической части синхронного генератора.

Лингвистическая оценка значения выходной переменной производится с помощью пяти термов: {"danger", "vivod iz stroya", "tehn obslug", "kontrol", "norma"}.

Полученные графики функций принадлежности переменных R_{iz} и "степень работоспособности электрической части синхронного генератора" представлены на рис. 2, 3.

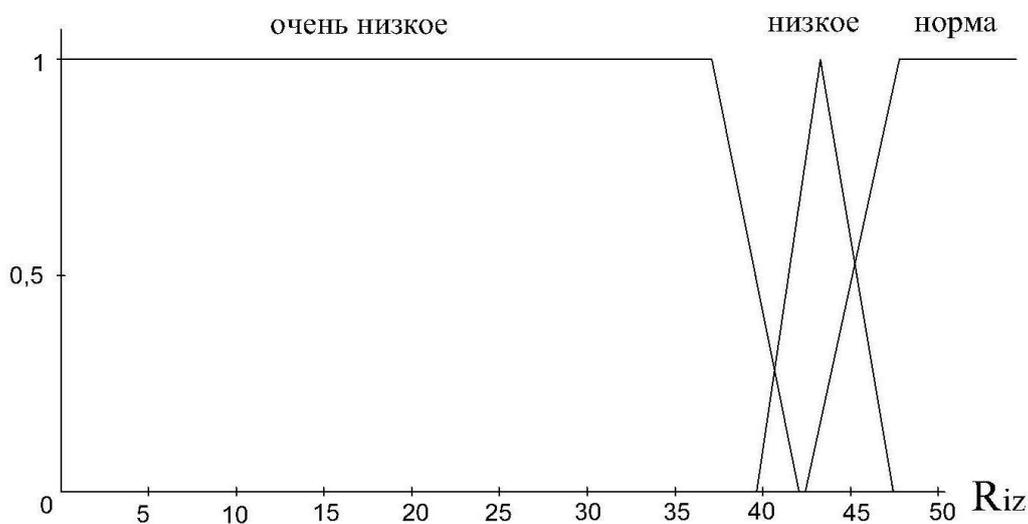


Рис. 2. Функции принадлежности переменной " R_{iz} "

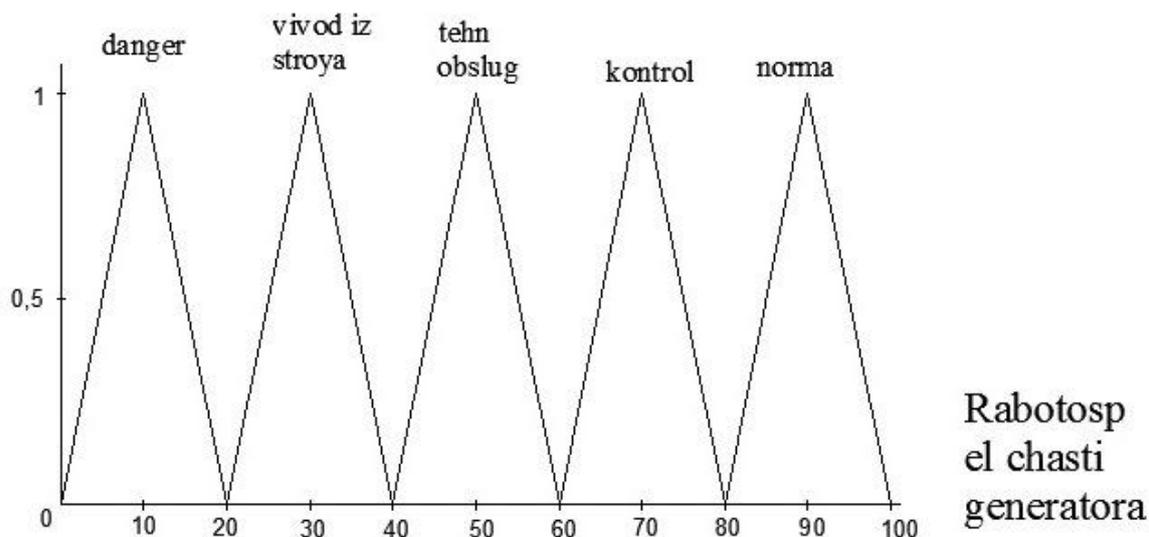


Рис. 3. Функции принадлежности выходной переменной “степень работоспособности электрической части СГ”

Причинно-следственные связи между значениями параметров и определенным интервалом степени работоспособности формализуются в виде совокупности нечётких логических правил.

Далее создается нечёткая база знаний с информацией о зависимости “значение параметров – значение степени работоспособности”, содержащей лингвистические правила.

Правила задаются экспертами на основе субъективных предпочтений о причине неисправности и не носят случайного характера. Информация может быть представлена в форме правил нечетких продукций. Для получения интересующего значения выходной переменной необходимо задать конкретное значение входной переменной [7].

Выполняется визуальный анализ поверхности вывода для нейросетевой модели, которая позволяет оценить значения выходной переменной. Выполнить анализ нейросетевой модели можно посредством визуализации поверхности нечеткого вывода. Для этой цели следует воспользоваться программой просмотра поверхности системы нечеткого вывода (рис. 4).

Поверхность нечеткого вывода позволяет установить зависимость значений работоспособности электрической части СГ от значений входных переменных нечеткой модели. Кроме того, имеется возможность установления зависимости выходной переменной от одной из входных переменных.

Программа просмотра поверхности системы нечеткого вывода позволяет визуализировать как зависит степень работоспособности электрической части СГ от различных входных параметров рассматриваемой системы, например, на рис. 4 показано как зависит степень работоспособности электрической части СГ от параметра « P_{oe} » и параметра « Q_{oe} » при различных значениях параметра « R_{iz} ».

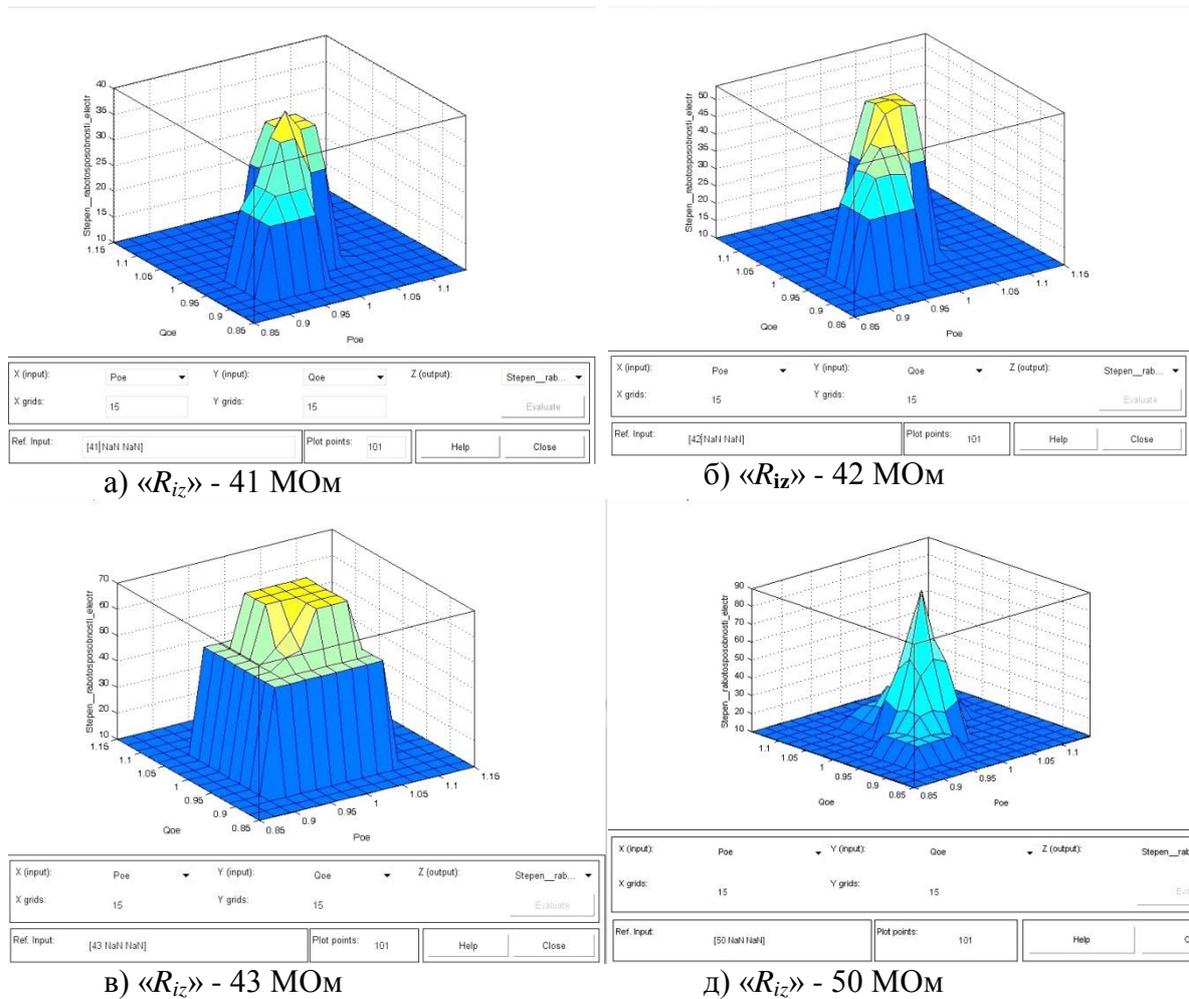


Рис. 4. Поверхности системы нечеткого вывода

Таким образом, авторами впервые предложен комплексный подход к определению степени работоспособности электрической части СГ на основе искусственного нейро-нечеткого моделирования и разработана структурная схема для определения работоспособности электрической части СГ.

Получены поверхности нечеткого вывода, позволяющие установить зависимость значений работоспособности электрической части СГ от значений входной переменной « R_{iz} ». Полученные результаты могут стать основой для создания экспертных систем диагностирования и прогнозирования технического состояния СГ.

Библиографический список

1. **Серебряков, А.В.** Энергоэффективные ветроэнергетические установки с оперативной диагностикой для автономных систем электроснабжения: дисс. ... канд. техн. наук 05.09.03 ИГЭУ/ А. В. Серебряков. – Иваново, 2013. – 173 с.
2. **Калявин, В.П.** Надежность и диагностика элементов электроустановок / В.П. Калявин, Л.М. Рыбаков. – СПб.: Элмор, 2009. – 336 с.

3. Правила технического наблюдения за постройкой судов и изготовлением материалов и изделий для судов. И. 2015 Т. 2. Ч. III, IV.
4. Межгосударственный стандарт ГОСТ ИЕС 60034-1-2014 Машины электрические вращающиеся. Часть 1. Номинальные значения параметров и эксплуатационные характеристики. – М., 2014.
5. **Стеклов, А.С.** Определение степени работоспособности судовых синхронных генераторов с применением искусственных нейро-нечетких сетей / А.С. Стеклов, В.Г. Титов, А.В. Серебряков // Вестник Чувашского университета. 2016. № 1. С. 97-104.
6. **Стеклов, А.С.** Нейро-нечеткая модель диагностирования технического состояния синхронного генератора / А.С. Стеклов, Д.С. Подковырин // Главный энергетик. 2015. № 11-12. С. 55–60.
7. **Стеклов, А.С.** Система диагностики технического состояния судового синхронного генератора / А.С.Стеклов, В.Г. Титов, А.В. Серебряков // Труды Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева, 2016. № .1 С. 60-64.

УДК 621.31

В.Г. Титов, Д.С. Кобяков**ЦИФРОВОЙ ЭЛЕКТРОПРИВОД НА БАЗЕ БЕСКОЛЛЕКТОРНОГО ДВИГАТЕЛЯ ПОСТОЯННОГО ТОКА**

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Рассмотрен цифровой электропривод на базе бесколлекторного двигателя постоянного тока. Описан алгоритм управления, конструкция и преимущества данного двигателя. Также приводятся примеры применения и рассмотрены ключевые моменты методов управления разными видами двигателей в зависимости от их конструкции. Проведен обзор современной элементной базы.

In the article digital electric drive on the basis of brushless DC motor. The described control algorithm, the construction and advantages of this engine. Also examples of the application and reviewed the key points of control methods different types of engines depending on their design. The review of modern element base.

Ключевые слова: цифровой электропривод, сигнальный процессор, бесколлекторный двигатель постоянного тока, системы управления электроприводов.

Key words: digital electric drive, signal processing, BLDC motor, control systems of electric drives.

На сегодняшний день электропривод можно представить как совокупность электромеханического преобразователя энергии (электродвигатель), силового преобразователя и цифровой платы управления. Он реализует преобразование электроэнергии в механическую энергию в соответствии с заданием на скорость или программой, которая задана в технологической установке, например системе ЧПУ. Ниши, которые занимает электрический привод, постоянно обновляются и развиваются. В наш век свыше половины всей генерируемой в мире электроэнергии потребляется электродвигателями. Из этого можно сделать вывод, что эффект от энергосберегающих устройств в значительной мере зависит от эффективности электрического привода. Одним из главных направлений развития сегодняшней техники является разработка производительных, малогабаритных и энергоэффективных электроприводов.

В данной статье рассматривается тема разработки системы управления цифровым электроприводом на базе бесколлекторного двигателя постоянного тока. Рассмотрим этот вид двигателей. Альтернативным вариантом применения коллекторных двигателей постоянного тока являются электроприводы с вентильными двигателями. Главное отличие этих электродвигателей состоит в том, что они не могут работать напрямую от сети. Чтобы добиться вращения вала и регулировать скорость вентильного двигателя, нужно создать вращающееся магнитное поле статора за счет управления транзисторами в АИН. Таким образом, магнитным потоком статора управляют электронно. Вентильный электропривод применяется в нефтедобывающей промышленности, автомобильных

приложениях, пропульсивных установках судов, станкостроении. Данный вид электропривода наиболее перспективен для станкостроения и робототехники, однако, он довольно дорого стоит. Самый дешевый электродвигатель из этого вида - это вентильно - реактивный двигатель с самовозбуждением. Этот двигатель очень технологичен и прост, а его цена дешевле асинхронного электродвигателя.

Статья посвящена разработке системы электропривода, в которой вентильный двигатель использовался в маломощном опорно-поворотном устройстве (ОПУ) радиолокационной станции с постоянным напряжением питания. Актуальность применения вентильного двигателя в маломощных ОПУ обусловлена тем, что в его конструкции нет щеточно-коллекторного узла, что увеличивает срок службы двигателя и он питается от сети постоянного напряжения 12-48 В. Также он не требует обслуживания коллектора, что позволяет использовать привод в агрессивных средах и герметичных конструкциях.

Таким образом, подводя итог, можно сделать вывод, что вентильный электропривод наиболее оптимально подходит для применения в устройствах вращения малой мощности.

На сегодняшний день электроприводы, выпускаемые промышленностью, в основном цифровые. Это значит, что ядром системы управления приводом может являться микроконтроллер или цифровой сигнальный процессор (*DSP*). Двигатель может быть асинхронным (*AC motor*), синхронным с постоянными магнитами (*PMSM*), обычным ДПТ (*BDC*) или бесколлекторным двигателем постоянного тока (*BLDC*). Силовой преобразователь, как правило, имеет топологию трехфазного мостового АИН, если речь идет не о ДПТ и не о *SRM* (вентильно-индукторный двигатель с самовозбуждением), а также не о больших мощностях.

Digital signal processor (DSP) - специальный микроконтроллер, предназначенный для цифровой обработки сигналов, в масштабе реального времени. Какие параметры *DSP* влияют на качество регулирования? Это разрядность, быстродействие, разрядность и быстродействие модуля АЦП. На сегодняшний день наиболее широкое применение нашли *DSP* фирмы *Texas Instruments*. *Texas Instruments* выпускает *DSP* семейства *Motor control - TMS320C28x*. Это 32-разрядные *DSP* с фиксированной запятой (*fixed-point*). Сигнальные процессоры *C28x*, по сути, представляют собой высокопроизводительный микроконтроллер с 32 – шиной данных [2]. Семейство *C28x* содержат периферию для приложений управления (например, *CAN*-интерфейс, модуль ШИМ и модули АЦП). Процессоры *C28x* применяются для управления приводами и цифровыми импульсными источниками питания. Тактовая частота *DSP C28x* достигает 150 МГц.

Преимущества *TMS320C28x*:

- разрядность 32 бита и возможность работы с псевдоплавающей запятой (*float-point*) посредством библиотеки *IQmath* – высокая точность регулирования;
- сильная периферия (12 битный АЦП, *CAN*, *UART*, модуль *PWM*);
- быстродействие до 150 МГц.

Недостатки *TMS320C28x*:

- последовательно выполняемая программа управления вращением двигателя и АЦП конечного быстродействия. Это накладывает временные ограничения на структуру системы управления.

В данной работе в качестве бесколлекторного двигателя использовался электродвигатель *BG 75x25* немецкой фирмы *Dunkermotoren*. Данный двигатель выбран в целях разработки и отладки системы управления, так как он имеет характеристики, аналогичные двигателю, который планировалось использовать в приводе вращения радара. Электродвигатель работал без нагрузки на валу. Внешний вид двигателя представлен на рис. 1.



Рис. 1. Внешний вид двигателя *BG 75x25*

Чтобы разобраться в алгоритме управления, рассмотрим два распространённых вида электродвигателей: синхронный с постоянными магнитами, бесколлекторный двигатель постоянного тока. В английской терминологии эти двигатели называются так:

- *BLDC (Brushless Direct Current Motor)* – бесколлекторный двигатель постоянного тока;

- *PMSM (Permanent Magnet Synchronous Machine)* – синхронный двигатель с постоянными магнитами.

Электродвигатель *BLDC* в отечественной литературе называют по-разному: и бесколлекторный двигатель постоянного тока, и бесщёточный электродвигатель, и вентильный электродвигатель. Конструктивно он представляет собой синхронный двигатель с постоянными магнитами, т.е. роль индуктора выполняют постоянные магниты, а не обмотка возбуждения. Синхронным двигателем с постоянными магнитами можно управлять в двух режимах:

- управление *BLDC* - режим автокоммутации с поддержанием фазного тока на заданном уровне на интервале коммутации;

- управление *BLAC (PMSM)* - векторный метод управления (*FOC*), который сегодня реализуется программно с помощью векторной ШИМ и координатных преобразований. Суть этого метода состоит в изменении частоты переменного трехфазного напряжения, подаваемого на статор двигателя.

Когда синхронным двигателем управляют в режиме автокоммутации, его конструкция подразумевает однополярное питание, при этом обмотки генери-

руют трапецеидальную противо-ЭДС. Ротор такого двигателя имеет явно выраженные полюса. Такой двигатель называют бесколлекторным, или в английской терминологии - *BLDC*. Если речь идет об управлении, ориентированном по полю (*FOC*), то двигатель генерирует синусоидальную противо-ЭДС. На роторе находятся не явно выраженные полюса. Такой двигатель называют синхронным, или *PMSM*. Для каждого двигателя свой метод управления. Точнее конструкция сделана под метод управления.

Управление вентиляльным приводом осуществляется с помощью *DSP*, который управляет трехфазным мостовым АИН. Различают такие понятия, как механическое вращение и электрическое (магнитное) вращения. Их соотношение зависит от числа полюсов в двигателе. Механическое и электрическое вращения зависят друг от друга:

$$n_{\text{маг}} = p \cdot n_{\text{мех}}, \quad (1)$$

где p – число пар полюсов статора.

В свою очередь один магнитный “оборот” состоит из последовательности переключений комбинаций ключей в силовом мосту. Таким образом, существует шесть комбинаций транзисторных ключей, которые в каждый момент времени питают постоянным напряжением две обмотки. Пояснение алгоритма переключения силовых транзисторов показано на рис.2.

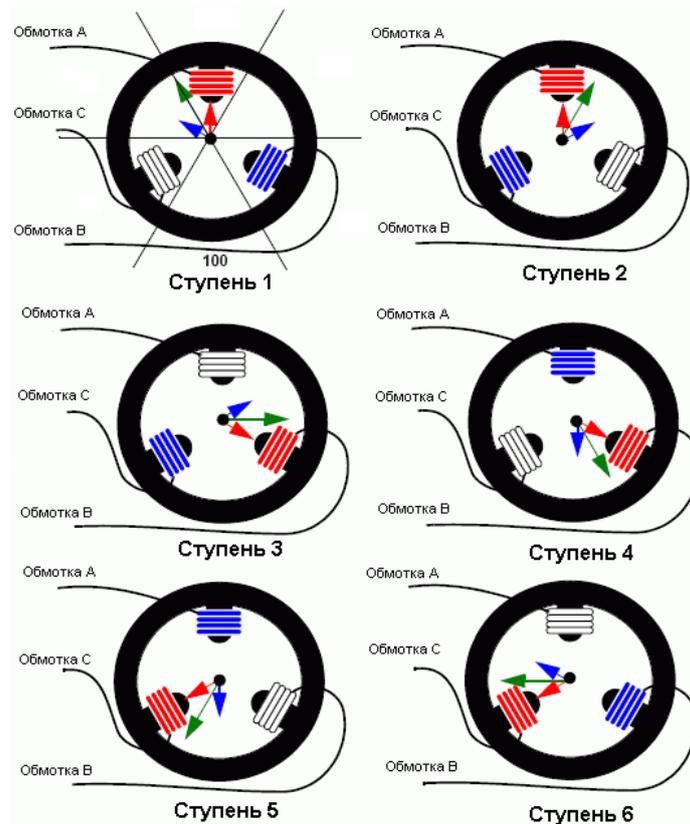


Рис. 2. Пояснение алгоритма переключения ключей

Для двигателя с $p = 1$ справедлив рис. 2. Последовательность переключения ключей всегда одна и та же и не зависит от числа пар полюсов. Функцио-

нальная схема разработанного вентиляльного электропривода представлена на рис. 3.

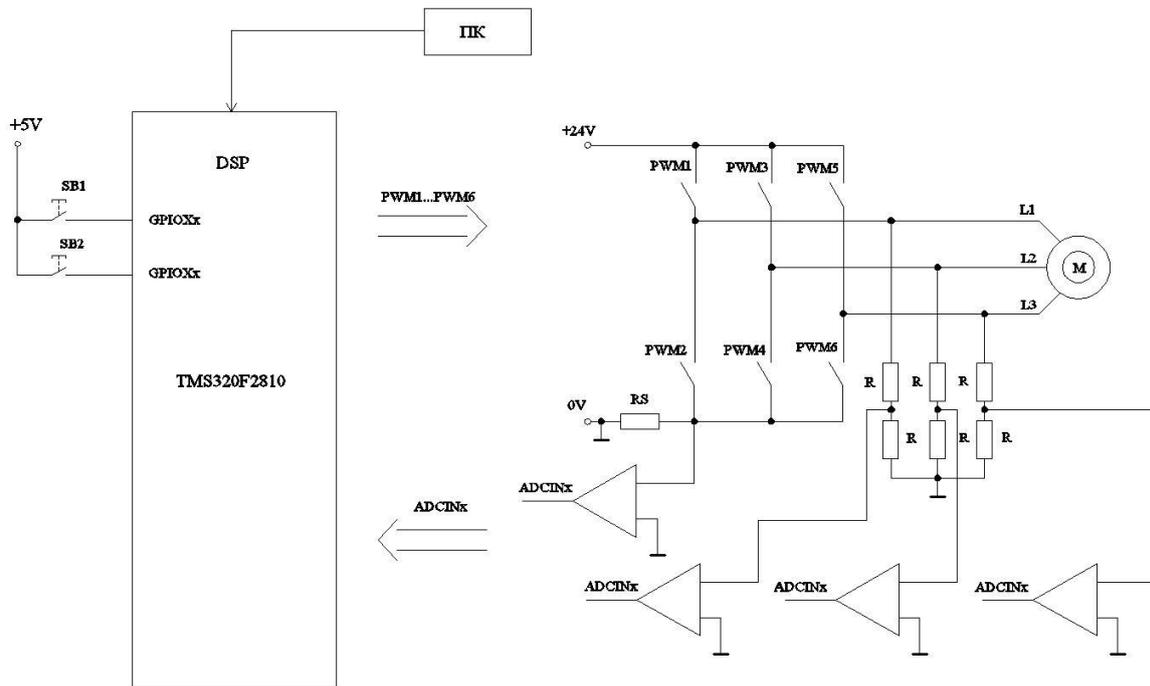


Рис. 3. Функциональная схема вентиляльного электропривода с бездатчиковым управлением

Последовательность переключения силовых ключей и состояние системы при определенной комбинации работающих транзисторов показаны в табл. 1.

Таблица 1

Таблица переключения силовых ключей

Электрические градусы	Номер сектора	Сигналы <i>PWM</i>	Фазы		
			A	B	C
0 – 60 ⁰	1	1,4	+	-	x
60 ⁰ – 120 ⁰	2	1,6	+	x	-
120 ⁰ – 180 ⁰	3	3,6	x	+	-
180 ⁰ – 240 ⁰	4	3,2	-	+	x
240 ⁰ – 300 ⁰	5	5,2	-	x	+
300 ⁰ – 360 ⁰	6	5,4	x	-	+

Рассмотрим один из графиков значений программных переменных в среде программирования *Code Composer Studio*. Функция цифрового осциллографирования позволяет строить графики программных переменных в режиме реального времени. Это используется для отладки алгоритма управления и проверки его работоспособности.

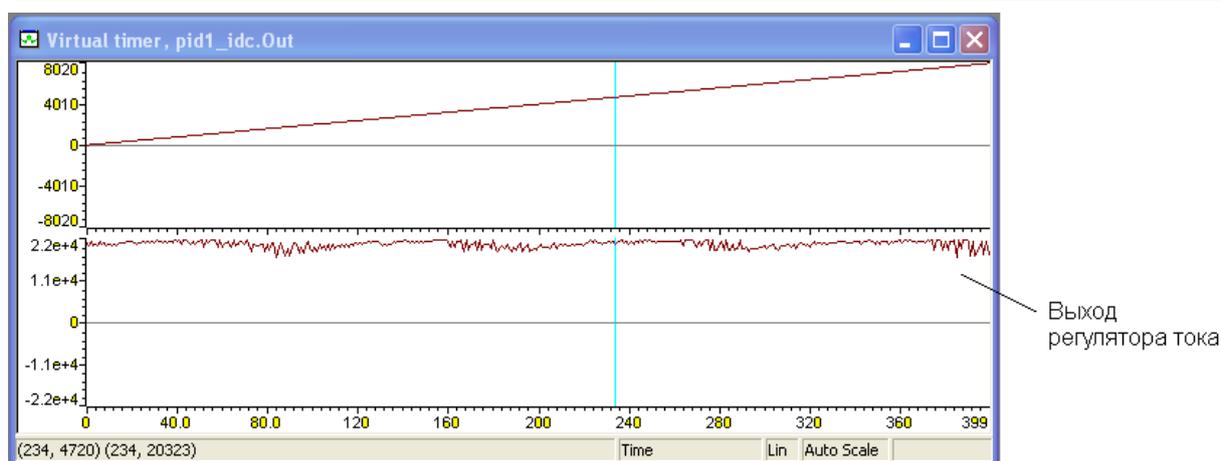


Рис. 4. Графики переменных *Virtual timer* (сверху) и *pid1_idc.Out* (снизу)

На рис. 4 показан график сигнала выхода регулятора тока при задании на скорость 3000 об/мин. Выход регулятора не находится в состоянии насыщения, так как есть определенный запас по напряжению питания. Таким образом, обеспечивается настройка контуров САР во всем диапазоне скоростей. Результаты цифрового осциллографирования подтверждают работоспособность электропривода. Разработанное программное обеспечение отлажено и может использоваться в бездатчиковых системах управления бесколлекторными двигателями постоянного тока.

Библиографический список

1. Солонина, А.И. Алгоритмы и процессоры цифровой обработки сигналов / А.И. Солонина, Д.А. Улахович, Л.А. Яковлев. – СПб.: БХВ-Петербург, 2002.–464 с.
2. *TMS320F2810, TMS320C2810 Digital Signal Processors* – Texas Instruments, 2012.

УДК 62-83:621.313

А.Ю. Смирнов, А.Ю. Зимин

**ВОПРОСЫ КОНСТРУИРОВАНИЯ И РАСЧЁТА БЕСКОНТАКТНЫХ
СИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ ДЛЯ ШАГОВОГО ПРИВОДА
ПОЗИЦИОНИРОВАНИЯ РЕГУЛИРУЮЩИХ ОРГАНОВ**

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Представлен научно-технический анализ конструкций бесконтактных синхронных машин, предназначенных для точного позиционирования регулирующих органов, методов проектирования и исследования их работы в составе шагового электропривода с частотным управлением.

The article presents a scientific and technical analysis of the construction of a brushless synchronous motor designed for the precise positioning of the regulatory bodies, methods of their design and computational studies of their work in the composition of step electric drive with frequency control.

Ключевые слова: синхронная машина, ротор, шаговый двигатель, электромагнитный момент, метод конечных элементов, электропривод, математическое моделирование.

Key words: synchronous motor, rotor, step motor drive, electromagnetic torque, element method (FEM), electric drive, mathematical modeling.

Развитие частотно-управляемого электропривода, повышение требований к его надежности стимулировало создание бесконтактных синхронных двигателей. Наибольшее распространение получили привод с переключением фаз обмотки якоря синхронного двигателя по сигналам от датчика положения ротора – вентильный привод [1] и привод с отсутствием управляющей связи между положением ротора и законом изменения напряжения или тока в фазах – шаговый привод [2].

Достоинством первого типа привода является способность устойчиво запускаться на любую частоту вращения при электромагнитном моменте двигателя, превышающем момент нагрузки, и более высокие массогабаритные и энергетические показатели.

Преимуществами шагового привода являются отсутствие развитой кинематической цепи, независимость от работы устройств обратной связи, за которыми сохраняется только функция контроля за перемещением, отсутствие «выбега» при остановке. При этом каждому импульсу напряжения или тока, поданному на фазы обмотки, соответствует перемещение ротора на строго заданный угол, называемый шагом двигателя.

Приведенные ранее достоинства, послужили причиной его использования в механизмах, предназначенных для позиционирования регулирующих органов энергетических установок, рис. 1.

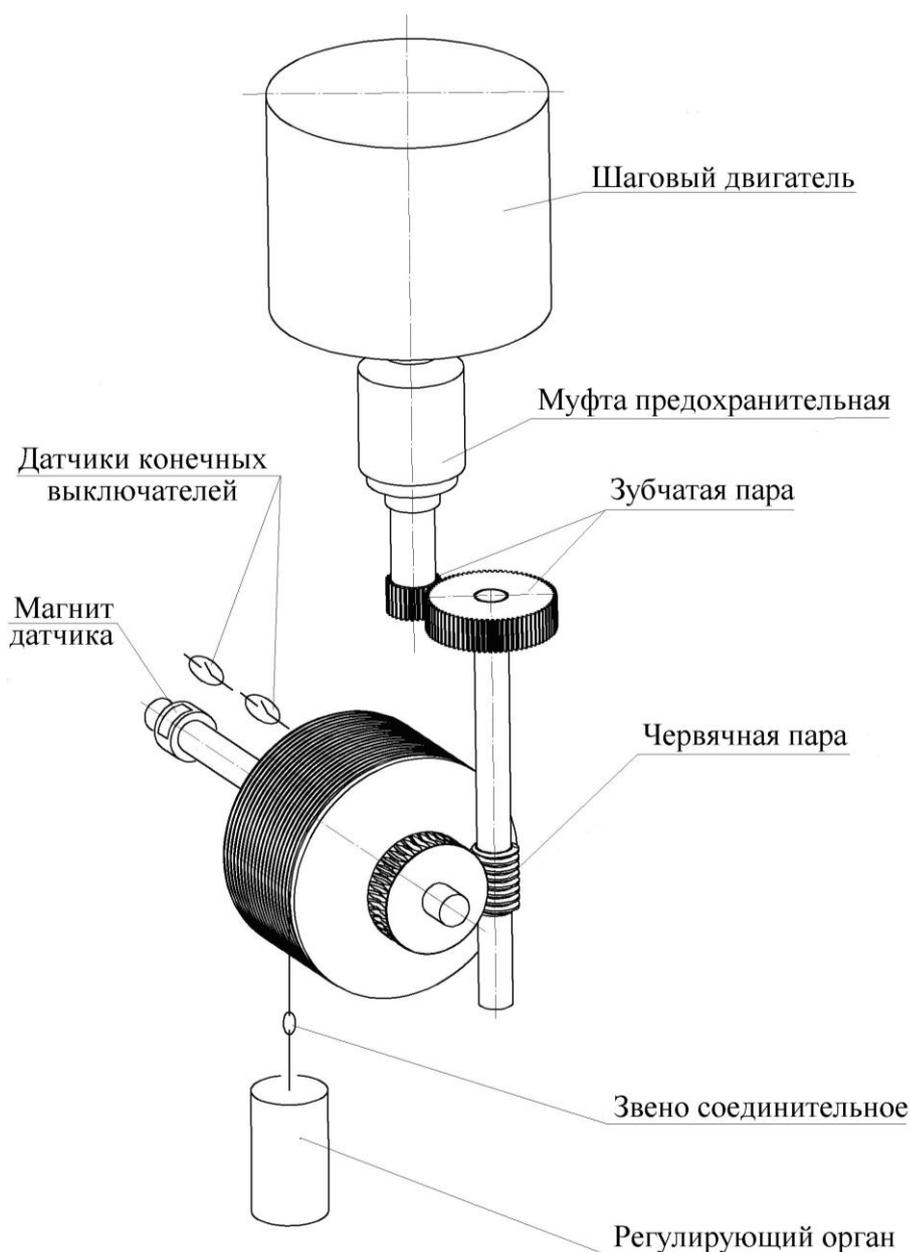


Рис. 1. Привод регулирующего органа энергетической установки

Общая теория шаговых двигателей (ШД) и дискретного электропривода на их основе впервые была разработана в Московском энергетическом институте в 60-х – 70-х годах прошлого столетия под руководством профессора М.Г. Чиликина и его учеников [2]. Ими же впервые была представлена классификация шаговых двигателей:

- с постоянными магнитами на роторе, образующими по окружности полюса чередующейся полярности (переменно - полюсные);
- реактивные;
- индукторные;
- индукторно – реактивные.

Переменно – полюсные магнитоэлектрические двигатели, содержащие ротор с составным звездообразным магнитопроводом, коллекторного типа или

с когтеобразным магнитопроводом [4] имеют ограниченное число полюсов, которые чередуются полярностью по окружности зазора. Вследствие этого, шаг таких двигателей при подаче импульсов на перемещение ротора весьма велик. Несколько устранить этот недостаток без образования магнитных систем на роторе и на статоре со слишком большим количеством полюсов позволяет двигатель с преобразованием энергии на высшей гармонике магнитного поля: 3-й или 5-й, или на одной из зубцовых. Последние используются для преобразования энергии в двигателях реактивного и индукторного типа, где для образования достаточно большого количества зубцов, обеспечивающих мелкий шаг и повышение точности позиционирования ротора, нередко используются гребенчатые зубцовые зоны на явно выраженных полюсах статора [3]. При этом реактивные двигатели и индукторные с электромагнитным возбуждением от постоянной составляющей тока в фазах, не обеспечивают фиксацию ротора в обесточенном состоянии, что влечет за собой потерю информации о положении ротора и механически связанного с ним регулирующего органа. Во избежание такого действия, а также для динамического торможения ротора отключенного двигателя, вращающегося под действием внешнего приложенного момента, в системах позиционирования предпочтительнее применение индукторных двигателей с возбуждением от постоянных магнитов, с преобразованием энергии на зубцовой гармонике. Наибольшее распространение получили переменные – полюсные индукторные двигатели с возбуждением от постоянных магнитов со стороны статора и одноименно – полюсные индукторные двигатели с возбуждением от одного или нескольких кольцевых постоянных магнитов, расположенных на роторе [3].

В зарубежной литературе можно встретить разделение переменных полюсных и одноименно-полюсных машин на следующие группы [5]:

- с двухсторонней зубчатостью (double salient PM);
- с гладким статором и переменным по направлению магнитным потоком (flux reversal PM);
- с переключаемым (управляемым) потоком постоянных магнитов (flux switching PM), в соответствии с отечественной классификацией их можно отнести к одноименно-полюсным;
- двойного возбуждения (hybrid excitation PM), с последовательным или параллельным соединением постоянных магнитов и обмотки возбуждения в общую магнитную цепь.

Одноименно – полюсные индукторные двигатели (с переключаемым потоком, по зарубежной терминологии) с расположением одного или нескольких постоянных магнитов на роторе являются гораздо более технологичными, особенно в крупносерийном и массовом производстве. Поэтому они получили широкое применение во многих областях техники, не только в качестве вентильных и шаговых двигателей, но и как высокочастотные генераторы [3].

Традиционные подходы к проектированию таких машин, как и большинства других, предполагают определение основных размеров: диаметра и длины зазора в осевом направлении через электромагнитные нагрузки: индукцию в зазоре и линейную, представляющую собой ток, приходящийся на единицу дли-

ны окружности ротора или расточки статора. Однако при таком подходе игнорируется важнейший параметр шагового привода – момент инерции его подвижных частей, приведенный к валу двигателя. О существовании диапазона наиболее благоприятных соотношений между моментами инерции шагового двигателя и привода изложено в труде профессора И.П. Копылова и его учеников [6]. Методики проектирования ШД с учетом этого параметра представлены в работах профессора Б.А. Ивоботенко [2] и в диссертации Т.Н. Уснунц – Кригер, выполненной под руководством д-ра техн. наук А.Ю. Смирнова [6].

Методы поверочного расчета ШД, как и всех синхронных машин, базируется на теории магнитных полей, неподвижных во вращающейся системе координат, и определении электромагнитного момента по приращению (убыли) их энергии. Исходя из этой теории, профессором А.В. Ивановым – Смоленским и его учениками был обоснован метод, известный под названием метода конечных макроэлементов [7]. Наибольшее распространение он получил при решении плоских (двухмерных) стационарных и квазистационарных задач расчета синхронных машин методами векторного магнитного потенциала. В трехмерной постановке задачи определения электромагнитного момента методом конечных элементов решается через расчет поля относительно скалярных магнитных потенциалов узлов сетки, без учета полей внутри областей с током.

Математическое моделирование электропривода с ШД исходит из уравнений теории электромеханического преобразования энергии, наиболее полно отраженной в учебниках профессора И.П. Копылова [8]. Моделирование электропривода с ШД может быть выполнено как в преобразованных, так и в фазных координатах. Однако последняя система координат является более наглядной и понятной в случае интеграции в состав модели полупроводниковых приборов, подключенных к фазам обмотки. Сам электромеханический преобразователь – синхронная машина, может быть представлен системой индуктивных и взаимно индуктивных связей, периодически изменяющихся по углу поворота ротора, либо полевой моделью, например, сеточной, с последующей обработкой результатов для определения фазных ЭДС или матрицы индуктивных параметров [9].

Развитие шагового электропривода во многом связано с применением новых магнитных и проводниковых материалов в электромеханических преобразователях, с внедрением новых конструкций двигателей, обладающих определёнными преимуществами в конкретных применениях, а также со всё более тесным взаимодействием машины с полупроводниковым преобразователем. В этих условиях уравнения классической теории синхронных машин, используемых при исследовании их работы в составе шагового привода, требуется дополнить или адаптировать с целью более полного учёта конструктивных особенностей двигателя, а также влияния параметров и характеристик усилителей мощности, инверторов, регуляторов и других электронных приборов, присоединённых к его обмотке.

Библиографический список

1. **Ильинский, Н.Ф.** Перспективы развития регулируемого электропривода / Н.Ф. Ильинский // *Электричество*. 2003. №2. С. 2-7.
2. **Дискретный электропривод с шаговыми двигателями** /под ред. М.Г. Чиликина. – М.: Энергия, 1971. – 624 с.
3. **Юферов, Ф.М.** Электрические машины автоматических устройств: учебник для ВУЗов / Ф.М. Юферов. – М.: Высш. шк., 1988. – 479 с.
4. **Балагуров, В.А.** Электрические генераторы с постоянными магнитами / В.А. Балагуров, Ф.Ф. Галтеев. – М.: Энергоатомиздат, 1988. – 280 с.
5. **Cheng, M.** Overview of Stator-Permanent Magnet Brushless Machines / M. Cheng, W. Hua, J. Zhang and W. Zhao // *IEEE Transaction on Industrial Electronics*, Vol. 58. No. 11, P. 5087-5101, Nov. 2011.
6. **Смирнов, А.Ю.** Проектирование индукторных двигателей с самовозбуждением для частотного привода / А.Ю.Смирнов, Т.Н. Уснунц-Кригер // *Электричество*. 2012. №5. С. 50-56.
7. **Универсальный метод расчёта электромагнитных процессов в электрических машинах**/ А.В.Иванов-Смоленский, Ю.И.Абрамкин, А.И.Власов, В.А.Кузнецов; под ред. А.В.Иванова-Смоленского. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 216 с.
8. **Копылов, И.П.** Математическое моделирование электрических машин / И.П. Копылов. – М.: Высш. шк., 1987. – 248 с.
9. **Смирнов, А.Ю.** Индукторные машины. Проектирование и вычислительный анализ (специальный курс): учеб. пособие для вузов / А.Ю. Смирнов. – М.: Изд-во Форум, – 2015. – 192 с.

УДК 62-83:621.313

А.Ю. Смирнов, А.Ю. Зимин

ИССЛЕДОВАНИЕ РАБОТЫ ОДНОИМЁННО-ПОЛЮСНОЙ ИНДУКТОРНОЙ МАШИНЫ В СОСТАВЕ ЭЛЕКТРОПРИВОДА

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Рассмотрены разработанные авторами математическая модель и алгоритм, которые использованы для исследования режима пуска одноимённого-полюсного индукторного двигателя в шаговом приводе с различными преобразователями движения, обладающими отличающимся моментом инерции вращающихся масс.

The article considers the model and algorithm developed by the authors that are used to study the start-up mode of the homopolar reluctance machine in a step drive with various motion converters having a different moment of inertia of the rotating masses.

Ключевые слова: индукторная машина, ротор, момент инерции, шаговый привод, алгоритм, модель.

Key words: reluctance machine, rotor, inertia moment, step motor drive, algorithm, model.

Предельно высокая надежность и длительный ресурс, достигаемые даже при жестких условиях эксплуатации, обусловили использование бесконтактных синхронных двигателей в современных исполнительных механизмах для перемещения регулирующих органов энергетических установок [1].

Электрическая схема (рис. 1) содержит контуры многофазной индукторной машины и элементы выходного каскада преобразователя напряжения.

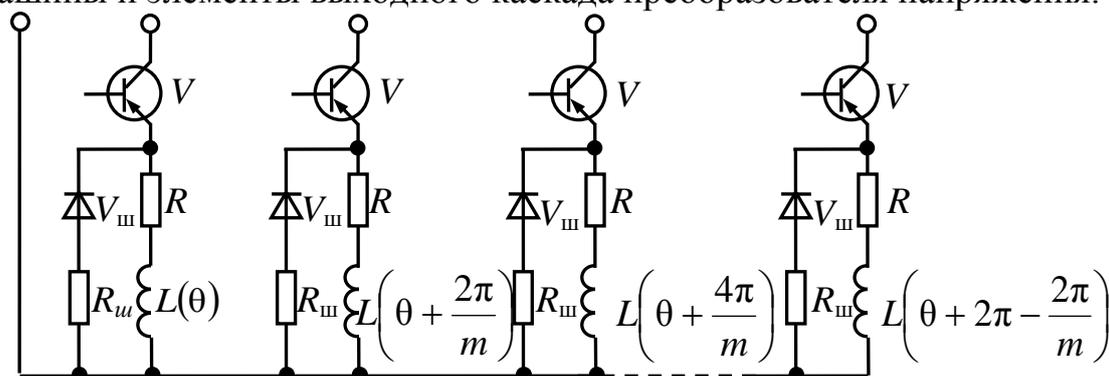


Рис. 1. Электрическая схема замещения m – фазного индукторного двигателя с преобразователем напряжения (инвертором)

Индуктивности L являются периодическими функциями угла поворота ротора θ со смещением по углу между соседними фазами обмотки на угол $2\pi/m$ электрических радиан ротора.

Выражение для электромагнитного момента m -фазного двигателя [2]:

$$M_{\vartheta} = \frac{1}{2} \sum_{j=1}^m \sum_{k=1}^m i_j \frac{dL_{jk}}{d\theta} i_k, \quad (1)$$

где i_j и i_k – токи электрических контуров с номерами i и j , всего содержащего m , по числу фаз, контуров; L_{jk} – коэффициент само- (при $j=k$) или взаимной- (при $j \neq k$) индукции j -го и k -го электрических контуров (фаз); θ – мгновенное значение координаты, положения ротора, в радианах.

Записывается система уравнений равновесия напряжений, каждое для одного электрического контура – фазы [1]:

$$u_j = R_j i_j + \sum u_{\text{тр}} + \sum u_{\text{вр}}, \quad (2)$$

где $R_j i_j$ падение напряжения на активном сопротивлении.

Вторая группа слагаемых (2), обусловленных трансформацией токов из других индуктивно связанных контуров машины, и из самого этого контура:

$$\sum u_{\text{тр}} = \sum_{k=1}^N L_{jk} \frac{di_k}{dt}. \quad (3)$$

Последние слагаемые (2) обусловлены изменением собственной или взаимной индуктивности контуров вследствие изменения положения ротора:

$$\sum u_{\text{вр}} = \sum_{k=1}^m i_k \frac{dL_{jk}}{dt} = \sum_{k=1}^m i_k \frac{dL_{jk}}{d\theta} \frac{d\theta}{dt}. \quad (4)$$

С учётом (3) и (4) уравнение (2) можно переписать в виде:

$$u_j = R_j i_j + \frac{d\psi_j}{dt} = R_j i_j + \sum_{k=1}^m \left(L_{jk} \frac{di_k}{dt} + i_j \dot{\theta} \frac{dL_{jk}}{d\theta} \right), \quad (5)$$

где ψ_j – потокосцепление j -го контура; $\dot{\theta}$ – скорость ротора; L_{jk} – собственные или взаимные индуктивности электрических контуров; u_j – мгновенное значение напряжения j -й фазы обмотки. Оно может быть представлено в виде суммы l составляющих U_n , являющихся ступенчатыми функциями времени:

$$u_j = \sum_{n=1}^l K_{nj} U_n - R_{\text{ш}} i_j \prod_{n=1}^l (1 - K_{nj}), \quad (6)$$

где K_{nj} – ступенчатые функции, принимающие значение 0 или 1 в зависимости от того, подана или не подана составляющая U_n на j -ю фазу.

Уравнения равновесия напряжений (5), интегрируемые совместно с уравнением движения [3]:

$$\frac{1}{Z} J \frac{d^2\theta}{dt^2} + M_1 + \frac{d\theta}{dt} \alpha + M_2 \text{sign} \left(\frac{d\theta}{dt} \right) = \frac{Z}{2} \sum_{j=1}^m \sum_{k=1}^m i_j i_k \frac{dL_{jk}}{d\theta}. \quad (7)$$

В уравнении движения (7) J – приведённый момент инерции; M_1 и M_2 – составляющие нагрузки: потенциальная и типа “сухое трение” соответственно; α – коэффициент составляющей нагрузки типа “вязкое трение”.

Математическая модель позволяет рассчитать значения углового ускорения $\ddot{\theta}$, угловой скорости $\dot{\theta}$ и угла θ в функции времени. Исходными данными являются: активные сопротивления $R_{\text{ф}}$, составляющие индуктивности фазы: постоянная L_0 и амплитуда первой гармоники переменной составляющей L_1 , ин-

дуктивность рассеяния L_{σ} , значение и продолжительность включения уровней напряжения U_n и T_n , число зубцов ротора Z_2 , длительность цикла коммутации фазы $T_{ц}$, параметры нагрузки J , α , M_1 и M_2 , а также шаг счёта ΔT , шаг вывода на печать ΔT_n , время окончания счёта T_k .

Ступенчатые функции управляющего напряжения представляются массивом $[\mathbf{U}]$, количество столбцов которого равно числу уровней напряжения источника n_U , включая нулевой. Каждому уровню напряжения ставится в соответствие безразмерное время (в радианах):

$$\tau = \frac{2\pi t_U}{T_{ц}}, \quad (0 < t_U < T_{ц}), \quad (8)$$

отсчитываемое от начала цикла коммутации, по прошествии которого данный уровень подаётся на обмотку фазы (вторая строка массива), где t_U – время, прошедшее от начала цикла коммутации.

Напряжение на остальных фазах определяется по этой матрице путём интерполяции, по увеличенному безразмерному времени на значение:

$$\varphi_j = \frac{2\pi}{m}(j-1), \quad (1 < j \leq m), \quad (9)$$

т.е. напряжение на второй и последующих фазах шагового двигателя в матрице $[\mathbf{U}]$ определяется по аргументу:

$$\tau_j = \tau + \varphi_j, \quad (10)$$

причём если

$$\tau_j > 2\pi, \quad (11)$$

аргумент уменьшается

$$\tau_j = \tau_j - 2\pi. \quad (12)$$

Производные по току $D_j = di_j/dt$ ($1 \leq j \leq m$) определяются путём решения системы уравнений:

$$[\mathbf{D}_j][\mathbf{L}] = [\mathbf{B}], \quad (13)$$

где $[\mathbf{D}_j]$ – искомая матрица-столбец производных по току; $[\mathbf{L}]$ – квадратная матрица индуктивностей и взаимных индуктивностей, размерностью $m \times m$; $[\mathbf{B}]$ – матрица-столбец, элементы которой представляют алгебраическую сумму падений напряжения и ЭДС вращения контура.

После решения уравнения движения (7) относительно углового ускорения $\ddot{\theta} = d^2\theta/dt^2$ и сравнения текущего времени T с заданным временем окончания счёта T_k производится численное интегрирование токов, угла и скорости по времени. Оно может быть выполнено по формуле Эйлера:

$$\begin{aligned} i_j &= i_j + D_j \cdot \Delta T, \\ \dot{\theta} &= \dot{\theta} + \ddot{\theta} \cdot \Delta T, \\ \theta &= \theta + \dot{\theta} \cdot \Delta T. \end{aligned} \quad (14)$$

Новые значения этих переменных, а также текущего времени $T = T + \Delta T$ используются для следующего цикла вычислений.

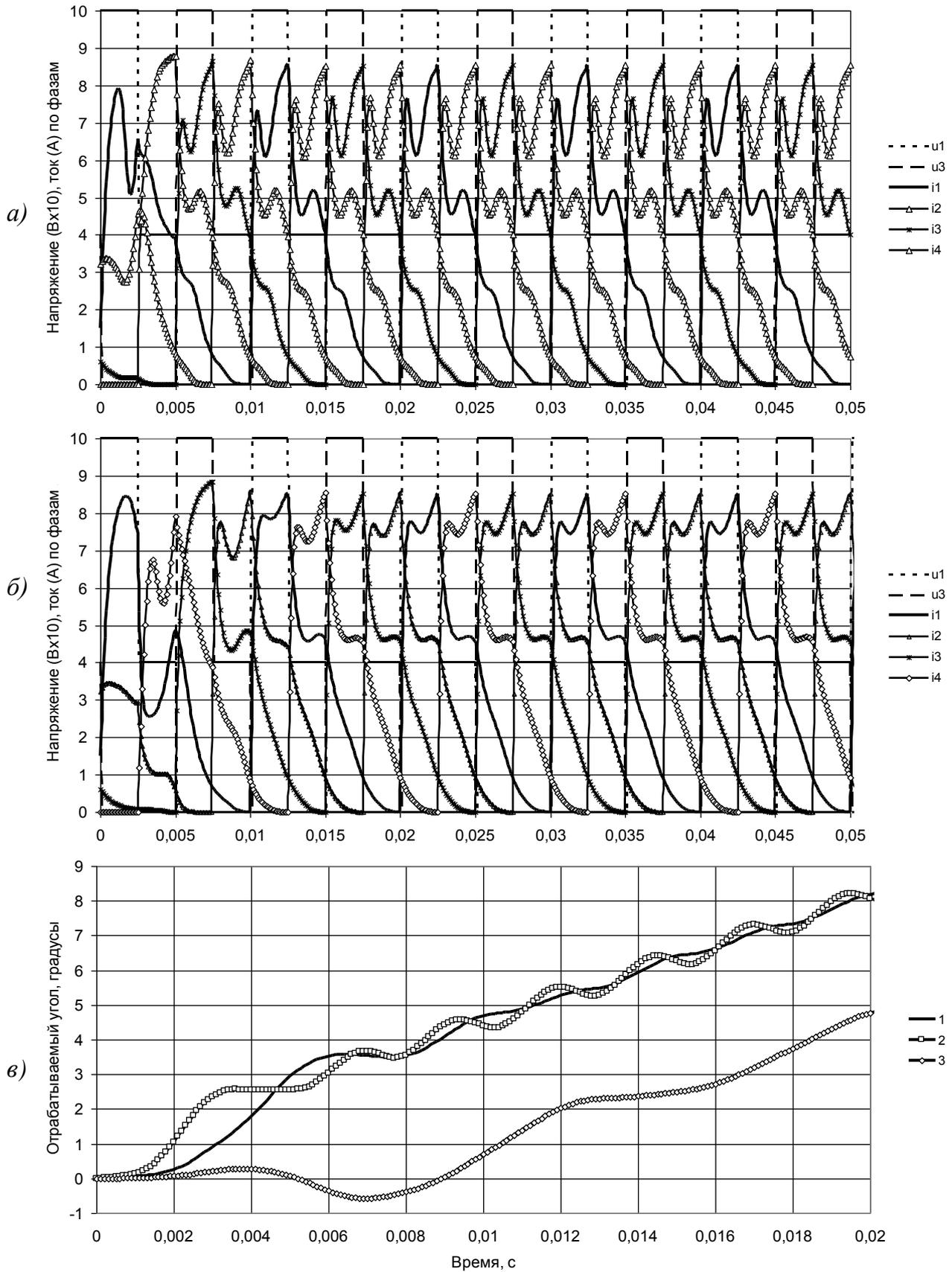


Рис. 2. Осциллограммы пуска шагового электропривода:
a, б – тока и напряжения при различных моментах инерции вращающихся масс механической передачи; *в* – отработываемый шаговым электроприводом угол при различных значениях момента инерции вращения масс

Расчётные осциллограммы (рис. 2, кривые i_1-i_4) отражают наложение токов, обусловленных влиянием ЭДС вращения. Наиболее заметно оно проявляется в виде колебательной составляющей в приводе с минимальным моментом инерции (рис. 2, *а*). В приводе с большим моментом инерции (рис. 2, *б*), более заметно действие аperiodической составляющей тока.

Сравнивая осциллограммы отработки угла при пуске двигателя (рис. 2, *в*), можно отметить, что при нагрузке одним и тем же моментом трения чрезмерная инерционность ротора провоцирует избыточные колебания ротора при отработке угловых перемещений (кривая 2 по сравнению с кривой 1). Это может стать причиной нежелательных резонансных явлений и преждевременного износа механизма. Чрезмерная инерционность подвижных масс преобразователя движения приводит к пропуску шагов при пуске, что делает разомкнутый привод позиционирования и перемещения регулирующих органов фактически неработоспособным.

Предложенная математическая модель так же применима для исследования других режимов работы шагового электропривода, таких как реверс, останов, наброс нагрузки, работа на упор и т.д., а также для подбора формы и количества уровней импульсов напряжения, уточнения частоты приемистости спроектированного двигателя в составе привода.

Библиографический список

1. **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.
2. **Смирнов, А.Ю.** Электрические машины в задачах вычислительного анализа и синтеза: монография / А.Ю. Смирнов, Б.Ю. Алтунин; – Нижегород. гос. техн. ун-т им. Р.Е. Алексеева. Нижний Новгород, 2010. – 250 с.
3. **Иванов-Смоленский, А.В.** Электрические машины: учебник для вузов / А.В. Иванов-Смоленский. – М.: Энергия, 1980. – 928 с.

УДК 621.752.3

Б.А. Гордеев^{1,2}, С.Н. Охулков^{1,2}, А.С. Плехов², А.Н. Осмехин³,
Е.А. Мишанов^{1,2}

ИЗМЕРЕНИЕ ДИНАМИЧЕСКОЙ ВЯЗКОСТИ МАГНИТОРЕОЛОГИЧЕСКИХ ЖИДКОСТЕЙ В РОТАЦИОННОМ ВИСКОЗИМЕТРЕ ЧАСТОТНЫМ МЕТОДОМ

ФГБУН «Институт проблем машиностроения Российской академии наук»¹,
Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева²,
АО «Опытное Конструкторское Бюро Машиностроения им. И.И.Африкантова»³

Предложен метод измерения динамической вязкости магнитоологических жидкостей по деформации кручения торсионного вала ротационного вискозиметра с помощью широкополосной частотной модуляции по частоте биений.

The method of measurement of dynamic viscosity of magnetorheological liquids on deformation of torsion of the torsion shaft of the rotational viscosity gage by means of broadband frequency modulation on the frequency of outruns is offered.

Ключевые слова: магнитоологическая жидкость, вязкость, вискозиметр, торсионные моменты, частотно-модулированные сигналы, частота биений, магнитоологический трансформатор.

Key words: magnetorheological liquid, viscosity, viscosity gage, the torsion moments, frequency-modulated signals, frequency of outruns, magnetorheological transformer.

В статье рассмотрены новые подходы к измерению вязкости магнитоологических жидкостей (МРЖ), основанные на измерениях торсионных моментов, возникающих на валу ротационного вискозиметра при погружении внутреннего воспринимающего цилиндра в исследуемую среду. Предложено перед заполнением рабочей жидкостью магнитоологических трансформаторов (МРТ) проводить дополнительную корректировку вязкости МРЖ в зависимости от магнитной индукции внешнего магнитного поля.

Магнитоологические жидкости представляют собой суспензии микро-частиц магнитных материалов в органических маслах. Под действием магнитного поля частицы, распределенные в объеме дисперсной среды, образуют структуры, ориентированные вдоль силовых линий поля. При этом магнитное взаимодействие между частицами приводит к значительному изменению реологических свойств, поскольку образованные структуры препятствуют свободному перемещению суспензии и вызывают увеличение вязкости жидкости более чем в 10^5 раз, что зависит от материала частиц дисперсной фазы, дисперсионной среды, размеров частиц и их объемной концентрации, а также других параметров [1,2].

Поведение МРЖ, аналогично реологическим средам, характеризуется следующими параметрами: касательные напряжения сдвига; модуль сдвига; сдвиговой деформации; сдвиговой скорости; пределу текучести. В случае пове-

дение МРЖ зависит от приложенного магнитного поля, материала, объемной концентрации частиц дисперсной фазы и температуры, коэффициента сдвиговой вязкости жидкости, определяемого приложенным магнитным полем и скоростью сдвиговых деформаций.

Главным показателем всех традиционных рабочих жидкостей гидравлических виброопор, качественно влияющих на характеристики их сопротивления, является коэффициент кинематической вязкости [3,4]:

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} = \frac{dP_{\tau}}{dS \frac{du}{dz} \cdot \rho}, \quad (1)$$

где μ - динамический коэффициент вязкости; dP_{τ} - элементарная величина силы вязкого трения. Н; dS - площадь соприкосновения слоев в частице жидкости, мм²; du/dz - модуль градиента скорости; du - разница скоростей на сдвиговых плоскостях жидкости; dz - расстояние между плоскостями.

Для любой реологической среды сдвиговая вязкость определяется отношением касательного напряжения к градиенту скорости, поперечного направления движения, что для МРЖ зависит от напряженности приложенного магнитного поля.

Если считать МРЖ линейно-вязкопластичной средой, то ее поведение описывается моделью Шведова-Бингама, учитывающей совместное влияние вязкости и пластичности на касательные напряжения и сдвиговая вязкость определится как [1,2]:

$$\eta = \frac{\tau_y}{\dot{\gamma}} + \eta_p, \quad (2)$$

где τ_y - предельное напряжение сдвига (предел текучести). Па; $\dot{\gamma}$ - сдвиговая скорость, м/с; η_p - показатель консистенции МРЖ. являющийся аналогом коэффициента пластической вязкости, т.е. вязкости без магнитного поля.

На описанном ранее эффекте основан принцип действия магнитореологических трансформаторов (МРТ) гидроопор [5 -7].

Регулируя внешним магнитным полем вязкоупруго-пластичные свойства МРЖ, используемой в качестве рабочей среды, можно управлять определяемым сдвиговыми напряжениями τ , перепадом давлений в гидравлической системе МРТ или упругими деформациями структурированной суспензии, за счет чего осуществляется демпфирование колебаний.

В связи с этим возникает задача измерения динамической вязкости исследуемой массы магнитореологической жидкости.

Измерение динамической вязкости исследуемой массы МРЖ традиционно производится при помощи ротационного вискозиметра [10,11,17].

Принцип работы ротационного вискозиметра основан на зависимости вращающего момента, приложенного к внутреннему воспринимающему цилиндру, погруженному в исследуемую массу, от вязкости этой массы.

Крутящий момент, приложенный к воспринимающему цилиндру, определяется соотношением

$$M_k = Fr, \quad (3)$$

где M_k – крутящий момент на роторе;

F – сила, приложенная к воспринимающему цилиндру;

r – радиус внутреннего воспринимающего цилиндра [10,11,17,18].

Сила, приложенная к воспринимающему цилиндру, определяется законом Ньютона

$$F = \eta \frac{(\Omega_{\text{вр}} S)}{l}, \quad (4)$$

где $\Omega_{\text{вр}} = 2\pi F_{\text{вр}}$ – угловая скорость вращения;

S – рабочая площадь внутреннего воспринимающего цилиндра;

l – зазор между стаканом и внутренним воспринимающим цилиндром;

η – вязкость.

Подставляя соотношение (2) в формулу (1), получим

$$M_k = \eta \frac{(\Omega_{\text{вр}} Sr)}{l}. \quad (5)$$

Если угловая скорость вращения внутреннего воспринимающего цилиндра $\Omega_{\text{вр}} = 2\pi F_{\text{вр}}$ и размеры его постоянны, то крутящий момент M_k пропорционален вязкости η .

Таким образом, зная значение крутящего момента на внутреннем воспринимающем цилиндре, можно определить динамическую вязкость исследуемой массы [10,11,17].

Измерение динамической вязкости исследуемой массы МРЖ основано на измерении малых крутящих моментов торсионного вала ротационного вискозиметра – актуальная задача при разработке МРТ гидропор [5 – 7,16].

Для определения крутящего момента на внутреннем воспринимающем цилиндре нужно создать противодействующий момент на чувствительном элементе – торсионном вале ротационного вискозиметра (рис. 1) [10,11,17].

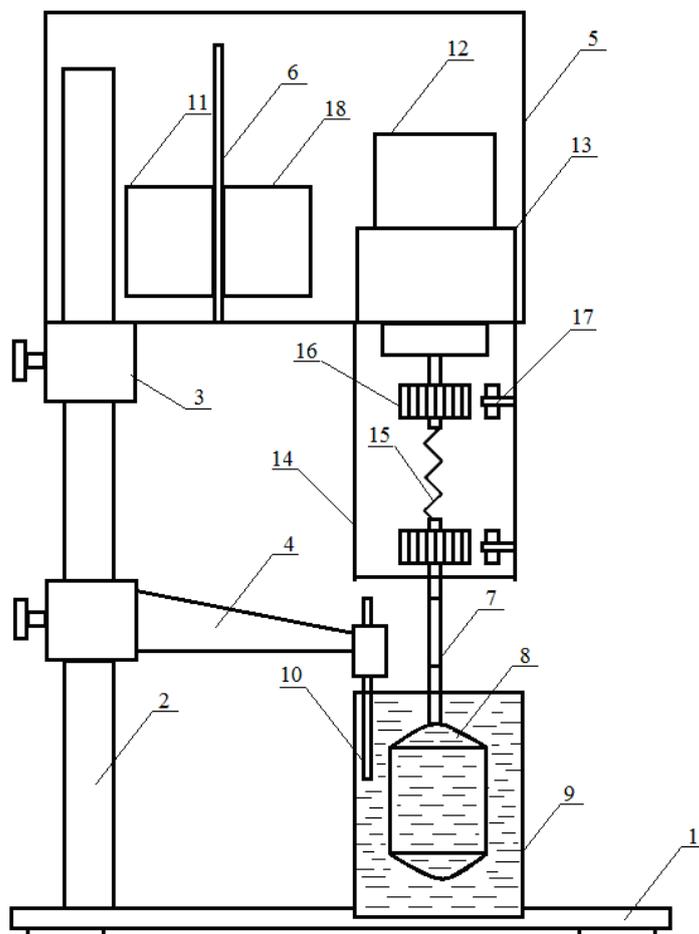


Рис. 1. Основные узлы ротационного вискозиметра:

1 – основание; 2 – стойка вискозиметра; 3 – кронштейн измерительной головки; 4 – кронштейн термометра; 5 – измерительная головка; 6 – стойка приборная; 7 – карданный подвес; 8 – измерительный ротор; 9 – измерительный стакан с МРЖ; 10 – термометр; 11 – измеритель температуры; 12 – синхронный электродвигатель; 13 – блок питания синхронного электродвигателя; 14 – фотоэлектрический преобразователь; 15 – торсион; 16 – измерительные диски; 17 – оптопары; 18 – частотный измеритель крутящего момента

В измерительной головке 5 расположены: измеритель температуры 11, синхронный электродвигатель 12, блок питания синхронного электродвигателя 13, частотный измеритель крутящего момента - схема измерения вязкости 18.

Синхронный электродвигатель 12 обеспечивает вращение с постоянной скоростью. Далее скорость вращения электродвигателя подвергается редуцированию в редукторе, что необходимо для увеличения мощности на валу электродвигателя. Вал электродвигателя 12 и вал ротора 8 соединены торсионным валом 15 ротационного вискозиметра (рис. 1).

В фотоэлектрическом преобразователе 14 на концах торсионного вала 15 закреплены измерительные диски с прорезями 16, с которых при помощи оптопар 17 снимается частота вращения торсионного вала 15 и передается по двум измерительным коаксиальным кабелям в измерительную головку 5 ротационного вискозиметра.

Под действием вязкостного сопротивления исследуемой массы МРЖ на роторе 8 создается крутящий момент, посредством которого происходит скручивание торсионного вала 15 ротационного вискозиметра [10,11-15].

Новый метод измерения крутящего момента торсионного вала ротационного вискозиметра основан на определении деформации кручения с помощью широкополосной частотной модуляции (ЧМ).

Для измерения крутящего момента $M_{кр}$ по деформации кручения вала используют торсионные динамометры [10,11-15], которые фиксируют угол $\Delta\varphi$ закручивания вала – угол относительного поворота двух сечений вала, находящихся на расстоянии H одно от другого. Этот угол определяется выражением [13, 16]:

$$\Delta\varphi = \frac{H}{GJ_p} M_{кр}, \quad (6)$$

где G – модуль сдвига материала вала; J_p – полярный момент сечения вала.

Для сплошного круглого вала диаметром d формула (6) имеет вид [13,16]:

$$\Delta\varphi = \frac{32H}{\pi d^4 G} M_{кр}. \quad (6,a)$$

Следовательно, в пределах упругих деформаций угол закручивания торсионного вала пропорционален приложенному к валу крутящему моменту. Принято, что наибольший угол закручивания торсионного вала ограничивается допустимым касательным напряжением τ в поверхностном слое вала:

$$\tau = \frac{16M_{кр}}{\pi d^3}. \quad (7)$$

С учётом формулы (7) угол закручивания торсионного вала равен:

$$\Delta\varphi = 2H\tau / dG. \quad (8)$$

Учитывая, что угол закручивания торсионного вала составляет

$$\Delta\varphi = \Omega_{вр} t_3,$$

где $\Omega_{вр}$ – угловая скорость торсионного вала ротационного вискозиметра; t_3 – время задержки двух сечений торсионного вала, расположенных на расстоянии H одно от другого, получим выражение (8) в виде:

$$\Omega_{вр} t_3 = 2\tau H / (Gd), \quad \text{откуда} \quad t_3 = 2\tau H / (\Omega_{вр} Gd). \quad (9)$$

Установлено, что при частотном методе измерения крутящего момента вращающихся торсионных валов [1] закручивание торсионного вала приводит к частотному сдвигу между опорной и смещенной волнами высокочастотных генераторов качающейся частоты (ГКЧ). Применяются два генератора ГКЧ_о – опорного сигнала и ГКЧ_с – смещённого сигнала. При этом частота опорного сигнала (f_o) и смещенного (f_c) меняется во времени по закону симметричной треугольной пилы (рис.2, а) [12-15].

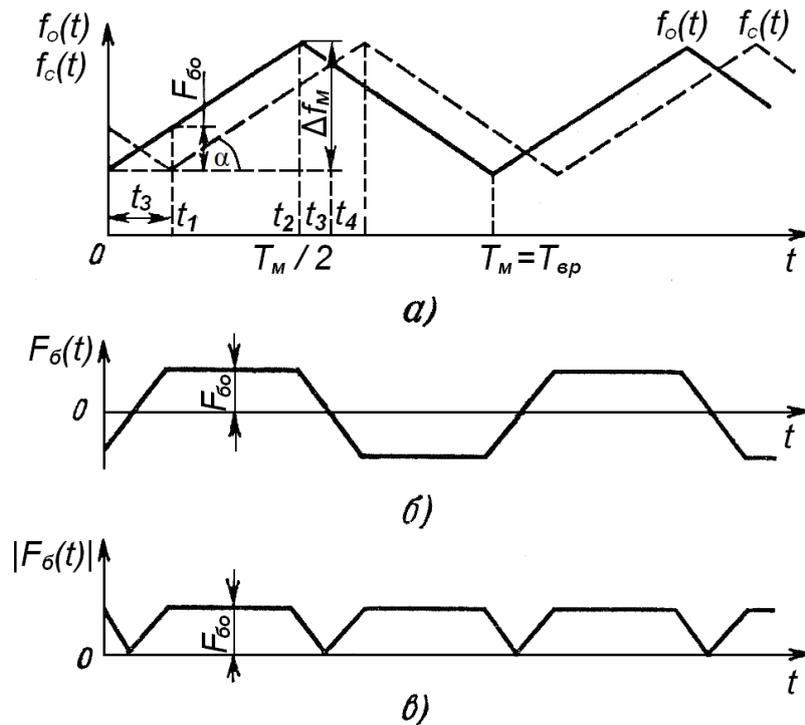


Рис. 2. Изменение во времени частот опорного (f_o) и смещенного (f_c) частотно-модулированных сигналов (а) и частоты (F_6) (б, в) биений в измерителе крутящего момента на низкой или с нулевой промежуточной частоте

В измерителе крутящего момента используется симметричный линейный закон периодической модуляции частоты ГКЧ [7, 10]. Заметим, что на рис. 2 масштаб не выдержан, так как всегда средняя частота $f_o \gg \Delta f_M$, где $\Delta f_M = 20 \div 50$ МГц – девиация частоты.

В измерителе крутящего момента используется симметричный линейный закон периодической модуляции частоты ГКЧ [12 -15].

Заметим, что на рис. 2 масштаб не выдержан, так как всегда средняя частота $f_o \gg \Delta f_M$, где $\Delta f_M = 20 \div 50$ МГц – девиация частоты.

Частота смещенного во времени сигнала под действием крутящего момента изменяется таким же образом, как и частота f_o опорного сигнала, но со сдвигом на время запаздывания $t_3 = \Delta\varphi/\Omega_{вр}$ относительно частоты f_o (рис.2, а).

В результате смещения колебаний ГКЧ возникают биения.

Изменение частоты генераторов ГКЧ_о и ГКЧ_с согласно рис. 2, а составляет

$$F_6 = t_3 \operatorname{tg} \alpha = t_3 \frac{df_o}{dt} = \frac{df_o / dt}{\Omega_{вр}} \Delta\varphi, \quad (10)$$

т.е. пропорциональна углу $\Delta\varphi$ закручивания вращающегося торсионного вала ротационного вискозиметра при его деформации кручения [12 -15].

Измерение частотного сдвига в измерителе крутящего момента ротационного вискозиметра основано на сравнении частоты опорного сигнала (от ГКЧ_о) и частоты смещенного сигнала (от ГКЧ_с). На выходе смесителя выделяется нулевая разностная частота F_{60} .

Измеритель крутящего момента торсионного вала ротационного вискозиметра реализован на низкой или нулевой промежуточной частоте следующим образом (рис. 3) [12 -15].

С помощью разнесенных вдоль торсионного вала ротационного вискозиметра фотоэлектрических (или индуктивных) датчиков 1 и 2 частоты вращения вала синхронно и синфазно снимают с вращающегося торсионного вала два сдвинутых по фазе друг относительно друга сигнала с частотой, пропорциональной частоте вращения вала. При этом следует уточнить, что использование терминов *синхронность* и *синфазность* относительно сигналов с датчиков правомерно только при постоянном торсионном моменте на валу, так как в противном случае синхронность и синфазность нарушаются.

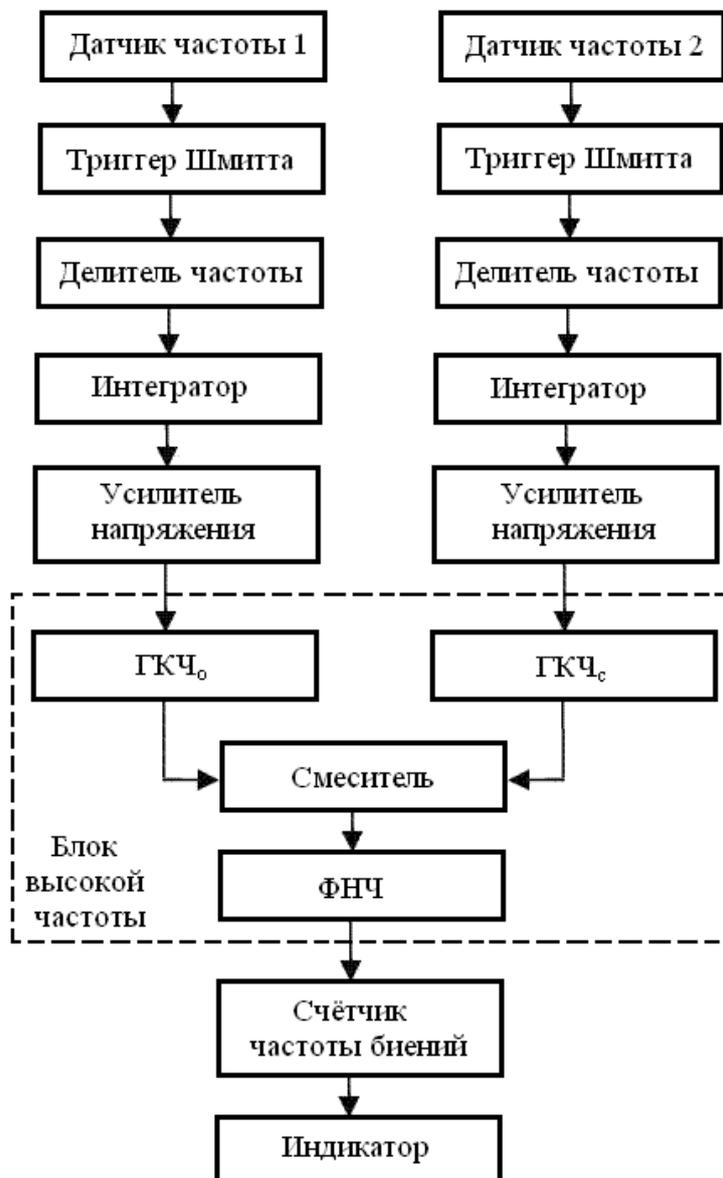


Рис. 3. Структурная схема устройства измерения крутящего момента на низкой или нулевой промежуточной частоте

Пройдя через триггеры Шмитта - делители частоты сигналы поступают на интеграторы. Полученные низкочастотные пилообразные сигналы треугольной формы пропускают через усилители напряжения на ГКЧ_о и ГКЧ_с для обеспечения периодической частотной модуляции.

Далее сохранившие фазовый сдвиг, сформированные частотно-модулированные опорный сигнал с датчика 1 с частотой $f_o(t)$ и сдвинутый вследствие деформации кручения сигнал с датчика 2 с частотой $f_c(t)$ подают на смеситель, снабженный на выходе фильтром низкой частоты (ФНЧ) с полосой пропускания $\Delta F_0 = F_{\text{б0max}}$.

ФНЧ соединен с входом счетчика частоты биений, который преобразует частоту биений в значения деформации кручения упругого вала. Счётчик состоит из формирователя прямоугольных импульсов, длительность которых соответствует половине периода частоты биений, и высокостабильного генератора тактовых импульсов (ГТИ) с тактовой частотой порядка 100 МГц. Использовать более высокую частоту нецелесообразно из-за погрешности фотоэлектрических датчиков.

Поскольку условие линейной зависимости угла закрутки торсионного вала ротационного вискозиметра от изменения момента на валу сохраняется, то число импульсов ГТИ, занесённых в счётчик, пропорционально углу $\Delta\phi$ закручивания торсионного вала.

Результат вычисления деформации кручения торсионного вала ротационного вискозиметра в виде значений угла $\Delta\phi$ закручивания вала или в значениях торсионных моментов индицируется индикатором.

Подставив формулу (9) для времени t_3 задержки в формулу (10) для частоты биений, получим выражение, определяющее изменение частоты ГКЧ_о за время t_3 задержки [12 -15]:

$$F_6 = t_3 \operatorname{tg} \alpha = t_3 \frac{df_o}{dt} = \frac{2(df_o / dt) H}{\Omega_{\text{вр}} G d} \tau. \quad (11)$$

Согласно формуле (11), приращение F_6 пропорционально касательным напряжениям τ на поверхности торсионного вала ротационного вискозиметра.

Мгновенная частота биений равна абсолютному значению разности мгновенных значений частот опорного и смещенного сигналов

$$|F_6(t)| = |f_o(t) - f_c(t)|,$$

хотя формально можно учитывать знак частоты $F_6(t)$ [12 -15].

Изложенное иллюстрируется на (рис. 2, б, в). Частота биений, которая в течение большей части периода модуляции $T_M = T_{\text{вр}}$ остается постоянной, является основной.

Ее значение, как видно из (рис. 2, а) и формулы (10), равно $F_{60} = \beta t_3$, где $\beta = \frac{df_o}{dt} = 2\Delta f_m F_m$ - скорость изменения частоты ГКЧ_о; Δf_m - девиация частоты; $F_m = F_{\text{вр}}$ - частота модуляции.

Тогда основная частота биений с учетом (11) будет равна

$$F_{60} = \left(\frac{4\Delta f_m F_m}{\Omega_{вр} G} \right) \left(\frac{H}{d} \right) \tau, \quad (12)$$

причем девиация частоты Δf_m несколько десятков мегагерц, а F_m – десятки герц.

Так как $F_m = F_{вр}$, а $\Omega_{вр} = 2\pi F_{вр}$, то выражение (12) преобразуется к виду

$$F_{60} = \left(\frac{4\Delta f_m F_m}{2\pi F_m G} \right) \left(\frac{H}{d} \right) \tau. \quad (12,a)$$

В этом случае круговая частота биений будет равна

$$\Omega_{60} = 2\pi F_{60} = 4\Delta f_m \left(\frac{\tau}{G} \right) \left(\frac{H}{d} \right). \quad (13)$$

Из выражения (13) можно определить допустимые касательные напряжения τ на вращающемся валу, которые будут равны

$$\tau = \left(\frac{\Omega_{60}}{4\Delta f_m} \right) \left(\frac{d}{H} \right) G. \quad (14)$$

Далее можно определить крутящий момент на вращающемся валу. С учетом выражений (6), (6,a), (7) крутящий момент на вращающемся валу будет равен выражению

$$M_{кр} = \frac{2\tau}{d} \left(\frac{\pi d^4}{32} \right) = \left[\left(\frac{\Omega_{60}}{4\Delta f_m} \right) \left(\frac{d}{H} \right) G J_p \right] \frac{2}{d} = \frac{\Omega_{60}}{2\Delta f_m} \frac{G J_p}{H} = \frac{2\pi F_{60}}{2\Delta f_m} \frac{G J_p}{H}. \quad (15)$$

Крутящий момент на вращающемся торсионном валу ротационного вискозиметра определяется выражением

$$M_{кр} = \frac{\Delta\varphi}{H} G J_p, \quad (16)$$

то, приравняв выражение (15) к выражению (16), получаем равенство

$$M_{кр} = \frac{\Delta\varphi}{H} G J_p = \frac{2\pi F_{60}}{2\Delta f_m} \frac{G J_p}{H} = \frac{F_{60}}{2\Delta f_m} 2\pi \frac{G J_p}{H}, \quad (17)$$

в котором величина $\frac{F_{60}}{2\Delta f_m} 2\pi = \Delta f$ есть угол закручивания торсионного вала ротационного вискозиметра, выраженный в радианах.

Приравняв выражение (17) к выражению (5), получаем равенство

$$M_{кр} = \eta \frac{(\Omega_{вр} S r)}{l} = \frac{F_{60}}{2\Delta f_m} 2\pi \frac{G J_p}{H}. \quad (18)$$

Теперь из равенства (18) можно определить динамическую вязкость η исследуемой массы МРЖ в ротационном вискозиметре

$$\eta = \left(\frac{F_{60}}{2\Delta f_m} 2\pi \frac{G J_p}{H} \right) \cdot \left(\frac{l}{2\pi F_{вр} S r} \right) = \frac{F_{60}}{2\Delta f_m} \frac{G J_p}{H} \frac{l}{F_{вр} S r}, \quad (19)$$

где $2\pi F_{\text{вр}} = \Omega_{\text{вр}}$ – угловая скорость вращения внутреннего воспринимающего цилиндра ; S – рабочая площадь внутреннего воспринимающего цилиндра ; r – радиус внутреннего воспринимающего цилиндра ; l – зазор между стаканом и ротором.

Рассмотренный метод измерения динамической вязкости МРЖ позволяет производить исследования рабочей жидкости с изменяющейся вязкостью на несколько порядков. Перед заполнением магнитореологических трансформаторов рабочей жидкостью необходимо проводить предварительную калибровку вязкости МРЖ в зависимости от магнитной индукции управляющего магнитного поля.

Исследование выполнено за счёт гранта Российского научного фонда (проект №15-19-10026).

Библиографический список

1. **Шульман, З.П.** Магнитореологический эффект / З.П. Шульман, В.И. Кордонский. – Минск: Наука и техника, 1982. – 184 с.
2. **Борин, Д.Ю.** Инженерное образование. Наука в образовании. / Д.Ю. Борин, В.П. Михайлов, А.М. Базиненков. – М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2006. – 9 с.
3. **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.
4. **Башта, Т.М.** Машиностроительная гидравлика / Т.М. Башта. – М.: Машиностроение, 1971. – 672 с.
5. **Гордеев, Б.А.** Применение магнитореологических жидкостей в машиностроении / Б.А. Гордеев, С.Н. Охулков, А.С. Плехов, П.А. Злобин // Приволжский научный журнал. 2014. № 4. С. 29-42.
6. **Гордеев, Б.А.** Течение и релаксация магнитореологической жидкости в дроссельных каналах гидропор / Б.А. Гордеев, С.Н. Охулков, А.С. Плехов, Д.Ю. Титов, В.П. Горсков // Вестник машиностроения. – 2015. - №7. - С. 32-38.
7. **Морозов, Н.А.** Нанодисперсные магнитные жидкости в технике и технологиях / Н.А. Морозов, Ю.Б. Казаков. – Иваново: Иван. гос. энерг. ун-т., 2011. – 264 с.
8. **Райхер, Ю.Л.** Вращательная вязкость вязкоупругой магнитной жидкости / Ю. Л. Райхер, В.В. Русаков // Коллоидный журнал. 2008. №70. С. 85-92.
9. **Гордеев, Б.А.** К вопросу создания цилиндрического магнитореологического трансформатора в ортогональных магнитных полях / Б.А. Гордеев, В.Г. Маслов, С.Н. Охулков, А.Н. Осмехин // Проблемы машиностроения и надёжности машин. 2014. № 2. С. 15 -21.
10. **Крутоголов, В.Д.** Ротационные вискозиметры / В.Д. Крутоголов, М.В. Кулаков. – М.: Машиностроение, 1984. – 112 с.
11. **Корганова, О.Г.** Ротационный вискозиметр / О.Г. Корганова, В.А. Кузнецов // Вестник самарского государственного технического университета. Сер. Технические науки. Информационные технологии. 2012. №1 (33). С. 55-60.
12. Частотный метод измерения крутящего момента вращающихся валов / Б.А. Гордеев, С.Н. Охулков, А.С. Плехов, В.В. Бугайский, В.П. Горсков // Вестник машиностроения. 2015. № 2. С. 3-7.

-
13. Частотный метод измерения деформации кручения на вращающихся валах машин и механизмов / Б.А. Гордеев, В.В. Бугайский, В.И. Ерофеев, С.Н. Охулков // Вестник Волжской государственной академии водного транспорта. Надежность и ресурс в машиностроении. 2006. Вып. 16. С. 62–70.
 14. Пат. №2196309. Способ определения крутящего момента / Охулков С.Н.; заявл. 10.01.2003, по заявке № 2000110472 от 24.04.2004.
 15. **Викторов, В. А.**, Лункин Б.В., Совлуков А.С. Радиоволновые измерения параметров технологических процессов / В.А. Викторов, Б.В. Лункин, А.С. Совлуков. – М.: Энергоиздат, 1989. – 208 с.
 16. Экспериментальные методы исследования деформаций и напряжений: справочное пособие / Б. С. Касаткин, А. Б. Кудрин, Л. М. Лобанов [и др.] – Киев: Наукова думка, 1981. – 584 с.
 17. **Фазане, Н.Г.** Технологические измерения и приборы / Н.Г. Фазане, Л.В. Илиннов, А.Ю. Азим-Заде. – М.: Высшая школа, 1989. – 152 с.
 18. **Пирогов, А.Н.** Инженерная реология: учебное пособие / А.Н. Пирогов, Д.В. Доня // Кемеровский технологический институт пищевой промышленности. Кемерово, 2004. – 110 с.

УДК 534.631

Б.А. Гордеев^{1,2}, С.Н. Охулков^{1,2}, А.С. Плехов², А.Н. Осмехин³

ВЛИЯНИЕ ДЕВИАЦИИ ЧАСТОТЫ ОТРАЖЁННОГО ОТ ВИБРИРУЮЩЕЙ ПОВЕРХНОСТИ УЛЬТРАЗВУКОВОГО СИГНАЛА НА ЕГО СПЕКТР

ФГБУН «Институт проблем машиностроения Российской академии наук»¹,
Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева²,
АО «Опытное Конструкторское Бюро Машиностроения им. И.И.Африкантова»³

Проведена оценка погрешностей фазовых измерений виброперемещений электромеханических комплексов волновыми методами. Показано влияние девиация частоты отраженного сигнала на изменение его спектра, который может использоваться в качестве диагностического признака при исследовании ударных нагрузок.

The errors in the phase measurements of the vibro-displacement of electromechanical complexes by wave methods are estimated. The deviation frequency effect of the reflected signal on the spectrum change, which can be used as a diagnostic feature in the study of impact loads, is showed.

Ключевые слова: ударные нагрузки; ультразвуковой фазовый вибропреобразователь; акустическое зондирование; исследуемая поверхность магнитореологического трансформатора; частотная модуляция; девиация частоты отраженной волны.

Key words: shock loadings; ultrasonic phase vibroconverter; acoustic sounding; the studied surface of the magnetorheological transformer; frequency modulation; deviation of frequency of the reflected wave.

В работе рассмотрены экспериментально полученные результаты изменения спектра отраженного от вибрирующей поверхности ультразвукового луча, при условии явно выраженной его девиации. Показано, что девиация частоты отраженного акустического сигнала возникает не только при повышении частоты исследуемого вибросигнала, но также при ударных процессах [8,9].

Волновые методы измерения параметров вибрации в режиме бегущей волны применяются там, где иные способы применять затруднительно, или невозможно. Например, параметры радиальной вибрации шнековых валов, ударные нагрузки, движение магнитореологических жидкостей в магнитных полях [1,3-7]. Однако во всех случаях надо учитывать возможную девиацию частоты отраженного сигнала.

Отражённый от вибрирующей поверхности исследуемого объекта частотно-модулированный ультразвуковой сигнал может быть представлен бесконечным рядом [1,8]:

$$G(t) = A_0 \cdot \sum_{n=-\infty}^{\infty} |J_n(m)| \cdot \cos[2\pi(f_0 + nF)t + \varphi_n], \quad (1)$$

где $J_n(m)$ – значение функции Бесселя 1-го рода n -го порядка, определенное для индекса угловой модуляции m частотно-модулированного колебания, аргументы m ; n – целые числа.

Спектр отражённого ультразвукового сигнала от вибрирующей поверхности при частотной модуляции определяется выражением

$$G(f) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} \frac{A_0 \cdot |J_n(m)|}{2} \cdot e^{j\phi_n} \cdot \delta(f - f_0 - n \cdot F) =$$

$$= \sum_{n=-\infty}^{\infty} \frac{G_n}{2} \cdot e^{j\phi_n} \cdot \delta(f - f_0 - n \cdot F), \quad f > 0, \quad (2)$$

где $G_n = A_0 \cdot |J_n(m)|$ – амплитудные коэффициенты ряда Фурье.

Пакет программ Mathcad представляет возможность путем обращения к функции $J_0(m)$, $J_1(m)$, $J_n(m)$ вычислить значения функции Бесселя 1-го рода n -го порядка при любом значении аргумента m . Далее на рис. 1 показаны графики поведения нескольких Бесселевых функций $J_n(m)$ [2].

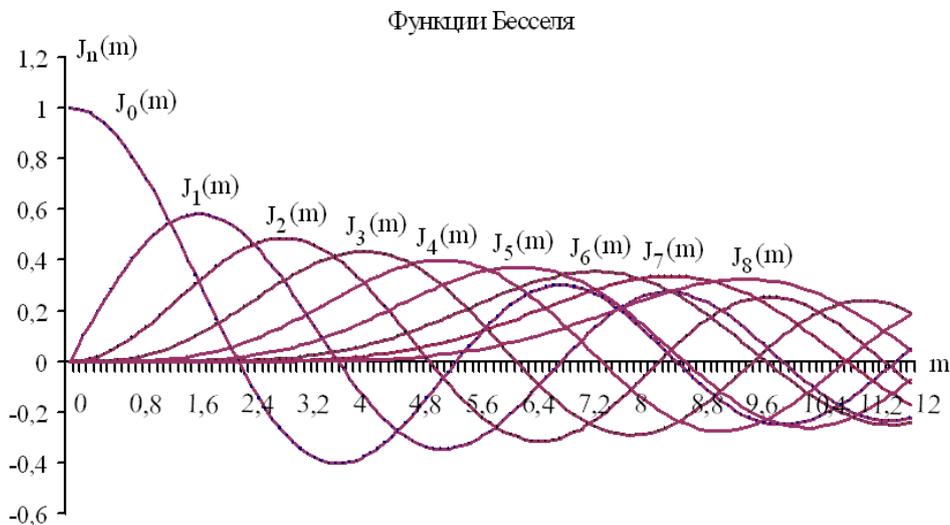


Рис. 1. Функции Бесселя первого рода n -го порядка от аргумента m

Из графиков (рис.1) видно, что Функции Бесселя имеют осциллирующий характер [2]. При некоторых значениях индекса модуляции функция $J_0(m)$ равна нулю, при котором наблюдается уменьшение уровня мощности основной гармоники с частотой $\omega_0 = 2\pi f_0$ отражённого колебания в модулированном акустическом сигнале ($m = 2,4$) - наименьшее значение индекса модуляции, где $J_0(m) = 0$). Следует заметить, что спектральная составляющая с частотой $\omega_0 = 2\pi f_0$, и несущая с частотой $\omega_0 = 2\pi f_0$ - разные понятия [2].

При $m = 2,4$ основная спектральная составляющая с частотой $\omega_0 = 2\pi f_0$ равна нулю, но это не означает, что отсутствует основная спектральная составляющая в отражённом от вибрирующей поверхности сигнале. Используя значения функций Бесселя, можно построить спектры отражённых акустических сигналов при их частотной и фазовой модуляции при заданных значениях $m = x$ или $\Delta\phi_d = x$.

Как пример, такие спектрограммы отражённых акустических сигналов при $m = 0,6$, $m = 1,3$ при виброперемещениях $s = 0,5$ мм и $s = 1,0$ мм приведены на рис. 2 и 3.

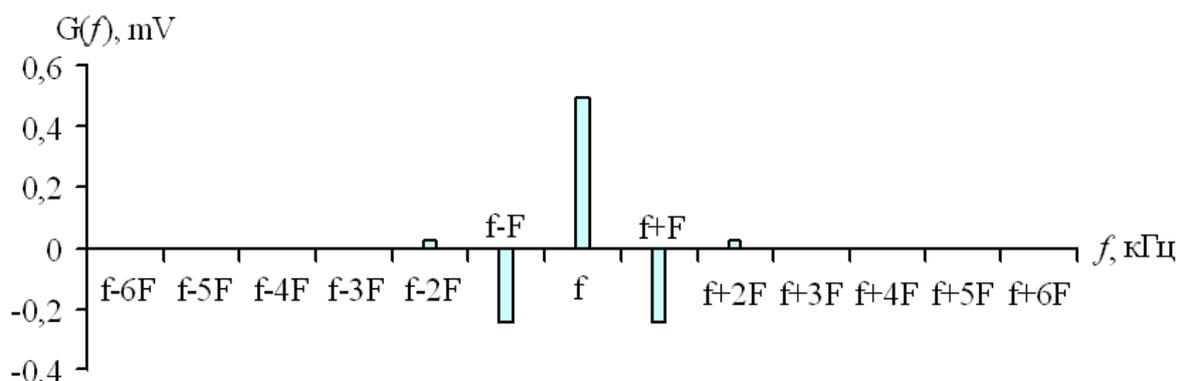


Рис. 2. Спектр отражённого акустического сигнала при частотной модуляции при заданных значениях:

$$f = 32 \text{ кГц}; F = 10 \text{ Гц}; s = 0,5 \text{ мм}; m = 0,6$$

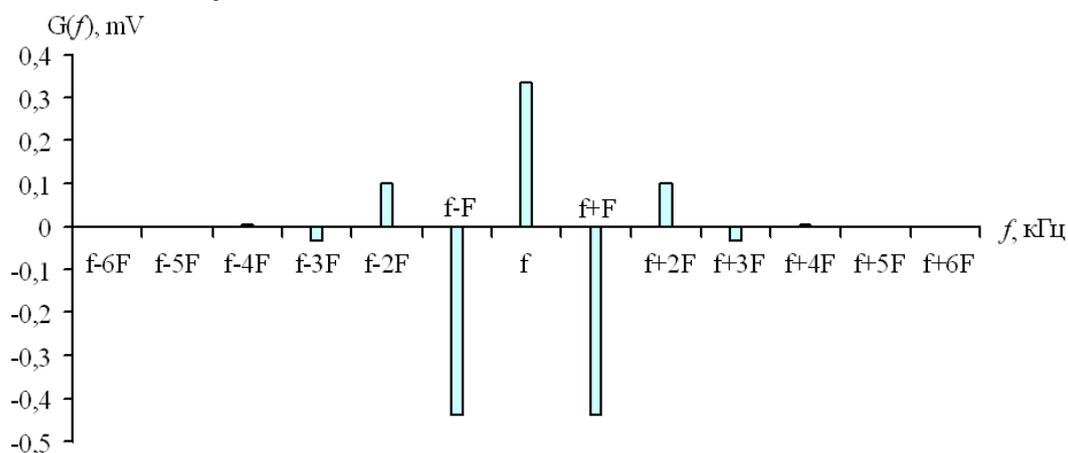


Рис. 3. Спектр отражённого акустического сигнала при частотной модуляции при заданных значениях:

$$f = 32 \text{ кГц}; F = 500 \text{ Гц}; s = 1,0 \text{ мм}; m = 1,3$$

Теоретически спектр частотно-модулированного отражённого акустического сигнала (особенно при $m \gg 1$) безграничен [2,8,9]. Чем выше значение индекса частотной модуляции, тем шире полоса частот, занимаемая отражённым акустическим сигналом.

Однако, как показывает анализ, большая часть энергии частотно-модулированного отражённого акустического сигнала сосредоточена в полосе

$$\Delta f_{cn} = 2(1 + m + \sqrt{m})F, \quad (3)$$

где F - циклическая частота вибрации в спектре частотно-модулированного отражённого акустического сигнала.

Именно на эту величину и следует рассчитывать полосу пропускания тракта ультразвукового фазового вибропреобразователя. При $m \ll 1$ ширина спектра частотно-модулированного акустического сигнала: $\Delta f_{cn} = 2F$.

Частотно-модулированный акустический сигнал с индексом $m < 1$ явля-

ется узкополосным, с индексом $m > 2 \div 3$ – уже считается широкополосным. При акустическом зондировании исследуемой поверхности объектов при ударных нагрузках наблюдается частотно-модулированный сигнал с индексом $m \gg 1$.

Рассмотрим далее значения индексов $m \gg 1$. Вопрос сводится к выяснению зависимости функции Бесселя $J_n(m)$ от порядкового номера n при больших значениях аргумента m (рис.4).

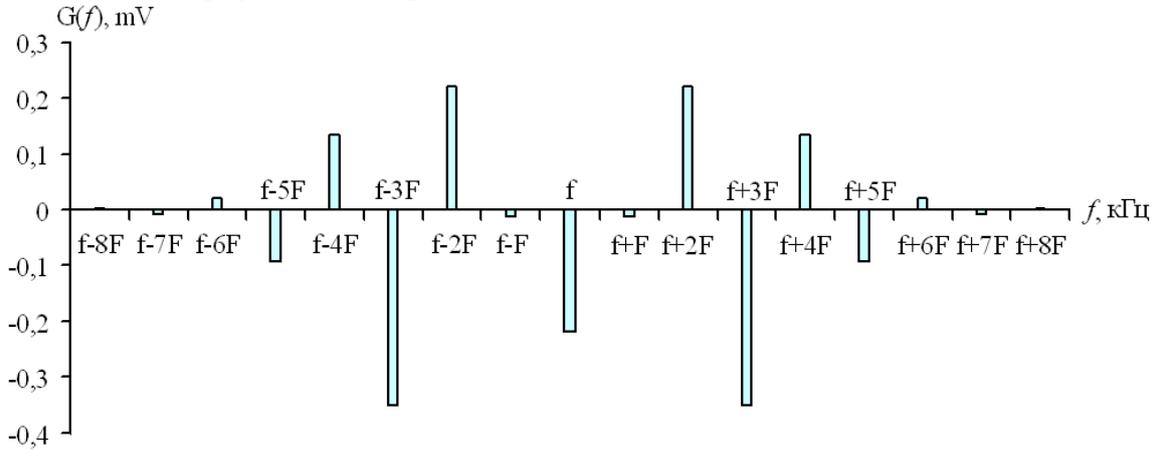


Рис. 4. Спектр отражённого акустического сигнала при частотной модуляции при заданных значениях:

$$f = 32 \text{ кГц}; F = 10 \text{ Гц}; s = 3,0 \text{ мм}; m = 3,8$$

Оказывается, что при $m \gg 1$ величина $|J_n(m)|$ наиболее, либо наименее равномерна при всех целых значениях $|n|$, наименьших, чем аргумент m . При $|n|$, близких к m , $|J_n(m)|$ образует всплеск, а при предстоящем увеличении $|n|$ функция $|J_n(m)|$ быстро убывает до нуля. Общий вид данной зависимости показан на рис. 5, для $m = 3,8$. Из рис. 4 видно, что наивысший номер n боковой частоты, которую еще нужно учитывать, приблизительно равен индексу модуляции m (в данном случае $n = 3,8$).

Приравнивая это наибольшее значение n_{\max} величине m , приходим к выводу, что полная ширина диапазона частотно-модулированного отражённого акустического колебания $2|n_{\max}|\Omega = 2|n_{\max}|2\pi F \approx m4\pi F$.

Но $m = \Delta\omega_d/\Omega = \Delta f/F$, следовательно, при больших индексах модуляции ширина диапазона модулированного отражённого акустического колебания близка к двойной девиации частоты. Так, для индекса модуляции $m = 3,8$ ширина диапазона отражённого акустического колебания составляет:

$$2|n_{\max}|\Omega \approx 2\Delta\omega_d \rightarrow 2\Delta f \rightarrow f - 4F \div f + 4F. \tag{4}$$

Эта ширина диапазона ограничена полосой частот от $f - 4F \div f + 4F$ (рис.4). Заметим, что в согласовании с определением m выражение «модуляция с малым индексом» эквивалентно выражению «быстрая модуляция», а выражение «модуляция с большим индексом» эквивалентно выражению «медленная

модуляция» [2,8]. Потому, можно констатировать следующее положение: при быстрой угловой модуляции (когда $\Delta\omega_d \ll \Omega$) ширина диапазона отражённого акустического колебания близка к значению 2Ω ; при медленной угловой модуляции (когда $\Delta\omega_d \gg \Omega$) ширина диапазона близка к значению $2\Delta\omega_d$.

Таким образом, показано, что частотная модуляция отражённого акустического сигнала относительно опорного, падающего на исследуемую поверхность, может приводить к дополнительному насыщению спектра исследуемого процесса высокочастотными гармониками. Это явление всегда надо учитывать при обработке результатов измерений. Оно возникает тогда, когда скорость исследуемого объекта превышает критическую величину при ударных процессах и начинает проявляться девиация частоты отраженного сигнала.

Исследование выполнено за счёт гранта Российского научного фонда (проект №15-19-10026).

Библиографический список

1. Пат. №2472109 Ультразвуковой фазовый вибропреобразователь / Гордеев Б.А., Куклина И.Г., Голубева К.В., Гордеев А.Б. заявл. №2011130282/28(044754) от 18.07.2012; опубл. 10.01.2013. Бюл. №1.
2. **Гоноровский, И.С.** Частотная модуляция и её применения / И.С. Гоноровский. – М.: Связьиздат, 1948. – 283 с.
3. **Takeda, Y.** Velocity Profile Measurement by Ultrasonic Doppler Shift Method // Int. J. Heat Fluid Flow 1986. Vol. 7. No. 4. P. 313-318.
4. **Kikura, H.** Velocity Profile Measurement of the Taylor Vortex Flow of a Magnetic Fluid Using the Ultrasonic Doppler Method // Exp. Fluids 1999. Vol. 26. № 3. P. 208-214.
5. **Toda, M.** Theory of curved, clamped, piezoelectric film air-borne transducers // IEEE Transactions on ultrasonics, ferroelectrics and frequency control. – 2000. V. 47. № 6. P. 1421-1431.
6. **Gomez, T.E.** Acoustic impedance matching of piezoelectric transducers to the air // IEEE Trans. Ultrason., Ferroelectr. and Freq. Contr. – 2004. V. 51. № 5. P. 624-633.
7. **Kazakov, V.V.** Measurement of vibration field by ultrasonic phase vibrodisplacenment meters hi Proceed // XV session RAS. Acoustical measurements. – М.: GEOS. 2004. P.1.
8. Пат. №2407029. Гидравлическая виброопора / Гордеев Б.А., Синев А.В., Кулинова Г.С. Зарегистрирован в Государственном реестре изобретений Российской Федерации 27.12.2010. Бюл. № 36.
9. Пат. №2561610. Магнитореологический амортизатор / Гордеев Б.А., Ерофеев В.И., Охулков С.Н., Тумаков С.Ф. Опубликовано 27.08.2014. Бюл. №24.

УДК 621.311

О.В. Федоров**СТАНОВЛЕНИЕ ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКОГО ОБРАЗОВАНИЯ
СТУДЕНТОВ ИНЭЛ**

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

В работе отражены этапы технико-экономического образования студентов образовательно-научного института электроэнергетики, являющегося структурным подразделением Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева. Отмечена роль Л.М. Зельцбурга в организации и становлении организационно-экономического образования студентов и специалистов в области электроэнергетики и электромеханики.

In article the stages of technical and economic education of students of educational-scientific Institute of electric power, which is a structural unit of Nizhny Novgorod state University R.E. Alekseev. The role of Ph. D. of the L.M. Salzburga in the organization and formation of organizational and economic education of students and specialists in the field of power engineering and electromechanics.

Ключевые слова: этапы, образование, институт, учебный процесс, кафедры, энергетика, электромеханика, инженер-электрик, Л.М. Зельцбург, направления подготовки, бакалавр, магистр, специалист, публикации, учебники, гриф Министерства образования и науки, научно-исследовательские работы.

Key words: stages, education, institute, educational process, Department, energy, electrical engineering, electrical engineer, L.M. Salzburg, areas of training, bachelor, master, specialist, publications, textbooks, approved by the Ministry of education and science, scientific research.

В 1935 году приказом директора Горьковского инженерного института П.А. Тюркина (№ 203 от 07.06.35) организована кафедра «Организация и планирование производства», которой было поручено осуществлять организационно-экономическую и управленческую подготовку будущих специалистов для всех факультетов и специальностей. Этапы преобразования кафедры и её названия представлены на рис. 1.

По мере развития университета совершенствовалась и структура самой кафедры, осуществляющей эту подготовку для нужд экономики страны. В учебный процесс по кафедре вводились новые дисциплины (например, в 1940 г. дисциплина «Пожарная безопасность»). Постепенно из состава кафедры выделялись самостоятельные (специализированные) кафедры. В составе кафедр формировались группы преподавателей (секции), осуществляющие подготовку студентов с учетом специфики специальностей. Одной из таких секций стала группа преподавателей, ведущих подготовку специалистов на электротехническом факультете (ныне образовательно-научный институт электроэнергетики – ИНЭЛ), которую возглавил пришедший на кафедру в 1954 г. с предприятия «Красная Этна» инженер-электрик, канд. техн. наук Лев Моисеевич Зельцбург (13.05.1913-19.03.2000 гг.).

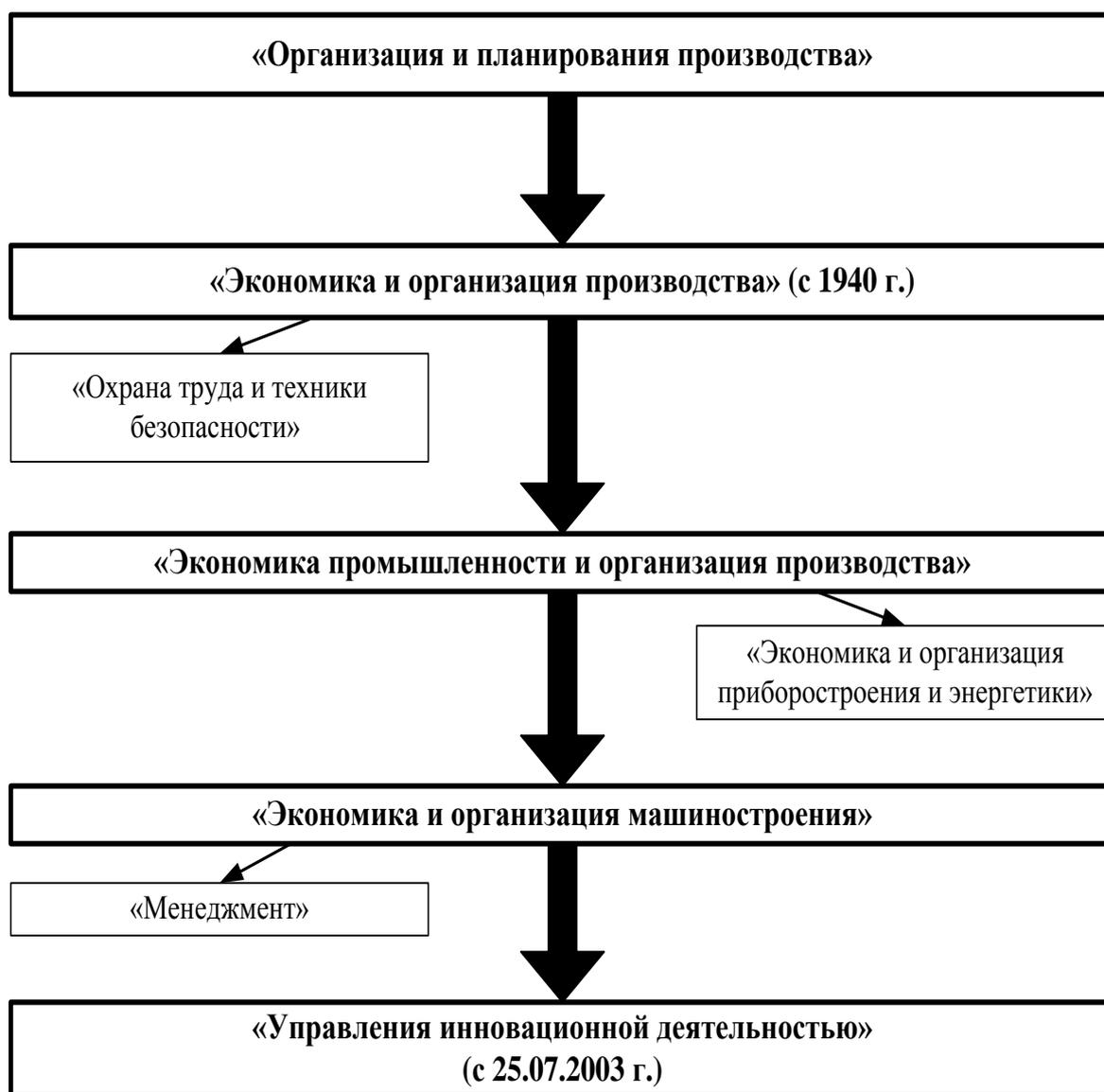


Рис. 1. Этапы преобразования кафедры

Л.М. Зельцбург родился в Н.Новгороде, учился во Франции и, в совершенстве владея французским языком, окончил «ШКОЛУ ПРОМЫШЛЕННЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСТВА И МЕХАНИКИ» (период обучения 7.10.1929-10.07.1933), успешно защитил диплом инженера электротехника-механика (рис. 2) и вернулся в г. Горький.

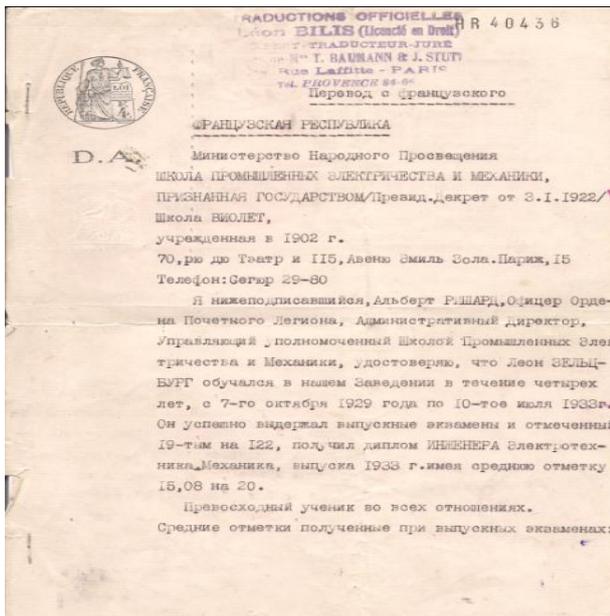
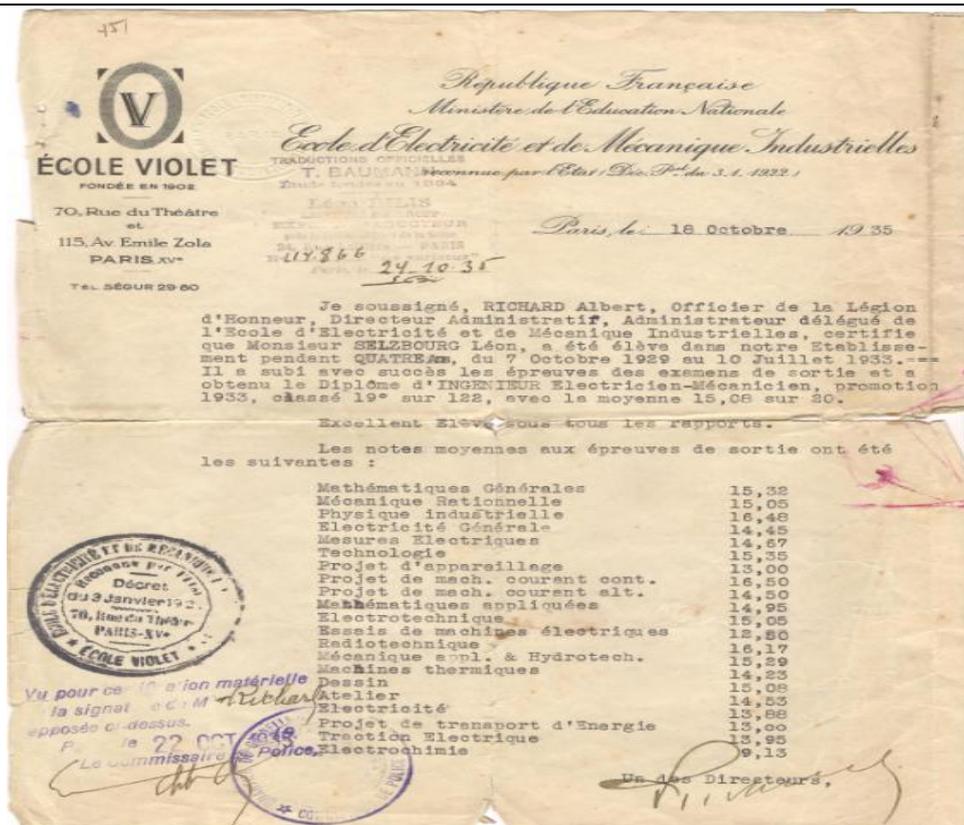


Рис. 2. Французский диплом инженера, 1933 г.

Второй диплом инженера-электрика Лев Моисеевич получил в Ленинградском электротехническом институте (ныне СПбГЭТУ «ЛЭТИ»), обучаясь как специалист по сокращенной программе, подтверждая звание инженера-электрика.

Работая энергетиком цеха холодной прокатки ленты на предприятии «Красная Этна», Лев Моисеевич много внимания уделял совершенствованию электрооборудования цеха, был известным рационализатором и имел авторские

свидетельства на изобретения. Одно из таких изобретений стало темой его диссертационной работы, выполненной под руководством профессора МЭИ (ныне – Национальный исследовательский университет «МЭИ») Д.П. Морозова, учебники которого содержат основы классической теории электропривода, а потому и сегодня являются настольными книгами студентов, инженеров и научных работников. Защита диссертационной работы прошла в МЭИ (рис. 3).

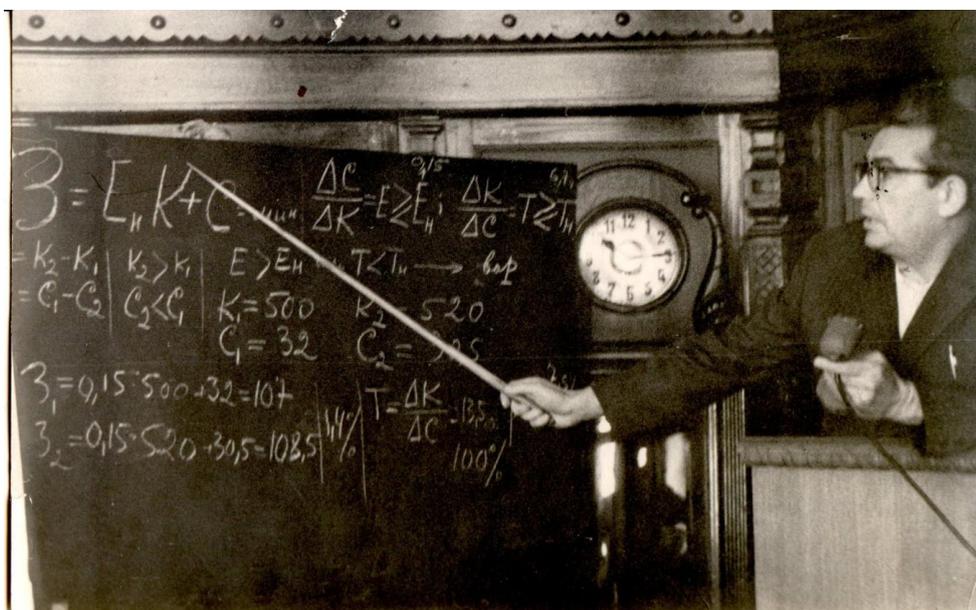


Рис. 3. Защита диссертации 1952 г.

На электротехническом факультете (ныне ИНЭЛ), образованном в 1938 г., традиционно осуществлялась подготовка специалистов по электроэнергетике и электромеханике и Л.М. Зельцбург (рис. 4), как производственник, избранный на конкурсной основе в 1954 г на должность доцента Горьковского политехнического института, активно берется за разработку учебных программ дисциплин, связанных именно с этим направлением — «Электроэнергетика и электротехника», содержащем, в настоящее время, семь различных профилей направлений подготовки. Дело в том, что ранее экономические дисциплины преподавались в основном как общий курс экономики для всех специальностей.

Активная жизненная позиция Л.М. Зельцбурга способствовала активизации учебно-методической работы преподавателей. Разработаны учебные программы, методические указания к лекциям и практическим занятиям, а также указания к выполнению организационно-экономической части дипломных работ/проектов для всех существовавших в тот период специальностей, которые публикуются типографией института. В 1966 и 1973 гг. в центральных издательствах выходят учебное пособие и учебник [4, 5], имеющие гриф - «Допущено Министерством высшего и среднего специального образования СССР для студентов вузов, обучающихся по специальности «Электроснабжение промышленных предприятий, городов и сельского хозяйства», которые не потеряли своей актуальности и в настоящее время при подготовке бакалавров, магистров и специалистов.



Рис. 4. Л.М. Зельцбург, 1954 г.

В 70-х годах прошлого столетия Льву Моисеевичу, как пионеру прикладного экономического образования будущих инженеров-энергетиков/электриков, поручено руководить кафедрой, и присвоено звание профессора, он как преподаватель делится своим опытом с вновь приходящими в университет сотрудниками.

Осуществляя учебно-методическую работу, Л.М. Зельцбург одновременно проводит и научно-исследовательские работы в области электроэнергетики и электротехники, является членом технических советов отраслевых институтов «Электропроект», «Верхневолгаэлектромонтаж». Заключаются хозяйственные работы с предприятиями и научными организациями, а также выполняются заказ-наряды на проведение работ по оценкам эффективности использования как самого электрооборудования на всех этапах его жизненного цикла, так и по оценкам экономии всех видов ресурсов, потребляемых электрооборудованием. Регулярно публиковались научные работы Л.М. Зельцбурга в центральных журналах, в частности, «Экономика и математические методы», «Промышленная энергетика» и др., которые широко обсуждаются научной общественностью.

К научной работе Лев Моисеевич активно привлекал студентов, некоторые из которых в последующем защитили диссертации.

Разработанные научные подходы к определению экономических оценок нашли применение и в определении областей эффективности различных электротехнических комплексов и систем в задачах выбора из возможных альтернатив технических решений. Такие работы выполнялись ранее и осуществляются сейчас в различных диссертационных работах на соискание ученой степени доктора/кандидата наук по научной специальности 05.09.03 – «Электротехнические комплексы и системы» в различных научных школах.

Библиографический список

1. Прошельцева, С. Мы – дети галактики / С. Прошельцева, С. Степанов // Газета Нижегородские новости, № 217(1202) от 14 ноября 1996.
2. Носков, В. Красная Этна: дела и люди: Очерки истории предприятия. 70 лет. – Горький: Волго-Вятское кн. изд-во, 1986. – 126 с.
3. Зельцбург, Л.М. Определение экономической эффективности внедрения новой техники с учетом фактора времени // Труды Горьковского политехнического ин-та им. А.А. Жданова. 1966. Т. XXII. Вып. 2.
4. Зельцбург, Л.М. Экономика электроснабжения промышленных предприятий / Л.М. Зельцбург. – Горький: Волго-Вятское кн. изд-во, 1966.
5. Зельцбург, Л.М. Экономика электроснабжения промышленных предприятий / Л.М. Зельцбург. – М.: Высш. шк., 1973. – 272 с.
6. Зельцбург, Л.М. Методы технико-экономического сравнения вариантов технических решений: учебное пособие / Л.М. Зельцбург. ГПИ им. А.А. Жданова. Горький, 1979. – 82 с.

УДК 621.316.722

В.Г. Сугаков, Н.С. Варламов**ЦИФРОВОЕ ФАЗОСМЕЩАЮЩЕЕ УСТРОЙСТВО И ЕГО ОБЛАСТИ ПРИМЕНЕНИЯ НА ОБЪЕКТАХ ВОДНОГО ТРАНСПОРТА**

Волжский государственный университет водного транспорта

Статья посвящена классификации полупроводниковых преобразователей и их особенностям работы по областям применения на судах. При нестабильности частоты питающего напряжения появляется погрешность выходных параметров полупроводникового преобразователя. Предлагается цифровое фазосмещающее устройство с устойчивостью к нестабильности частоты напряжения.

The article is devoted to classification and peculiarity works of semiconductor converters in fields of application on ship. Output error appears when voltage frequency is changed. The digital phase-shifting device with resistance to instability voltage frequency is given.

Ключевые слова: цифровое фазосмещающее устройство, применение полупроводниковых преобразователей, нестабильность частоты питающей сети, погрешность параметров электрической энергии.

Key words: digital phase-shifting device, application of semiconductor converters, instability frequency of system electrical power, error in electrical energy parameters.

Особенности применения полупроводниковых преобразователей (ПП) тесно связаны с режимами работы электротехнических систем судов, функционирующих с различными параметрами электрической энергии. Согласно классификации, приведенной на рис. 1, выделены три основные группы судовых потребителей электрической энергии: общего судового назначения, электропривода судовых механизмов и систем электроснабжения.

Полупроводниковая преобразовательная техника общего назначения, характеризующаяся стабильными выходными параметрами, нашла применение в системах питания различных судовых потребителей. К таким потребителям относятся: магнитные усилители [5], системы измерения сопротивления изоляции [3, 6], распределения нагрузки [7], промышленное и технологическое оборудование [5] и световое оборудование [3, 6], где применяются неуправляемые выпрямители (НВ) и управляемые выпрямители (УВ) типа ВАКС, ВАКЗС, ВАКЗ и ТПС [1, 2]. Однако для питания радиоэлектронной и навигационной аппаратуры применяются также транзисторные преобразователи постоянного напряжения и автономные инверторы [9].

В системах заряда аккумуляторных батарей от электроагрегатов требуется неизменный ток при изменяющемся в процессе работы напряжении. В таких системах используются НВ и УВ, обеспечивающие автоматическим поддержанием выпрямленного тока по мере изменения напряжения батареи [1, 2, 3, 6].

В электросварочных агрегатах в зависимости от режима электросварки напряжение и ток с выхода полупроводникового преобразователя (ПП) должны

плавно регулироваться в широких пределах. Для таких агрегатов применяются НВ и полупроводниковые сварочные выпрямители с крутопадающими внешними характеристиками [1].



Рис. 1. Области применения полупроводниковых преобразователей на судах

В системах катодной защиты корпуса судна применяются НВ и УВ, устраняющие электрохимическую коррозию части корпуса судна. Такие преобразователи позволяют устанавливать и автоматически поддерживать заданную величину защитного потенциала относительно электрода [1, 2].

Для предотвращения гармонических искажений параметров напряжения на судах используются фильтро-компенсирующие устройства. В таких устройствах применяются ПП на основе УВ или схем с использованием транзисторов, что позволяет обеспечивать повышенную точность компенсации реактивной мощности в динамических режимах и снижение колебаний напряжения.

Основная особенность работы ПП в системах возбуждения генераторных агрегатов – это обеспечение номинального и форсированного режимов работы, характеризующихся перегрузками по току на вентили. УВ и НВ применяются в системах питания обмоток возбуждения, начального возбуждения и регулирования напряжения синхронных генераторов и генераторов постоянного тока [1, 2, 3, 4, 7, 8]. Такие системы обеспечивают малые габариты и массу, стабилизацию напряжения генераторов при изменении нагрузки, высокую надежность и большую скорость нарастания напряжения в переходных режимах.

В системах электроснабжения основными требованиями к ПП являются стабилизация напряжения и частоты и обеспечение устойчивости к внешним коротким замыканиям. Преобразователи такого рода при коротком замыкании должны выдерживать величину тока, необходимую для срабатывания защитных аппаратов поврежденного участка. Ведомые сетью инверторы [1], выпрямительные преобразователи и автономные инверторы напряжения [1, 2] применяются в валогенераторных установках, вентильных генераторов и системах бесперебойного питания.

В электропривод судовых механизмов, в котором используется ПП, входит якорно-швартовые устройства, грузоподъемные, промышленные, технологические и общесудовые механизмы и системы электродвижения судов.

Регуляторы напряжения [1, 2, 4], бестоковые коммутаторы [3], УВ и НВ, применяемые в приводах якорно-швартовых устройств, имеют ряд особенностей и зависят от системы управления: широкие пределы регулирования напряжения, ограничение момента двигателя при увеличении натяжения троса и осуществление рекуперативного торможения двигателя.

Электропривод грузоподъемных механизмов, работающий в повторно-кратковременном режиме, характеризуется широким диапазоном изменения нагрузки и частоты вращения. Вследствие чего основной особенностью ПП является в широком диапазоне регулирования напряжения при ограничении величины тока обеспечение достаточно высоких динамических показателей и инверторного режима. В электроприводе буксирных, грузовых, пассажирских, станковых и папильонажных лебедок, судовых кранов и подъемников технологического назначения применяют УВ [1, 2], НВ, преобразователи частоты [1], бестоковые коммутаторы [3] и регуляторы переменного напряжения.

Преобразователи, обеспечивающие стабилизацию частоты вращения двигателя и регулирование напряжения по определенному закону, используются для питания электропривода промышленного, технологического и общесудового назначения. К таким приводам можно отнести судовые нагнетатели и электропривод плавучих буровых установок, где применяются УВ [9].

Траловая лебедка рыболовного траулера является основным производственным механизмом, мощность электропривода которой соизмерима с мощностью судовой электростанции. Не характерность частых реверсов при работе траловой лебедки приводит к использованию нереверсивных УВ.

Для электропривода систем электродвижения судов важными требованиями являются обеспечения специальных режимов и высокой надежности работы. В гребных электрических установках двойного рода тока применяются НВ [1, 2, 4] и УВ [2, 4], переменного тока – преобразователи частоты [3], постоянного тока – регуляторы постоянного тока. Для электропривода подруливающих устройств применяются преобразователи частоты, рулевых устройств – УВ [4].

При изменении частоты напряжения формирование углов управления с выхода системы управления ПП происходит с опережением или отставанием. В следствие чего увеличивается погрешность выходных параметров ПП.

Формирование углов управления производит фазосмещающие устройства, которые входят в состав систем управления ПП. Применение предлагаемого цифрового фазосмещающего устройства (ЦФСУ) устраняет погрешность задания углов управления, поскольку обладает устойчивостью к нестабильности частоты сети за счет установки кода в зависимости от частоты напряжения и требуемого угла управления (рис. 2, а) [10].

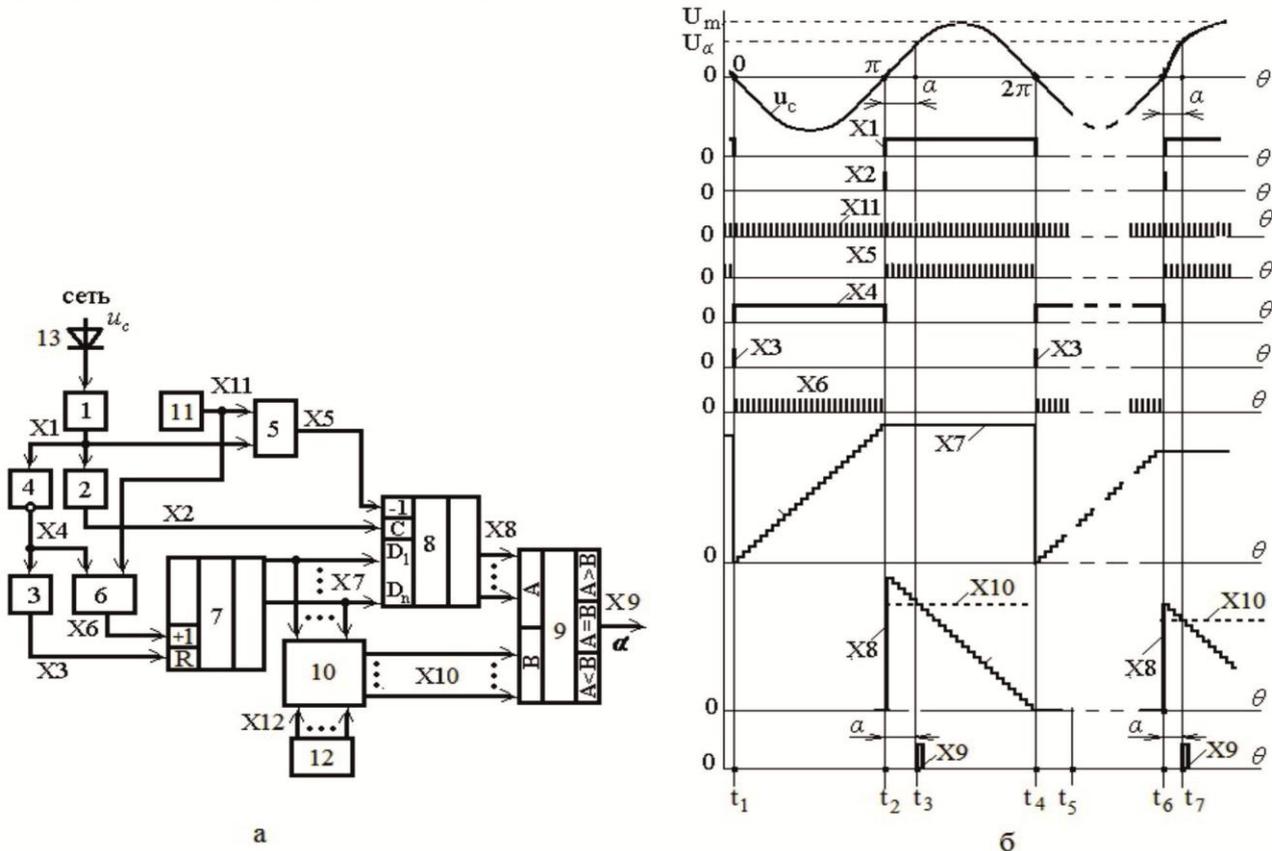


Рис. 2. Цифровое фазосмещающее устройство:

а – схема цифрового фазосмещающего устройства; б – эпюры сигналов на элементах устройства;

- 1 – формирователь прямоугольных импульсов; 2, 3 – формирователь коротких импульсов; 4 – логический элемент НЕ; 5, 6 – логический элемент И; 7 – суммирующий счетчик; 8 – вычитающий счетчик; 9 – числовой компаратор; 10 – блок памяти; 11 – генератор импульсов стабильной частоты; 12 – задающий регистр; 13 – диод

ЦФСУ работает следующим образом (рис. 2, б). При изменении частоты напряжения u_c на выходе счетчика 7 будет сформирован код X7, который формируется импульсами X6 при отсутствии сигнала X1 с выхода формирователя 1 в период отрицательной полуволны напряжения. Сброс счетчика 7 производится импульсом X3 с выхода формирователя коротких импульсов 3 в моменты нарастающего фронта сигнала X1. Код X7 поступает на вход адреса первой координаты блока памяти 10, на вход адреса второй координаты которого поступает код X12, соответствующий заданному углу управления, с выхода задающего регистра 12. Вследствие чего на выходе блока памяти 10 появляется код X10. Код X8 с выхода вычитающего счетчика 8 формируется при вычитании кода X7 импульсами X5 в период положительной полуволны напряжения. Сброс счетчика 8 производится импульсом X2 с выхода формирователя корот-

ких импульсов 2 в моменты спадающего фронта сигнала Х1. Равенство кодов Х10 и Х8 наступает в момент времени, которому соответствует мгновенное значение U_α питающего напряжения u_c при номинальной частоте напряжения, и компаратор 9 формирует управляющий импульс Х9.

Таким образом, применение данного цифрового фазосмещающего устройства в составе системы управления ПП приводит к снижению погрешности формирования углов управления.

Системы управления, включающие в свою структуру ЦФСУ, могут быть применены для устранения погрешности выходных параметров электрической энергии с выхода тиристорных преобразователей в системах электроснабжения судов с ограниченной мощностью электростанции.

Библиографический список

1. **Анисимов, Я.Ф.** Особенности применения полупроводниковых преобразователей в судовых электроустановках / Я.Ф. Анисимов. – Л.: Судостроение, 1973. С. 8-140.
2. **Дмитриев, Б.Ф.** Судовые полупроводниковые преобразователи: учебник по курсу «Полупроводниковые преобразователи» / Б.Ф. Дмитриев, В.М. Рябенский, А.И. Черевко, М.М. Музыка; Сев. федер. ун-т. – 2-е изд., перераб. и доп. – Архангельск; САФУ, 2015. С. 443-515.
3. **Будяков, Н.М.** Устройство и эксплуатация электрооборудования морских судов: Учеб. пособие для учащихся средних ПТУ / Н.М. Будяков. – М: Транспорт, 1980. С. 64-273.
4. **Сергиенко, Л.И.** Электрооборудование морских судов / Л.И. Сергиенко, А.П. Устинов, Г.Г. Драгомарецкий. – М: Транспорт, 1980. С. 98-324.
5. **Фесенко, В.И.** Электрооборудование промысловых судов: учебник / В.И. Фесенко. 2-е изд., перераб. и доп. – Л.: Судостроение, 1983. С. 105-324.
6. **Роджеро, Н.И.** Справочник судового электромеханика и электрика / Н.И. Роджеро. 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Транспорт, 1986. С. 8-291.
7. **Акулов, Ю.И.** Судовая электроника и электроавтоматика / Ю.И. Акулов, А.Ф. Коробков, Ю.В. Мнушко. – М: Транспорт, 1988. С. 49-228.
8. **Сергиенко, Л.И.** Электроэнергетические системы морских судов: учебник для морех. училищ / Л.И. Сергиенко. – М.: Транспорт, 1991. – С. 45-71.
9. **Головин, Ю.К.** Судовые электрические приводы: учеб. для мореход. училищ / Ю.К. Головин. -2-е изд., перераб. и доп. – М.: Трансопрт. – 1991. С. 23-106.
10. Пат. 2612055 RU, МПК G01R 25/00 Цифровое фазосмещающее устройство / В.Г. Сугаков, О.С. Хватов, Н.С. Варламов. 2015155112/28; заявл. 22.12.2015; опубл. 02.03.2017. Бюл. № 7.

УДК 621.313.323

А.И. Байков¹, А.Л. Жеребцов², Д.В. Ковалев³, Д.М. Кочеганов¹**МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ МОЩНОГО СИНХРОННОГО
ДВИГАТЕЛЯ С УЧЕТОМ ПАРАМЕТРОВ СИСТЕМЫ
ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ**

Нижегородский государственный технический университет им. Р. Е. Алексеева¹,
ООО «Газпром трансгаз Сургут»²,
ЦТЭ НТЦ РУ и ЭЭО компании «НИПОМ»³

Рассматриваются уравнения состояния и численные значения параметров математической модели для отображения функционирования синхронного двигателя в упрощенной схеме электроснабжения с возможностью учета возможной асимметрии и других нарушений во внешней схеме, на основе которых произведено математическое моделирование синхронного двигателя большой мощности и реализация модели в среде *Matlab Simulink*.

The article deals with the equations of state and numerical values of the parameters of a mathematical model for displaying the functioning of a synchronous motor in a simplified power supply scheme with the possibility of taking into account possible asymmetry and other disturbances in the external circuit, on the basis of which a mathematical simulation of a high-power synchronous motor was made and the model was implemented in *Matlab Simulink*.

Ключевые слова: синхронный двигатель большой мощности, математическое моделирование, *Matlab, Simulink*.

Key words: high-power synchronous motor, mathematical modeling, *Matlab, Simulink*.

На показатели функционирования электропривода с синхронным двигателем могут оказывать влияние параллельно включенные мощные потребители. Также сам двигатель оказывает влияние на качество функционирования системы с разными потребителями.

Предлагается сформировать эквивалентную схему (рис. 1), которая включает цепь b_1 электропитания по шинам высокого напряжения, цепь шинпровода секции (Z_{b2}) и параллельно работающей нагрузки (Z_{load}).

Предполагается возможность учёта пофазной несимметрии, провалов и бросков напряжения шин и внешней нагрузки. Также можно исследовать процессы гашения поля при отключении питания возбудителя и замыкании его ключом S_{dc} на разрядное сопротивление r_{dc} в ходе воспроизведения процесса оключения электропривода. По значениям коэффициента мощности, и другим физическим переменным, вычисляемым как сигналы обратных связей системы регулирования, можно имитировать функционирование системы автоматического управления возбудителем. В схему в качестве узла связи подцепей искусственно введены не просто активные сопротивления r_x , но и параллельно с ними емкости c_x . Так как емкости c_x не замыкаются сами на себя, их напряжения являются независимыми переменными, или переменными

состояния электрической схемы. Они определяют линейные напряжения U_x на зажимах шин 10 кВ

$$U_{cx} = U_x, \quad (1)$$

так что вычисление внешних напряжений силовых подцепей существенно упрощается. Существенным преимуществом цепи связи, включающей емкость, является приближение постоянных времени контуров связи к постоянным времени силовых контуров. Это благоприятно сказывается на времени и точности интегрирования уравнений состояния, особенно при отображении функционирования объектов с большой механической и электромагнитной инерцией. В частности, исключается генерация высших гармонических в цепи связи с большими активными сопротивлениями.

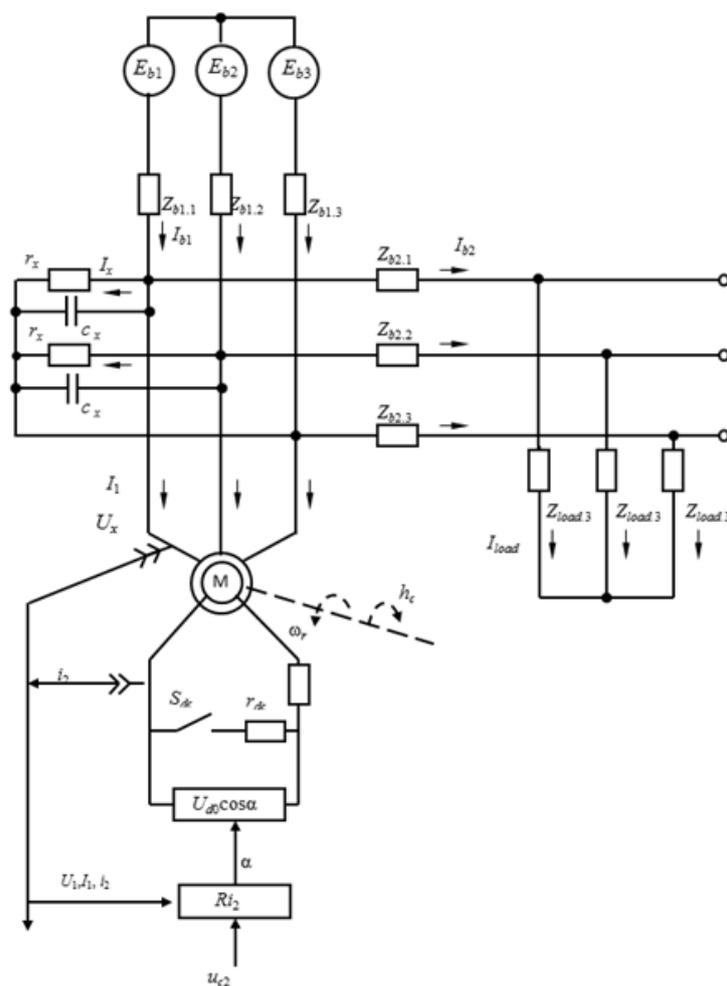


Рис. 1. Расчётная схема для анализа функционирования электропривода в составе системы «питающая сеть – синхронный двигатель – параллельная нагрузка»

В данной схеме принимаются следующие абсолютные значения активных сопротивлений и емкостей связи:

$$R_x = 1000 \text{ Ом}, C_x = 0,1 \text{ мкФ}, T_x = R_x C_x = 10^{-4} \text{ с}. \quad (2)$$

При таких параметрах эта цепь не оказывает заметного влияния на рабочие токи и напряжения.

Суммы пар токов параллельных ветвей цепей связи вычисляются через токи I_{hb1} , I_{hb2} независимых контуров с индуктивностями, т.е. через переменные состояния:

$$I_x = I_{rx} + I_{cx} = I_{hb1} - I_1 - I_{hb2} . \quad (3)$$

Математическая модель синхронного двигателя формируется на основе применения преобразования координат Парка-Горева [1] в виде дифференциальных уравнений эквивалентной двухфазной машины относительно преобразованных потокосцеплений продольных и поперечных осей статора Ψ_{dq} , компенсационных обмоток Ψ_{dq3} , контура обмотки возбуждения Ψ_d , создающей потокосцепление по продольной оси, и уравнений движения привода:

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} \Psi_{dq} &= U_{dq} - \omega_r \begin{bmatrix} 0 & -1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix} \Psi_{dq} - \begin{bmatrix} r_1 & 0 \\ 0 & r_1 \end{bmatrix} I_{dq}; \\ \frac{d}{dt} \Psi_{3dq3} &= \begin{bmatrix} r_{3d} & 0 \\ 0 & r_{3q} \end{bmatrix} I_{dq3}; \\ \frac{d}{dt} \psi_2 &= e_2 - r_2 i_2; \\ \frac{d}{dt} \omega_r &= j_{pr}^{-1} (h_{em} - h_c); \\ \frac{d}{dt} \theta_r &= \omega_r, \end{aligned} \quad (4)$$

где U_{dq} – преобразованные фазные напряжения на зажимах статора, получаемые благодаря наличию внешнего источника электрической энергии (E_{b1}); e_2 – ЭДС, подключенная к зажимам обмотки возбуждения; r_1 , r_2 , r_{3d} , r_{3q} – активные сопротивления соответствующих контуров, а I_{dq} , i_2 , I_{dq3} – токи; ω_r – угловая частота вращения, а θ_r – угол поворота ротора; j_{pr} – момент инерции вала ротора h_{em} , h_c – электромагнитный момент и момент сопротивления на валу ротора. Токи контуров вычисляются через потокосцепления с использованием обращенной матрицы их индуктивного взаимодействия L_{dq32} :

$$I_{dq32} = L_{dq32} \Psi_{dq32}, \quad (5)$$

где

$$I_{dq32} = \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \\ i_{3d} \\ i_{3q} \\ i_2 \end{bmatrix}, \quad \Psi_{dq32} = \begin{bmatrix} \Psi_d \\ \Psi_q \\ \Psi_{3d} \\ \Psi_{3q} \\ \Psi_2 \end{bmatrix}, \quad L_{dq32} = \begin{bmatrix} l_d & 0 & l_m & 0 & l_m \\ 0 & l_q & 0 & l_m & 0 \\ l_m & 0 & l_{3d} & 0 & l_m \\ 0 & l_m & 0 & l_{3q} & 0 \\ l_m & 0 & l_m & 0 & l_2 \end{bmatrix}.$$

Матрицу L_{dq32} определяют ключевые параметры схемы замещения машины: индуктивности статора l_d , l_q и компенсационных обмоток l_{3d} , l_{3q} по продольной и поперечной осям, индуктивность обмотки возбуждения l_2 и взаимная индуктивность l_m по основному контуру намагничивания.

Все физические величины в (1), (3) – (5) считаются приведёнными к статору и используются в относительных единицах. Преобразование координат осуществляется на основе применения матрицы

$$A_{dq} = 2/\sqrt{3} \begin{bmatrix} \sin(\theta_r + \pi/3) & \sin(\theta_r) \\ \cos(\theta_r + \pi/3) & \cos(\theta_r) \end{bmatrix}. \quad (6)$$

Исходное уравнение напряжений ветвей подстанции b_1 питания шин высокого напряжения

$$U_{b1} = L_{b1} \frac{d}{dt} I_{b1} + R_{b1} I_{b1} + U_{Cb1} - E_{b1}, \quad (7)$$

где матрицы индуктивностей и активных сопротивлений

$$L_{b1} = \begin{bmatrix} l_{b1.1} & 0 & 0 \\ 0 & l_{b1.2} & 0 \\ 0 & 0 & l_{b1.3} \end{bmatrix}, R_{b1} = \begin{bmatrix} r_{b1.1} & 0 & 0 \\ 0 & r_{b1.2} & 0 \\ 0 & 0 & r_{b1.3} \end{bmatrix},$$

а также вектор трехфазных ЭДС

$$E_{b1} = \begin{bmatrix} E_{b1.1\max} \sin(\omega_1 t + \varphi_{b1.1}) \\ E_{b1.2\max} \sin(\omega_1 t - 2\pi/3 + \varphi_{b1.2}) \\ E_{b1.3\max} \sin(\omega_1 t + 2\pi/3 + \varphi_{b1.3}) \end{bmatrix}$$

могут иметь пофазовую асимметрию, так как (7) не подвергается координатному преобразованию.

На основе метода контурных токов составляется уравнение электрического равновесия подстанции b_1 относительно линейного напряжения шин высокого напряжения U_x :

$$\frac{d}{dt} I_{hb1} = L_{hb1}^{-1} (-U_x + E_{hb1} - R_{hb1} I_{hb1}), \quad (8)$$

где I_{hb1} – вектор контурных токов подстанции,

$$H_s = \begin{bmatrix} 1 & 0 & -1 \\ 0 & 1 & -1 \end{bmatrix}, L_{hb1} = H_s L_{b1} H_s', R_{hb1} = H_s R_{b1} H_s', E_{hb1} = H_s E_{b1}.$$

Уравнения напряжений подстанции b_2 –load,

$$U_{b2} = L_{b2} \frac{d}{dt} I_{b2} + R_{b2} I_{b2}, \quad (9)$$

$$U_{load} = L_{load} \frac{d}{dt} I_{b2} + R_{load} I_{b2},$$

учитывающие преобразование электромагнитной энергии параллельно работающими потребителями, разрешаются по методу контурных токов относительно линейных напряжений U_x шин высокого напряжения

$$\frac{d}{dt} I_{hb2} = L_{hb2}^{-1} (U_x - R_{hb2} I_{hb2}), \quad (10)$$

где I_{hb2} – вектор контурных токов подстанции,

$$L_{b2} = \begin{bmatrix} l_{b2.1} & 0 & 0 \\ 0 & l_{b2.2} & 0 \\ 0 & 0 & l_{b2.3} \end{bmatrix}, L_{load} = \begin{bmatrix} l_{load1} & 0 & 0 \\ 0 & l_{load2} & 0 \\ 0 & 0 & l_{load3} \end{bmatrix},$$

$$R_{b2} = \begin{bmatrix} r_{b2.1} & 0 & 0 \\ 0 & r_{b2.2} & 0 \\ 0 & 0 & r_{b2.3} \end{bmatrix}, R_{load} = \begin{bmatrix} r_{load1} & 0 & 0 \\ 0 & r_{load2} & 0 \\ 0 & 0 & r_{load3} \end{bmatrix};$$

$$L_{hb2} = H'_s [L_{b2} + L_{load}] H'_s, R_{hb2} = H'_s [R_{b2} + R_{load}] H'_s, I_{b2} = I_{load} = H'_s I_s,$$

Изменением параметров параллельной нагрузки можно имитировать различные виды нарушений, включая упрощенные варианты коротких замыканий и асимметрии. Контурные уравнения подцепей b_1 и b_2-load и уравнение разряда емкостей цепи связи добавляются в (4). Применяется обратное преобразование токов статора

$$I_1 = I_{load} = H'_s A_{dq}^{-1} I_{dq}, \quad (11)$$

соотношение (3) для вычисления токов подцепи связи, преобразование фазных напряжений шин питания статора

$$U_{dq} = A_{dq} \begin{bmatrix} H'_s \\ 111 \end{bmatrix} U_x \quad (12)$$

и формула расчёта электромагнитного момента

$$h_{em} = (\Psi_d i_q - \Psi_q i_d). \quad (13)$$

Получается полная система уравнений состояния синхронного двигателя и эквивалентной упрощенной схемы электроснабжения:

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} I_{hb1} &= L_{hb1}^{-1} (E_{hb1} - U_x - R_{hb1} I_{hb1}), \\ \frac{d}{dt} I_{hb2} &= L_{hb2}^{-1} (U_x - R_{hb2} I_{hb2}), \\ \frac{d}{dt} \Psi_{dq} &= E_{dq} - \omega_r \begin{bmatrix} 0 & -1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix} \Psi_{dq} - \begin{bmatrix} r_1 & 0 \\ 0 & r_1 \end{bmatrix} I_{dq}, \\ \frac{d}{dt} \Psi_{3d} &= -i_{3d} r_{3d}, \\ \frac{d}{dt} \Psi_{3q} &= -i_{3q} r_{3q}, \\ \frac{d}{dt} \Psi_2 &= e_2 - r_2 i_2, \\ \frac{d}{dt} \omega_r &= j_{pr}^{-1} (h_{em} - h_c), \\ \frac{d}{dt} \theta_r &= \omega_r, \\ \frac{d}{dt} U_{cx} &= \frac{1}{c_x} \left(I_x - \frac{1}{r_x} U_{cx} \right), \end{aligned} \quad (14)$$

Математическая модель применена для анализа статических и динамических режимов работы синхронного двигателя СТД2 12500 мощностью 12500 кВт компрессорного агрегата газоперекачивающей станции. Двигатель имеет базисные величины, приведенные в табл. 1. Параметры схемы замещения двигателя, используемые в вычислениях, приведены в табл. 2.

На рис. 2 представлена диаграмма токов и напряжений статора в номинальном режиме с опережающим коэффициентом мощности 0,9, полученная при реализации модели в среде *Matlab-Simulink*.

В табл. 3 приведены результаты расчета интегральных показателей статического режима – коэффициента мощности $\cos(\varphi)$, и действующего значения тока статора I_{1eff} , определяемых по первым гармоническим составляющим, при изменении величины напряжения питания e_2 обмотки возбуждения. Полученные данные полностью согласуются с паспортными [2], что свидетельствует о достаточной точности и адекватности как математических соотношений, так и параметров модели.

Таблица 1

Базисные величины синхронного двигателя СТД2 12500

Базисная величина	Идентификатор	Формула	Значение	Едн. изм
Базисное напряжение	U_B	$U_n \cdot f \cdot \sqrt{2}$	8165	В
Базисный ток	I_B	$I_n \cdot \sqrt{2}$	1159,7	А
Базисная частота	Ω_B	$2 \cdot \pi \cdot f_1$	314,1593	1/с
Базисный угол поворота	$Teta_B$	1	1	рад
Производные базисные единицы				
Время базисное	T_B	$Teta_B / \Omega_B$	0,00318	с
Потокоцепление базисное	Ψ_B	$U_B \cdot T_B$	25,99	В·с
Базисная индуктивность	L_B	Ψ_B / I_B	0,0224	Гн
Базисная емкость	C_B	$I_B \cdot T_B / U_B$	0,00045	Ф
Базисное сопротивление	R_B	U_B / I_B	7,04	Ом
Базисная мощность	P_B	$3 \cdot U_B \cdot I_B / 2$	14202816	Вт
Электромагнитный момент базисный	h_B	$P_B \cdot Z_p / \Omega_B$	45209	Нм
Энергия базисная	W_B	$P_B \cdot T_B$	45209	Дж
Базисная частота вращения ротора	Ω_r_B	Ω_B / Z_p	314,1593	1/с
Базисный угол поворота ротора	$Teta_r_B$	$Teta_B / Z_p$	1	
Момент инерции базисный	J_B	W_B / Ω_B^2	0,458	кг·м ²

Таблица 2

Параметры схемы замещения синхронного двигателя СТД2 12500 в относительных единицах, приведенные к статору

Параметр	l_d	l_q	l_2	l_m	l_{3d}	l_{3q}	r_1	r_2	r_{3d}	r_{3q}
Значение	2,208	2,208	3,285	2,09	2,208	2,208	0,0039	0,0065	0,005	0,008

Выводы

Представлены уравнения состояния и численные значения параметров математической модели для отображения функционирования синхронного двигателя в упрощенной схеме электроснабжения с возможностью учета возможной асимметрии и других нарушений во внешней схеме. Точность и адекватность модели проверены путем сопоставления расчетных интегральных показателей статического режима с паспортными.

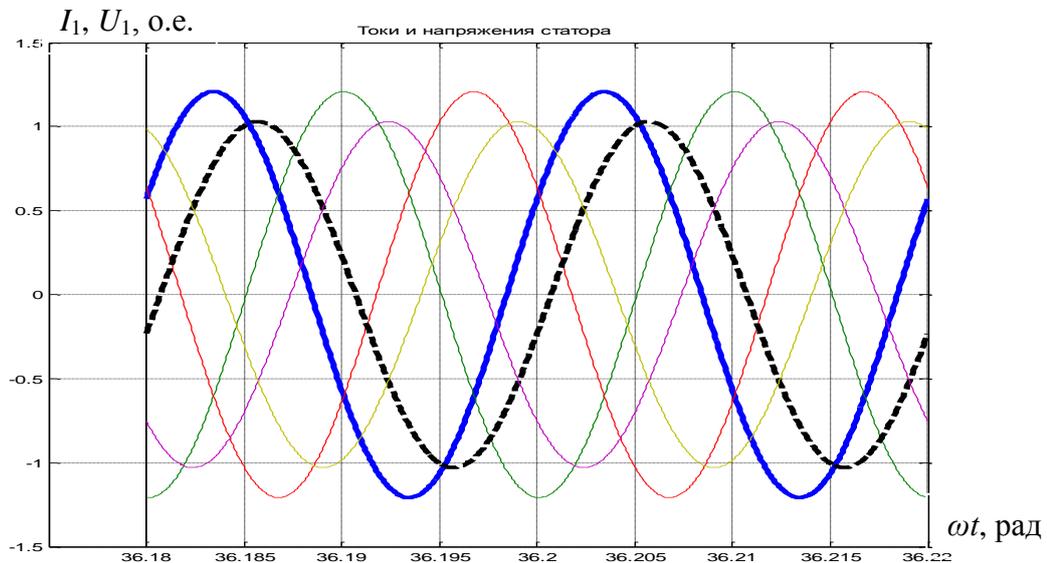


Рис. 2. Расчётная диаграмма токов (сплошная линия) и напряжений (пунктирная линия) статора в относительных единицах в номинальном режиме

Таблица 3

Коэффициент мощности и действующее значение тока статора синхронного двигателя СТД2 12500 в статическом режиме при разных уровнях возбуждения

φ , град	$\cos(\varphi)$	I_{1eff} , А	e_2 , о.е.
-32	0,85	860	1,08
-28	0,88	838	1,03
-26	0,90	821	1,00
-23	0,92	803	0,97
-20	0,94	785	0,92
-14	0,97	766	0,88
-8	0,99	754	0,84
0	1,00	744	0,77
8	0,99	744	0,75
11	0,98	759	0,71
23	0,92	801	0,67

Библиографический список

1. Горев, А.А. Переходные процессы синхронной машины / А.А. Горев. – Л.-М.: ГЭИ, 1950. – 552 с.
2. Двигатели трехфазные асинхронные СТД. Техническое описание и инструкция по эксплуатации. Документ завода-изготовителя: Лысьва, ОВЖ. 412.041 ТО. – 70 с.

УДК 621.314

Г.И. Коробко, М.П. Шилов**РАЗРАБОТКА И МОДЕЛИРОВАНИЕ СИНХРОНИЗАТОРА
ДЛЯ ВКЛЮЧЕНИЯ СИНХРОННОГО ГЕНЕРАТОРА
НА ПАРАЛЛЕЛЬНУЮ РАБОТУ С СЕТЬЮ**

ФГБОУ ВО "Волжский государственный университет водного транспорта"

Рассматривается блок-схема синхронизатора для включения синхронного генератора на параллельную работу с сетью. В пакете Matlab с использованием библиотек Simulink и SimPowerSystem разработана имитационная модель, обеспечивающая автоматическую синхронизацию на базе нового алгоритма. При моделировании работы синхронизатора на диаграммах отсутствует колебательный процесс включения генератора параллельно с сетью.

In the article are developed the block diagram of the synchronizer for switching on the synchronous generator for parallel operation with the mains. In the package Matlab with the use of Simulink libraries and SimPoverSystems, a simulation model has been developed that provides automatic synchronization based on the new algorithm. When simulating the operation of the synchronizer, there is no oscillatory process of switching on the generator in parallel with the mains.

Ключевые слова: генераторный агрегат, параллельная работа, синхронный генератор, синхронизация.

Key words: generator set, parallel operation, synchronous generator, synchronization.

Параллельная работа источников электроэнергии является основным режимом работы автономной электроэнергетической системы (ЭЭС) [1]. Главными достоинствами при параллельной работе являются:

- перевод нагрузки с одного на другой генератор без перерыва в питании потребителей;
- увеличение надежности обеспечения приемников электроэнергией;
- повышение КПД генераторов и электростанции в целом из-за снижения суммарных потерь.

Одной из важных задач при параллельной работе источников электроэнергии является их синхронизация. При выполнении условий включения синхронного генератора на параллельную работу его ЭДС и напряжение сети должны быть равны по значению и совпадать по фазе. Как показывает практика, ЭДС и частота синхронного генератора устанавливаются на несколько процентов больше напряжения и частоты сети с целью начальной загрузки генератора активной и реактивной мощностью. Кроме того, сигнал на включение генератора должен подаваться несколько раньше момента совпадения ЭДС и напряжения по фазе для компенсации уставки времени срабатывания генераторного автомата.

Разработка и модернизация автономных ЭЭС на базе систем автоматического управления генераторными агрегатами и электростанции в целом являет-

Для определения частот генератора и сети используются два блока измерения БИЧГ и БИЧС, на входы которых подключены напряжения УГ и УС. На выходах блоков получены значения частоты генератора f_G и сети f_C в цифровом виде, которые поступают на входы второго узла сравнения УС2, где определяется значение разности частот генератора и сети Δf . При разности частот менее 0.1 Гц на выходе УС2 формируется сигнал "1", разрешающий включение привода автоматического выключателя.

Третьим условием включения генераторного автомата является равенство напряжений генератора УГ и сети УС с высокой точностью. Для этого используется устройство разности напряжений УРН, состоящее из трансформаторов напряжения Т1 и Т2, выпрямителей В1, В2 и фильтров Ф1, Ф2, на выходах которых формируются постоянные напряжения $U_{Г=}$ и $U_{С=}$, пропорциональные соответственно напряжениям генератора и сети. После сравнения напряжений $U_{Г=}$ и $U_{С=}$ в сумматоре С1, его выходной сигнал, усиленный в усилителе У, преобразуется в напряжение ΔU , которое управляет регулятором возбуждения и, следовательно, напряжением на зажимах генератора.

При равенстве напряжений $U_{Г=}$ и $U_{С=}$ в пределах допустимой ошибки 0.1%, на выходе блока $U_{норма}$ формируется сигнал равный "1". Сигналы "1" с блоков УС1, УС2 и $U_{норма}$ поступают на входы логического элемента И, при этом на его выходе подается сигнал "1" на включение ЭП.

Для моделирования параллельной работы генераторного агрегата с сетью, в пакете Matlab создана модель синхронизатора, представленная на рис 2.

В модели использованы блоки из библиотек Simulink и SimPowerSystem [2]. Аналого-цифровые преобразователи АЦП1 и АЦП2 представлены блоком Fourier analyser. Измеренные значения фазных напряжений генератора УГ и сети УС блоками pV1, pV2 поступают на АЦП1 и АЦП2. На выходе преобразователей вырабатываются значения углов фаз в виде цифрового сигнала и поступают на входы УС1.

В формирователь импульсов на вход "In1" поступают значения углов фаз напряжения сети и генератора, где формируются сигналы разницы углов фаз для управления дизелем. На вход "состояние генераторного автомата" приходит логическая единица, которая останавливает передачу управляющих сигналов для дизеля.

Измерители частоты генератора БИЧГ и сети БИЧС получают на входах фазные напряжения, из которых определяются числа в виде цифр xx,xx. После вычитания значений частот генератора и сети, выполнившее УС2 и сравнивающее их с допустимым значением (0,xx), на выходе УС2 формируется логическая единица.

На входы АВС и А1В1С1 поступает напряжение от синхронного генератора и сети, которое подключено к трехфазным понижающим трансформаторам - Three-PhaseTransformer1 и Three-PhaseTransformer2, трехфазным мостовым выпрямителям - Universal Bridge1 и Universal Bridge2, измерителям напряжения - Voltage Measurement1 и Voltage Measurement2 и фильтрам Баттерворта второго порядка - Filter1 и Filter2. Полученные на выходе фильтров значения посто-

янного напряжения генератора и сети поступают на сумматор Sum, где определяется разность напряжений на его выходе.

В усилителе Gain устанавливается коэффициент усиления (4 - 20) разности, при котором напряжение генератора будет равно напряжению сети с точностью $\pm (0,2 \div 1,0)\%$. Если разница выпрямленных напряжений находится в требуемом диапазоне блока Interval Test, то на выходе формируется сигнал "1", поступающий на логический элемент "AND" Logical Operator вместе с сигналами блоков УС1 и УС2. Логическая единица с Logical Operator разрешает работу для блока Enable Subsystem, которая передает "1" на электропривод генераторного автомата.

Моделирование при включении на параллельную работу синхронного генератора с сетью выполнено при активно-индуктивной нагрузке равной $P = 40$ кВт и $Q = 30$ кВАр, что соответствует 20% от полной мощности генератора. Синхронизатор моделировался в составе синхронного генератора мощностью $S=250$ кВА, $U_{\text{ном}}=400$ В, $f_{\text{ном}} = 50$ Гц, $n_{\text{ном}} = 1500$ об/мин; при полной мощности сети $S=750$ кВА.

На диаграммах моделирования показаны изменения активной и реактивной мощности на рис. 3 и рис. 4 соответственно.

В начальный момент времени $t = 0$ с происходит подключение нагрузки к сети. При достижении времени $t = 0,235$ с на параллельную работу включился дизель - генератор.

Точность включения на параллельную работу зависит от величины угла сдвига фазы напряжения синхронного генератора и сети. На осциллограммах показано, что генератор берет на себя нагрузку без перерегулирования. В момент включения на параллельную работу отсутствует переход генератора в двигательный режим.

Распределение нагрузок осуществляется плавно без наличия колебательного процесса [3]. Диаграммы токов генератора и сети представлены на рис. 5. Переходные процессы идентичны процессам изменения активной и реактивной мощности.

В разработанной блок-схеме синхронизатора используется принцип управления частотой вращения дизеля за счет уменьшения разницы углов фаз напряжения сети и генератора, стремящейся к нулю. При этом частоты генератора и сети практически равны ($\Delta f \leq \pm 0.1$ Гц), а конкретная величина уставки времени на срабатывание генераторного автомата не требуется.

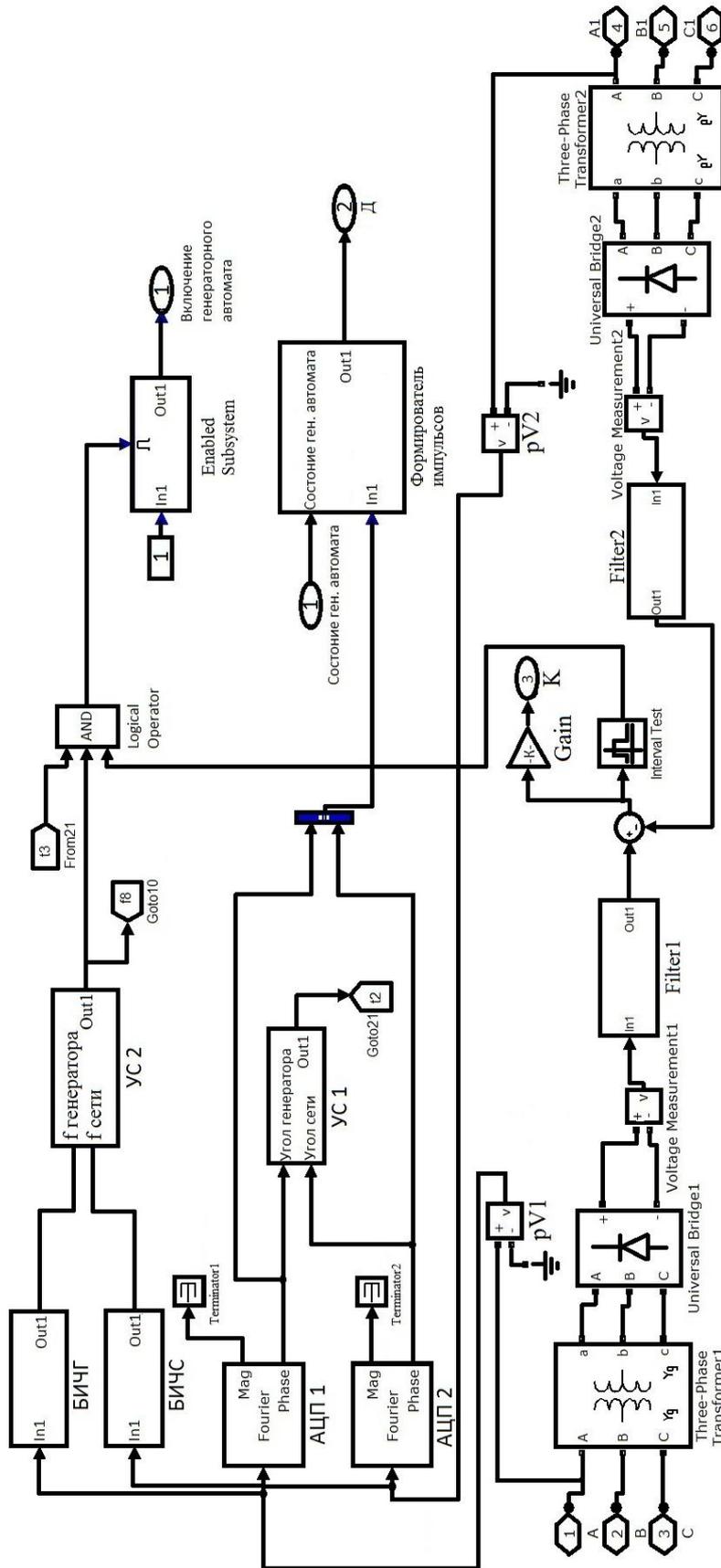


Рис. 2. Модель синхронизатора в пакете Matlab

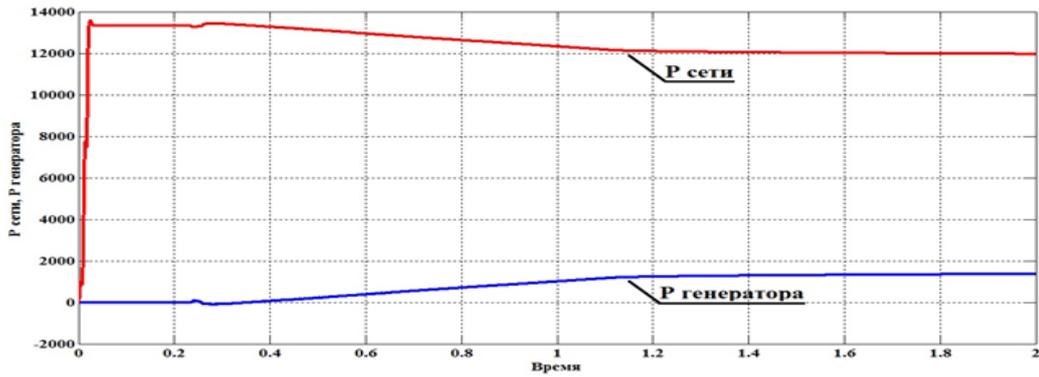


Рис. 3. Диаграмма изменения активной мощности после включения на параллельную работу генератора с сетью

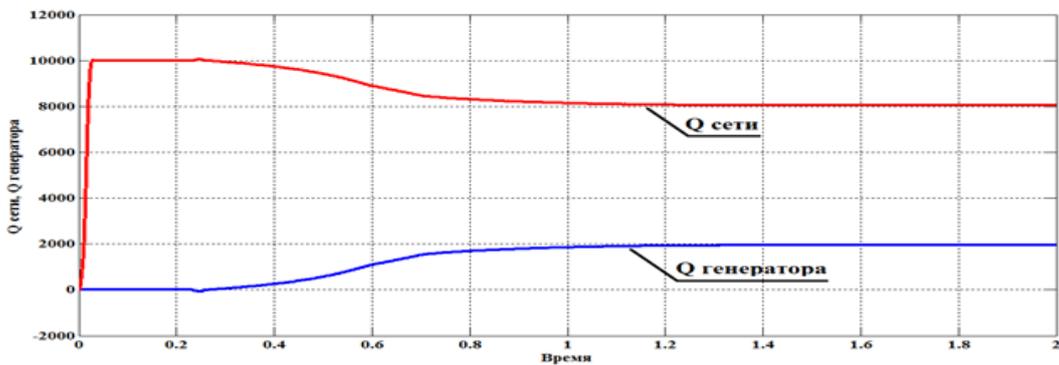


Рис. 4. Диаграмма изменения реактивной мощности после включения на параллельную работу генератора с сетью

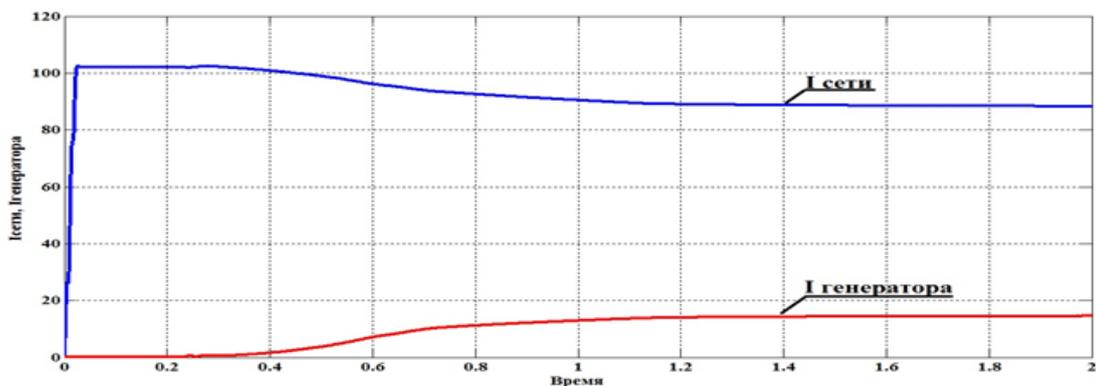


Рис. 5. Диаграмма изменения тока после включения на параллельную работу генератора с сетью

Библиографический список

1. Баранов, А.П. Судовые автоматизированные электроэнергетические системы: учебник для вузов. 2-е изд., перераб. и доп. – СПб.: Судостроение, 2005.–528 с.
2. Черных, И.В. Моделирование электротехнических устройств в MATLAB, SimPowerSystem и Simulink / И.В. Черных. - М.: ДМК Пресс; СПб.: Питер, 2008. – 288 с.
3. Коробко, Г.И. Исследование параллельной работы автономного генераторного агрегата с сетью / Г.И. Коробко, С.В. Попов, А.В. Бишлетов, А.С. Филатов // Актуальные проблемы электроэнергетики; НГТУ. Н.Новгород, 2011. С.116-120.

УДК 621

Д.С. Кобяков

ЦИФРОВЫЕ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОПРИВОДАМИ

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Рассмотрены наиболее распространенные электродвигатели современных электроприводов, принцип их работы и конструкция. Также приводятся примеры применения и рассматриваются ключевые моменты методов управления разными видами двигателей в зависимости от их конструкции. Проводится обзор современной элементной базы.

The article describes the most common electric motors in modern electric drives, their operation and design. Also examples of the application and reviewed the key points of control methods different types of engines depending on their design. Modern element base was reviewed.

Ключевые слова: цифровой электропривод, сигнальный процессор, вентильный электродвигатель, системы управления электроприводов.

Key words: digital electric drive, signal processing, BLDC motor, control systems of electric drives.

Одной из главных тенденций развития современной электротехники является разработка эффективных регулируемых систем электропривода. Современные системы управления электроприводов, как правило, цифровые с интеллектуальными силовыми ключами. Этому способствовало развитие микроэлектроники, а также силовой электроники. На данный момент под электроприводом можно понимать однокристалльную систему управления в совокупности с силовым автономным инвертором напряжения и электродвигателем.

Рассмотрим два распространённых вида электродвигателей: синхронный с постоянными магнитами и бесколлекторный двигатель постоянного тока. В англоязычной терминологии эти двигатели называются так: *BLDC (Brushless Direct Current Motor)* – бесколлекторный двигатель постоянного тока; *PMSM (Permanent Magnet Synchronous Machine)* – синхронный двигатель с постоянными магнитами.

Любой электродвигатель имеет статор и ротор. Статор - неподвижная часть конструкции, ротор - вращающаяся ее часть. По данному критерию двигатели можно разделить на два типа: *Inrunner* – магнитные пластины ротора находятся внутри статора; *Outrunner* – магнитные пластины закреплены снаружи и вращаются вокруг неподвижного статора.

Ротор *PMSM* и *BLDC* может включать в себя постоянные магниты или обмотку возбуждения. Постоянные магниты – это изделие из магнитотвердого материала с высокой коэрцитивной силой. Геометрия ротора синхронного двигателя бывает: с явно выраженными полюсами; с неявно выраженными полюсами.

Чтобы проанализировать геометрию ротора, представим статор электродвигателя во вращающейся системе координат $d-q$. Конструкция с неявно выраженными полюсами имеет одинаковую индуктивность по продольной и поперечной осям, а у конструкции с явно выраженными полюсами это не так. Статор электродвигателя включает в себя корпус и сердечник с обмоткой. Широко применяются трехфазные вентильные двигатели. Конструкция статора любого электродвигателя бывает: с распределённой обмоткой; с сосредоточенной обмоткой.

Бесколлекторные электродвигатели с тремя фазами самые распространённые. С увеличением количества фаз растёт плавность вращения ротора, но зато становится сложнее алгоритм управления. Под трехфазные двигатели выпускаются готовые силовые транзисторные сборки.

Теперь сравним двигатель постоянного тока и вентильный электродвигатель. Современной альтернативой щеточным электродвигателям постоянного тока выступают электроприводы с вентильными, т. е. электронно-коммутируемыми двигателями. Этот вид двигателей не имеет щеток и механических контактов, поэтому срок службы механики определяется подшипниками. *BLDC* двигатель меньше весит и менее габаритный. Если сравнивать потери в электроприводе на базе ДПТ и *BLDC*, то во втором случае они ощутимо меньше. Дело в том, что потери мощности в электроприводе можно условно разделить на транзисторные и коллекторные. У вентильного двигателя коллектора нет, поэтому КПД такого привода выше. О диапазоне регулирования скорости вращения трудно судить однозначно. У ДПТ есть обмотка возбуждения, и увеличение скорости выше номинальной достигается за счет уменьшения потока возбуждения. У *BLDC* в роторе находятся постоянные магниты. Так что здесь, если оба привода с датчиком обратной связи по скорости, то диапазон вращения шире у ДПТ. Так же бесколлекторные двигатели греются меньше, чем ДПТ. Все вентильные двигатели греются меньше, чем коллекторные электродвигатели: ДПТ, универсальный коллекторный двигатель, вентильно - индукторный двигатель с независимым возбуждением. Еще одним плюсом вентильных приводов является возможность эксплуатации в воде и агрессивной среде. Это преимущество, к примеру, активно используется в военной промышленности, в автомобильных приводах [2].

Каждый электродвигатель занимает свою нишу применения. Синхронные двигатели традиционно используются в генераторных установках. Для тяговых приложений больше подходят ДПТ. В электрических дрелях, как и раньше, применяются универсальные коллекторные двигатели. Самым распространённым двигателем и по сей день остается асинхронный. Он широко применяется в насосных установках, нерегулируемом приводе.

Рассмотрим способы управления двигателями *BLDC* и *PMSM*. Синхронным двигателем с постоянными магнитами можно управлять в двух режимах:

- управление *BLDC* - режим автокоммутиации с поддержанием фазного тока на заданном уровне на интервале коммутации;

- управление *BLAC (PMSM)* - векторный метод управления (*FOC*), который сегодня реализуется программно с помощью векторной ШИМ и координатных преобразований (рис. 1).

Когда синхронным двигателем управляют в режиме автокоммутации, его конструкция подразумевает однополярное питание, при этом обмотки генерируют трапецеидальную противо-ЭДС. Ротор такого двигателя имеет явно выраженные полюса. Такой двигатель называют бесколлекторным, или в английской терминологии - *BLDC*. Если речь идет об управлении, ориентированном по полю (*FOC*), то двигатель генерирует синусоидальную противо-ЭДС. На роторе находятся не явно выраженные полюса. Такой двигатель называют синхронным, или *PMSM*. Для каждого двигателя свой метод управления. Точнее конструкция сделана под метод управления.

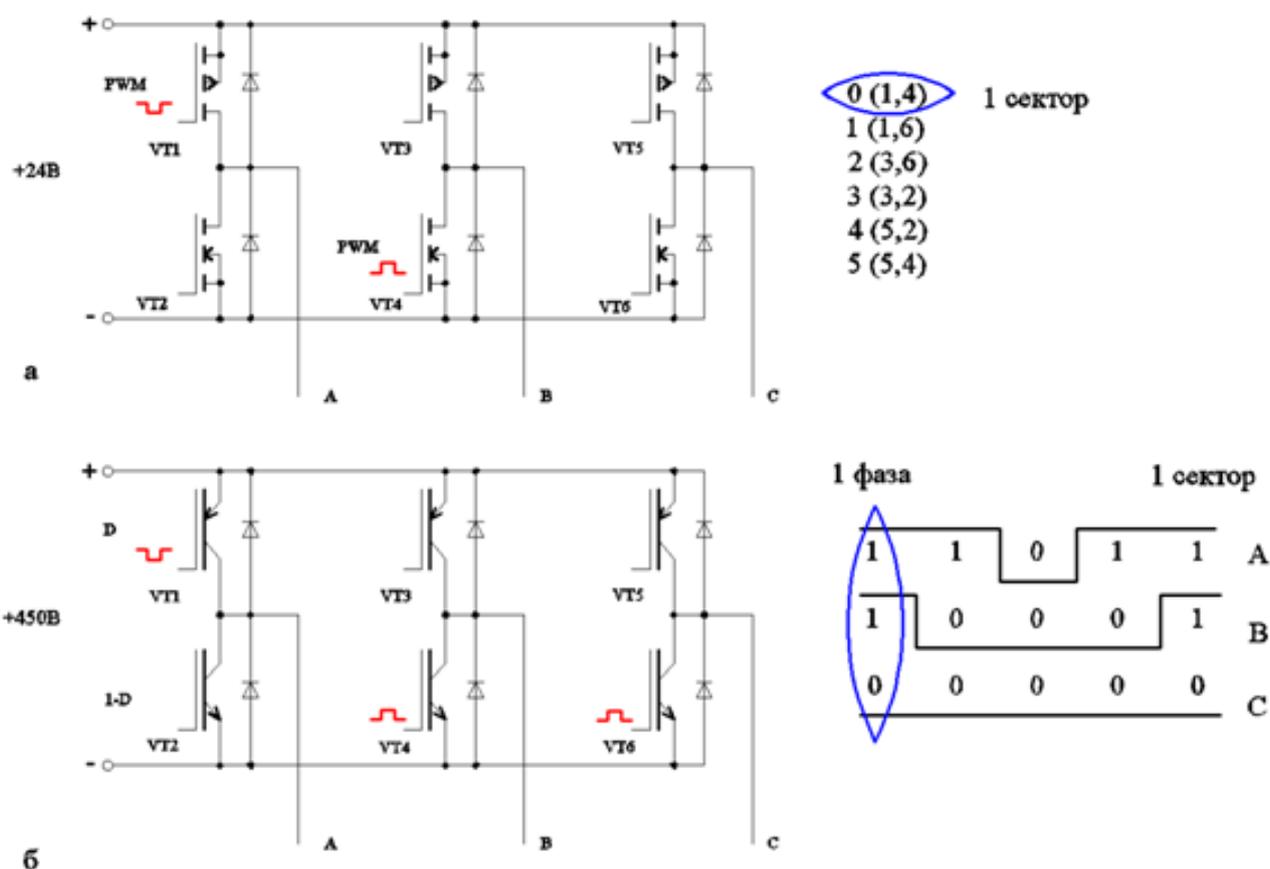


Рис. 1. Подача импульсов управления на ключи АИН:
 а - при PWM с автокоммутацией фаз; б - Space Vector PWM

На сегодняшний день электроприводы, выпускаемые промышленностью, в основном цифровые. Это значит, что ядром системы управления приводом может являться микроконтроллер или цифровой сигнальный процессор (*DSP*). Двигатель может быть асинхронным (*AC motor*), синхронным с постоянными магнитами (*PMSM*), обычным ДПТ (*BDC*) или бесколлекторным двигателем постоянного тока (*BLDC*). Силовой преобразователь, как правило, имеет топологию трехфазного мостового АИН.

ставлена структурная схема управления электроприводом *PMSM*. Микроконтроллер управляет скважностью силовых ключей и снимает сигналы с АЦП. Вращение вычисляется в программных модулях. Тут есть и цифровые ПИД-регуляторы, и модули координатных преобразований, и векторная ШИМ, и многое другое. Учитывая полосу пропускания электропривода, тактовой частоты *DSP* вполне хватает как на вращение, так и на обмен информацией по интерфейсам.

Библиографический список

1. Солонина, А.И. Алгоритмы и процессоры цифровой обработки сигналов / А.И. Солонина, Д.А. Улахович, Л.А. Яковлев. – СПб.: БХВ-Петербург, 2002. – 464 с.
2. *TMS320F2810, TMS320C2810 Digital Signal Processors – Texas Instruments*, 2012.

Секция 3. ЭФФЕКТИВНОСТЬ СИСТЕМ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКИ И ЭКОНОМИЯ ЭНЕРГОРЕСУРСОВ

УДК 621.3

А.Б. Лоскутов, А.А. Лоскутов, Д.В. Зырин, П.А. Толчин

АНАЛИЗ МЕТОДОВ РАСЧЕТА ЗОН ЗАЩИТЫ ОТ ПРЯМОГО УДАРА МОЛНИИ ПРОМЫШЛЕННЫХ ЗДАНИЙ И СООРУЖЕНИЙ

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Несоответствие отечественных стандартов на проектирование со стандартами других стран определяет одну из проблем выхода инжиниринговых компаний на международный рынок: большие затраты времени на выполнение проекта и несоответствие качества выполненных услуг. В статье рассмотрены методики расчета зон защиты одиночных стержневых молниеотводов отечественной инструкции и стандарта МЭК 62305. Предложен ряд рекомендаций для формирования новой инструкции, которую предполагается использовать при проектировании объектов стран-заказчиков ЕС.

The disparity of national standards for the design with international, identifies one of the challenges of release engineering companies on the international market: large time costs on project execution and lack of quality of the executed services. The article considers the methods of calculation of protection zones of single lightning rods in the domestic and to standard IEC 62305. We proposed a few recommendations for the new user that you want to use when designing buildings in the EU.

Ключевые слова: молниезащита, расчет зон защиты, МЭК 62305, метод фиктивной сферы.

Key words: lightning protection, calculation of protection zones, IEC 62305, the rolling sphere method.

Известно, что не все стандарты Международной Электротехнической Комиссии (МЭК) на данный момент приняты в качестве нормативов в РФ.

Например, при проектировании систем молниезащиты и заземления основным нормативным актом для решения ряда задач является «Инструкция по устройству молниезащиты зданий и сооружений» РД 34.21.122-87[1], и дополнившая ее «Инструкция по устройству молниезащиты зданий, сооружений и промышленных коммуникаций» СО 153-34.21.122-2003 [2].

На примере топливно-насосного хозяйства площадки АЭС «Пакш», была рассчитана система молниезащиты по методикам, описанным в отечественных инструкциях. Однако сторона заказчика выдвинула требования по формированию и реализации системы молниезащиты в соответствии с требованиями МЭК

62305[3], в частности, чтобы расчет зон защиты удовлетворял условия метода фиктивной сферы, после чего была совершена прокатка территории сферой заданного радиуса (рис.1).

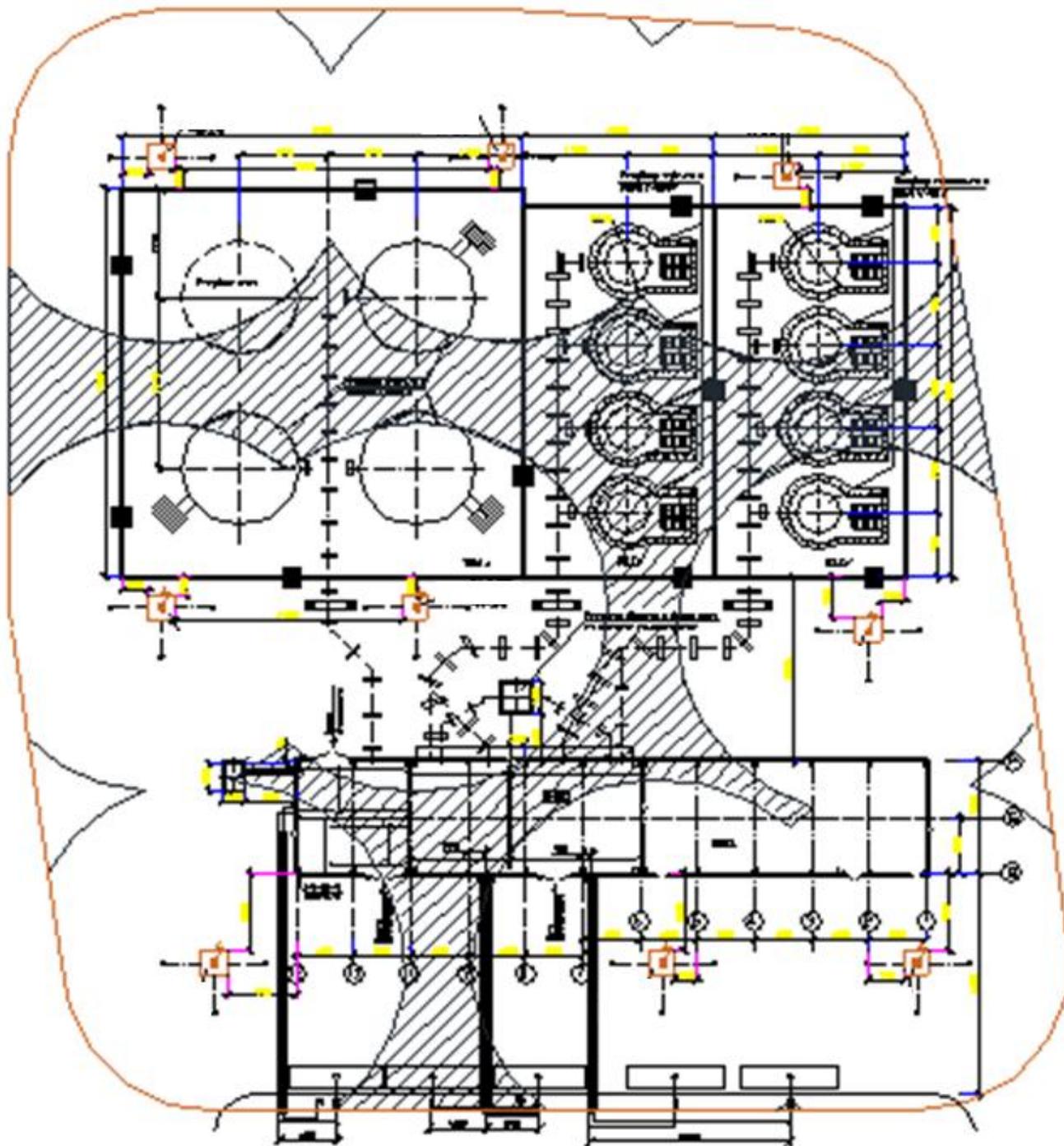


Рис. 1. Результат прокатки площадки топливно-насосного хозяйства с установленными ранее молниеотводами по методу, изложенному в отечественной инструкции, сферой заданного радиуса

Как видно из рис. 1, метод фиктивной сферы наносит более строгие ограничения на расчет зон защиты, что определяется следующими соображениями:

- в основу метода фиктивной сферы легло более современное представление молнии, в частности, развитии канала лидера, который при распространении из точки в пространстве может описать сферу [3];
- пара одиночных стержневых молниеотводов при любых условиях рассматривается как два одиночных, а не один двойной стержневой молниеотвод.

Поскольку более 80% проектов АО ИК «АСЭ» выполняются для зарубежных заказчиков, и компания позиционирует себя как один из мировых лидеров атомного инжиниринга, необходима методика расчета зон защиты стержневых молниеотводов, удовлетворяющая требованиям МЭК 62305 и методу фиктивной сферы, в частности.

Предлагается для защиты объектов на ограниченной площади устанавливать молниеотводы так, чтобы они оказались в вершинах вписанного в окружность радиуса R (рис. 2).

В результате, любая диагональ данного многоугольника будет меньше диаметра сферы, и данная сфера не будет иметь возможности прокатки в пределах данного многоугольника:

$$l_1 < l_2 < l_3 < 2R \quad (1)$$

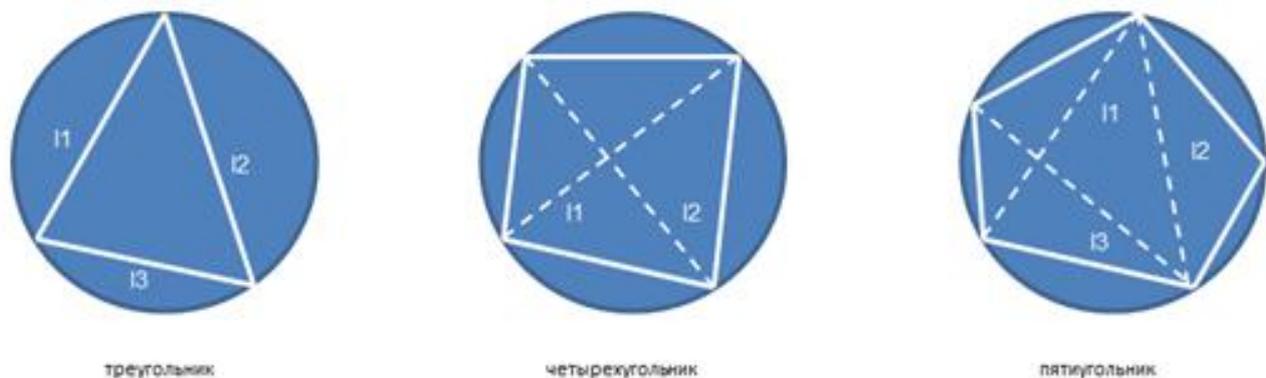


Рис. 2. Расположение молниеотводов по вершинам вписанных многоугольников

Высоту молниеотвода необходимо выбирать из условия, что сфера не должна коснуться защищаемого объекта (рис. 3).

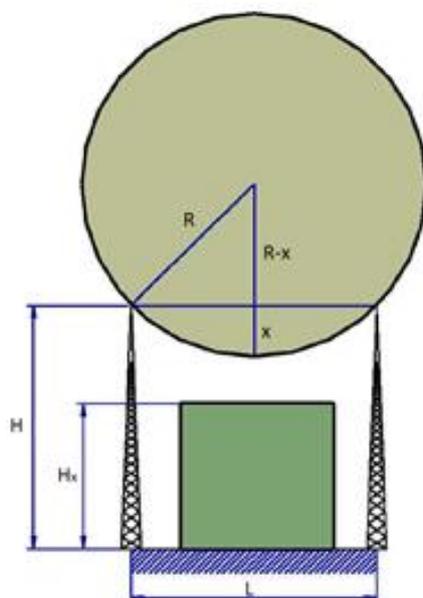


Рис. 3. Выбор высоты молниеотвода

Условие принимает следующий вид:

$$H > h_{\max} + (R - x), \quad (2)$$

где

$$x = \sqrt{R^2 - \left(\frac{L}{2}\right)^2}, \quad (3)$$

R – радиус сферы; L – расстояние между молниеотводами (рис. 3).

После необходимо проверить отсутствие точек пересечения между защищаемым объектом и сферой заданного радиуса, описывающей молниеотвод (рис. 4), для этого необходимо вычислить радиус зоны защиты на максимальной высоте защищаемого объекта, применяя формулу окружности.

Для случая, когда высота молниеотвода выше радиуса сферы (рис. 4, а), центр окружности определяется в точке $(R; R)$:

$$(h_x - R)^2 + (r_{x\phi} - R)^2 = R^2. \quad (4)$$

Подставляя известное h_x , вычисляем зону защиты сферы r_x :

$$r_{x\phi} = -R + \sqrt{(2R - h_x) \cdot h_x}. \quad (5)$$

Для случая, когда высота молниеотвода меньше радиуса сферы (рис. 4, б), центр окружности определяется в точке:

$$r_0 = \sqrt{R^2 - (R - H)^2}; \quad (6)$$

$$h_0 = 2R - H. \quad (7)$$

Тогда уравнение окружности примет вид:

$$(h_x - (2R - H))^2 + (r_{\text{xcф}} - \sqrt{R^2 - (R - H)^2})^2 = R^2. \quad (8)$$

Подставляя известное h_x , вычисляем зону защиты сферы r_x :

$$r_{\text{xcф}} = -R + \sqrt{(2R - H) \cdot 2R - h_x}. \quad (9)$$

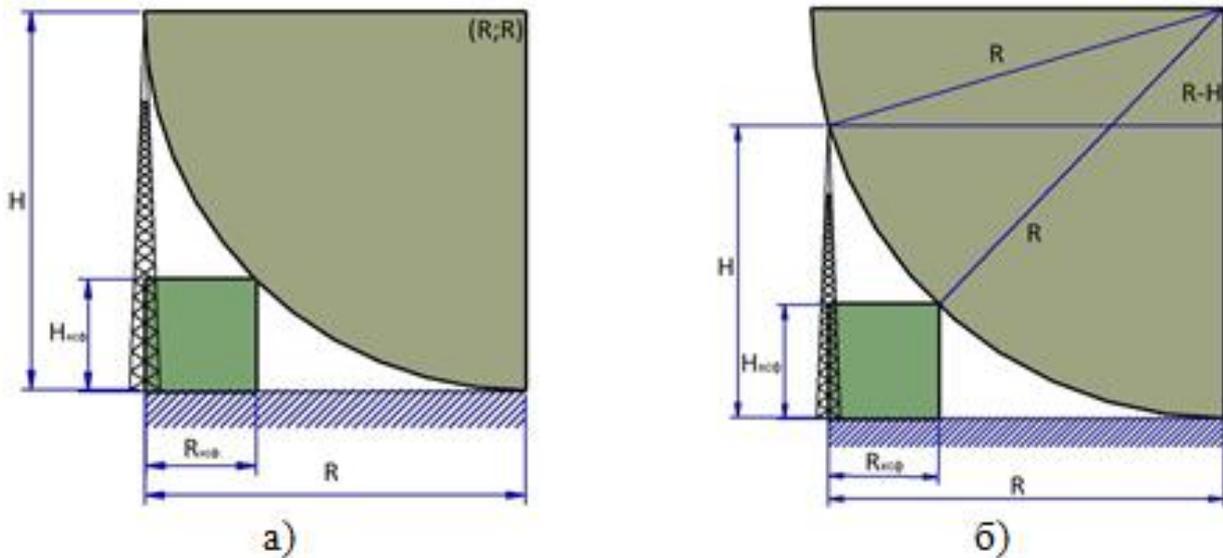


Рис. 4. Фронтальная проверка зоны защиты молниеотвода:

а - высота молниеотвода не меньше радиуса сферы; *б* - высота молниеотвода меньше радиуса сферы

Для того чтобы здание оказалось защищенным, необходимо, чтобы расстояние, на которое выходит здание из-за плоскости молниеотвода, было меньше данной координаты сферы на горизонтальной оси (рис.4), т.е.:

$$r_x < r_{\text{xcф}}. \quad (10)$$

В случаях, когда данные рекомендации невозможно выполнить на практике и на плане остаются незащищенные зоны, необходимо применять комбинированные методы защиты, включая применение защитной сетки и тросовых молниеотводов.

Следуя данной методике, система молниезащиты топливно-насосного хозяйства АЭС «Пакш» была вновь спроектирована (рис. 5) и можно утверждать, что она отвечает требованиям надежности и эффективности, изложенным в МЭК62305, что является главным критерием качества выполненных инженеринговых услуг.

Как видно, все особо опасные объекты, такие как баки с топливом, маслом и столбы сброса масла находятся в зонах защиты, рассчитанной по стандарту МЭК-62305.

УДК 621.3

А.Б. Лоскутов, А.А. Лоскутов, Д.В. Зырин, А.С. Демидова

МОДЕЛИРОВАНИЕ РЕЖИМОВ РАБОТЫ РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНОЙ СЕТИ С РАЗЛИЧНЫМИ ИСТОЧНИКАМИ РАСПРЕДЕЛЕННОЙ ГЕНЕРАЦИИ

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Рассмотрены вопросы создания интеллектуальных распределительных сетей. В новых электрических сетях существует большое количество источников распределенной генерации, расположенных близко к потребителям, которыми необходимо управлять. Предложен один из возможных вариантов подключения источников - с помощью вставок постоянного тока. Описаны преимущества вставок постоянного тока уже в существующих электрических сетях. В программном продукте PSCAD создана имитационная модель гексагональной распределительной сети при аварийном и нормальном режимах работы.

The paper deals with development of intelligent distribution networks. New electric networks there are a large number of sources of distributed generation is located close to the consumers that you want to manage. One of the possible options for connecting sources with direct current. Described the advantages of direct current in the existing electrical networks. The software PSCAD generated simulation model hexagonal distribution networks during emergency and normal operation modes.

Ключевые слова: вставка постоянного тока, распределённая генерация, PSCAD, гексагональные сети, распределительные сети.

Key words: insert DC, distributed generation, PSCAD, hexagonal grids, distribution networks.

До недавнего времени электроэнергетические системы и сети были достаточно консервативными и однонаправленными, выполняли функции пассивного устройства транспорта и распределения электроэнергии. Концепция развития интеллектуальной распределительной сети свидетельствует о необходимости внедрения распределенной генерации, внедрения активных цифровых устройств регулирования и автоматических систем управления режимами сетей, унификации конструктивно-топологических решений. В связи с этим проводится много исследований в части внедрения источников распределенной генерации в электрические распределительные сети.

В связи с этим актуальной задачей является создание интегрированной, саморегулируемой, распределенной системы электроснабжения на основе разработки интеллектуальных систем передачи и распределения электроэнергии, обеспечивающей автоматическое управление электросетями и объединяющей энергетические, информационные и финансовые потоки в едином канале по силовым цепям.

В новых интеллектуальных сетях существует большое количество источников распределенной генерации, расположенных близко к потребителям, ко-

торыми необходимо управлять. Естественно, источники будут разнообразны и необходимы системы их синхронизации, так как они работают на разных частотах. Подключение источников распределенной генерации к распределительной сети увеличивает токи короткого замыкания, что может потребовать замены коммутационных аппаратов, изменения настроек защит. Появление распределенной генерации усложняет оперативно-диспетчерское управление, а также систему релейной защиты и автоматики, противоаварийного управления. Предлагаемым решением данных вопросов является подключение в сеть вставок постоянного тока (ВПТ). В настоящее время уже существует достаточный опыт внедрения ВПТ в электрические сети. Такие сети имеют ряд преимуществ: эффективное интегрирование возобновляемых источников электроэнергии, являющихся также источниками постоянного напряжения (солнечные батареи, небольшие ветряные турбины, топливные элементы); повышенная электробезопасность сетей постоянного тока; более эффективное применение накопителей электрической энергии; более эффективное управление графиками нагрузки (включая накопление электрической энергии в периоды наличия избыточной генерации и выдачу в периоды дефицита).

В данном исследовании было произведено моделирование распределительной сети со ВПТ, на примере сети гексагональной конфигурации (рис.1). Моделирование происходило в несколько этапов. Первый – подключение одного источника распределенной генерации через ВПТ, второй – подключение нескольких источников.

Для примера рассмотрим модель распределительной гексагональной сети с одним источником распределенной генерации, подключенной в сеть через ВПТ. Модель можно условно разделить на две части. Первая часть состоит из ветрогенератора мощностью 3 МВт и вставки постоянного тока. Преобразование электрической энергии осуществляется преобразователями, связанными с передающей и приемной системами. Преобразователь, который преобразует энергию переменного тока от передающей системы в энергию постоянного тока, называется выпрямителем. Другой преобразователь, который получает энергию от выпрямителя и преобразует ее в энергию переменного тока, отдавая эту энергию в приемную систему, называется инвертором. Вторая часть представляет собой гексагональную распределительную сеть - гибкая интеллектуальная электрическая сеть, представленная в виде совокупности территориально распределенных узлов нагрузки, соединенных между собой проводниками унифицированного сечения и имеющая топологию в виде шестиугольников, стремящихся к правильной форме.

В программном продукте PSCAD моделировался аварийный режим для сети без ВПТ и соответственно с ВПТ. Короткое замыкание (КЗ) происходило на шинах электрической сети (рис. 2), места установки измерительных органов были выбраны таким образом – в непосредственной близости от источника и в месте короткого замыкания.

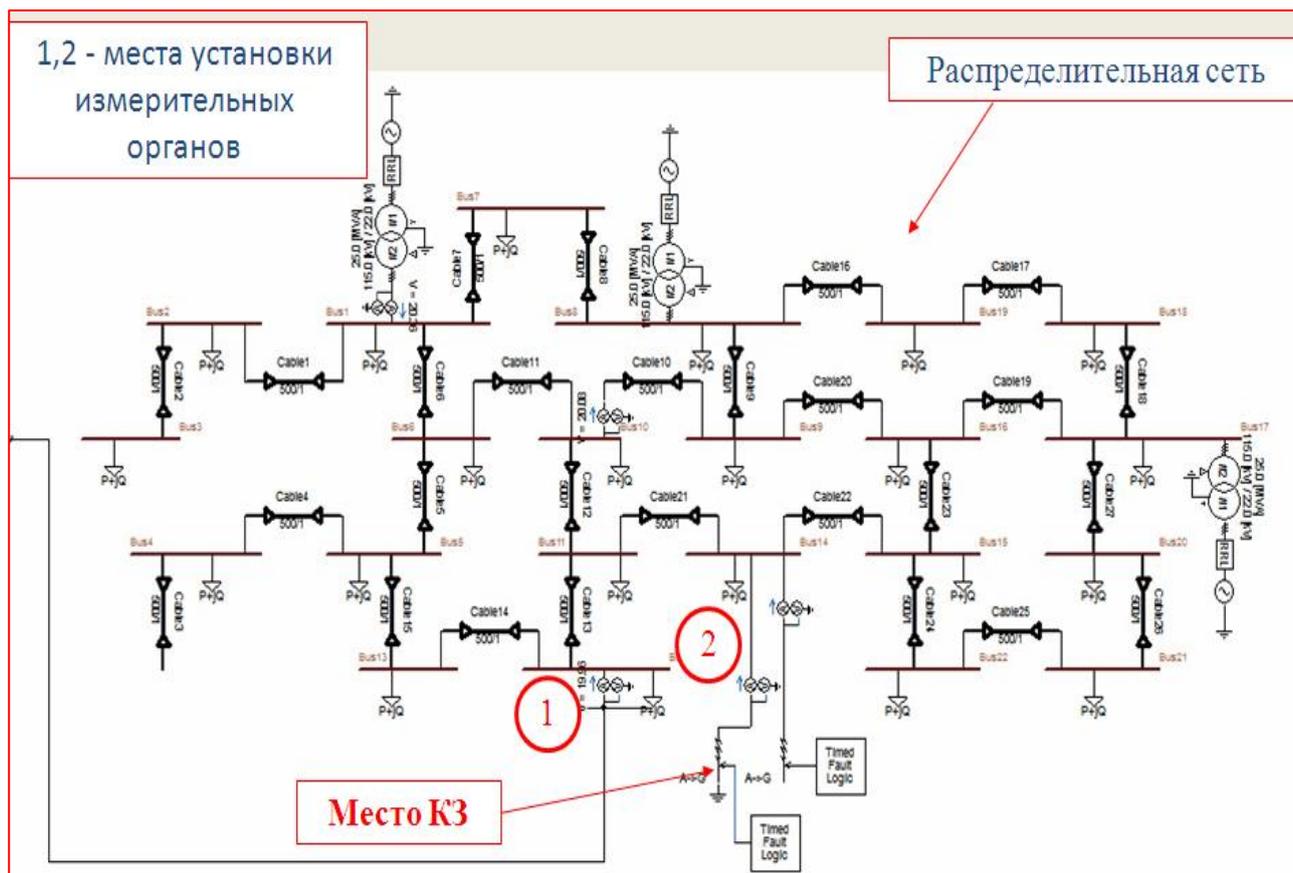


Рис. 2. Участок сети гексагональной конфигурации

По результатам исследования были получены осциллограммы токов и напряжений, которые позволили сделать вывод о том, что ВПТ ограничивает величину тока КЗ, что позволяет решить проблему высоких значений динамических токов в распределительных сетях с большим числом источников распределенной генерации, расположенных вблизи с нагрузкой. Применение ВПТ в распределительных сетях позволяет упростить систему управления и синхронизации разнородными источниками распределенной генерации, работающими параллельно.

Библиографический список

1. Лоскутов, А.Б. Интеллектуальные распределительные сети 10-20 кВ с гексагональной конфигурацией / А.Б. Лоскутов, Е.Н. Соснина, А.А. Лоскутов, Д.В. Зырин // Промышленная энергетика. – 2013. – № 12. – С. 3-7.
2. Пат. №118133 Российская Федерация, МПК7 H02J 3/00 (2006 01). Система передачи электрической энергии [Текст] / Лоскутов А.Б., Соснина Е.Н., Лоскутов А.А.: заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВПО «Нижегородский государственный технический университет им. Р. Е. Алексеева». – № 2011154247; заявл. 28.12.2011; опубл. 10.07.2012, Бюл. № 19. – 3 с.: ил.

УДК 621.316

Е.Н. Соснина, А.А. Асабин, А.А. Кралин, Е.В. Крюков

ТИРИСТОРНЫЙ РЕГУЛЯТОР ВЕЛИЧИНЫ И ФАЗЫ ВОЛЬТОДОБАВОЧНОГО НАПРЯЖЕНИЯ В РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЯХ 6-10 кВ

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Статья посвящена вопросам применения тиристорного регулятора величины и фазы вольтодобавочного напряжения (ТРВДН) в распределительных электрических сетях 6-10 кВ. Показаны различные варианты подключения ТРВДН в зависимости от выполняемых функций.

The article deals with the application of thyristor voltage magnitude and phase controller (TVC) in distribution networks 6-10 kV. Different TVC connection modes depending on the performed functions are shown.

Ключевые слова: электрическая сеть, регулирование напряжения, управление потоками мощности, фазоповоротное устройство.

Key words: electric grid, voltage regulation, power flow control, phase shifting device.

Одной из актуальных задач энергетической стратегии России до 2035 года является обеспечение эффективной надежности электроснабжения в сочетании с интеллектуализацией электроэнергетических систем [1, 2].

Анализ проблем функционирования сетей среднего напряжения позволяет выявить ряд недостатков:

- недостаточная пропускная способность линий электропередач, которые обеспечивают связи между отдельными районами электрических сетей, что ограничивает возможность удовлетворения требованиям свободного рынка электроэнергии при соблюдении условий надежного энергоснабжения;
- низкая режимная управляемость электрических сетей, недостаточный объем устройств регулирования напряжения и реактивной мощности;
- неоптимальное распределение потоков мощности по параллельным линиям электропередачи разного класса напряжения, и как следствие этого – ограничение пропускной способности электрических сетей, рост потерь мощности и электроэнергии, увеличение затрат на передачу электроэнергии;
- нарастающий темп роста потерь мощности и электроэнергии.

Многие из указанных проблем могут быть эффективно решены путем совершенствования методов и средств управления потоками активной и реактивной мощности в электрических сетях напряжением 6 – 10 кВ на основе применения технологии гибких управляемых линий электропередач переменного тока или, в соответствии с терминологией *IEEE – Flexible AC Transmission Systems (FACTS-«гибкие передающие системы переменного тока»)* [3].

Основная задача технологии *FACTS* как элемента интеллектуальных сетей заключается в повышении эффективности управления потоками мощности, регулирования напряжения, обеспечения статической или динамической устойчивости. Такая возможность обеспечивается благодаря способности элементов *FACTS* управлять взаимосвязанными параметрами, определяющими функционирование линий электропередачи, такими, как полное сопротивление, ток, напряжение, угол фазового сдвига между напряжениями по концам линии.

Таким образом, сетевое устройство гибких линий электропередач для сети среднего напряжения (6-10 кВ) должно решать следующие задачи:

- оперативно регулировать напряжения протяженных (более 1 км) РЭС в целях поддержания напряжения на входах ТП в соответствии с требованиями ГОСТ к качеству электроэнергии;
- управлять потоками активной и реактивной мощности в параллельных линиях электропередач с целью оптимизации потерь электрической энергии;
- устранять паразитные транспортные потоки электрической энергии в сетях среднего напряжения;
- управлять потоками активной мощности от объектов малой генерации.

Подходящим техническим решением для поставленных задач является применение тиристорного регулятора величины и фазы вольтодобавочного напряжения (ТРВДН) [4].

Тиристорные регуляторы обладают более высокими быстродействием и ресурсом работы в сравнении с электромеханическими, а также лучшими массогабаритными характеристиками в сравнении с феррорезонансными регуляторами и трансформаторами с подмагничиванием и более высокой перегрузочной способностью в сравнении с высокочастотным транзисторным регулированием.

ТРВДН устанавливается в расщелку линии в целях компенсации потерь напряжения в сопротивлениях короткого замыкания РЭС. При его работе в режиме стабилизации, напряжение на входах ТП даже в конце линии не выходит за пределы, установленные требованиями ГОСТ к качеству электроэнергии. Применение ТРВДН в целях оптимизации распределения токовой нагрузки параллельно работающих линий с различными сопротивлениями короткого замыкания поясняется на рис. 1. Такие случаи имеют место при параллельной работе воздушной и кабельной линий электропередач, а также в случае параллельной работы двух кабельных линий.

На рис. 1 показан рекомендуемый вариант подключения ТРВДН в расщелку воздушной линии электропередач. При отсутствии ТРВДН большая часть тока линии $I_{\text{Л}}$ протекает по кабелю, имеющему меньшее сопротивление. Наличие ТРВДН позволяет ввести в контур вольтодобавочное напряжение $U_{\text{ВД}}$, обеспечивающее протекание по нему контурного тока $I_{\text{К}}$. Начальная фаза вольтодобавочного напряжения задается так, чтобы контурный ток $I_{\text{К}}$ протекал встречно нагрузочной составляющей тока кабельной линии $I_{\text{КЛ}}$. В результате

ток кабельной линии уменьшается, а ток воздушной линии возрастает. Величина вольтодобавочного напряжения задается из условия обеспечения оптимального распределения токовой загрузки линий. Рекомендуется располагать ТРВДН в линиях, имеющих максимальное сопротивление. Это обеспечит частичную компенсацию падения напряжения в сопротивлении короткого замыкания данной линии и уменьшит потери напряжения в целом.

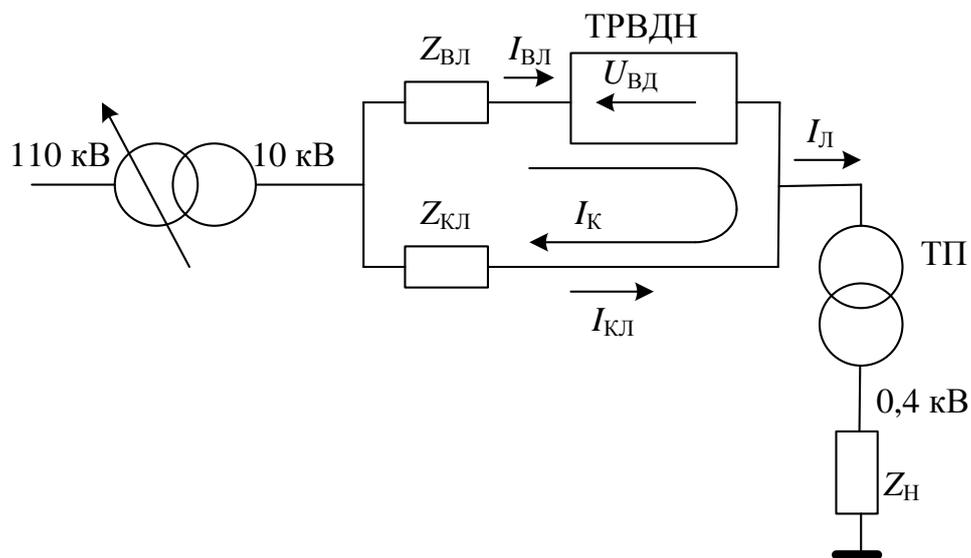


Рис. 1. Распределение токовой нагрузки параллельно работающей воздушной и кабельной линий

Следует отметить, что предлагаемый ТРВДН сочетает свойства устройства РПН и фазоповоротного трансформатора. Поэтому он может использоваться в целях оптимизации распределения потоков мощности интеллектуальных РЭС кольцевой конфигурации. Это поясняется на рис. 2. Возможны следующие режимы работы распределительной сети:

1 режим. Оба тиристорных регулятора ТРВДН1 и ТРВДН2 переведены в непроводящее состояние. В этом случае изменяется конфигурация распределительной сети из кольцевой на радиальную, что приводит к устранению паразитных транспортных потоков мощности.

2 режим. Оба тиристорных регулятора ТРВДН1 и ТРВДН2 переведены в проводящее состояние. В этом случае возможно перераспределение транспортных потоков в линиях распределительной сети кольцевой конфигурации.

3 режим. Один из тиристорных регуляторов (например ТРВДН1) переведен в проводящее состояние, а второй ТРВДН2 - в непроводящее состояние. В этом случае возможно перераспределение транспортных потоков в линиях распределительной сети для оптимизации напряжений в узлах нагрузки.

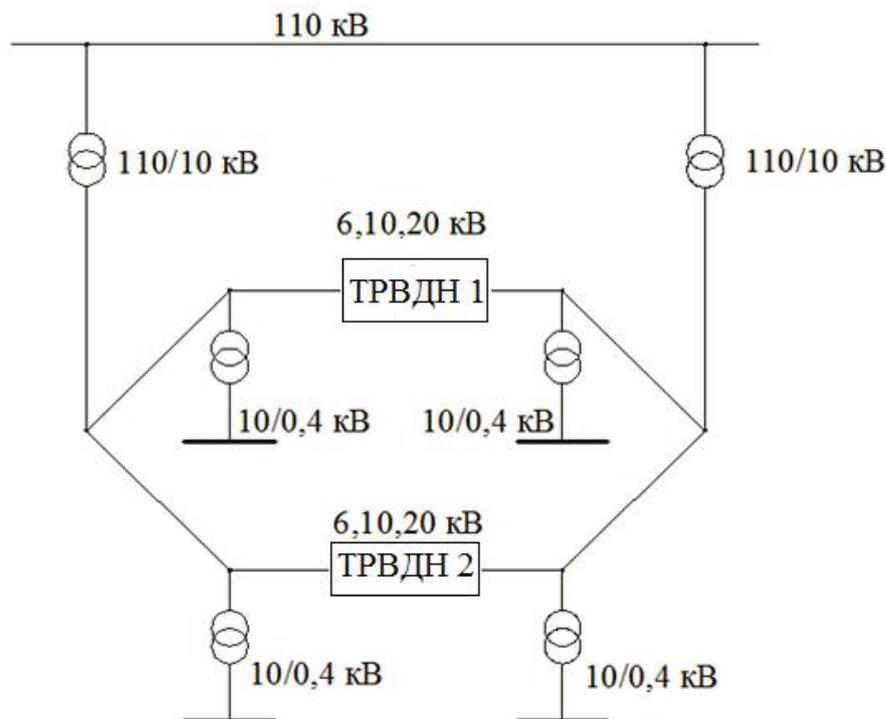


Рис. 2. Структурная схема включения ТРВДН в интеллектуальной РЭС кольцевой конфигурации

Применение ТРВДН для обеспечения регулируемого забора мощности от источника малой генерации (ИМГ), подпитывающего радиальные ЛЭП, представлено на рис. 3. ТРВДН устанавливается в месте расположения объекта малой генерации. Величина забора мощности, обеспечиваемого ТРВДН, определяется исходя из оптимальной электромагнитной совместимости ИМГ с РЭС. При этом в качестве источников малой генерации могут быть использованы малые ветрогенераторные установки, газотурбинные и парогазовые установки, дизель-генераторы, фотоэлектрические преобразователи, малые ГЭС и т.д.

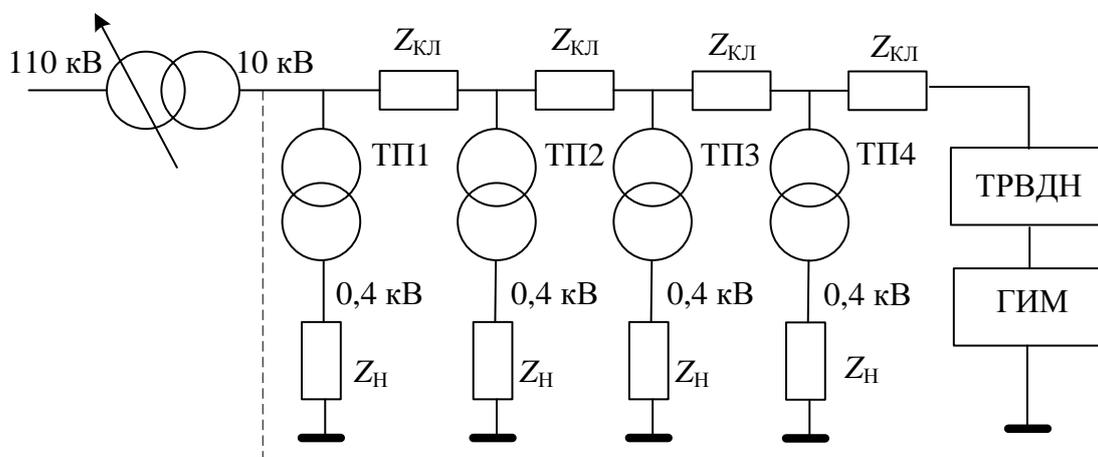


Рис. 3. Использование ТРВДН для управления потоками мощности от объектов малой генерации

Представленное техническое решение позволяет заменить комплекс оборудования состоящего из двух сложных устройств – фазоповоротного устройства (ФПУ) и регулятора напряжения с вольтодобавочным трансформатором (ВДТ) одним ТРВДН. При этом сложность силовой схемы и, следовательно, стоимость ТРВДН сопоставима с аналогичными параметрами только одного из этих устройств – ФПУ [5]. По сложившейся практике регуляторы с ВДТ или тиристорные РПН применяют на входе одной трансформаторной подстанции.

Схемотехническое решение ТРВДН позволяет включить его в рассечку линии РЭС и использовать для регулирования напряжения группы ТП. При этом путем перепрограммирования системы управления на данной силовой схеме возможна реализация как отдельно регуляторов напряжения, так отдельно фазоповоротных устройств. Указанные достоинства ТРВДН делают их конкурентоспособными по сравнению с ФПУ или ВДТ в традиционных РЭС среднего напряжения и перспективными при реализации гибких электропередач переменного тока.

Библиографический список

1. Проект Энергетической стратегии России на период до 2035 года [Электронный ресурс]. – URL: <http://www.minenergo.gov.ru/documents/razrabotka/17481.html> (дата обращения: 29.04.2015).
2. Концепция реализации национального проекта “Интеллектуальная энергетическая система России”. – Москва, 2015. – 25 с.
3. **Hadjsaid, N.** Smart grids: motivation, rates and perspective / N. Hadjsaid, J. Cl. Cabonnadiere // *Energetics abroad*. – 2014. – Vol. 3. – P. 2-24.
4. Пат. №157116. Полупроводниковое фазоповоротное устройство / Асабин А.А., Верховский С.Я., Соснина Е.Н., Гардин А.И., Бедретдинов Р.Ш., Кисель Д.А.; заявл. 9587663; опубл. 20.04.2016. Бюл. №3.
5. **Соснина, Е.Н.** Исследование твердотельного регулятора напряжения и мощности в сети 6–20 кВ / Е.Н. Соснина, А.А. Асабин, А.А. Кралин, Р.Ш. Бедретдинов // *Сборник трудов 2-й Международной научно-технической конференции «Пром-Инжиниринг»*. – Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ, 2016. С. 322-327.

УДК 621.311.1

Е.Н. Соснина, А.В. Шалухо, А.Ю. Кечкин, Н.В. Шумский

РАЗРАБОТКА ЛАБОРАТОРНОГО СТЕНДА ДЛЯ ИЗУЧЕНИЯ РЕЖИМОВ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ВИРТУАЛЬНОЙ ЭЛЕКТРОСТАНЦИИ

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Статья затрагивает вопросы необходимости разработки механизмов интеграции малой распределенной генерации в энергосистему. Авторами была сформулирована необходимость разработки лабораторного стенда ВиЭС, выбран объект моделирования, определен функционал стенда и предполагаемые режимы работы. Предъявлены требования к конструкции, силовому оборудованию и системе управления стенда.

The article considers the integration of small distributed generation into the power system. The authors formulated the necessity of development a VPP laboratory stand, selected the modeling object, defined the stand functionality and the expected operation modes, proposed the requirements for the design, power equipment and the control system.

Ключевые слова: виртуальная электростанция, возобновляемые источники, лабораторный стенд.

Key words: virtual power plant, renewable sources, laboratory stand.

Расширение использования малой распределенной генерации, в том числе на основе возобновляемых источников энергии (ВИЭ) с использованием технологии «виртуальной электростанции» (ВиЭС), становится все более значимым процессом в энергетическом секторе западноевропейских стран.

В общем случае ВиЭС можно охарактеризовать как систему, обеспечивающую агрегирование объектов распределенной генерации, накопителей электроэнергии и потребителей с управляемой нагрузкой.

В ключевых документах [1,2], определяющих направления развития электроэнергетической системы России, говорится о перспективе эффективного взаимодействия централизованной (традиционной) и малой распределенной энергетики.

Для достижения этой цели требуется решение задач по разработке механизмов (технических, методологических, нормативных) интеграции малой распределенной генерации в энергосистему.

Под механическими механизмами интеграции подразумеваются решения вопросов выбора силового и преобразовательного оборудования, обеспечения устойчивости функционирования системы, изучения аварийных режимов работы, разработки активно-адаптивной системы управления. Под методологическими механизмами подразумевается разработка методики выбора оптимальной топологии сети и электрических параметров, удовлетворяющих требованиям ГОСТ на качество электроэнергии, с целью повышения надежности и

энергоэффективности электроснабжения. Под нормативными механизмами подразумевается решение вопросов экономического и правового взаимодействия участников ВиЭС со сбытовыми компаниями, расширение нормативно-правовой базы в области электроснабжения.

Для решения перечисленных вопросов требуется разработка специального устройства, реализованного в виде лабораторного стенда, созданного на базе масштабируемых моделей силового оборудования, активно-адаптивной системы управления и обладающего функционалом ВиЭС.

Есть коллективы, которые активно приступили к разработке технических механизмов. Например, в ассортимент немецкого производителя лабораторного оборудования Lucas-Nülle входит лабораторный стенд, позволяющий производить исследование ВиЭС [4]. Другим примером служит испанская компания Edibon, разработавшая лабораторный стенд для изучения системы электроснабжения с ВИЭ по технологии Smart Grid и удаленной системой управления SCADA [5]. Однако недостатком данных стендов является преимущественно демонстрационный характер работы, который позволяет исследовать уже заранее заложенные в него режимы работы. Другим недостатком является то, что данные режимы зачастую отличаются от тех режимов, которые возможны в условиях российской энергетики.

Поэтому, целью данной работы является разработка лабораторного стенда для изучения режимов функционирования ВиЭС, исследования закономерностей процессов передачи и распределения мощности от источников к потребителям, решения вопросов обеспечения устойчивости системы.

В первую очередь, разрабатываемый лабораторный стенд предназначен для проведения научно-исследовательской работы по разработке методологических принципов создания энергоэффективных систем генерирования на основе малой распределенной генерации, решения вопросов устойчивости данных систем, разработки активно-адаптивной системы управления. Помимо этого, лабораторный стенд также может быть использован и в образовательных целях. Стенд станет основным инструментом при проведении практических и лабораторных работ по теме интеллектуальных активно-адаптивных сетей. С его помощью студенты смогут изучить работу преобразовательной техники, системы АСКУЭ и SCADA.

На лабораторном стенде предполагается моделирование характерных для ВиЭС режимов работы: изолированный режим, режим взаимодействия с РЭС, различные аварийные режимы (выход из строя одного из источников, отключение крупной нагрузки, резкое изменение климатических условий). В каждом режиме возможна отработка нескольких сценариев: питание одного потребителя от одного источника малой генерации (ИМГ), параллельная работа нескольких ИМГ, выход ВиЭС на совместную работу с РЭС, нагрузка ВиЭС питается от РЭС и ИМГ – происходит изменение величины нагрузки и генерации и т.д. Эксперименты будут проводиться в порядке возрастания сложности их реализации (постепенное увеличение числа задействованных объектов; внешних управляющих воздействий).

Для того чтобы выбрать силовое оборудование, составить структурную и электрическую схему стенда, необходимо определиться с объектом моделирования. Интересным для изучения представляется интеллектуальная микросеть, объединяющая разнохарактерные источники малой генерации, накопители электроэнергии, активных регуляторов нагрузки и потребителей на основе электрических и информационных сетевых структур. Данная микросеть связана с распределительной электрической сетью (РЭС) более высокого уровня напряжения (10 кВ), а также может функционировать в изолированном режиме.

Характерным примером интеллектуальной микросети является проект Вильдпольдсрид (Wildpoldsried) в Германии [3]. Вильдпольдсрид – это провинциальное поселение (2600 человек) с профицитным балансом электроэнергии. В состав системы электроснабжения входят пять биогазовых станций и одиннадцать ветроустановок, крыши зданий оборудованы солнечными панелями (рис. 1). Таким образом, возобновляемые источники производят на 300% больше электроэнергии, чем необходимо для покрытия потребностей поселения. Излишки электроэнергии выкупает региональная энергетическая компания.



Рис. 1. Источники ВИЭ в поселении Вильдпольдсрид:

а – солнечные установки на крышах частных домов, коммерческих и муниципальных строений; *б* – группа ветрогенераторов

Разрабатываемый лабораторный стенд предполагает моделирование ВиЭС, созданной на основе системы электроснабжения типового пригородного поселка, расположенного на территории России, путем добавления нескольких источников малой генерации и накопителей электроэнергии.

В состав моделируемой ВиЭС входят (рис. 2): две трансформаторные подстанции 10/0,4 кВ, имеющие возможность подключения как по магистральной, так и по радиальной схеме; источники малой генерации – ветроэнергетическая установка; солнечная электростанция; накопители электроэнергии – аккумуляторные батареи; электромобиль; потребители - двигательная нагрузка; управляемая нагрузка.

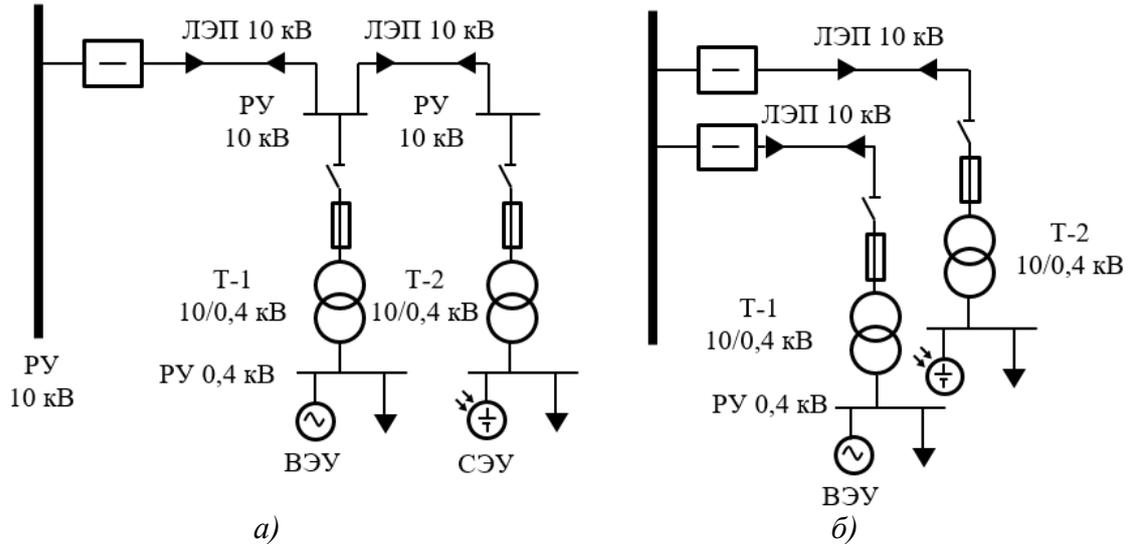


Рис. 2. Моделируемая схема электроснабжения 10 кВ:

а – магистральная; б – радиальная

Определившись с назначением стенда, предполагаемыми режимами работы, выбрав объект моделирования, стало возможным выдвинуть требования к силовой части разрабатываемого лабораторного стенда. Силовая часть должна:

- иметь модульную конструкцию, подразумевающую расположение силовых модулей, нагрузочных модулей и ЛЭП в отдельных съемных контейнерах;
- состоять из двух частей: шкаф с преобразовательным оборудованием и рабочая панель оператора, на которую будут выведены органы управления, индикация и измерительные приборы;
- иметь возможность широкой реконфигурации модулей стенда для гибкого изменения объекта исследования;
- иметь возможность масштабирования мощности нагрузки и источников.
- быть выполнена в однофазном исполнении, питаться от однофазной сети переменного напряжения 220 В частотой 50 Гц;

Исходя из того, что разрабатываемый лабораторный стенд должен иметь возможность масштабирования мощности нагрузки и генерации, необходимо разработать методику выбора электрических параметров оборудования стенда. Авторами был предложен универсальный коэффициент преобразования K (табл. 1), определяющий отношение электрических параметров моделируемой установки к параметрам оборудования лабораторного стенда.

Таблица 1

Приведение параметров элементов стенда

Элемент	Сопротивление (R, X)	Напряжение (U)	Мощность (P, Q, S)
Нагрузка 0,4 кВ	$R_M = R \cdot K$ $X_M = X \cdot K$	$U_M = U_{0,4}$	$P_M = P / K$ $Q_M = Q / K$
Источники ИМГ	-	$U_M = U_{0,4}$	$P_M = P / K$ $Q_M = Q / K$
ЛЭП 0,4 кВ	$R_M = R \cdot K$ $X_M = X \cdot K$	$dU_M = dU_{0,4}$	$dP_M = dP / K$ $dQ_M = dQ / K$

Таким образом, за счет данного параметра удастся создать лабораторный стенд, который будет имитировать отклонения напряжения и потери мощности в линиях.

Технические характеристики стенда приведены в табл. 2.

Таблица 2

Технические характеристики стенда

Потребляемая мощность, В·А, не более	3000
Электропитание от однофазной сети переменного тока с рабочим нулевым и защитным проводниками - напряжением, В - частота, Гц	220 ± 22 50 ± 0,5
Класс защиты от поражения электрическим током	I
Габаритные размеры, мм, не более - длина (по фронту) - ширина (ортогонально фронту) - высота	1500 850 2000
Масса, кг, не более	250
Количество человек, которое одновременно и активно может работать на комплексе	3

На базе лабораторного стенда предполагается осуществить SCADA систему с возможностью удаленного контроля над уровнями напряжения, величиной тока, активной и реактивной мощностью, углом нагрузки и частотой.

Разрабатываемая система управления имеет возможность получения данных о погодных условиях с метеостанций в режиме реального времени и последующего автоматического регулирования скоростью вращения блока двигатель-генератор и изменения мощности светового потока ламп.

Система управления позволит удаленно производить коммутацию нагрузки и изменять топологию сети. Например, представляется интересным для изучения режим работы двух трансформаторных подстанций с замкнутым кольцом низкого напряжения 0,4 кВ, переход ВиЭС в режим автономной работы, с последующим выходом на параллельную работу ВиЭС и РЭС, отключение части нагрузки или одного из источников.

Таким образом, система управления стендом должна:

- иметь необходимое количество электроизмерительных датчиков и счетчиков электрической энергии для построения системы АСКУЭ;
- быть построена на едином интерфейсе RS-485 по технологии MODBUS;
- выводить на экран мнемосхему, отражающую схему электрических соединений стенда, положения автоматических выключателей;
- принимать и отражать показания с датчиков тока и напряжения;
- отправлять управляющие команды на преобразователи частоты, регуляторы нагрузки.

На рис. 3 и 4 показаны структурные схемы силовой части лабораторного стенда и системы управления соответственно.

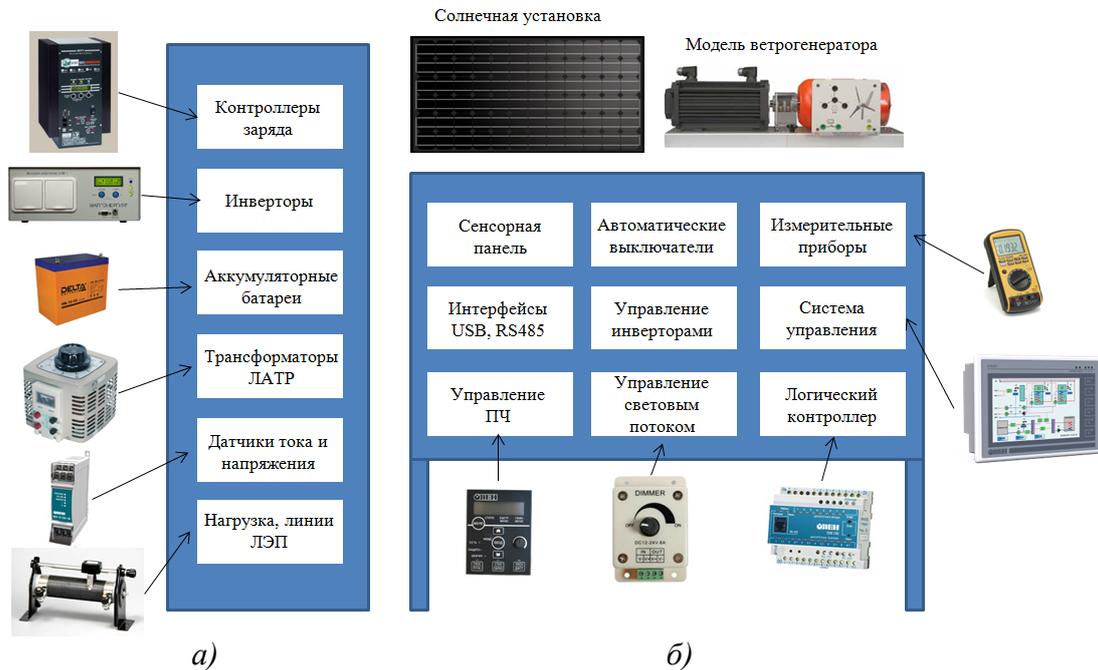


Рис. 3. Структурная схема силовой части лабораторного стенда:
а – блок с силовым оборудованием; б – панель оператора

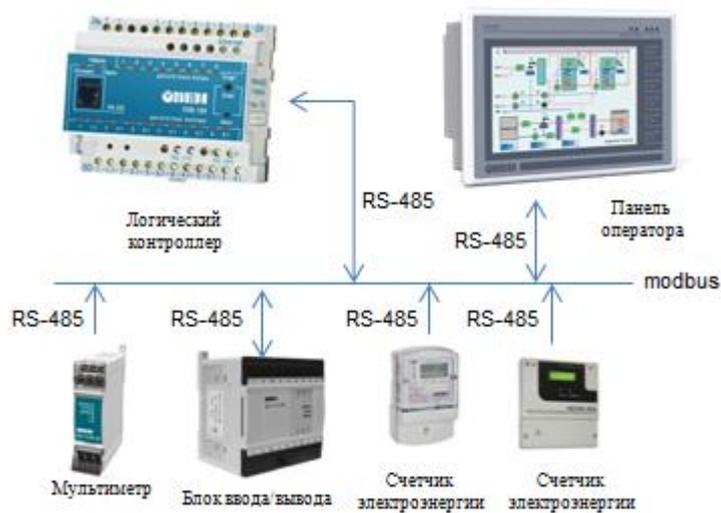


Рис. 4. Структурная схема системы управления стендом

Благодаря разрабатываемому стенду, будет разработан комплекс методических указаний для проектирования ВиЭС и системы управления, выбора оптимальной топологии сети, повышения качества и надежности электроснабжения. Также данный стенд будет способствовать популяризации технологий ВиЭС и подготовке кадров для работы в зарождающейся отрасли энергетики – отрасли умных сетей.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ (государственное задание №13.2078.2017/ПЧ).

Библиографический список

1. **Дарья Кеннеди.** Виртуальная электростанция – «умный контроль» распределенной генерации // www.eprussia.ru: Энергетика: тенденции и перспективы. – 2014. – URL: <http://www.eprussia.ru/epr/244/15964.htm> (дата обращения 24.04.2017).
2. EnergyNet: Распределенная энергетика от Personal Power до Smart Grid, Smart City. –URL: <http://www.nti2035.ru/markets/energynet> (дата обращения 24.04.2017).
3. Home of the energy pioneers. – URL: <https://www.energy.siemens.com/apps/features/iren2/index.html#!/en/> (дата обращения 24.04.2017).
4. "Smart Grids" - Intelligent power supply networks. –URL: <https://www.lucas-nuelle.com/316/apg/4508/eSmart-Gridse-Intelligent-power-supply-networks.htm> (дата обращения 24.04.2017).
5. Advanced Mechanical, Electrical and Smart Grid Power Systems (Utilities). – URL: <http://www.edibon.com/en/equipment/advanced-mechanical-electrical-and-smart-grid-power-systems-utilities> (дата обращения 24.04.2017).

УДК 621.311

Е.Н. Соснина, Л.Е. Веселов

**ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНАЯ СИСТЕМА ГЕНЕРИРОВАНИЯ
ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ НА ОСНОВЕ ТОТЭ**

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

В статье решается проблема автономного электроснабжения отечественных потребителей за счет применения энергоэффективной системы генерирования электроэнергии на основе ТОТЭ. Рассмотрены вопросы интеграции мини-ТЭЦ на ТОТЭ в систему электроснабжения сельскохозяйственного предприятия (СХП). Разработаны алгоритм и компьютерная модель системы электроснабжения (СЭС) с мини-ТЭЦ на ТОТЭ, позволяющие проводить исследования энергетических характеристик СЭС.

The article deals with the problem how to supply domestic consumer's offline by employing the energy-efficient system of electricity generation based on SOFC. Issues concerning the integration of SOFC-based mini-CHPs into agricultural enterprises power supply system are also considered here. The authors have developed the algorithm and computer model of SOFC-based mini-CHP power supply system to investigate its energy characteristics.

Ключевые слова: система генерирования электроэнергии, мини-ТЭЦ на ТОТЭ, система электроснабжения, биогаз, сельскохозяйственное предприятие, Simulink-модель.

Key words: power generation system, SOFC-based mini-CHP, power supply system, biogas, agricultural enterprise, Simulink model.

Устойчивая работа потребителей электрической энергии обеспечивается надежным и бесперебойным электроснабжением. Обеспечение отечественных потребителей электроэнергией требуемого качества является актуальной проблемой. Эффективным решением данной проблемы является применение автономных возобновляемых источников энергии [1,2], в том числе энергоустановок, использующих биогаз.

Энергоустановкой (ЭУ), эффективно преобразующей продукты сбраживания биоотходов в тепло- и электроэнергию, является мини-ТЭЦ. Наиболее перспективными ЭУ являются мини-ТЭЦ на топливных элементах (ТЭ), использующих прямое преобразование биогаза в электроэнергию. Отсутствие процесса сжигания топлива обеспечивает их высокую экологичность.

Наибольшее внимание исследователей и разработчиков во всем мире привлекают твердооксидные топливные элементы (ТОТЭ). ТОТЭ имеют самый высокий КПД, низкую стоимость керамических материалов и могут работать на обычном углеводородном топливе [3,4].

В данной статье рассмотрено решение проблемы электроснабжения отечественных потребителей с использованием мини-ТЭЦ на ТОТЭ.

Несмотря на преимущества мини-ТЭЦ на ТОТЭ, они пока не применяются в системах электроснабжения потребителей. Применение таких ЭУ сдержи-

вается их низкой маневренностью, отсутствием технических решений по интеграции в СЭС потребителей, отсутствием нормативных документов по проектированию мини-ТЭЦ на ТОТЭ, работающих на биогазе, и рядом других проблем.

Научно-технические решения, предлагаемые авторами, направлены на устранение проблем работающей на биогазе мини-ТЭЦ на ТОТЭ и рассмотрены на примере электроснабжения СХП молочного животноводства.

Интеграция мини-ТЭЦ на ТОТЭ в систему электроснабжения СХП

Энергоэффективная система генерирования с мини-ТЭЦ на ТОТЭ состоит из четырех подсистем:

- основной генерации (мини-ТЭЦ на ТОТЭ);
- накопления электроэнергии;
- преобразования и распределения электроэнергии;
- резервной генерации.

Система накопления на основе стационарных аккумуляторных батарей решает проблему низкой маневренности мини-ТЭЦ на ТОТЭ путем покрытия пиковых нагрузок в дневные часы и обеспечения необходимого уровня потребления электроэнергии в ночные часы.

Интеграция мини-ТЭЦ и системы накопления в СЭС предприятия осуществляется с помощью подсистемы преобразования и распределения электроэнергии на базе преобразователей «DC/DC» и инверторов «DC/AC».

Подсистема резервной генерации предназначена для работы в период одновременного превышения потребляемой нагрузки предприятия над генерируемой мощностью мини-ТЭЦ и полного разряда системы накопления. Источником энергии подсистемы является газовый генератор «ФАС-10-1\ВП» мощностью 10кВт [5].

Пример однолинейной схемы электроснабжения СХП с мини-ТЭЦ на ТОТЭ представлен на рис. 1.

Компьютерное моделирование СЭС с мини-ТЭЦ на ТОТЭ

Для определения порядка взаимодействия элементов исследуемой СЭС разработан алгоритм, позволяющий исключить дефицит электроэнергии и превышение генерации над электропотреблением предприятия. Блок-схема алгоритма представлена на рис. 2.

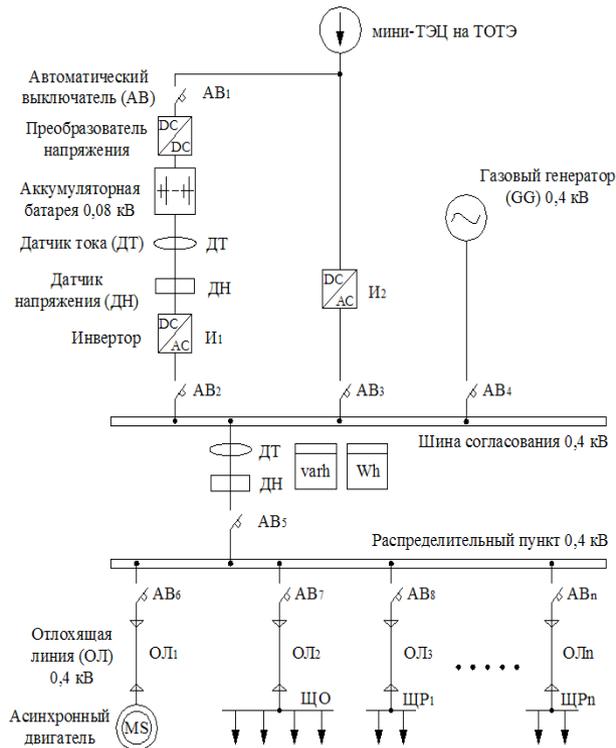


Рис. 1. Однолинейная схема электроснабжения предприятия с мини-ТЭЦ на ТОТЭ

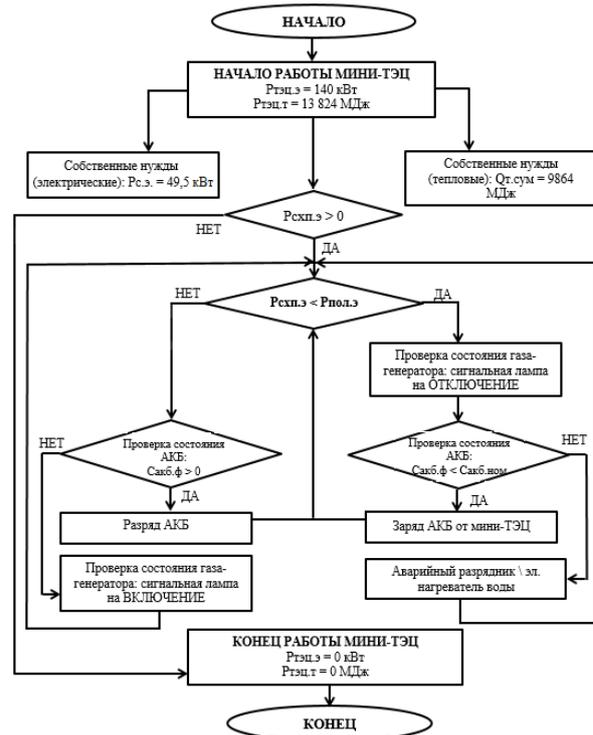


Рис. 2. Блок-схема алгоритма функционирования СЭС СХП

Начальными параметрами работы мини-ТЭЦ являются номинальные электрическая и тепловая мощности ЭУ. Необходимым условием для запуска мини-ТЭЦ является наличие электрической нагрузки на СХП. Питание собственных нужд ЭУ осуществляется от мини-ТЭЦ.

Для отработки алгоритма и отладки механизмов его управления в программном комплексе (ПК) «*Matlab-Simulink*» разработана имитационная компьютерная модель системы электроснабжения СХП.

Разработанная модель представляет собой комбинированное соединение типовых и программируемых блоков ПК «*Matlab-Simulink*» в единую систему.

На рис. 3 представлена первая итерация модели согласованного функционирования четырех подсистем, позволяющая имитировать ряд теоретических измерений (осциллограммы токов и напряжений, а также их действующие значения) для двух режимов функционирования СЭС исследуемого СХП:

– режим «1»: мощность генерации ($P_{ГЕН.1}$) равна номинальной мощности мини-ТЭЦ;

– режим «2»: мощность генерации ($P_{ГЕН.2}$) равна сумме номинальных мощностей мини-ТЭЦ и системы накопления, рассчитанной на работу в пиковый период.

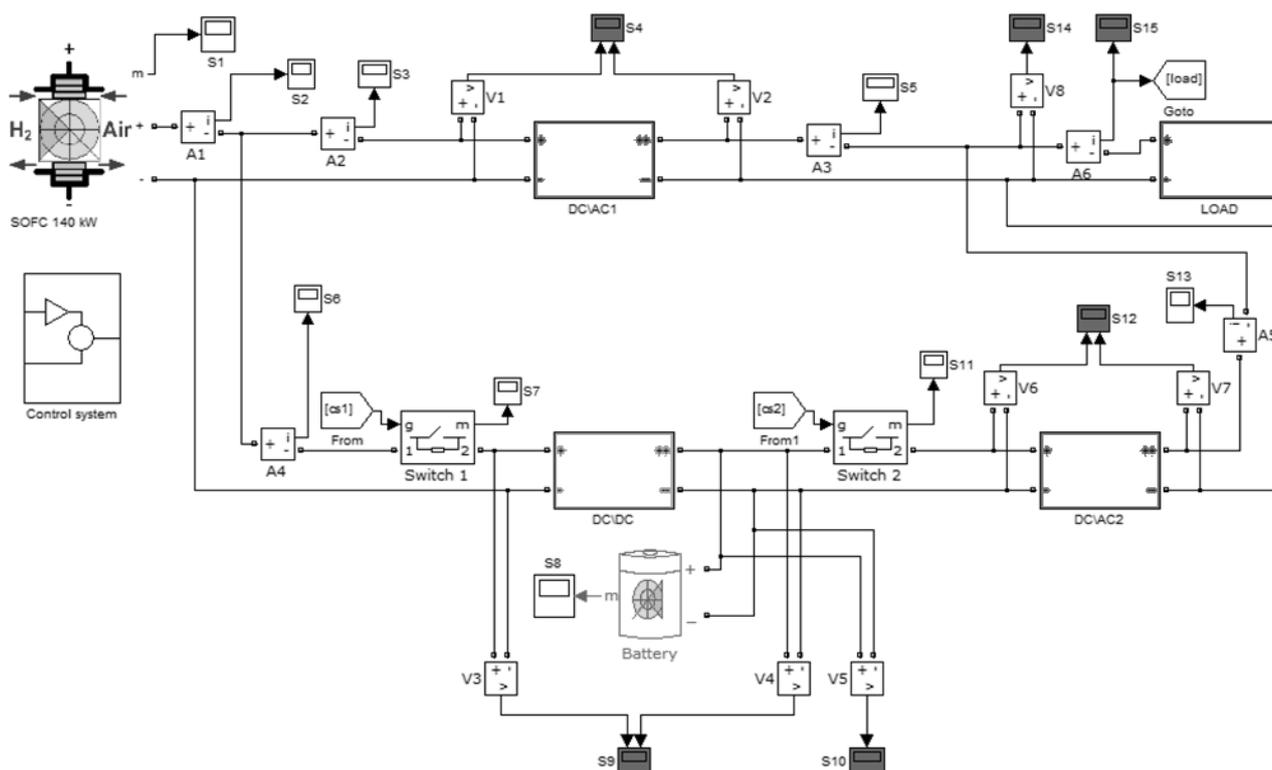


Рис. 3. Simulink-модель системы генерирования электроэнергии с мини-ТЭЦ на ТОТЭ

Следует отметить, что первичная итерация модели требует доработки и продолжения исследований с целью приближения моделируемой системы к реальным условиям.

Действующее значение напряжения на зажимах нагрузки с увеличением мощности генерации (пропорциональным увеличению мощности нагрузки) незначительно уменьшается (в пределах 1%), что находится в рамках допустимого согласно российскому стандарту о качестве электроэнергии [6]. При этом действующее значение тока при увеличении нагрузки и мощности генерации увеличивается примерно на 4,1%.

Анализ полученных результатов

На основе проведенных исследований получены следующие результаты:

1. Предложены научно-технические решения по интеграции мини-ТЭЦ на ТОТЭ в систему электроснабжения СХП.

Наличие подсистем накопления и преобразования позволяет решить проблемы низкой маневренности ЭУ на ТОТЭ и интеграции мини-ТЭЦ в СЭС потребителей. Система резервной генерации обеспечивает работу предприятия в критическом случае: превышении мощности нагрузки над генерацией и полном разряде АКБ.

2. На основе предложенного алгоритма в ПК «*Matlab-Simulink*» разработана имитационная компьютерная модель СЭС с мини-ТЭЦ на ТОТЭ.

Представленная модель позволяет получить электрические характеристики (осциллограммы токов и напряжений) на источниках питания и нагрузке, на

основе которых можно сделать вывод о согласованной работе системы генерации и потребителей СХП.

В работе представлена первичная итерация модели, которая не позволяет проводить более глубокие исследования. Планируется проведение дальнейших исследований, направленных на приближение модели СЭС с мини-ТЭЦ на ТОТЭ к реальным условиям ее функционирования.

Заключение

Применение мини-ТЭЦ на ТОТЭ актуально для электроснабжения энергоудаленных потребителей малой мощности (до 1МВт), имеющих возможность выработки биогаза и его дальнейшей переработки для получения тепло- и электроэнергии.

Проведенные исследования СЭС с мини-ТЭЦ на ТОТЭ и полученные на их основе результаты позволяют решить ряд проблем, возникающих на этапе проектирования, а также при реконструкции системы электроснабжения СХП: низкая маневренность ТОТЭ; интеграция мини-ТЭЦ на ТОТЭ в СЭС потребителей.

Библиографический список

1. Проект «Энергетическая стратегия России на период до 2035 года». Москва. 2014. [Электронный ресурс]. URL: media.rspp.ru/document/1/c/e/ceef7d9d4df403f7f78fa3bd217d7285.pdf.
2. Попель, О.С. Перспективные применения возобновляемых источников энергии – в мировой практике и в России. Научная конференция фонда Сколково. Презентация. [Электронный ресурс]. URL: gosbook.ru/node/36164.
3. Маркеев, Д.С. Электрохимические генераторы на топливных элементах последние разработки / Д.С. Маркеев, Д.В. Ростовщикова, Л.Г. Перминова // Молодёжь и наука: сборник материалов VI Всероссийской научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых учёных [Электронный ресурс]. — Красноярск: Сибирский федеральный ун-т, 2011.
4. Официальный интернет-сайт компании «Bloom Energy». 2014. [Электронный ресурс]. URL: bloomenergy.com/fuel-cell/solid-oxide.
5. Официальный интернет ресурс компании ООО «Фасэнергомаш». [Электронный ресурс]. URL: fasenergo.ru.
6. ГОСТ № 32144-2013. «Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения». – Введ. 2014-07-01. – М., 2014.

УДК 621.316.925.2

А.Л. Куликов, В.Ю. Вуколов, А.А. Колесников

АНАЛИЗ МЕТОДОВ РЕАЛИЗАЦИИ ЦЕНТРАЛИЗОВАННЫХ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫХ ЗАЩИТ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЕЙ

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Рассмотрены существующие решения по организации централизованных дифференциальных защит, представлены алгоритмы обнаружения неисправности трансформаторов тока и линий связи. Предлагается применение централизованных защит, основанных на дифференциальном принципе в сочетании с методом двойной записи.

The article deals with the existing solutions for the centralized differential protection, presented algorithms of failure detection of current transformers and communication lines. It is proposed to use a centralized protection, based on the differential principle, in combination with the method of double entry.

Ключевые слова: централизованная релейная защита, дифференциальная защита, двойная запись.

Key words: centralized relay protection, differential protection, double entry.

Введение

Развитие высокоскоростных коммуникаций создало условия для разработки централизованных дифференциальных защит (ЦДЗ).

Преимуществами таких защит, в частности, являются:

- высокие чувствительность, быстродействие и селективность;
 - наличие возможности контроля исправности трансформаторов тока и линий связи;
 - возможность расширения зон защиты;
 - реализация УРОВ за минимальный временной интервал времени;
- и ряд других.

Однако измерения токов и сбор информации о них с большего числа элементов электрической сети может сказаться на надежности функционирования ЦДЗ. При этом, чем большую часть электрической сети охватывает система защиты, тем больший ущерб будет нанесен из-за ненадежности ее функционирования.

Цель статьи – анализ методов реализации ЦДЗ, а также оценка надежности технических решений с учетом неисправности трансформаторов тока (ТТ) и каналов связи.

Характерными примерами подходов к организации ЦДЗ являются метод дифференциальных колец [1] и метод мультizonальной дифференциальной защиты [2].

Метод дифференциальных колец предлагается для применения в корабельных сетях электроснабжения 13,8/4,16/0,48 кВ. В соответствии с ним, сеть

разбивается на несколько участков – дифференциальных колец (*Diff Ring*). Участок, образованный с помощью ТТ на границе защищаемой области (*Outermost Diff Ring*), проверяется на наличие КЗ в сети. В случае обнаружения КЗ происходит опрос дифференциальной защиты отдельных электроустановок – линий, секций шин, ит.д. (*Inner Diff Ring*), и при обнаружении КЗ отключается поврежденный элемент. Также в процессе функционирования защиты происходит постоянная диагностика неисправностей ТТ с помощью проверки на наличие КЗ участков, образованных путем расширения зон дифференциальной защиты отдельных электроустановок до следующих по очереди ТТ с обеих сторон от защищаемого объекта (*Augmented Diff Ring*).

Метод мультizonальной дифференциальной защиты предлагается для применения в сетях 110 кВ и выше. Система состоит из распределенных дифференциальных защит, которые взаимодействуют друг с другом посредством высокоскоростных сетей связи.

Терминалы защит регистрируют значения токов и положения выключателей. Устанавливаемые локальные концентраторы собирают данные от терминалов защиты на своих и смежных подстанциях. После того как концентратор получает все данные, необходимые для дифференциальной защиты, он принимает решение о необходимости отключения или блокирования и передает команды на концентратор смежной подстанции.

При потере данных об измерениях на концах линии электропередачи, распределенные защиты не блокируются. Мультizonальная дифференциальная защита может восстановить потерянные данные и выявлять неисправности с использованием метода репрезентативных данных (*Representative Data*), основанным на использовании сигналов, полученных от соседних терминалов. Данная техника также позволяет расширить зону защиты. Если происходит потеря данных на терминале, общем для защиты линии и защиты шин, зоны защит линии и сборных шин будут расширены до одной общей зоны. Если потеря данных происходит на совместном терминале между двумя защитами шин, зона защиты будет расширена таким образом, чтобы охватить обе системы шин.

После обнаружения неисправности вводится алгоритм приоритетной стратегии (*Tripping Priority Strategy*) с целью минимизировать зону отключения, расширенную путем использования техники репрезентативных данных. Общий алгоритм приоритетной стратегии отличается в зависимости от расположения терминалов защиты.

Мультizonальная дифференциальной защита имеет также функцию исключения терминала (*Terminal Exclusion Function*), служащую для выявления отказа выключателей при КЗ на шинах.

Важнейшим недостатком рассмотренных технических решений является отсутствие достаточной гибкости системы релейной защиты при изменении конфигурации сети – подключении новых источников питания, нагрузок или их отключении.

ЦДЗ, предлагаемая авторами, исключает указанные недостатки. Она основана на применении дифференциального принципа в сочетании с методом

двойной записи [3].

В качестве примера рассмотрим участок электрической распределительной сети, изображенный на рис. 1.

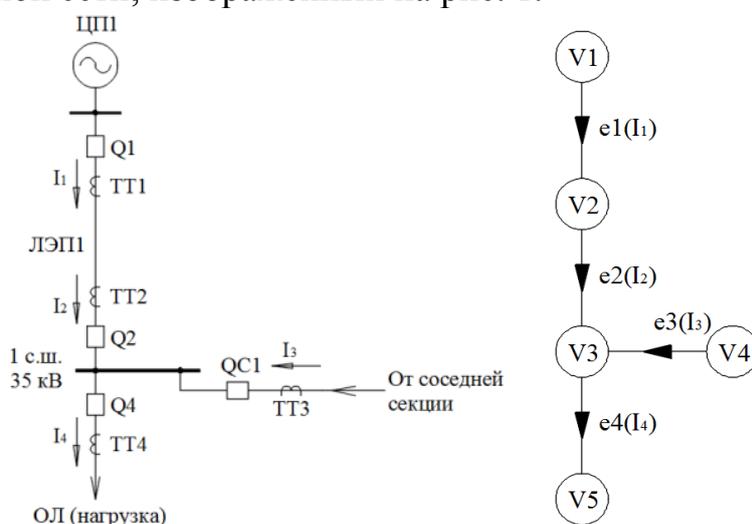


Рис. 1. Схема фрагмента распределительной сети и однонаправленный граф

Структура всей схемы представляется однонаправленным графом с дугами, представляющими высоковольтные аппараты, и вершинами, представляющими защищаемые элементы - шины, ЛЭП. Для всех вершин графа со степенью >1 составляются уравнения в матричной форме для суммы токов в узлах. Для поиска места повреждения защита производит сравнение токов по дифференциальному принципу для отдельных участков сети и выявляет потенциально поврежденный элемент.

Далее определяется, вызвано ли срабатывание пускового органа коротким замыканием (КЗ) на рассматриваемом участке, либо имеет место неисправность трансформаторов тока или линий связи, определяемая с помощью метода двойной записи. Так как каждая дуга графа отражается с одинаковым весом (значением тока) в матрицах дважды: как дуга, связанная с вершиной и направленная к ней в одной матрице, и как дуга, связанная с вершиной и направлена от нее в другой матрице, то при неисправности сумма входящих и исходящих токов в двух матрицах нарушается, но суммарный дифференциальный ток для всей сети остается равным нулю. В случае соблюдения условия наличия КЗ и сохранения суммы токов для всей сети, равной нулю, определяется неисправность трансформаторов тока или линии связи.

Признаки функционирования дифференциальной защиты при различных соотношениях токов и результатах выполнения матричных операций для рассматриваемой схемы показаны в табл. 1.

Таблица 1

Результаты матричных операций и признаки функционирования защиты

Результирующее значение матричной операции			Признаки функционирования дифференциальной защиты
$SMV2$	$SMV3$	SUM	
0	0	0	Ток короткого замыкания отсутствует, ТТ исправны.
$\neq 0$	0	$\neq 0$	КЗ на элементе, соответствующем вершине V2
0	$\neq 0$	$\neq 0$	КЗ на элементе, соответствующем вершине V3
$\neq 0$	$\neq 0$	0	Неисправен ТТ, общий для V2 и V3 (дуга $e2(I_2)$)

В табл. 1 переменные $SMV2$, $SMV3$ определяют условия наличия КЗ в зоне защиты:

- на линии ЛЭП1, соответствующей вершине графа V2

$$SMV2 = I_1 - I_2 \neq 0;$$

- на секции шин подстанции, соответствующей вершине графа V3

$$SMV3 = I_2 + I_3 - I_4 \neq 0.$$

Переменная SUM определяет суммарный дифференциальный ток для всей сети:

$$SUM = I_1 + I_3 - I_4.$$

Преимуществом предлагаемого метода является гибкость системы релейной защиты при изменении конфигурации сети благодаря тому, что итоговые матрицы формируются автоматически в отличие от рассматриваемых ранее защит, где для каждой конфигурации сети необходимо задавать специальные алгоритмы работы. В зависимости от соотношения токов на участке электрической сети, а также результатов выполнения операций над матрицами токов можно реализовать надежное функционирование централизованной дифференциальной защиты сети. При этом обеспечивается не только действие защиты при повреждениях на каждом участке, но и исключаются ее излишние действия при повреждениях трансформаторов тока или линий связи.

Выводы

1. Перспективные централизованные дифференциальные защиты позволяют: обеспечить надежное резервирование существующих защит электрических сетей; уменьшить вероятность отказов защит присоединений, вызванных неправильно заданными уставками; уменьшить затраты от недоотпуска электроэнергии и повреждения оборудования; повысить надежность электроснабжения за счет селективного отключения поврежденных участков электрической сети; снизить требования к электрооборудованию путем сокращения длительности воздействия токов КЗ.

2. Целесообразно применение метода двойной записи при построении ЦДЗ. Такое решение обеспечивает требуемую гибкость алгоритмов при изменении конфигурации электрической сети, а также контроль ТТ и каналов связи.

Библиографический список

1. **Tang, J.** Wide area differential protection system. A Dissertation submitted to the Department of Mechanical Engineering in partial fulfillment of the requirements for the degree of Doctor of Philosophy. – Florida, State University. – 2006. –178 p.
2. **Guo, H.** Enhanced characteristics of multi-zone current differential protection for transmission network / H. Guo, K. Kangvansaichol, P. Crossley // Actual trends in development of power system protection and automation. Yekaterinburg, 03.06 – 07.06, 2013.
3. **Куликов, А. Л.,** Централизованная дифференциальная защита распределительных сельских сетей 6–35 кВ с применением метода двойной записи / А.Л. Куликов, В.Ю. Вуколов, А.А. Колесников // Вестник НГИЭИ. 2017. № 2 (69). С. 71-81.

УДК 621.316.519

В.Л. Осокин, Б.В. Папков

ОЦЕНКА НАДЁЖНОСТИ ОБЪЕКТОВ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКИ НА ОСНОВЕ ТЕОРИИ НЕЧЁТКИХ МНОЖЕСТВ

Нижегородский государственный инженерно-экономический университет

Сложность оценок показателей надёжности систем электроэнергетики и отдельных объектов заключается в неполноте и неопределённости ретроспективных данных по их параметрам и режимам функционирования. Предложено использование математического аппарата теории нечётких множеств, что позволяет наилучшим образом структурировать все то, что разделено не очень точными границами. Приведён пример.

Complexity estimates of reliability electricity systems and individual objects is incompleteness and uncertainty of historical data on their parameters and operation regimes. Invited to use the mathematical apparatus of the theory of fuzzy sets, allowing the best to structure all that divided not very precise boundaries. Is an example.

Ключевые слова: надёжность, неопределённость, нечёткие множества, теория принятия решений.

Key words: reliability, uncertainty, fuzzy sets, decision theory.

Руководящими принципами принятия оптимальных или близких к ним решений в современных условиях функционирования и эксплуатации систем электроснабжения всех классов являются:

- терпимость к неточности, неопределенности и частичной истинности для достижения удобства управления ими;
- стремление к минимальной стоимости решения и лучшего его соответствия фактической ситуации.

При этом возможно использование методов, относящихся к так называемым «мягким» вычислениям [1, 2]. Сущность их состоит в том, что в отличие от традиционных, «жестких» (детерминированных) вычислений, они нацелены на приспособление к всеобъемлющей неточности реального мира. Исходными моделями для них служат результаты применения вероятностных методов и статистических выводов с включением хаотических систем, сетей доверия [3] и теории адаптации, а также нечеткая логика и человеческое мышление [4, 5].

Теория нечетких множеств – шаг на пути к сближению точности классической математики и неточности реального мира. Теория нечетких множеств позволяет наилучшим образом структурировать все то, что разделено не очень точными границами. Понятие нечеткого множества было предложено для описания и исследования больших (сложных) систем различной природы, когда применение точного количественного анализа оказывалось малоэффективным. Такие системы характеризуются:

- большим количеством слабо формализуемых и часто противоречивых целей функционирования с одновременной их изменчивостью во времени;
- конфликтным и многоаспектным характером взаимоотношений как между элементами, так и с внешней средой, при существенном влиянии человеческого фактора;
- преимущественно понятийным характером описания условий функционирования и внешних ограничений.

В последнее время наблюдается интенсивное развитие нечетких методов в рамках постановки и решения ряда прикладных конкретных задач:

- в системах управления режимами электроэнергетических систем (ЭЭС) и системах электроснабжения (СЭС) потребителей;
- при мониторинге состояния электрооборудования [6];
- в системах обработки и защиты информации;
- при анализ экономических показателей ЭЭС и СЭС.

Преимущества применения нечётких множеств для исследования больших технических систем заключаются:

- в возможности оперировать нечеткими входными данными (изменяющиеся во времени параметры ЭЭС, СЭС и их элементы);
- возможности использования результатов экспертных опросов [3];
- возможности нечеткой формализации критериев оценки и сравнения («большинство», «возможно», «преимущественно»);
- возможности качественных оценок входных данных и выходных результатов (не только значения данных, но и с их степень достоверности);
- возможности относительно быстрого моделирования сложных динамических элементов и систем и их сравнительный анализ.

Среди существующих в настоящее время объектов электроэнергетики есть немало таких, эксплуатационный ресурс которых близок к предельному или даже превысил его. За время эксплуатации эти объекты, как правило, не раз подвергались различного рода экстремальным воздействиям (короткие замыкания, обрывы, токовые и механические перегрузки, экстремальные температурные режимы, некачественный ремонт и т.п.). В результате возникли проблемы, связанные с возможностью их эксплуатации с пониженными показателями надёжности. Естественно, что с технико-экономической точки зрения не представляется возможным одновременно вывести из эксплуатации все эти объекты и заменить их новыми. Поэтому необходима обоснованная оценка: какие объекты подлежат первоочередной реконструкции, какие некоторое время могут продолжать эксплуатироваться, а какие следует вывести из эксплуатации, полностью заменив новыми.

Такую оценку относительно легко дать в случае, когда предельное состояние объекта электроэнергетики видно «невооружённым» глазом:

- ретроспективные статистические данные о длительной эксплуатации в экстремальных условиях;
- явные повреждения механической части основного оборудования;

- коррозия токопроводящих элементов;
- моральный износ и т.п.

В целом ряде других случаев однозначная оценка затруднительна. Чтобы сделать объективное заключение о состоянии исследуемого объекта, необходимо связать воедино данные о состоянии отдельных элементов этого объекта, полученные при «внешнем» осмотре, а также имеющую место ретроспективную техническую, экологическую, социальную и другую информацию:

- состояние на данный момент;
- количество, причины и степень повреждений;
- важность сооружения;
- данные проектирования;
- состояние окружающей среды.

Так, среди электростанций (подстанций) немало таких, которые создают серьёзные проблемы, связанные не только с их эксплуатацией, но и с надёжностью их оборудования (надёжностью электроснабжения потребителей) и безопасностью. Однако данные, которые можно использовать для объективной оценки их технического состояния, не только имеют недостаточный объём, но и в большинстве случаев включают разного рода нечёткости.

Если объёма данных, используемых для оценки надёжности недостаточно, необходимо изучить и принять во внимание нечёткие данные, полученные на основе интуиции и опыта компетентных экспертов. При этом качественные неопределённости, выраженные экспертами, необходимо представить в количественной форме. Однако неопределённые факторы, которые следует принять к рассмотрению, как правило, имеют самую разнообразную природу как с точки зрения причин их возникновения, так и особенностей протекания неблагоприятных процессов. Вместе с тем, учёт их даёт следующие преимущества для лиц, принимающих решения (ЛПР):

- становятся возможными выводы из нечётких данных и знаний;
- возможно использование естественного языка для записи правил принятия решений;
- знания, полученные в процессе диалога со специалистом, можно обрабатывать известными математическими методами.

Предположим, что существует ЛПР, работающее по чёткому правилу: «если X есть A , то Y есть B ». Но с помощью этого правила невозможно получить тот же вывод для данных: « X есть A' », в которых A' «немного» отличается от A . Однако человек из данных: « X есть A' » способен сделать вывод: « Y есть B' ». Следовательно, можно создать экспертную систему, в которой A' представляется в виде нечёткого множества $\{A\}$, а B' в виде нечёткого множества $\{B\}$.

В результате делается вывод: «если X есть $\{A\}$, то Y есть $\{B\}$ ».

Для достоверной оценки срока службы объекта энергетики данная экспертная система выполняет следующие действия:

1) неоднократно, в течение длительного времени ведёт диалог со специалистом в области управления и технического обслуживания, приобретая у

него специальные знания (причины повреждений, последствия отказов, длительность восстановления, эффективность работы разного рода защитных элементов, длительность и качество ремонтно-восстановительных работ и т.п.);

2) применяя аппарат теории нечётких множеств, производится обработка нечёткостей, содержащихся в данных полученных после обследования объекта и нечёткостей в знаниях, приобретённых у специалиста;

3) при оценке остаточного ресурса анализируются причины повреждений, их особенности и последствия.

Последовательность этапов оценки надёжности (остаточного ресурса) может выполняться в соответствии с рис. 1.

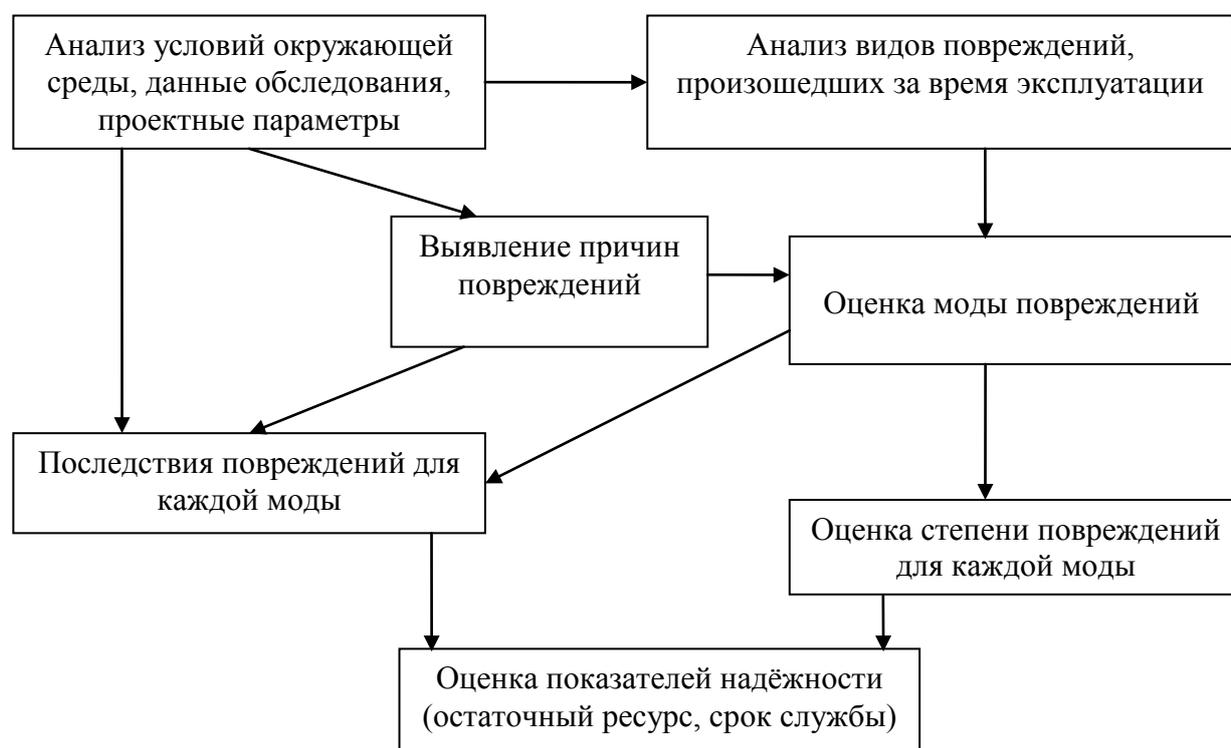


Рис. 1. Процедура оценки надёжности объекта

По данным обследования конкретного объекта уточняются виды повреждений (механический износ, коррозия, нарушение стационарной изоляции, старение строительных конструкций). Исходя из данных проектирования и состояния окружающей среды, высказываются предположения о причинах повреждений (длительная эксплуатация; частые перегрузки; нарушение графика проведения профилактических работ и (или) контрольных испытаний; нарушение режима работы системы релейной защиты и противоаварийной автоматики (РЗиПА). Обычно предлагается несколько причин, и для каждой рассматриваются наиболее вероятные повреждения, или мода (центр площади) повреждений (рис. 1). После идентификации моды повреждений по их причинам определяется степень повреждения отдельных элементов (узлов) анализируемого объекта. На основе обобщения мод повреждений получают оценки степени повреждений для каждой моды. Кроме того, для каждой причины определяют

последствия повреждений. С помощью комплексной оценки полученных таким образом степени повреждений, последствий повреждений и времени, прошедшего с момента ввода объекта в эксплуатацию (последней капитальной реконструкции) делается предположение о ресурсе для каждой моды повреждений.

Допустим, что оборудование анализируемой электроустановки не подвергалось разного рода отказам (вредным воздействиям), которые не принимались в расчёт при традиционном проектировании. Тогда зависимость степени его износа от времени может быть задана кривой S_0 (рис. 2). Аналогичные зависимости для «большой S_1 », «довольно большой S_2 », «средней S_3 », «довольно малой S_4 » и «малой S_5 » степеней износа соответственно представлены соответствующими кривыми.

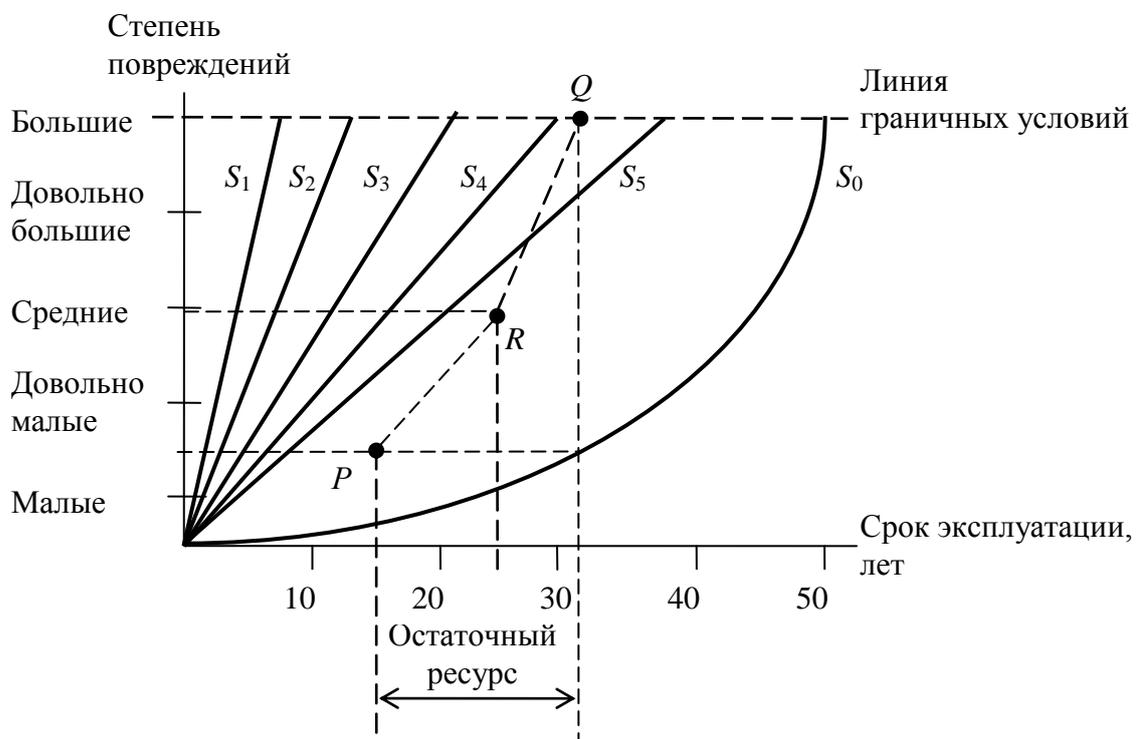


Рис. 2. Зависимость степени повреждений от срока службы и оценка остаточного ресурса

На основании рис.2 оценим срок службы подстанции, основное оборудование которой за 15 лет эксплуатации имело «довольно малую» и «малую» степень повреждения. Состояние этого оборудования показано точкой P на рис. 2. Можно ожидать, что дальнейший рост степени повреждений из состояния P будет происходить параллельно кривой S_4 . После 25-летней эксплуатации процесс увеличения степени повреждений переходит на траекторию, параллельную кривой S_3 , и достигает максимума в точке Q . Таким образом, срок службы можно определить как разность координат точек P и Q по оси абсцисс.

Библиографический список

1. **Заде, Л.** Понятие лингвистической переменной и его применение к принятию приближенных решений / Л. Заде. – М.: Мир, 1976. – 165 с.
2. **Кофман, А.** Введение в теорию нечётких множеств / А. Кофман. – М.: Радио и связь, 1982. – 432 с.
3. **Осокин, В.Л.** Уточнение исходной информации в задачах оценки надёжности систем электроснабжения / В.Л. Осокин, Б.В. Папков // Актуальные проблемы электроэнергетики; НГТУ им. Р.Е. Алексеева. Н. Новгород, 2016. С. 154-160.
4. **Рябинин, И.А.** Основы теории и расчёта надёжности судовых электроэнергетических систем / И.А. Рябинин. – Л.: Судостроение. 1971. – 456 с.
5. **Папков, Б.В.** Теория систем и системный анализ для электроэнергетиков / Б.В. Папков, А.Л. Куликов. – М.: Изд-во Юрайт, 2016. – 470 с.
6. **Бабичев, С.А.** Мониторинг состояния обмотки статора электродвигателей газоперекачивающих агрегатов / С.А. Бабичев, Б.В.Папков, А.И. Таджибаев, С.М. Подколотин // Библиотека специалиста по технической диагностике и неразрушающему контролю (ТДНК) объектов энергетики. Серия 2 «Оценка технического состояния электрооборудования». Вып. 2.2 (10). – СПб.: Северная звезда, 2012. – 70 с.

УДК 621.311

И.С. Шиханов, А.С. Карпов, В.В. Ярошевич

**ОСОБЕННОСТИ РАБОТЫ ПЛАТФОРМЫ LABVIEW
В ВЫСОКОВОЛЬТНОЙ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКЕ**

Центр физико-технических проблем энергетики Севера КНЦ РАН

Представлены особенности работы платформы LabVIEW при создании моделей с эмуляцией высоковольтной сети, а также при создании виртуальных приборов, которые в дальнейшем компилируются на реальную измерительную аппаратуру. Приведены достоинства этой среды программирования, и проанализирован эффект от применения LabVIEW в электроэнергетике.

Features of work in the LabVIEW platform are presented during creation of models with emulation of high-voltage network, and also during creation of the virtual devices which further are compiled on an actual measuring equipment. The advantages of this programming environment are given, and also the effect of application of LabVIEW in power industry is analysed.

Ключевые слова: программирование, моделирование, визуализация, виртуальный прибор, генератор сигнала, блок-диаграмма, электромагнитная совместимость, высоковольтная сеть.

Key words: programming, simulation, visualization, virtual Instrument, signal generator, block-diagram, electromagnetic compatibility, high-voltage network.

Программная среда LabVIEW является всемирно известным продуктом компании National Instruments (NI), который широко используется в процессе обучения студентов (в качестве программного и аппаратного инструментария) и в измерительных лабораториях. Кроме того, LabVIEW является универсальной средой, которая может существовать отдельно (для моделирования на ПК), а также может быть синхронизирована с приборами NI [1]. Однако стремление разработчиков данной среды программирования сделать ее как можно более универсальной привели к ряду трудностей применения LabVIEW в высоковольтной электроэнергетике.

В данной среде программирования невозможно четко смоделировать физические явления или какие-либо переходные процессы, так как здесь нет готовых решений, которые бы имели свою физику процессов, а такие элементы, как сопротивление (R), емкость (C) и индуктивность (L) и вовсе отсутствуют, но их влияние можно смоделировать с помощью конструктора формул (Formula Node) (рис.1), который присутствует в LabVIEW, но синтаксис записи в нем неудобен и составление сложных формул проблематично. Таким образом, в данной оболочке визуализация влияния R , L , C производится в виде изменения формы кривой при помощи манипуляций с данными [2].

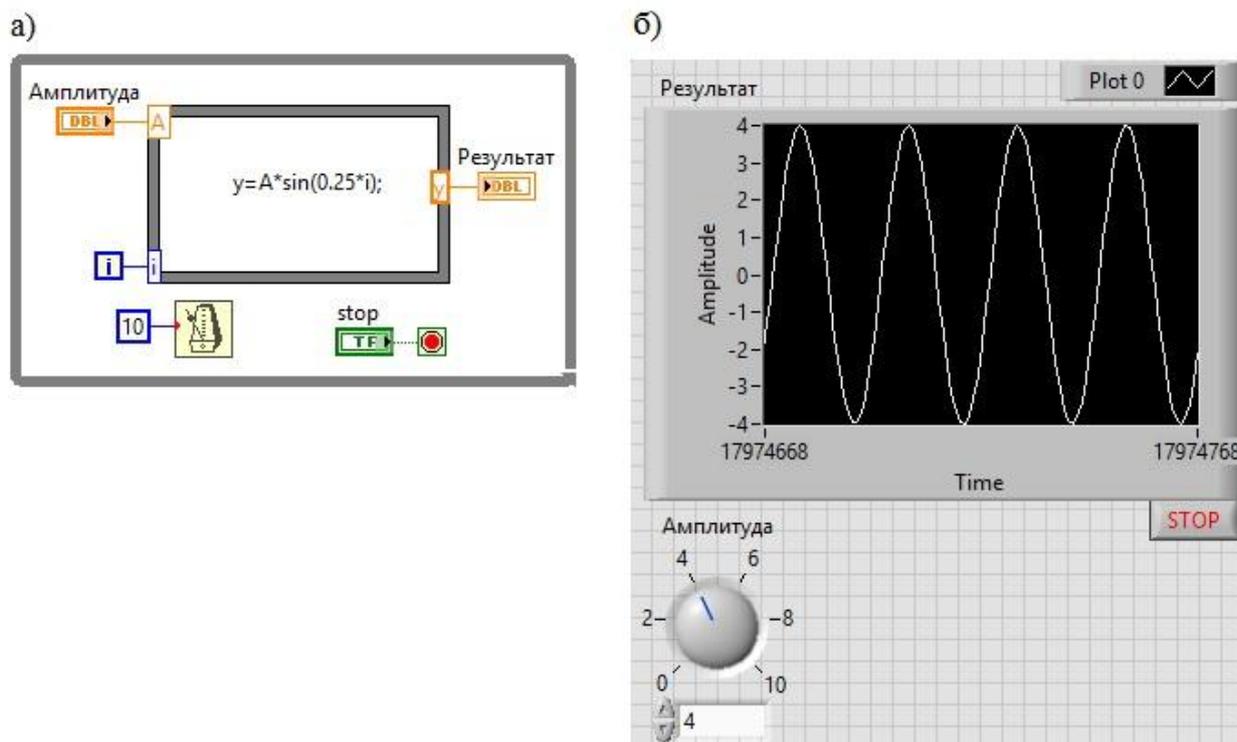


Рис. 1. Применение конструктора формул (formula node):

а - виртуальный прибор; *б* - визуальный результат применения конструктора формул

Тем не менее, использование LabVIEW в энергетике возможно, так как исследование процессов высоковольтной сети проводится на основе осциллограмм тока и напряжения [3-4]. Для их моделирования потребуется понимание физики процесса и есть возможность использовать виртуальные подприборы (ВПП), имеющиеся в данной среде программирования. У ВПП для генерации сигналов есть ряд недостатков, главный из них – это ограниченные возможности в изменении параметров исходного сигнала, а множество важных параметров и вовсе недоступно. Так же существуют сложности в совмещении нескольких графиков для получения усреднения. Поэтому для получения более точного результата исследования, необходимо создавать модель из комбинации более простых подпрограмм LabVIEW, это позволит расширить диапазон возможностей.

Одним из таких виртуальных подприборов для генерации сигнала является Sine Wave, который создает массив статичной тригонометрической функции – синусоиды. Массив можно задавать такими параметрами, как «количество выборок» (samples), которое увеличивает количество точек осциллограммы, «частота сигнала» (frequency), «амплитуду» (amplitude), а также ее фазовый сдвиг (phase in). Но задавая эти функции, данная модель сигнала будет статична и будет требовать постоянного перезапуска программы, чтобы внесенные изменения отобразились на графике. Именно поэтому в среде LabVIEW важно понимать физику процесса, которую вы хотите отобразить в своей модели.

Для создания полноценного сигнала, который будет двигаться с определенной частотой потребуются циклы, с фиксированным или бесконечным чис-

лом итераций. Для того чтобы создать симуляцию движения сигнала, необходимо связать количество совершаемых итераций в данный момент с фазовым углом сдвига. Изменение этого угла приведет к тому, что точки графика с каждой итерацией будут менять свое положение в зависимости от номера этой итерации, и ранее статичный график приобретёт движение.

Например, при изучении проблем электромагнитной совместимости [5], связанных с качеством электроэнергии, стояла задача о моделировании ситуации, в которой заданы 40 гармонических составляющих сигнала, с определенными значениями, а результат выведен в виде графиков напряжения и тока. На основе виртуальных подприборов, которые симулируют движения сигнала в сети, это возможно реализовать, но невозможно в реальном времени изменять значения гармоник и самого сигнала, поскольку параметры задаются до запуска программы. Поэтому на самом деле сигнал статичен, а его движение лишь перебор уже известных значений массива, который получается на выходе.

Плюсы применения LabVIEW в электроэнергетике заключаются в том, что:

1. LabVIEW отлично подходит для изучения или анализа различных явлений, имея все исходные данные;
2. Можно создавать достаточно много различных подпрограмм, влияние которых можно увидеть на конечном графике, без потери производительности, так как все расчеты просчитываются до симуляции движения сигнала. В итоге сигнал отображает все внесенные изменения и работает стабильно;
3. Эта среда программирования имеет очень гибкую систему. Можно создать большое количество различных потребителей с различными параметрами;
4. Все виртуальные подприборы отлично оптимизированы под работу друг с другом, следовательно, не возникает ошибок и конфликтов между собой.

Что касается минусов, то скорость симуляции модели не может быть больше скорости обработки данных вашего персонального компьютера, что особенно чувствуется в микросекундном диапазоне и меньше. Поэтому кратковременные процессы: импульсы, перенапряжения, провалы и т.д., очень проблематично показать на модели, где значения задаются до начала симуляции программы и во время ее работы не могут быть изменены.

Выход из данной проблемы моделирования найти возможно, например, если изменить структуру и работу данной модели. Можно воспользоваться одним из готовых решений, а именно выводом «sine wave» виртуального прибора «Sine Wave.vi» (рис. 2). Так как он представляет собой одномерный массив значений, и разница этой модели заключается в том, что результат выводится не в «Waveform Graph», а в «Waveform Chart». Поскольку она отображает мгновенные изменения, то точки, следующие друг за другом, будут образовывать сигнал, и в этот сигнал в любой момент времени можно внести изменения, так как массив не задается целиком, а программа считывает лишь одно значение в определённый момент времени, не зная какое будет следующее. Этот способ решения проблемы сильно утяжеляет модель, в отличие от

аналогов типа MATLAB или ATP-EMTP [6], где принципиально другая система построения модели и уже есть заготовки с варьирующимися параметрами, в которых прописана физика работы устройств внутри самой программы.

В связи с этим данная графическая среда программирования, используемая на промышленных объектах и в различных исследовательских лабораториях, является очень гибкой к решению поставленных задач. Тем не менее для моделирования использование LabVIEW нецелесообразно, так как данная среда больше подходит для визуализации и симуляции различных процессов. Особенность платформы – это работа не только с виртуальными приборами, но и с реальной аппаратурой от компании National Instruments, которая имеет большой багаж готового оборудования для различных задач. Подключение, компилирование и другие работы с приборной техникой значительно облегчены из-за присутствия графического интерфейса в среде программирования LabVIEW. Однако из-за большого охвата различных отраслей она теряет некоторые узкопрофильные возможности. При этом, чтобы рассмотреть конкретное явление в энергетике, необходимо разбить его на несколько процессов, физика которых известна, и уже на их основе формировать готовую модель.

Библиографический список

1. **Шиханов, И.С.** Возможность использования многоплатформенной среды LabVIEW для решения задач в высоковольтной электроэнергетики / И.С. Шиханов, А.С. Карпов, В.В. Ярошевич // Труды Кольского научного центра РАН. Энергетика. 2016. Вып. 12. С. 19-27.
2. **Шиханов, И.С.** Применение среды LabVIEW для решения проблем электромагнитной совместимости / И.С. Шиханов, А.С. Карпов, В.В. Ярошевич // Сб. научно-технич. ст. Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева ; А.Б. Дарьенков (отв. редактор). 2016. С. 183-188.
3. **Шиханов, И.С.** Исследование проблемы качества электроэнергии городской сети / И.С. Шиханов, А.С. Карпов, В.В. Ярошевич // Сб. статей межвузовского конкурса студенческих научных работ «Научная элита XXI века» (победители и лауреаты 2013-2015); – Изд-во МГТУ. Мурманск, 2016 – 152 с. – (Федеральное агентство по рыболовству. ФГБОУ ВПО «Мурманский государственный технический университет»). С. 98-102.
4. **Шиханов, И.С.** Оценка использования сертифицированных регистраторов показателей качества электроэнергии / И.С. Шиханов, А.С. Карпов, В.В. Ярошевич, Г.П. Фастий, Е.А. Токарева // Труды Кольского научного центра РАН. Энергетика. 2015. Вып. 11. С. 55-67.
5. **Соснина, Е.Н.** Моделирование системы электроснабжения с питанием группы потребителей от трансформатора с тиристорным регулятором напряжения и мощности / Е.Н. Соснина, Р.Ш. Бедретдинов // Вестник Нижегородского университета им. Н.И. Лобачевского. 2013. № 5(1). С. 224-230.

УДК 621.316

Е.И. Грачева, А.В. Шагидуллин

ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ МЕРОПРИЯТИЙ ПО СНИЖЕНИЮ ЭЛЕКТРОПОТРЕБЛЕНИЯ НА ПРОМЫШЛЕННЫХ ПРЕДПРИЯТИЯХ

Казанский государственный энергетический университет

Статья посвящена оценке эффективности замены установленных в цеховых сетях низковольтных коммутационных аппаратов на новые в целях снижения потребления электрической энергии на промышленном предприятии. Рассмотрена динамика изменения электропотребления и относительных потерь электроэнергии в низковольтных сетях с учетом времени эксплуатации оборудования.

The article is devoted to estimation efficient to replace the established networks in shop-bottom-voltage switchgear in the new ones in order to reduce the consumption of electric energy in an industrial plant. The dynamics of changes in electron-consumption and relative energy losses in low-voltage networks, taking into account the time of the equipment.

Ключевые слова: низковольтные сети, коммутационные аппараты, автоматический выключатель, магнитный пускатель, экономия электроэнергии.

Key words: low-voltage network, switching devices, circuit breaker, magnetic switch, energy savings.

Представляет интерес возможный экономический эффект от замены коммутационного оборудования внутрицеховых сетей до его отказа [1]. По результатам исследований потерь мощности в контактных соединениях низковольтных коммутационных аппаратов (НКА), предлагаются мероприятия по замене аппаратов, имеющие наибольшие потери на аппараты российских заводоизготовителей с меньшими потерями мощности в аппарате и аналогичными характеристиками защиты [2]. В процессе эксплуатации контакты НКА изнашиваются, образуются пленки, в результате чего начальное значение сопротивления контактных соединений НКА возрастает [3], что ведет к увеличению эквивалентного сопротивления сети и увеличению потерь электроэнергии [4].

Для корректирования режима электропотребления в цеховой сети (рис. 1) и снижения потерь активной мощности в контактах и контактных соединениях коммутационных аппаратов предлагается заменить установленные низковольтные коммутационные аппараты на аналоги, позволяющие снизить потери мощности на величину порядка $5 \div 50$ % [5].

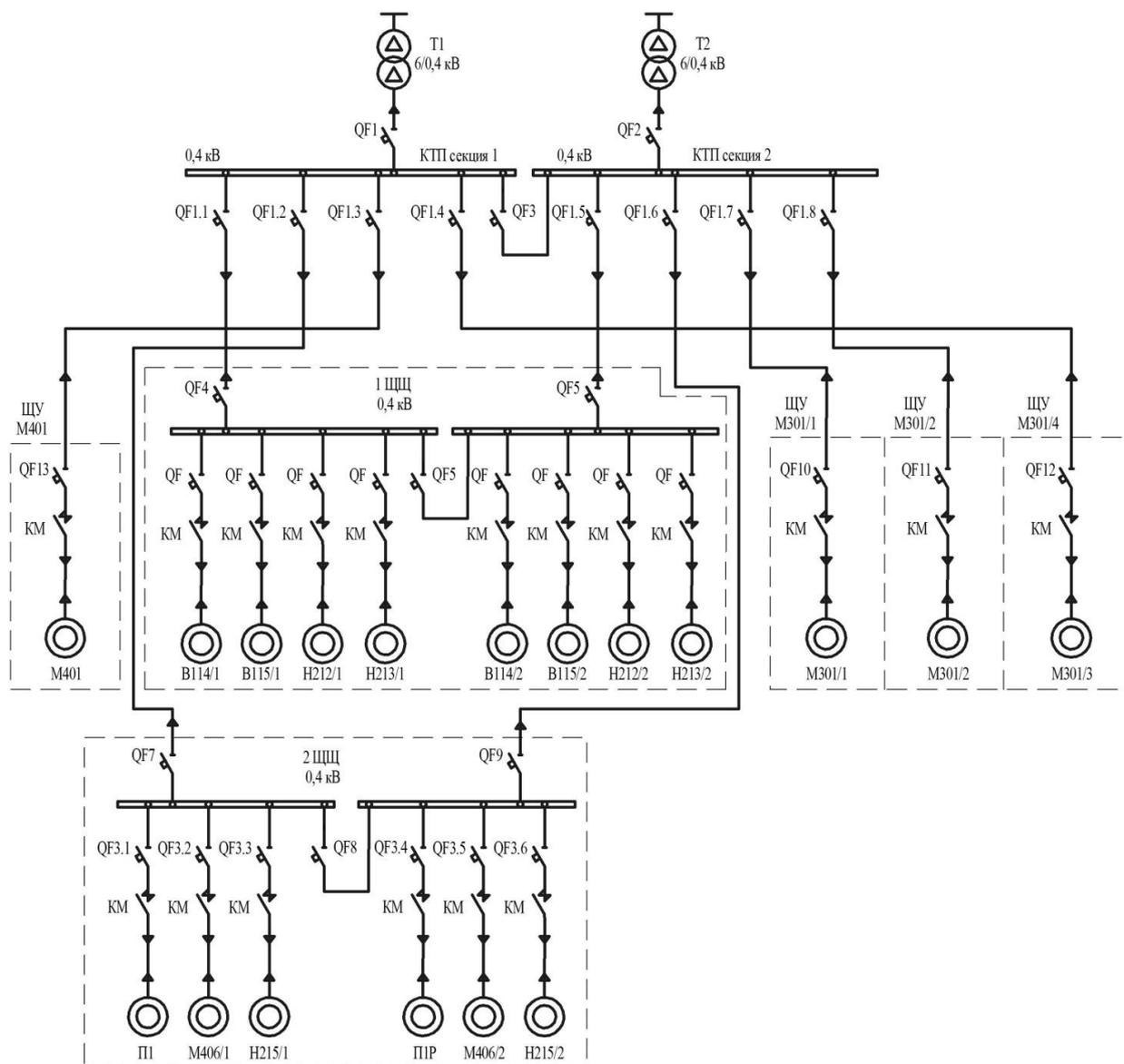


Рис. 1. Схема распределительной сети 0,4кВ

При разработке плановых заданий расхода электроэнергии удобно пользоваться эквивалентными сопротивлениями исследуемых сетей или их участков. Потери электроэнергии по эквивалентному сопротивлению находятся по выражению:

$$\Delta W = \frac{R_3^{\text{cp}} P_{\text{cp}}^2 T}{U_{\text{cp}}^2 \cos^2 \phi_{\text{cp}}}, \quad (1)$$

где P_{cp} - средняя мощность электроприемников, МВт; T - расчетный период, ч; U_{cp} - напряжение сети, В; $\cos \phi_{\text{cp}}$ - средний коэффициент мощности приемников электроэнергии.

С учетом выражения (1) расчетный отпуск электроэнергии составит:

$$W_p = \frac{R_3^{\text{cp}} P_{\text{cp}}^2 T}{U_{\text{cp}}^2 \cos^2 \phi_{\text{cp}}} + \frac{R_{30} P_{\text{cp}}^2 T}{U_{\text{cp}}^2 \cos^2 \phi_{\text{cp}}} \cdot \frac{100}{3,51}. \quad (2)$$

Погрешность расчетного отпуска электроэнергии, найденного по эквивалентному сопротивлению по (2), от фактически потребленной электроэнергии рассматриваемыми цеховыми потребителями за 2014-2015 гг. приведена в табл. 1.

Таблица 1

Расход электроэнергии по годам

Параметр	Год	
	2014	2015
Отпуск энергии в сеть W , МВтч	373,05	374,68
Расчетный отпуск энергии в сеть W_p , МВтч	369,8	370,3
Погрешность W_p от W , %	-1,03	-1,19

При замене 10 автоматических выключателей марки Schneider Electric с $I_H \leq 160$ А, установленных на линиях 1ШЩ – Н212/1, Н213/1, В114/1, В114/2, и 2ШЩ – П1, П1р, Н406/1, Н215/1, Н215/2, Н406/2, при 80% отработанном ресурсе на автоматы фирмы IEK, потери мощности снизятся на 70 %, что приведет к экономии электропотребления 1015,8 кВт·ч в год замены (табл. 2).

Таблица 2

Варианты замены установленных автоматических выключателей

Обозначение аппарата на схеме	Номинальный ток I_H , А	Производитель (установленные/замена)	Сопротивление, мОм	Потери мощности в 1 аппарате, Вт	Потери электроэнергии, кВт·ч/год
QF 2.1, QF 2.5	80	Schneider Electric	1,20	20,7	331,8
		IEK	1,11	7,1	113,7
QF 2.3, QF 2.4	160	Schneider Electric	0,46	31,8	508,7
		IEK	0,39	10,0	159,7
QF 3.1, QF 3.4	63	Schneider Electric	1,67	17,9	286,3
		IEK	1,31	5,2	83,2
QF 3.2	25	Schneider Electric	6,33	10,7	85,5
		IEK	4,50	2,8	22,5
QF 3.3, QF 3.6	32	Schneider Electric	4,37	12,1	193,3
		IEK	3,03	3,1	49,6
QF 3.5	4	Schneider Electric	145	6,3	50,1
		IEK	87,5	1,4	11,2
				Schneider Electric	1455,7
				IEK	439,9
				Экономия	1015,8

Для эффективного управления режимами эксплуатации и снижения электропотребления целесообразна замена контакторов, установленных в цепях электродвигателей, для аппаратов с $I_H = 26 \div 110$ А. В табл. 3 представлены

сравнительные характеристики установленных и предлагаемых к замене контакторов.

Таблица 3

Варианты замены установленных контакторов

Обозначение аппарата на схеме	Номинальный ток I_n , А	Производитель (установленные/замена)	Сопротивление, мОм	Потери мощности в 1 аппарате, Вт	Потери электроэнергии, кВт·ч/год
1ЩЦ-В114/1,	80	Schneider Electric	0,70	12,1	193,5
1ЩЦ-В114/2	75	КЭАЗ	0,36	2,0	32,4
2ЩЦ-П1,	65	Schneider Electric	0,80	9,1	146,0
2ЩЦ-Пр1	63	КЭАЗ	0,38	1,5	24,1
2ЩЦ-Н215/1,	32	Schneider Electric	1,49	4,1	65,9
2ЩЦ-Н215/2	30	КЭАЗ	1,00	0,9	14,4
2ЩЦ-406/1	25	Schneider Electric	1,59	2,7	21,5
	26	КЭАЗ	0,89	0,6	4,8
				Schneider Electric	426,9
				КЭАЗ	75,7
				Экономия	351,2

При замене только 7 контакторов марки Schneider Electric с $I_n \leq 80$ А, установленных на линиях 1ЩЦ – В114/1, В114/2, и 2ЩЦ – П1, Пр1, Н215/1, Н215/2, Н406/1, на 80% ресурса на контакторы завода КЭАЗ, потери мощности снизились на 82 %, что приведет к годовой экономии электропотребления 351,2 кВт·ч. С учетом замены приведенных аппаратов на 80%-ном сроке их эксплуатации изменение эквивалентного сопротивления схемы и расчетного отпуска электроэнергии [5] представлено в табл. 4.

Таблица 4

Изменение расчетного отпуска электроэнергии в сеть на участке цеховой сети при проведении энергоэффективных мероприятий

t , лет		0	2	4	6	8	10	12
$R_{\text{экр}} \text{ сети, мОм}$	было	25,75	27,23	28,14	32,37	37,23	42,82	49,26
	стало						29,64	32,39
Потери ΔW , МВтч	было	12,34	13,24	13,68	15,73	18,10	20,81	23,94
	стало						14,41	15,74
Расчетный отпуск энергии в сеть W_p , МВтч	было	369,1	369,8	370,3	372,3	374,7	377,4	380,5
	стало						371,0	372,3
Стоимость потеря э/э, тыс. руб.	было	50,07	52,94	54,71	62,94	72,39	83,26	95,78
	стало						57,63	62,97
Экономия от замены аппаратов	тыс. руб.						25,63	32,80
	%						1,70	2,16

На рис. 2 представлено изменение расчетного отпуска электроэнергии с учетом замены низковольтных коммутационных аппаратов.

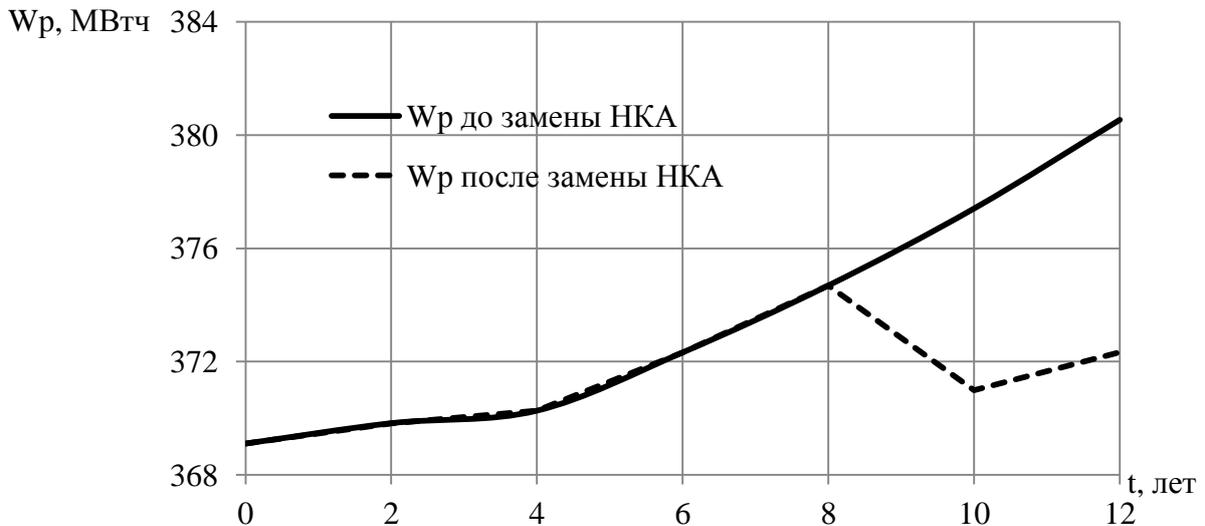


Рис. 2. Зависимости изменения расчетного отпуска электроэнергии (W_p) от времени эксплуатации до и после замены аппаратов

Замена коммутационных аппаратов при отработке ресурса на 80% является эффективным мероприятием, позволяя снизить расход электроэнергии на 6,4 МВт·ч в год замены и на 8,2 МВт·ч в будущем году.

Библиографический список

1. Федоров, О.В. Оценка ресурсосбережения электрооборудования / М.Ю. Петушков, А.С. Сарваров, О.В. Федоров // Электрооборудование: эксплуатация и ремонт. 2015. № 3. С. 24-28.
2. Шагидуллин, А.В. Расчет сопротивлений контактных соединений и потерь мощности автоматических выключателей / Е.И. Грачева, А.В. Шагидуллин, А.В. Рыбакова, А.Н. Хаерова // Главный энергетик. 2013. № 9. С. 23–27.
3. Кобленц, М.Г. Исследование электрической износостойкости силовых контактов / М.Г. Кобленц // Электрические контакты. – М.: Наука, 1967. С. 608-624.
4. Грачева, Е.И. Потери электроэнергии в низковольтных сетях: монография / Е.И. Грачева. – Казань: Казан. гос. энерг. ун-т, 2004. – 128 с.
5. Шагидуллин, А.В. Энергоэффективность мероприятий по экономии электроэнергии в низковольтных цеховых сетях / Е.И. Грачева, А.В. Шагидуллин // Надежность и безопасность энергетики. 2016. №1(32). С. 64-67.

УДК 621.314.22.08

Л.Э. Рогинская, Д.В. Гусаков

**ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ПАРАМЕТРЫ ТРЕХФАЗНОГО
ТРАНСФОРМАТОРА С ВИТЫМ МАГНИТОПРОВОДОМ**

Уфимский государственный авиационный технический университет

Рассмотрены преимущества и недостатки навитой магнитной системой. Определена система уравнений, описывающая электромагнитные процессы в трансформаторе с навитой магнитной системой. На основании системы уравнений разработана имитационная модель, определены форма и гармонический состав тока, напряжения и потока в трансформаторе с навитой магнитной системой.

In this paper advantages and disadvantages of a twisted magnetic circuit system are discussed. A system of equations describing the electromagnetic processes in a transformer with a wound magnetic system is defined. Based on the system of equations, an imitation model has been developed, the shape and harmonic composition of the current, voltage and flux in a transformer with a twisted magnetic system have been determined.

Ключевые слова: магнитопровод, трансформатор, навитая магнитная система.

Key words: Magnetic core, transformer, twisted magnet magnetic system.

В трансформаторе с витой магнитной системой (рис. 1) магнитный поток каждого стержня является геометрической разностью потоков двух витых колец. Например, поток фазы A можно представить в виде разности $\Phi_A = \Phi_1 - \Phi_3$. Поскольку три кольца этой магнитной системы навиваются отдельно, а для удобства сборки между ними должен соблюдаться небольшой технологический зазор, переход магнитного потока из одного кольца в другое затруднен и фактическая индукция в каждом кольце должна быть в 1,55 раза больше общей расчетной индукции в стержне [1].

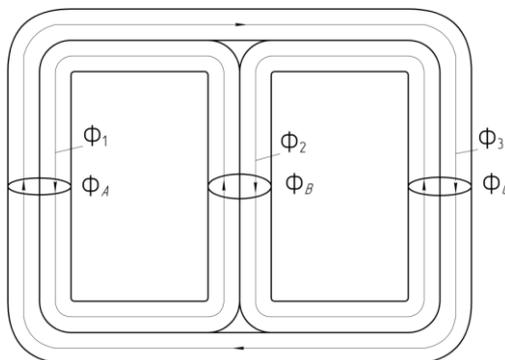


Рис. 1. Витой плоский ленточный магнитопровод

Витой ленточный магнитопровод для трехфазных трансформаторов характеризуется меньшей массой по сравнению с пластинчатым магнитопрово-

дом, меньшими габаритными размерами при той же мощности, более высоким КПД. При изготовлении трехфазных трансформаторов с использованием витого ленточного магнитопровода уменьшается расход провода, снижается трудоемкость при намотке и сборке трансформатора [2].

Витая конструкция за счет более равномерного распределения магнитного потока позволяет снизить массу магнитопровода и уменьшить потери холостого хода на 12 – 15 %. Конструкции ленточных магнитопроводов обеспечивают практически полную механизацию и частичную автоматизацию их изготовления и позволяют осуществить переход от стержня к ядру по кривой, совпадающей с направлением магнитного потока, т.е. наиболее полно использовать анизотропные свойства холоднокатаной электротехнической стали [3]. Ленточные магнитопроводы нашли самое широкое применение в трансформаторах малой и небольшой мощности, выпускаемых в массовом количестве. Применение сложного технологического оборудования, необходимого для изготовления трансформаторов с ленточными магнитопроводами, экономически оправдано.

Система уравнений для трансформатора с витым ленточным магнитопроводами:

$$\begin{cases} U_{AB} = i_A R_A + L_{\sigma A} \frac{di_A}{dt} + w_A \frac{d(\Phi_1 - \Phi_3)}{dt} - i_B R_B - L_{\sigma B} \frac{di_B}{dt} - w_B \frac{d(\Phi_2 - \Phi_1)}{dt}; \\ U_{BC} = i_B R_B + L_{\sigma B} \frac{di_B}{dt} + w_B \frac{d(\Phi_2 - \Phi_1)}{dt} - i_C R_C - L_{\sigma C} \frac{di_C}{dt} - w_C \frac{d(\Phi_3 - \Phi_2)}{dt}; \\ i_A w_A - i_C w_C = H_1 l_1; \\ i_B w_B - i_A w_A = H_2 l_2; \\ i_C w_C - i_B w_B = H_3 l_3; \\ i_A + i_B + i_C = 0. \end{cases} \quad (1)$$

где i_A, i_B, i_C – токи в первичной обмотке фаз A, B и C соответственно, A ; R_A, R_B, R_C – активные сопротивления первичной цепи фаз A, B и C соответственно, Ом; $L_{\sigma A}, L_{\sigma B}, L_{\sigma C}$ – индуктивные сопротивления рассеяния первичной цепи фаз A, B и C соответственно, Гн; w_A, w_B, w_C – числа витков первичной обмотки фаз A, B и C соответственно; Φ_1, Φ_2, Φ_3 – магнитные потоки в 1, 2 и 3 кольцах магнитопровода соответственно. H_1, H_2, H_3 – напряженности магнитного поля в 1, 2 и 3 кольцах магнитопровода трансформатора соответственно; l_1, l_2, l_3 – длины средних силовых магнитных линий в 1, 2 и 3 кольцах магнитопровода трансформатора соответственно.

На основании систем уравнений (1), в программном пакете *MatLab* создана имитационная модель намагничивания антирезонансного трансформатора напряжения (рис. 2) и представлены результаты моделирования (рис. 3).

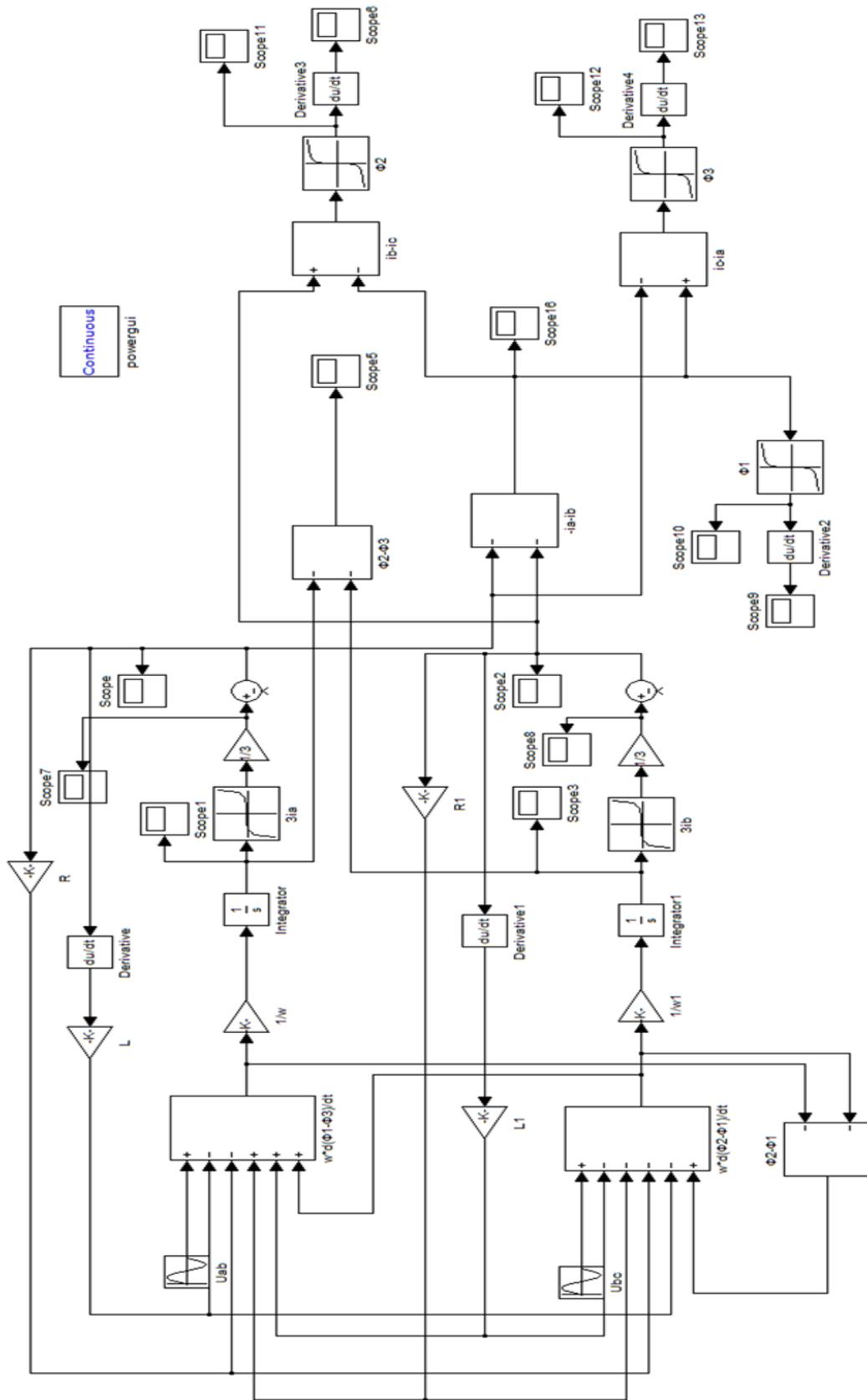


Рис. 2. Имитационная модель процесса намагничивания антирезонансного трансформатора напряжения

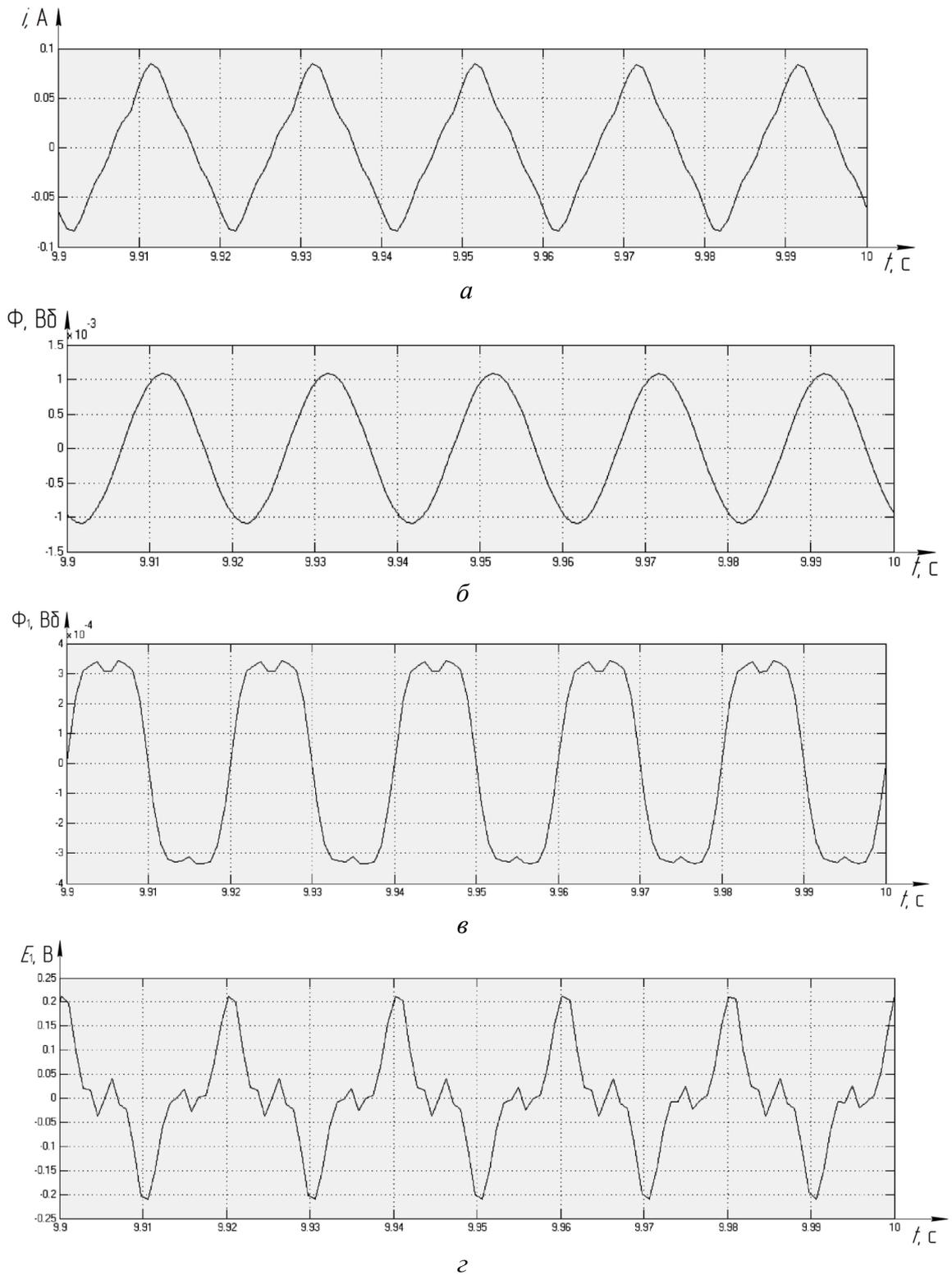


Рис. 3. Осциллограммы электромагнитных процессов в антирезонансном трансформаторе напряжения:
a – ток холостого хода; *б* – магнитный поток в стержне магнитопровода;
в – магнитный поток в кольце магнитопровода; *г* – ЭДС в кольце магнитопровода

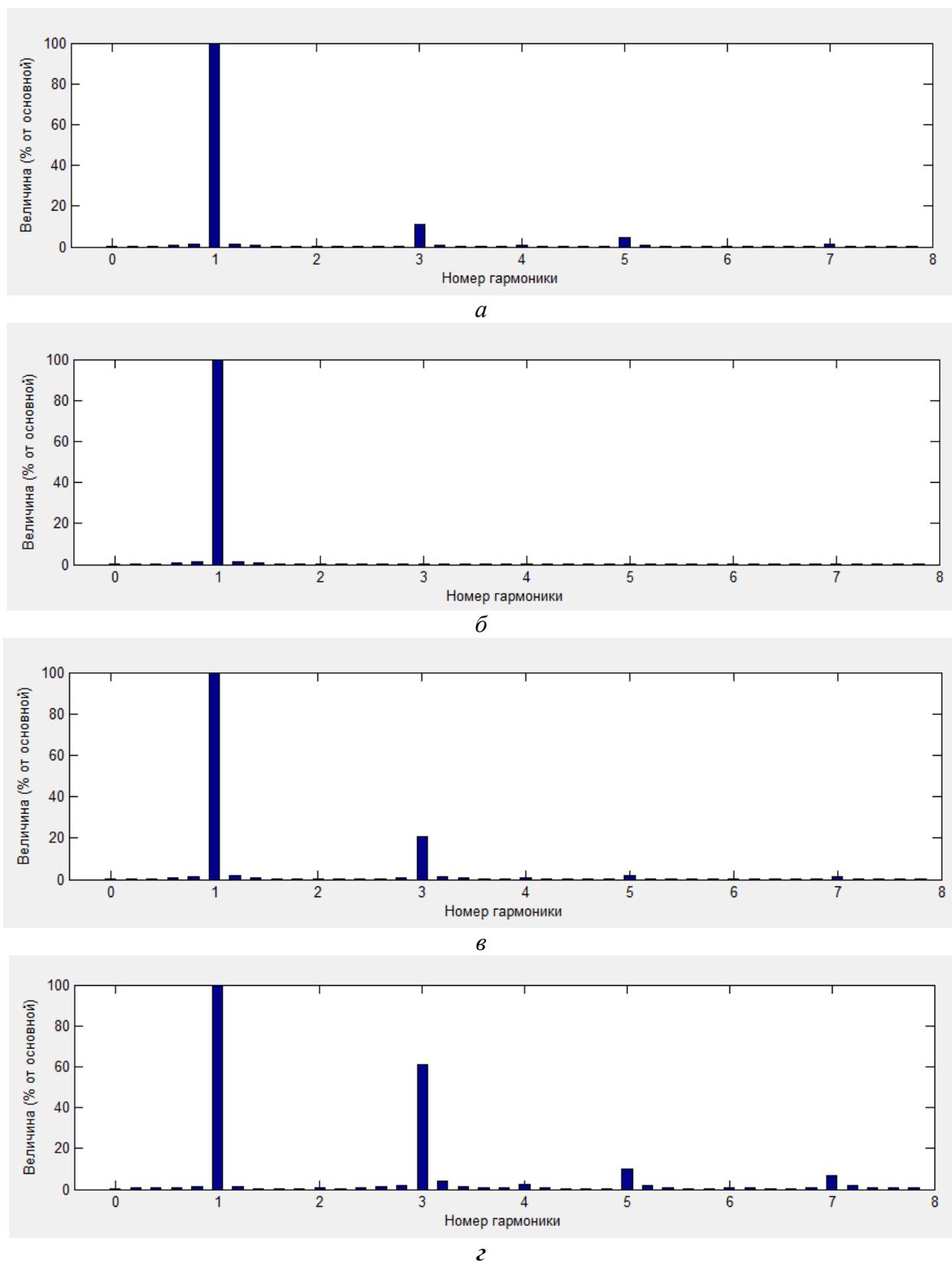


Рис. 4. Гармонический состав кривых, полученных при моделировании электромагнитных процессов в антирезонансном трансформаторе напряжения:

а – ток холостого хода; *б* – магнитный поток в стержне магнитопровода; *в* – магнитный поток в кольце магнитопровода; *г* – ЭДС в кольце магнитопровода

Как видим, кривая тока холостого хода трансформатора несинусоидальна, в гармоническом составе в незначительной степени присутствует третья, пятая и седьмая гармонические (рис. 4, *а*); магнитный поток в стержне трансформатора с витым ленточным магнитопроводом, создаваемый потоками в двух кольцах близок к синусоиде, изменяется с основной частотой (рис. 4, *б*). Магнитный поток в одном кольце имеет уплощенную форму, в гармоническом составе, помимо основной, присутствует третья гармоническая в размер 60 % от основной (рис. 4, *в*). Осциллограмма ЭДС, наводимой в обмотке, выполненной в одном кольце трансформатора с витым ленточным магнитопроводом, имеет заостренную форму, в гармоническом составе помимо основной, присутствует третья гармоническая в размер 20 % от основной (рис. 4, *г*).

Библиографический список

1. **Тихомиров, П. М.** Расчет трансформаторов / П. М. Тихомиров.-М.: Энергоатомиздат, 1986. – 528 с.
2. ООО «Комплект трансформатор». Производство и реализация магнитопровода [Электронный ресурс] URL: <http://www.glagolev.mk.ua/magnit.php> (дата обращения 30.03.2017).
3. **Сергеенков, Б. Н.** Электрические машины: Трансформаторы / Б. Н. Сергеенков, В. М. Киселев, Н. А. Акимова: учеб. пособие для электромех. спец. вузов; под ред. И.П. Копылова. – М.: Высш. шк., 1989. – 352 с.

УДК 621.316

А.А. Кралин, Е.В. Крюков

МОДЕЛИРОВАНИЕ ФАЗОПОВОРОТНОГО УСТРОЙСТВА С ПРОДОЛЬНОМ И ПОПЕРЕЧНЫМ РЕГУЛИРОВАНИЕМ В MATLAB SIMULINK

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Статья посвящена созданию в программе Matlab Simulink имитационных моделей фазоповоротного устройства (ФПУ) продольного и поперечного регулирования. Созданы модели одной фазы ФПУ, рассмотрены и проанализированы различные режимы регулирования потоков мощности в однофазной цепи. Разработанная модель одной фазы ФПУ может быть использована для создания модели трехфазного ФПУ. Данные модели позволяют исследовать энергетические показатели трансформаторов в динамических и статических режимах работы при различных способах регулирования.

The article deals with phase shifting device (PSD) simulation models creation with longitudinal and lateral control in Matlab Simulink. Simulation models of PSD phase were developed, various power flow regulating modes was conducted and analyzed. The developed model of PSD phase can be used to create model of three-phase PSD. These models allow to investigate the energy characteristics of transformers in dynamic and static modes of operation with different modes of regulation.

Ключевые слова: фазоповоротное устройство, трансформатор, схема, matlab simulink, продольное и поперечное регулирование, фаза.

Key words: phase shifting device, transformer, circuit, matlab simulink, longitudinal and transverse regulation, phase.

Одной из актуальных задач развития и эффективного функционирования современных электроэнергетических систем является обеспечение пропускной способности электрических сетей и их управляемости. Одним из способов увеличения пропускной способности линии является использование устройств, позволяющих изменять угол фазового сдвига между напряжениями в начале и в конце линии.

Актуальной задачей также является разработка и проектирование устройств регулирования и стабилизации параметров электроэнергии, обладающих высокими технико-экономическими показателями. Создание адекватных имитационных компьютерных моделей является неотъемлемой частью проектирования таких устройств.

Одним из таких устройств является фазоповоротное устройство (ФПУ), структурная схема которого представлена на рис. 1.

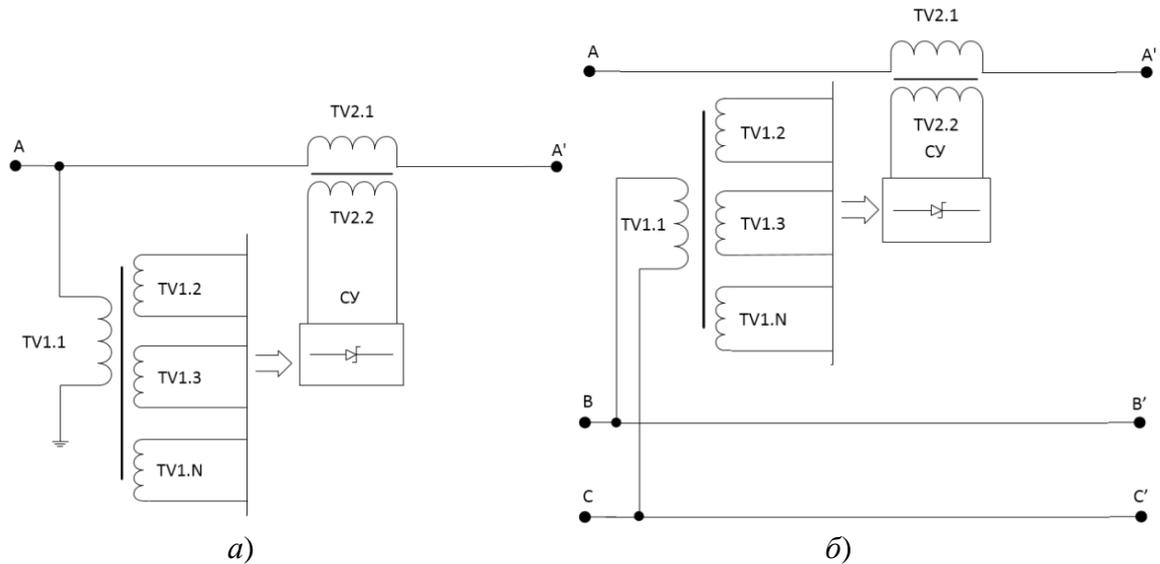


Рис. 1. Схемы ФПУ с продольным (а) и поперечным (б) регулированием напряжения

Схема ФПУ состоит из двух трансформаторов (регулируемого, который включается параллельно линии Т1, и серийного Т2, вторичная обмотка которого включается последовательно в линию), устанавливаемых в начале линии. При этом за счет схемы соединения обмоток, вектор напряжения на серийной обмотке направлен под углом 90 электрических градусов к фазному напряжению сети. Изменяя напряжение на серийной обмотке с помощью регулируемого трансформатора, можно осуществлять поворот вектора суммарного напряжения в начале сети.

Поскольку такое включение трансформаторов обеспечивает возможность произвольного формирования величины и угла напряжения, в такой схеме реализуется возможность гибкого регулирования потока мощности по линии.

Авторами разработаны имитационные компьютерные модели одной фазы ФПУ в программе *Matlab Simulink*. Для построения моделей были использованы типовые компоненты библиотеки *Powersys*.

На рис. 2 представлена модель ФПУ с продольным регулированием выходного напряжения (напряжение сети изменяется только по величине).

Схема состоит из двух трансформаторов – последовательного и параллельного. Регулирование величины выходного напряжения ФПУ происходит за счет изменения числа витков в обмотке параллельного трансформатора. Регулирование производится при изменении работы режимов тиристорных ключей, в результате чего достигается необходимая вольтодобавка напряжения.

Осциллограммы выходного напряжения ФПУ при поперечном регулировании представлены на рис. 3.

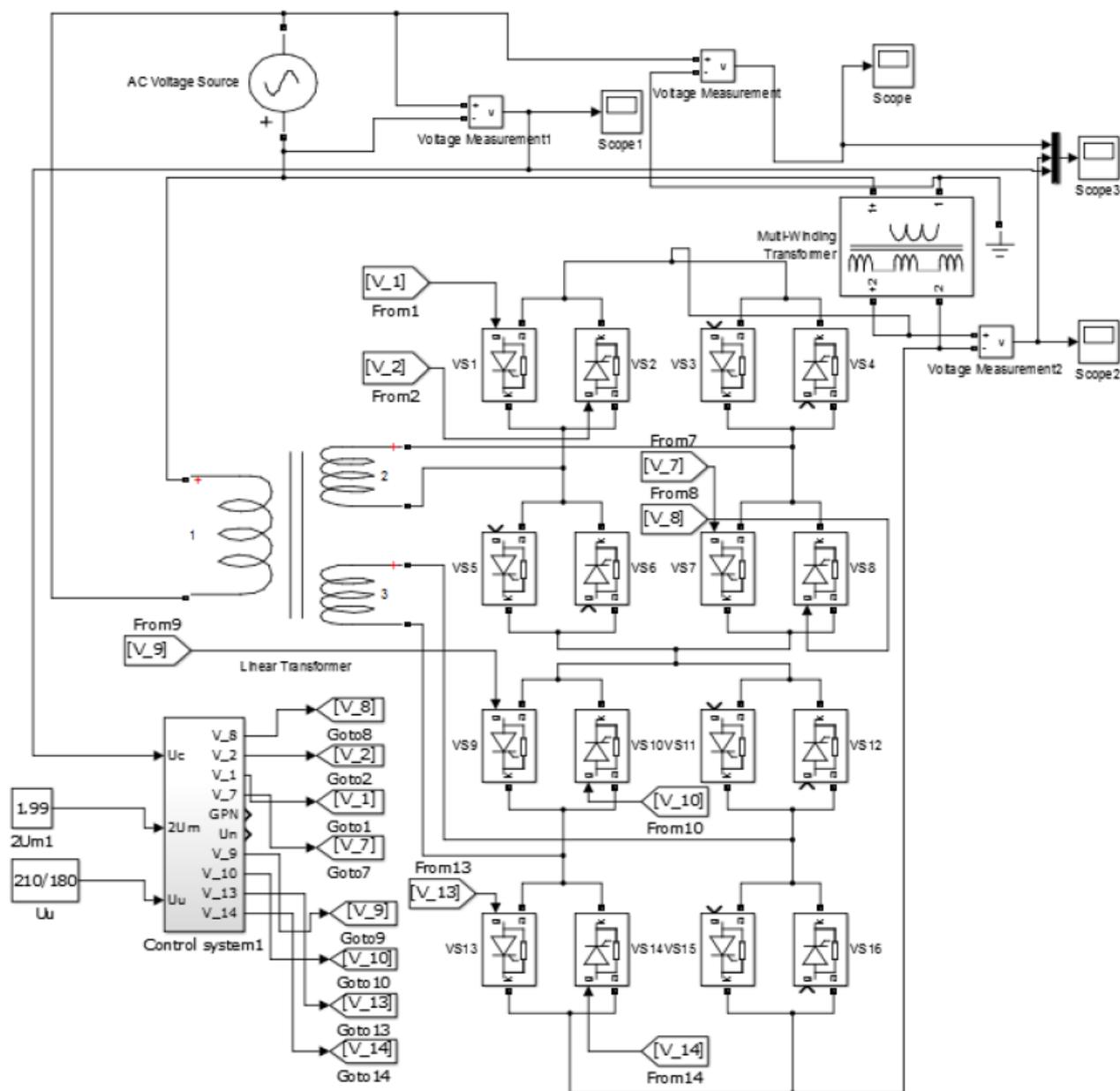


Рис. 2. Модель одной фазы ФПУ с продольным регулированием напряжения

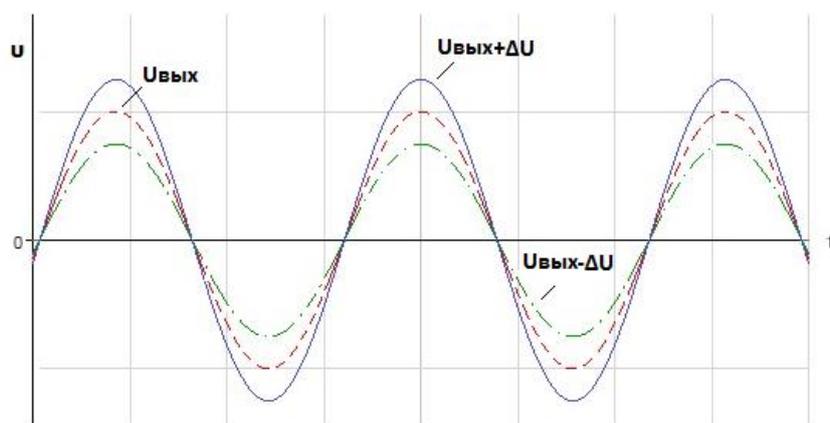


Рис. 3. Осциллограммы выходного напряжения ФПУ при продольном регулировании напряжения

Можно выделить несколько режимов работы тиристорных ключей:

1. Открыты тиристоры VS1, VS2, VS5, VS6, VS9, VS10, VS13 и VS14, при таком включении не происходит изменения значения выходного напряжения ФПУ относительно входного;

2. Открыты тиристоры VS1, VS2, VS7, VS8, VS9, VS10, VS13 и VS14, либо VS1, VS2, VS7, VS8, VS9, VS10, VS15 и VS16, при таких включениях происходит повышение выходного напряжения на величину напряжения регулирующей ступени. Переключение схемы в этот режим возможно при определенном соотношении напряжения и тока, необходимого для коммутации ключей;

3. Открыты тиристоры VS3, VS4, VS5, VS6, VS9, VS10, VS13 и VS14, либо VS3, VS4, VS5, VS5, VS11, VS12, VS13 и VS14, при таких включениях происходит уменьшение выходного напряжения на величину напряжения регулирующей ступени.

На рис. 4 представлена имитационная модель одной фазы ФПУ, позволяющая выполнять поперечное регулирование выходного напряжения (изменение фазы выходного напряжения). При этом фаза выходного напряжения может быть как опережающей, так и отстающей относительно входного напряжения.

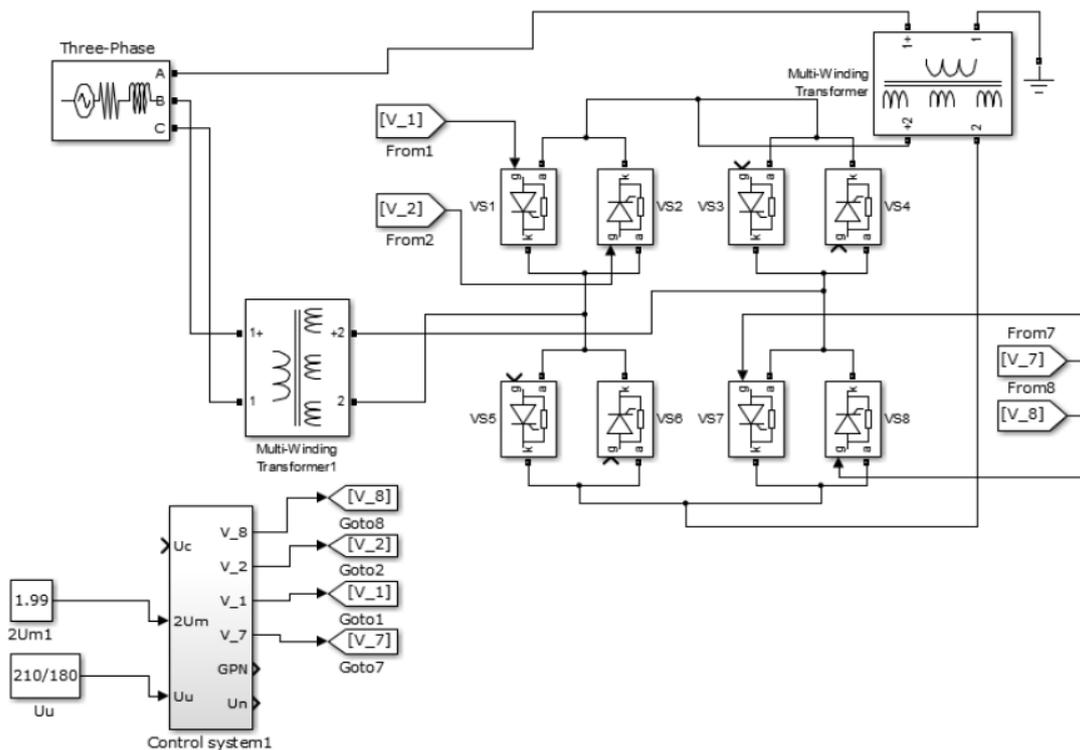


Рис. 4. Модель одной фазы ФПУ с поперечным регулированием

Регулирование производится за счет подключения обмотки возбуждения регулирующего трансформатора к линейному напряжению двух других фаз. В результате к фазному напряжению сети прибавляется (или вычитается) регулируемое напряжение, сдвинутое на угол 90° , и таким образом, линейное напряжение сети изменяет фазу, оставаясь неизменным по значению. Осциллограммы выходного напряжения ФПУ при поперечном регулировании представлены на рис. 5.

Аналогично с продольным регулированием возможны несколько режимов работы тиристорных ключей:

1. Открыты тиристоры VS1, VS2, VS5 и VS6, при таком включении форма выходного напряжения не отличается от формы входного, регулирование отсутствует;

2. Открыты тиристоры VS1, VS2, VS7 и VS8, при таком включении происходит введение в линию фазы одного инверсного напряжения ступени поперечного регулирования. Выходное напряжение будет отставать по фазе от входного на величину регулировочной ступени;

3. Открыты тиристоры VS3, VS4, VS5 и VS6, при таком включении происходит введение в линию фазы одной ступени поперечного регулирования. Выходное напряжение будет опережать входное по фазе на величину регулировочной ступени.

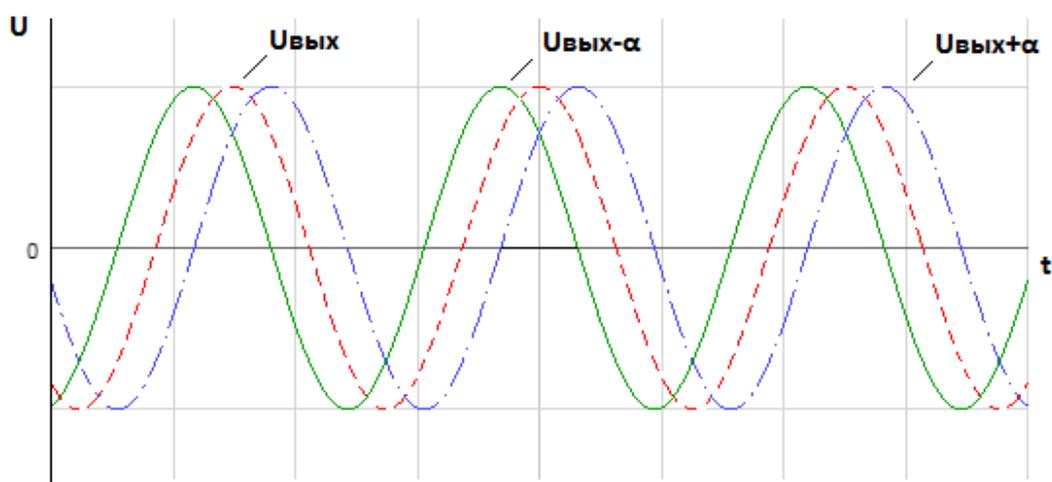


Рис. 5. Осциллограммы выходного напряжения ФПУ при поперечном регулировании

Разработанные модели одной фазы ФПУ могут быть использованы для создания трехфазных ФПУ. Данные модели позволяют исследовать энергетические показатели трансформаторов в динамических и статических режимах работы при различных способах регулирования.

Библиографический список

1. **Соснина, Е.Н.** Разработка имитационной модели параллельного трансформатора фазоповоротного устройства / Е.Н. Соснина, А.А. Кралин, А.А. Асабин // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. 2015. №2. С. 210-216.
2. **Алтунин, Б.Ю.** Исследование режимов работы нелинейного трехфазного трансформатора в пакете Simulink / Б.Ю. Алтунин, А.А. Кралин, В.В. Гуляев // Вестник волжской государственной академии водного транспорта. 2012. №32. С. 195-198.
3. **Кралин, А.А.** Моделирование трехстержневого трансформатора в SIMULINK / А.А. Кралин, М.П. Тюриков // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. 2015. №3. С. 238-242.

УДК 620.9

А.А. Севостьянов, Н.С. Маслова

АНАЛИЗ ДИНАМИКИ ИЗМЕНЕНИЯ ПОТЕРЬ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ И МЕРОПРИЯТИЙ ПО ИХ СНИЖЕНИЮ

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е.Алексеева

Рассмотрены потери электрической энергии и динамика их изменения как комплексная проблема. На основе баланса производства и потребления электрической энергии представлены наиболее актуальные технические и организационные мероприятия по снижению величины потерь с ранжированием по затратам и эффективности.

The article considers the losses of electric energy and the dynamics of their changes as a complex problem. On the basis of the balance of production and consumption of electrical energy, the most relevant technical and organizational measures are presented to reduce the magnitude of losses with ranking by cost and efficiency.

Ключевые слова: электроснабжение, электрическая сеть, энергия, потери, баланс.

Key words: power supply system, electric network, energy, losses, balance.

В последние годы практически повсеместно наблюдается рост отчетных потерь электрической энергии (ЭЭ). Избежать потерь ЭЭ не представляется возможным. При передаче от мест производства до мест потребления расходуется часть самой передаваемой ЭЭ, поэтому требуется определить экономически обоснованный уровень потерь [1].

Увеличение потерь ЭЭ в электрических сетях (ЭС) происходит за счет действия вполне объективных закономерностей, связанных с развитием энергетики. Основными из них являются: тенденция к концентрированному производству ЭЭ на крупных электростанциях; непрерывное увеличение нагрузок ЭС. Величина потерь ЭЭ является результатом экономичной работы системы электроснабжения (СЭС), эффективности работы энергоснабжающих организаций, состояния систем и приборов учета.

Расчеты технических потерь показывают, что наблюдающийся рост потерь ЭЭ до 15 %, а по некоторым районам до 25-40 % можно объяснить ростом коммерческой составляющей. Эта часть от суммарных потерь ЭЭ в среднем по энергосистеме достигает 30-50 % и имеет явную тенденцию к росту. Достаточно часто наличие коммерческих потерь объясняют хищениями ЭЭ. На самом деле около 50 % коммерческих потерь обусловлено моральным старением и погрешностями системы учета ЭЭ, не исключается и человеческий фактор, обусловленный зачастую низкой квалификацией персонала.

Для экономично-эффективной работы СЭС потери не должны превышать 5 % от отпуска ЭЭ в ЭС (нормально-допустимое значение). Потери, достигающие значения 10 % от отпуска ЭЭ в сеть, считаются максимальными.

По данным Росстата, структура потребления ЭЭ в России довольно стабильна. Баланс производства и потребления ЭЭ приведен в табл. 1 [2].

Таблица 1

Баланс производства и потребления ЭЭ, млрд. кВт-ч, 2005-2014 годы

	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014
Произведено электроэнергии	953	996	1015	1040	992	1038	1055	1069	1059	1064
Отпущено за пределы России	23	21	18	21	18	19	24	14	16	8
Получено из-за пределов России	10	5	6	3	3	2	10	8	11	9
Видимое потребление, в т. ч.:	941	980	1003	1023	977	1021	1041	1063	1055	1065
- городское и сельское население	109	113	116	117	121	127	131	137	141	146
- промышленность	497	534	558	570	533	554	568	574	565	561
- охота и лесное хозяйство	17	17	16	16	15	16	16	15	15	16
- строительство	10	10	11	12	11	11	12	12	12	13
- транспорт и связь	83	86	87	87	84	88	90	91	90	90
- оптовая и розничная торговля*								28	30	34
- другие виды экономической деятельности*	112	113	109	112	112	119	120	98	99	98
- потери в электросетях	113	108	105	109	101	105	105	107	102	107

* До 2011 года «оптовая и розничная торговля» входила в категорию «другие виды экономической деятельности».

На рис. 1 и 2 показано соотношение величины потребления ЭЭ (общее потребление, потребление промышленными предприятиями и городским и сельским населением) к потерям ЭЭ и соотношение процента потерь к проценту потребления ЭЭ соответственно. Из графиков видно, что потребление ЭЭ промышленными предприятиями достигает 52-57 %. На городское и сельское население приходится около 11,5-14 % от отпуска ЭЭ, что сопоставимо со значениями потерь ЭЭ сети (10-12 %). Следует отметить, что величина потерь достигает максимального значения или превышает его, что отражается на экономических показателях работы сети. Требуется уделить внимания таким вопросам, как поиск перспективных и эффективных путей для снижения потерь ЭЭ.

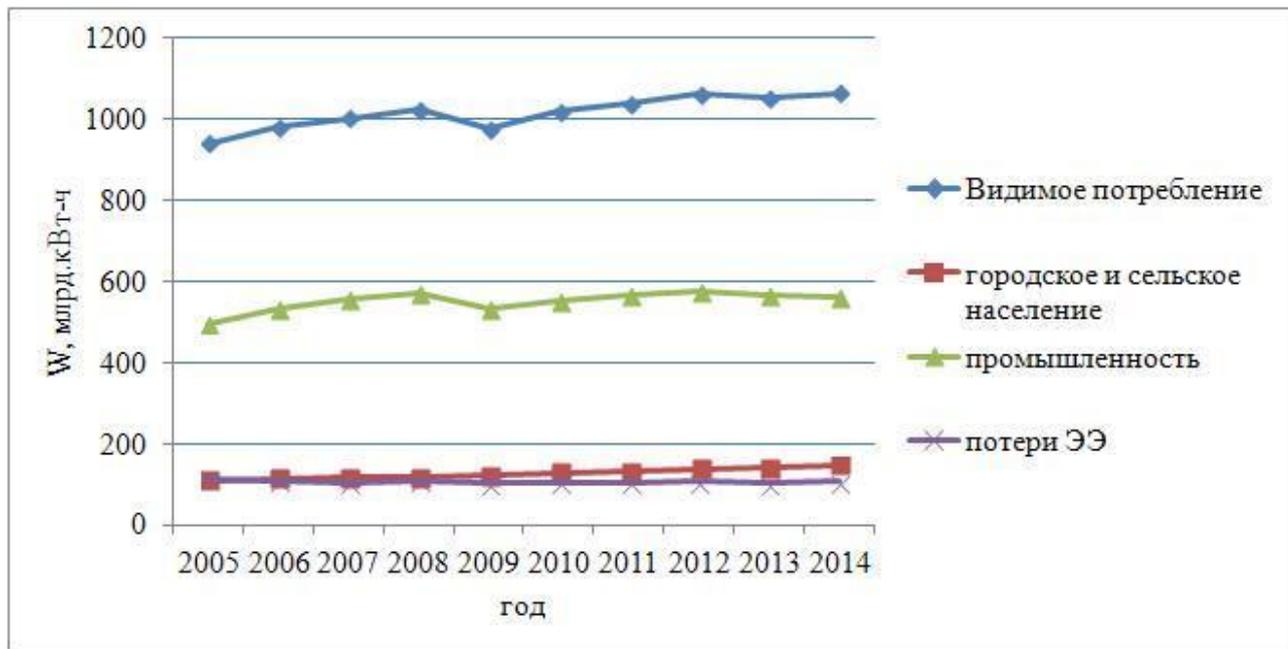


Рис. 1. Соотношение значений потребления ЭЭ к потерям (млрд. кВт-ч) по годам

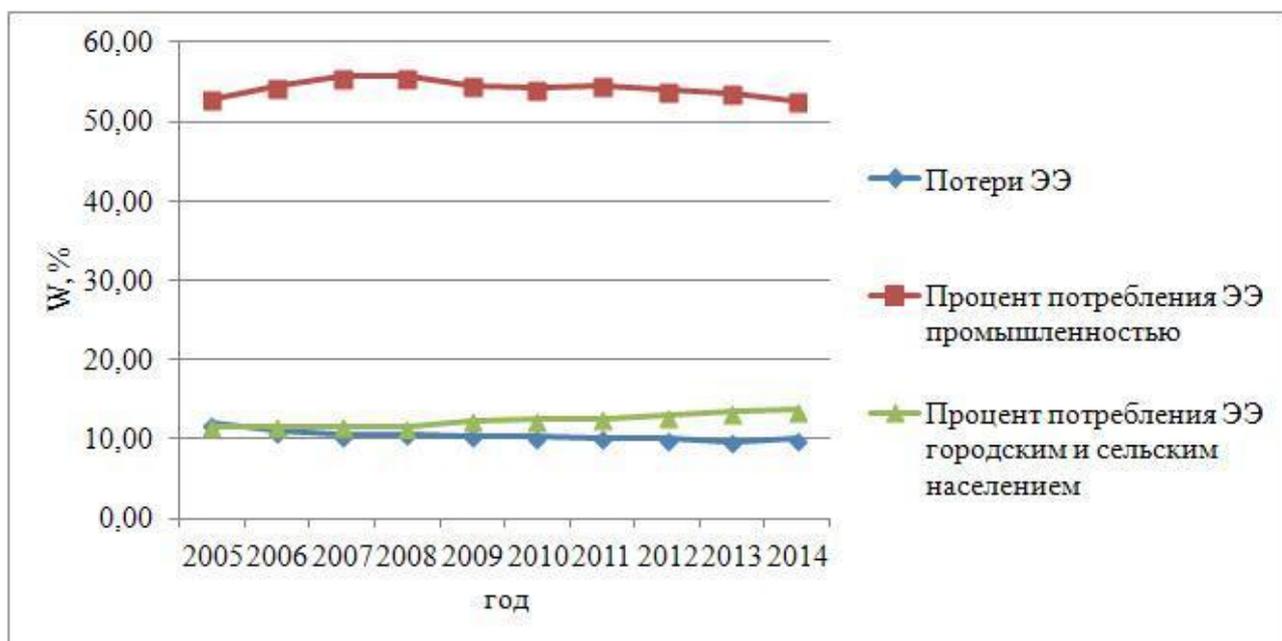


Рис. 2. Соотношение процента потребления к проценту потерь по годам

Технические мероприятия по снижению технологических потерь электрической энергии

Среднезатратные мероприятия:

- перестановка и (или) замена трансформаторов;
- выбор и замена проводов с большим сечением на перегруженных ВЛ и КЛ.

КЛ.

Организационные мероприятия по снижению технологических потерь электрической энергии

К общим рекомендациям относятся:

- составление балансов ЭЭ;
- выпуск организационно-распорядительных документов, устанавливающих ответственность подразделений за те или иные составляющие потери;
- стимулирование и поощрение персонала к снижению потерь;
- введение органа контроля за проведением работ по снижению потерь ЭЭ;
- повышение квалификации и обучение персонала.

Высокозатратные мероприятия:

- оптимизация схем и режимов СЭС;
- поэтапный переход к системам автоматизации и телемеханизации ЭС, применение программного обеспечения, широкое использование информационных технологий;
- выделение средств, для замены устаревшего оборудования на современное, его доставки и установки.

Технические мероприятия по снижению коммерческих потерь электрической энергии

Среднезатратные мероприятия:

- обеспечение работы приборов учета в допустимых условиях;
- применение электронных сканеров, позволяющих выявлять скрытую электропроводку.

Высокозатратные мероприятия:

- замена существующих приборов системы учета на приборы с улучшенными характеристиками;
- организация массового внедрения АСКУЭ и установка приборов учета со встроенным модемом для передачи данных.

Организационные мероприятия по снижению коммерческих потерь электрической энергии

К общим рекомендациям относятся:

- анализ балансов ЭЭ;
- штрафы и административно-уголовная ответственность за хищение электроэнергии;
- создание телефонов доверия.

Среднезатратные мероприятия:

- периодические проверки условий работы электросчетчиков у потребителей и выявление хищений ЭЭ;
- инструментальная проверка приборов учета;
- проверка отключенных потребителей;
- организация рейдов по обнаружению фактов хищения;
- выявление безучетного и бездоговорного потребления ЭЭ;
- стимулирование и материальное поощрение инспекторов и контролеров за выявление фактов хищения ЭЭ.

Необходимо учесть, что применение лишь комплекса мероприятий может позволить снизить потери ЭЭ [3]. Так, например, технические мероприятия по снижению технологических потерь эффективны лишь с применением организационных мероприятий. Организационные мероприятия по снижению коммерческой составляющей потерь следует применять совместно с техническими. Наиболее эффективным при реализации считается внедрение АСКУЭ и введение в работу систем учета с улучшенными характеристиками. Так же следует отметить, что автоматизация исключает человеческий фактор. В связи с преимущественным ростом коммерческой составляющей потерь над технологической, применение автоматизированных систем и приборов учета со встроенным модемом для передачи данных в режиме реального времени набирают большую популярность.

Рост потерь ЭЭ является маркером накопления проблем в СЭС. Снижение потерь ЭЭ – одно из важных направлений энергосбережения и нелегкая комплексная проблема, требующая разработку плана мероприятий по снижению потерь, поиск новых конструктивных решений, значительных капитальных вложений, необходимых для оптимизации развития СЭС, усовершенствование системы учета ЭЭ, применение новых информационных технологий в энерго-бытовой деятельности и управления режимами сетей.

Библиографический список

1. **Железко, Ю.С.** Расчет, анализ и нормирование потерь электрической энергии в электрических сетях: Руководство для практических расчетов / А.В. Артемьев, О.В. Савченко.-М.: НЦ ЭНАС, 2004. С. 7-20 и С. 99-102.
2. Федеральная служба государственной статистики [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://gks.ru> (дата обращения 20.03.2017).
3. **Воротницкий, В. Э.** Мероприятия по снижению потерь электроэнергии в электрических сетях энергоснабжающих организаций / В. Э. Воротницкий, М. А. Калинкина, В. Н. Апряткин // Энергосбережение, 2000. № 3. С. 53-56.

УДК 621.3.01

А.И. Гардин, А.Е. Логачев

УНИВЕРСАЛЬНЫЙ ЛАБОРАТОРНЫЙ СТЕНД «АВТОМАТИЗИРОВАННЫЕ СИСТЕМЫ КОНТРОЛЯ И УЧЕТА ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ»

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е.Алексеева

Разработан стенд, позволяющий исследовать автоматизированные системы контроля и учета электроэнергии (АСКУЭ) различных производителей. Рассмотрены причины возникновения АСКУЭ и их структура. Приведено описание блоков лабораторного стенда, используемых коммуникационных интерфейсов и программного обеспечения. Показаны схемы проводимых на лабораторном стенде опытов.

A new laboratory device has been designed. It allows to examine the activity of automatic meter reading systems (AMR) of different manufacturers. The article considers causes of AMR and their structures. There is a description of the units of device, their communication interfaces and software. The experiment schemes carried out on a laboratory device are shown.

Ключевые слова: автоматизированная система контроля и учета электроэнергии, лабораторный стенд, автоматизированный учет.

Key words: automatic meter reading, laboratory device, automated accounting.

С распадом плановой экономики в 1991 году закончилась эпоха практически неограниченных и дешевых энергоресурсов, когда их доля в себестоимости продукции составляла всего лишь несколько процентов. В 1992 году была организована оптовая торговля электрической энергией на Федеральном оптовом рынке электроэнергии и мощности (ФОРЭМ). В настоящее время правила оптового рынка утверждены в Федеральном законе №35 «Об электроэнергетике» от 26 марта 2003 года.

Федеральный закон РФ № 261 «Об энергосбережении» от 23.11.2009. обусловил кардинальное изменение отношения к организации энергоучета в промышленности и других энергоемких отраслях. В соответствии с ним как поставщики, так и потребители создавали на своих объектах автоматизированные системы контроля и учета электроэнергии – АСКУЭ.

АСКУЭ – это многоуровневая автоматизированная система учета электроэнергии, обеспечивающая автоматизированный сбор и передачу результатов измерений по физическим или беспроводным каналам связи на верхний уровень, с последующим ее хранением и использованием.

В общем случае АСКУЭ состоит из трех уровней.

Первый уровень – включает в себя счетчик электроэнергии, измерительные трансформаторы тока и напряжения, вторичные измерительные цепи. Этот комплекс оборудования называют измерительно-информационным комплексом

точки учета (ИИК ТУ). Данный уровень выполняет измерения параметров электропотребления в точке учета, регистрацию событий, их хранение в памяти электронного счетчика.

Второй уровень – включает в себя устройства сбора и передачи данных (УСПД) и каналобразующую аппаратуру. Этот комплекс называется информационно-вычислительным комплексом электроустановки (ИВКЭ). Здесь обеспечивается сбор и передача информации на третий уровень от нескольких ИИК, сквозной доступ от верхнего уровня непосредственно к ИИК ТУ. В некоторых версиях АСКУЭ второй уровень может быть совмещен с первым или третьим.

Третий уровень – включает в себя технические средства приема-передачи данных (каналобразующая аппаратура), сервер опроса и сервер баз данных, технические средства для организации локальной вычислительной сети и средства информационной безопасности. Оборудование, входящее в состав уровня, называют информационно-вычислительным комплексом (ИВК). Этот уровень обеспечивает автоматический сбор и хранение результатов измерений, диагностику состояния, подготовку отчетов, а также импорт-экспорт данных.

Система обеспечения единого времени (СОЕВ) формируется на верхнем уровне и выполняет функцию измерения времени, имеет нормированные метрологические характеристики и обеспечивает синхронизацию времени при проведении измерений количества электроэнергии с точностью не более $\pm 5,0$ с/сутки.

В настоящее время на кафедре «Электроэнергетики, электроснабжения и силовой электроники» (ЭССЭ) существует лабораторный стенд по изучению «Автоматизированной системы контроля и учета электроэнергии», выполненный на базе оборудования ООО «НПК «Инкотекс».

Лабораторный стенд представляет собой набор различных по своим функциям блоков, вставленных в раму специального лабораторного стола. Часть блоков представляет собой физические модели элементов электрической сети низкого напряжения, другая служит для измерения потребляемой электроэнергии. Часть блоков необходима для обработки, структурирования и передачи полученной информации. Антенна и SIM-карты являются готовыми покупными изделиями. Для передачи информации используются CAN-интерфейс, PLC и GSM. Общее число блоков составляет четырнадцать штук.

На рис. 1 изображена структурная схема стенда.

На рис. 2 изображена принципиальная электрическая схема лабораторного стенда. В качестве программного обеспечения (ПО) для опроса счетчиков используются две программы «Конфигуратор счетчиков Меркурий» и «BQuark».

«Конфигуратор счетчиков Меркурий» предназначен для опроса счетчиков по интерфейсу RS-485, CAN и по GSM. Эта программа позволяет связываться, получать или передавать информацию непосредственно от каждого счетчика «Меркурий». Такую процедуру нужно проделывать с каждым счетчиком, входящим в систему АСКУЭ.

Программа «BQuark» предназначена для использования в качестве рабочего места оператора учёта в составе АСКУЭ «Меркурий-PLC-I/II». Сбор данных происходит в соответствии с файлом задания, который записывает оператор учёта. Файл задания представляет собой текстовый файл с расширением *.dat, содержащий: описание структуры аппаратных компонентов опрашиваемой АСКУЭ; настройки пользовательского интерфейса; тип данных, которые необходимо получить от концентраторов; протокол последнего сеанса работы программы.

Выводы

1. Лабораторный стенд «АСКУЭ» является универсальным, потому что может дополняться техническими и программными средствами других производителей.
2. Для связи со счетчиками электроэнергии других производителей используется интерфейс RS-485, потому что он является наиболее распространенным и в составе стенда есть специальный преобразователь данного интерфейса в USB.
3. Лабораторный стенд «АСКУЭ» и внедрение его в учебный процесс обеспечивает возможность получения магистрантами сведений об одной из систем автоматизации и управления электроснабжением, принципах ее построения, аппаратной и программной базе.

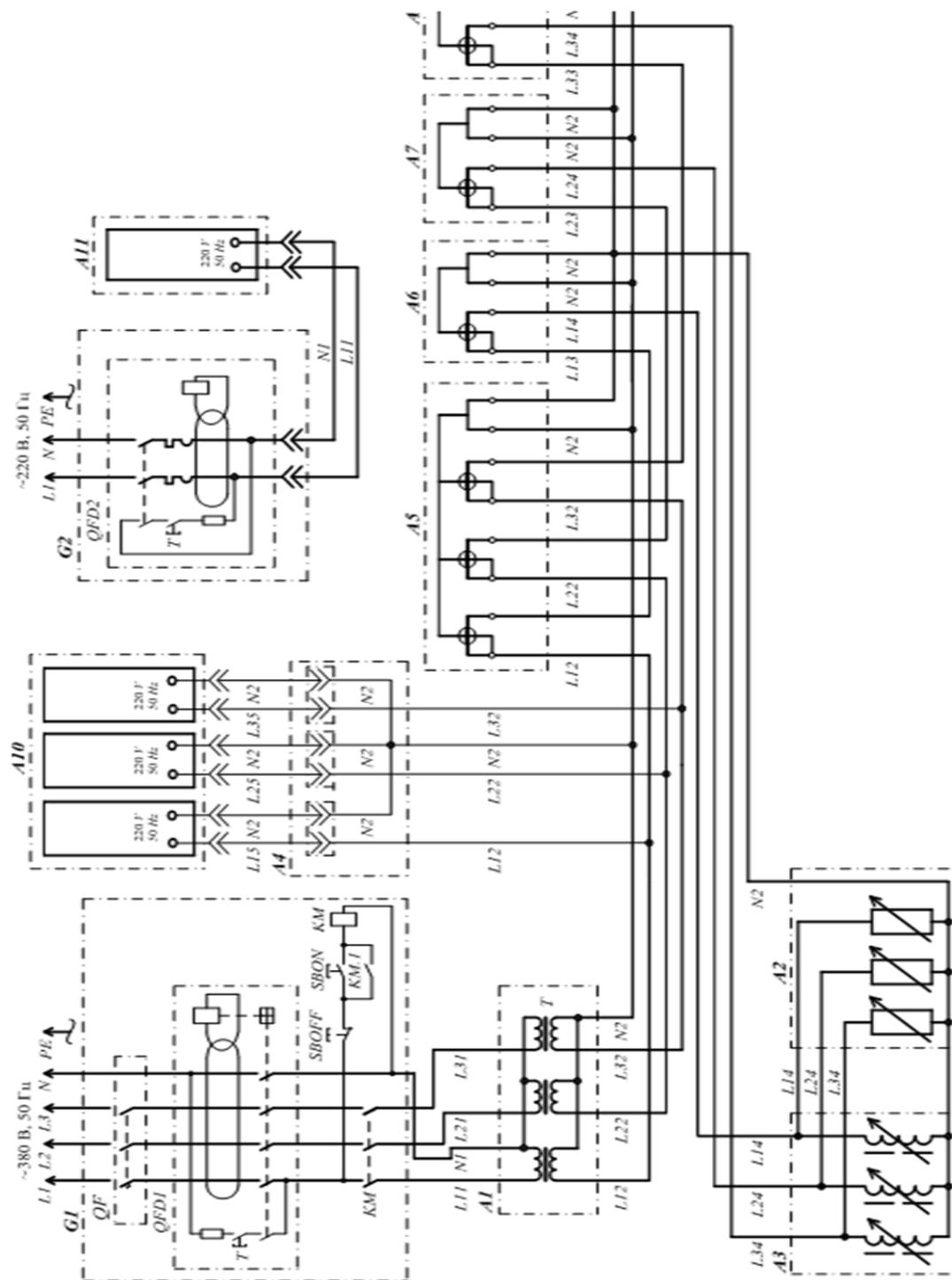


Рис. 2. Электрическая принципиальная схема блоков лабораторного стенда «Автоматизированная система контроля и учета электроэнергии»

Библиографический список

1. Правила учета электрической энергии: утв. Минтопэнерго РФ и Минстроем РФ 19, 26 сентября 1996 г. // информационно-правовое обеспечение «Гарант» - URL: <http://base.garant.ru/136707/> (дата обращения 15.10.2016).
2. Об электроэнергетике: Федеральный закон от 26 марта 2003 г. №35-ФЗ // Консорциум кодекс: электронный фонд правовой и нормативно-технической документации – URL: <http://docs.cntd.ru/document/901856089> (дата обращения 15.10.2016).
3. Об энергосбережении: Федеральный закон от 23 ноября 2009 г. №261-ФЗ // Консорциум кодекс: электронный фонд правовой и нормативно-технической документации – URL: <http://docs.cntd.ru/document/902186281> (дата обращения 15.10.2016).
4. **Вагин, Г.Я.** Учет энергоресурсов: комплекс учебно-методических материалов / Г.Я. Вагин, А.М. Мамонов; НГТУ им. Р.Е. Алексеева. Нижний Новгород, 2014. – 107 с.
5. **Еремина, М.А.** Развитие автоматизированных систем коммерческого учета энергоресурсов (АСКУЭ) // Молодой ученый. 2015. №3. С. 135-138.

УДК 621.3.01

А.И. Гардин, И.А. Савельев**ИССЛЕДОВАНИЕ РАБОТЫ ФАЗОПОВОРОТНЫХ УСТРОЙСТВ
В ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЯХ СРЕДНЕГО НАПРЯЖЕНИЯ**

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Исследована работа фазоповоротного устройства в электрических сетях среднего напряжения, а именно: оптимизация величины поперечной составляющей напряжения фазоповоротного устройства по критерию максимума КПД передачи мощности. Сделаны выводы об положительных изменениях наблюдаемых в распределительных сетях при применении ФПУ.

The work of the phase-rotation device in medium-voltage electrical networks was studied. The optimization of the value of the transverse component of the voltage of the phase-gate device by the criterion of the maximum efficiency of power transmission is investigated. Conclusions are made about the positive changes observed in distribution networks when using FPA.

Ключевые слова: электрические сети среднего напряжения, фазоповоротное устройство.

Key words: medium voltage electrical networks, phase-reversing device.

Развитие электроэнергетики предполагает не только строительство новых линий электропередачи, но и повышение управляемости электрических сетей путем применения специализированных технических средств. Это позволяет повысить пропускную способность электрических сетей, надежность и экономичность их работы.

Вопросы практической реализации управляемых линий переменного тока в последние годы находят все большее распространение. Статические компенсаторы, объединенные регуляторы перетоков мощности и фазоповоротные устройства (ФПУ) успешно работают в электросетевых компаниях различных стран мира. В России на данный момент нет опыта применения ФПУ в электрических сетях среднего напряжения, но активно ведутся разработки и создаются проекты по их внедрению и использованию.

Данное исследование выполнялось на модели радиальных электрических сетей при параллельном питании нагрузки посредством двух линий с различными параметрами. Предложен алгоритм оптимизации величины поперечной составляющей напряжения ФПУ по критерию максимума КПД передачи мощности.

В качестве имитационной модели взят участок электрической распределительной сети 10кВ в виде двух параллельных ЛЭП (кабельной и воздушной), по которым осуществляется передача электрической мощности от генераторов энергосистемы. Принципиальная расчетная схема сети приведена на рис. 1, ФПУ размещено в конце воздушной линии.

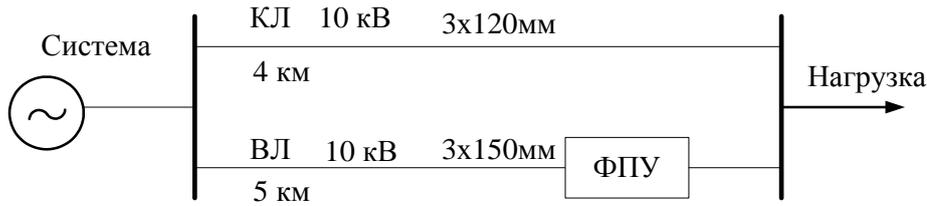


Рис. 1. Расчетная схема электрической сети для проверки возможности перераспределения транспортных потоков при помощи фазоворотных устройств

Схема замещения трехфазной электрической сети представляется в виде однофазной схемы замещения, исходя из условия равенства нагрузок и сопротивлений элементов сети по фазам, и приведена на рис. 2.

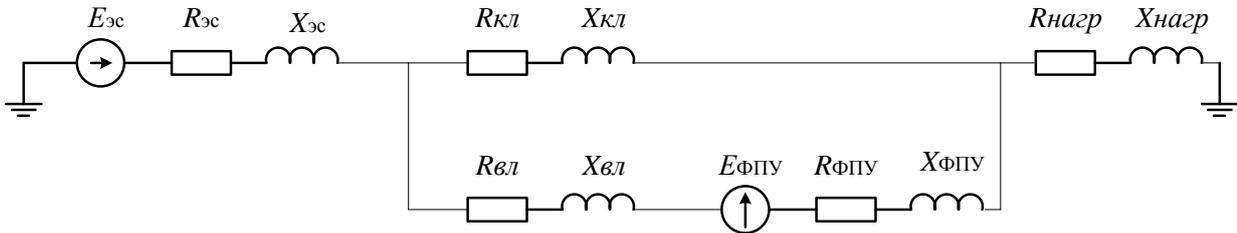


Рис. 2. Схема замещения электрической сети для проверки возможности перераспределения потоков активной мощности при помощи фазоворотных устройств

Расчет токов и падений напряжения на элементах схемы, а также напряжений в узлах схемы осуществлен по методу узловых потенциалов в комплексной форме и реализован в программном комплексе.

Исследуется распределение токов и потоков активной и реактивной мощности, падения напряжения, КПД передачи для двух параллельных линий при изменении действующего значения поперечной составляющей напряжения ФПУ. Первая линия является кабельной, а вторая – воздушной. ФПУ установлено во второй линии. Расчетная модель приведена на рис. 3. Результаты расчета показаны для реального ФПУ в пассивном состоянии (без регулирования величины и фазы напряжения): $G1$ – модель источника с действующим фазным напряжением 6,062 кВ; $L1$ – модель кабельной линии (КЛ) электропередачи; $L2$ – модель воздушной линии (ВЛ) электропередачи; $H1$ – модель трехфазной нагрузки мощностью 5 МВт при номинальном линейном напряжении 10 кВ (фазное напряжение -5,774 кВ), активное сопротивление 20 Ом.

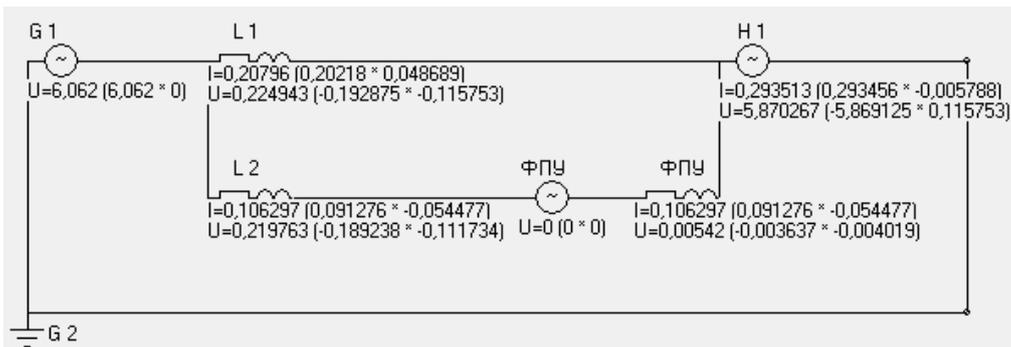


Рис. 3. Естественное распределение токов по двум параллельным линиям с ФПУ в пассивном состоянии

Номинальный рабочий ток нагрузки $I_p = \frac{U_\phi}{Z_\phi} = \frac{5,774}{20} = 288,7$ А обеспечивает номинальную мощность фазы трехфазной системы в размере $P_H = \frac{U_\phi^2}{R_H} = \frac{5,774^2}{20} = 1,667$ МВт. Номинальная мощность трехфазной нагрузки составит $3 \cdot 1,667 = 5$ МВт.

По рабочему току выбираются следующие параметры линий электропередач.

Линия $L1$ - кабель с бумажной пропитанной изоляцией сечением $1 \times (3 \times 120)$ с алюминиевой жилой, длительно допустимый ток $I_{\text{до}} = 185$ А удельные активное $r_0 = 0,258$ Ом/км и индуктивное $x_0 = 0,081$ Ом/км. Степень неоднородности $\xi = 0,31$. Длина первой линии $L1$ 4 км, полное Z , активное R и индуктивное X сопротивление составляют: $Z = 1,082$ Ом, $R = 1,032$ Ом и $X = 0,324$ Ом.

Линия $L2$ - воздушная линия, выполненная проводом АС $1 \times (3 \times 150)$ с алюминиевой жилой, длительно допустимый ток $I_{\text{до}} = 440$ А удельные активное $r_0 = 0,198$ Ом/км и индуктивное $x_0 = 0,362$ Ом/км. Степень неоднородности $\xi = 1,83$. Длина второй линии $L2$ 5 км, полное Z , активное R и индуктивное X сопротивление составляют: $Z = 2,067$ Ом, $R = 0,99$ Ом и $X = 1,815$ Ом.

Параметры элементов схемы замещения сведены в табл. 1. Полное сопротивление ВЛ превышает сопротивление КЛ, но активное сопротивление у ВЛ несколько ниже чем у КЛ. Отличие в степени неоднородности линий составляет $1,83/0,31 = 5,9$. Без регулирования КЛ перегружена по току, а ВЛ недогружена по току.

Таблица 1

Параметры элементов схемы замещения

Наименование элемента	U , кВ	φ , °	R , Ом	X , Ом	ξ
Источник $G1$	6,062	0	1E-10	0	-
Кабельная линия $L1$, 4 км	-	-	1,032	0,324	0,31
Воздушная линия $L2$, 5 км	-	-	0,99	1,815	1,83
ФПУ, $G3$	см. табл. 2	90	0,01	0,05	-
Нагрузка, $H1$	-	-	20	0	-

Результаты расчета при изменении действующего значения поперечной составляющей напряжения ФПУ приведены в табл. 2. В табл. 3 представлены результаты расчета КПД передачи электроэнергии.

Динамика изменения параметров режима работы сети представлена на рис. 4.

Таблица 2

Расчетные величины для нормального режима электропередачи при различном значении напряжения ФПУ

Параметры $U_{ФПУ}$		Ток КЛ, I_1		K_{31}	Ток ВЛ, I_2		K_{32}	I_n		U_2	
кВ	град	кА	град		кА	град		кА	град	кВ	град
0	-90	0,208	13,540	1,124	0,106	-30,83	0,242	0,294	-1,130	5,870	178,870
0,05	-90	0,194	11,275	1,048	0,112	-22,46	0,255	0,294	-0,981	5,879	179,019
0,1	-90	0,180	8,658	0,973	0,121	-15,09	0,274	0,294	-0,833	5,888	179,167
0,15	-90	0,167	5,616	0,901	0,130	-8,749	0,296	0,295	-0,686	5,897	179,314
0,2	-90	0,154	2,055	0,832	0,142	-3,356	0,322	0,295	-0,539	5,905	179,461
0,225	-90	0,148	0,047	0,799	0,148	-0,978	0,336	0,295	-0,465	5,910	179,535
0,25	-90	0,142	-2,131	0,766	0,154	1,209	0,350	0,296	-0,392	5,914	179,608
0,30	-90	0,131	-7,067	0,706	0,167	5,077	0,380	0,296	-0,246	5,923	179,754

Примечание к таблице: I_1, I_2, I_n – токи в ветвях, соответственно в КЛ, ВЛ, в нагрузке; K_3 – коэффициент загрузки по току $=I/I_{до}$; U_2 – фазное напряжение на нагрузке.

Таблица 3

Расчетные величины КПД передачи электроэнергии (КПД= $\Delta P/P_n$)

$U_{ФПУ}$, кВ	№ схемы	Расчетные величины		
		P_n , кВт	ΔP , кВт	КПД, %
0	1	1723,001	55,930	96,856
0,05	2	1728,117	51,392	97,112
0,1	3	1733,263	47,977	97,307
0,15	4	1738,440	45,687	97,439
0,2	5	1743,648	44,520	97,510
0,225	6	1746,263	44,359	97,523
0,25	7	1748,886	44,478	97,520
0,3	8	1754,155	45,559	97,469

ΔP – суммарные потери мощности в КЛ и ВЛ; P_n – мощность нагрузки.

При достижении поперечной составляющей напряжения ФПУ 225 В, достигается максимум КПД передачи электроэнергии, мощности, передаваемые по линиям, выравниваются, ВЛ загружается по мощности, а КЛ разгружается.

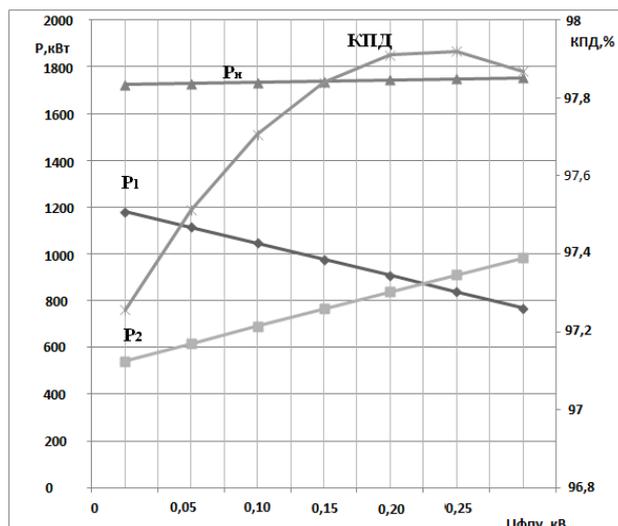


Рис. 4. Зависимость мощности передаваемой по кабельной линии (P_1), воздушной линии (P_2), мощности нагрузки (P_n) и КПД передачи от величины действующего значения поперечной составляющей напряжения реального ФПУ

При регулировании потоков мощности с использованием ФПУ по критерию максимума КПД передачи за счет изменения (увеличения) действующего значения поперечной составляющей напряжения ФПУ наблюдаются следующие процессы:

А. Поток активной мощности, передаваемый по кабельной линии, уменьшается, а по воздушной линии увеличивается (при действующем значении напряжения ФПУ 225 В, потоки мощности, передаваемые по линиям, становятся равными);

Б. КПД передачи мощности увеличивается и достигает максимума при действующем значении поперечной составляющей напряжения ФПУ - 225 В и углу регулирования ФПУ равным 90^0 ;

В. Коэффициент загрузки кабельной линии уменьшается и ток, протекающий по этой линии, становится меньше длительно допустимого тока кабеля, а ток воздушной линии увеличивается, при этом наиболее полно используется сечение воздушной линии;

Г. Улучшается режим напряжения на нагрузке и мощность нагрузки повышается.

Оптимальное значение поперечной составляющей напряжения ФПУ при активной нагрузке равно 225 В, что составляет 3,71 % от фазного напряжения источника энергосистемы (6,062 кВ).

Библиографический список

1. Фазоповоротные устройства // ФСК ЕЭС - URL: http://www.fsk-ees.ru/innovation/intelligent_network/new_types_of_power_equipment_of_substations_and_overhead_power_lines/fazopovorotnye_unit_fpu (дата обращения 20.02.2017)
2. Евдокунин, Г.А. Фазоповоротный трансформатор. Впервые в СНГ применен в Казахстане / Г.А. Евдокунин // Новости электротехники. 2007. №6.

УДК 621.3.01

А.И.Гардин, И.А. Савельев

УНИВЕРСАЛЬНЫЙ ЛАБОРАТОРНЫЙ СТЕНД «УЧЕТ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ»

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Разработан стенд, обеспечивающий учет электрической энергии. Приведено описание блоков лабораторного стенда и особенности их работы с подробным описанием элементной базы. Показаны схемы проводимых на лабораторном стенде опытов. Сформулированы возможные негативные последствия при неправильном соединении схем.

A stand was developed that provides for the calculation of electrical energy. The description of the laboratory stand blocks and the features of their work with a detailed description of the element base are given. The schemes of the experiments carried out on the laboratory bench are shown. Possible negative consequences are formulated with incorrect connection of circuits.

Ключевые слова: счетчик электрической энергии, лабораторный стенд.

Key words: electric energy meter, laboratory stand.

Эпоха дешевых и неограниченных ресурсов закончилась вместе с распадом СССР. Начался переход от административно-плановой экономики к рыночной системе хозяйствования. Вместе с удорожанием энергоресурсов наступил экономически целесообразный предел их потребления в рамках исторически сложившихся технологий для каждого предприятия. Фактор высокой стоимости обусловил кардинальное изменение отношения к организации энергоучета в промышленности и других энергоемких отраслях.

Основные требования к обеспечению учета используемых энергетических ресурсов и применению соответствующих приборов для расчетов за энергетические ресурсы сформулированы в ст. 13 Федерального закона РФ № 261-ФЗ «Об энергосбережении и о повышении энергетической эффективности и о внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации», а также в соответствии с «Правилами учета электрической энергии» утв. Минтопэнерго и Минстроем РФ 26 сентября 1996 года.

В современном мире измерения в системах электроснабжения, а также учет выработанной и израсходованной электроэнергии является важной частью хозяйственной деятельности любого объекта. Для рационального и экономичного потребления энергоресурсов требования к правильной организации и точности учета электроэнергии все более возрастают, что в свою очередь вызывает необходимость изучения студентами технических специальностей различных средств измерения, приборов учета электрической энергии и схем их включения.

Без организации должной системы достоверного учета поступившей в электрические сети, отпущенной из сетей и полезно потребленной электроэнергии невозможно рассчитать балансы электроэнергии по сети в целом и ступеням напряжения, технические и фактические потери электроэнергии, а также выявить места очагов потерь для выработки мероприятий по снижению потерь.

Круг вопросов, рассматриваемых при выполнении работ на данном стенде, очень широк. Необходимо знание типовых схем включения счетчиков и способов их проверки. Чтобы обеспечить точность учета и надежность работы устройств учета, необходимо знать и выполнять существующие требования к выбору измерительных трансформаторов тока и напряжения, а также схем их включения, устройству вторичных цепей, установке счетчиков. В настоящее время в качестве приборов учета электроэнергии используются индукционные и электронные счетчики.

Разработан стенд, который обеспечивает проведение учета электрической энергии, проверки схем включения счетчиков электрической энергии, а также позволяет моделировать ряд схем хищения электрической энергии. Физическая модель электрической нагрузки обеспечивает возможность регулирования с различной степенью неравномерности по фазам электрической сети, а также с различным характером этой нагрузки. Стенд обеспечивает измерение активной, реактивной и полной электрической энергии, а также моделирование типичных схем хищения электрической энергии.

Лабораторный стенд представляет собой набор различных по своим функциям блоков, вставленных в раму специального лабораторного стола, их расположение показано на рис. 1. Часть модулей представляет собой физические модели элементов электрической сети среднего и низкого напряжения, другая часть служит для учета электрической энергии.

Общее число блоков составляет семнадцать штук. В соответствии с электрической схемой лабораторного опыта, блоки соединяются между собой проводниками, которые находятся в ящиках лабораторного стола. Рассмотрим основные функциональные блоки стенда, которые изображены на рис. 1.

Блок G1 является трехфазным источником питания стенда. Его назначение состоит в том, чтобы обеспечивать питанием трехфазным переменным током промышленной частоты функциональных блоков лабораторного стенда.

Блок A1 представляет собой физическую модель активной нагрузки.

Блоки A2, A3, A4 представляет собой три трансформатора тока, каждый из которых может быть подключен к одной рабочей фазе. Они предназначены для измерений, т.е. к вторичной обмотке трансформатора тока для измерений подключаются амперметры, токовые обмотки ваттметров, счетчиков и аналоговых приборов. Таким образом, трансформатор тока для измерений обеспечивает преобразование переменного тока любого значения в переменный ток, приемлемый по значению для непосредственного измерения с помощью стандартных измерительных приборов.

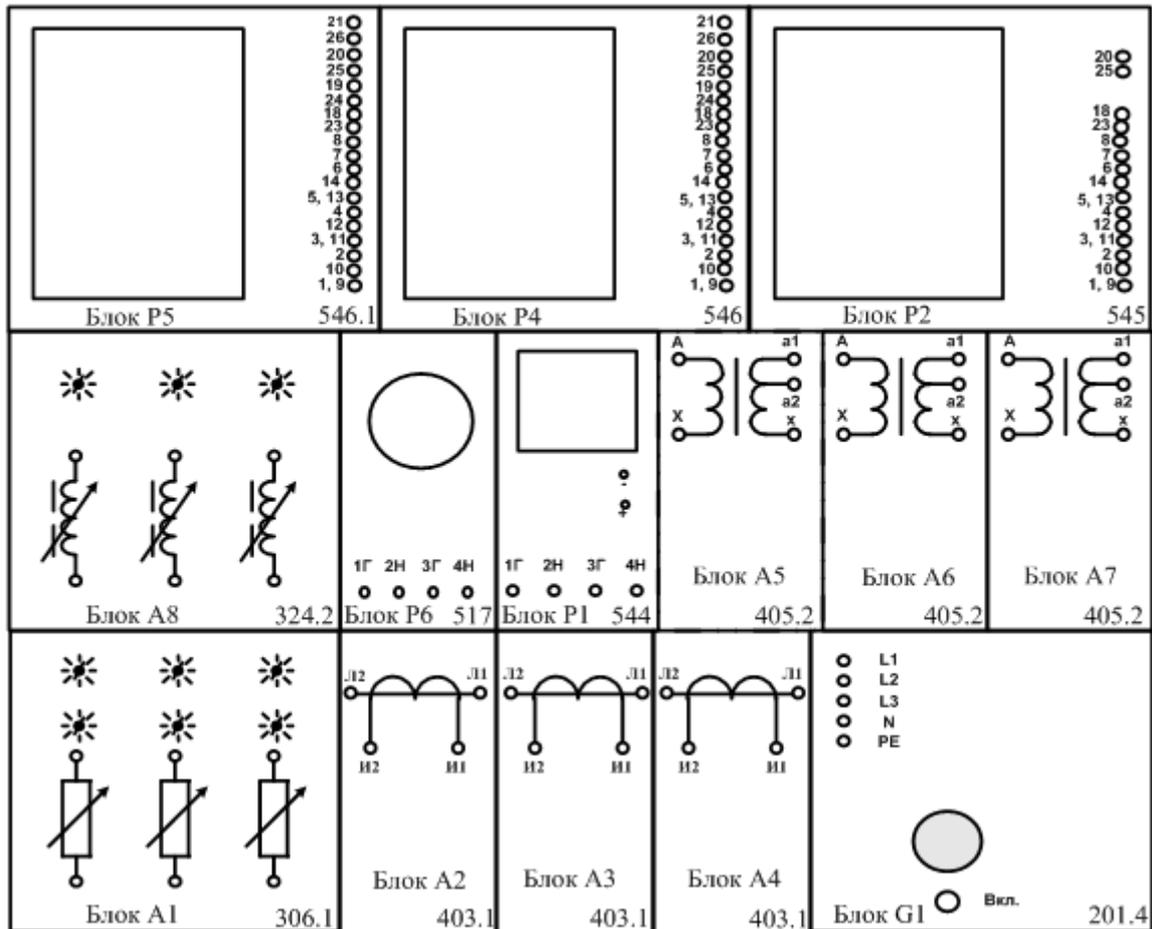


Рис. 1. Расположение функциональных блоков стенда в раме лабораторного стола

Блоки А5, А6, А7 представляет собой трансформаторы напряжения. Измерительные трансформаторы напряжения применяют для питания обмоток напряжения измерительных приборов.

Блок А8 представляет собой физическую модель индуктивной нагрузки.

Блок А9 представляет собой однофазный трансформатор.

Блок А10 представляет собой миниблок резисторов.

Блок Р1 представляет собой однофазный однотарифный счетчик активной электрической энергии Меркурий 203.1. Счетчик предназначен для учета активной электрической энергии в сетях 230 В. Импульсный выход позволяет использовать счетчик как автономно, так и в системе АСКУЭ, допускающей приём учётной информации в импульсах телеметрии.

Блок Р2 представляет собой однофазный однотарифный счетчик активной электрической энергии Меркурий 230 АМ-03 для сети 230 В. Счетчик предназначен для коммерческого учета активной электроэнергии в одном направлении в трёх- или четырёхпроводной сети переменного тока и работает как автономно, так и в составе АСКУЭ.

Блок Р3 представляет собой однофазный однотарифный счетчик активной электрической энергии Меркурий 230 АМ-00 для сети $100\sqrt{3}$ В. Счетчик предназначен для коммерческого учета активной электроэнергии в одном на-

правлении в 3- или 4-проводной сети переменного тока и работает как автономно, так и в составе АСКУЭ.

Блок Р4 представляет собой однофазный однотарифный счетчик активной и реактивной электрической энергии Меркурий 230 AR-03 R для сети $100\sqrt{3}$ В.

Счетчик предназначен для учета активной и реактивной электрической энергии, и мощности в одном направлении в трехфазных 3- и 4-проводных сетях переменного тока частотой 50 Гц через измерительные трансформаторы тока или непосредственно с возможностью передачи измерений и накопленной информации об энергопотреблении по цифровым интерфейсным каналам. Эксплуатируется автономно или в составе любых информационно-измерительных систем технического и коммерческого учёта.

Блок Р5 представляет собой однофазный однотарифный счетчик активной и реактивной электрической энергии Меркурий 230 AR-00 R для сети $100\sqrt{3}$ В. Счетчик предназначен для учета активной и реактивной электрической энергии, и мощности в одном направлении в трехфазных 3- и 4-проводных сетях переменного тока частотой 50 Гц через измерительные трансформаторы тока или непосредственно с возможностью передачи измерений и накопленной информации об энергопотреблении по цифровым интерфейсным каналам. Эксплуатируется автономно или в составе любых информационно-измерительных систем технического и коммерческого учёта.

Блок Р6 представляет собой индукционный однофазный счетчик активной электрической энергии марки СО-И4491М2-5, который предназначен для учета электрической активной энергии в двухпроводных сетях переменного тока напряжением 230 (220) В, частотой 50 Гц.

На сегодняшний день существующие счетчики электрической энергии не защищены от неправильного подключения. Двухэлементный счетчик имеет 7 присоединительных зажимов. Уже только одна возможная перестановка во всех комбинациях подходящих семи проводов теоретически дает 5040 схем включения счетчика, не считая случаев неправильного соединения измерительных трансформаторов и случаев обрыва проводов.

Часто неправильное включение счетчика на действующей установке заметить трудно, так как в большинстве случаев диск вращается в правильном направлении, но при этом погрешность учета может достигать очень больших значений (сотни процентов).

На рис. 2 представлена одна из схем подключения счетчика электрической энергии через трансформаторы тока и напряжения. В ходе лабораторной работы студенты будут проводить проверку правильности подключения счетчика электрической энергии с помощью ВАФ.

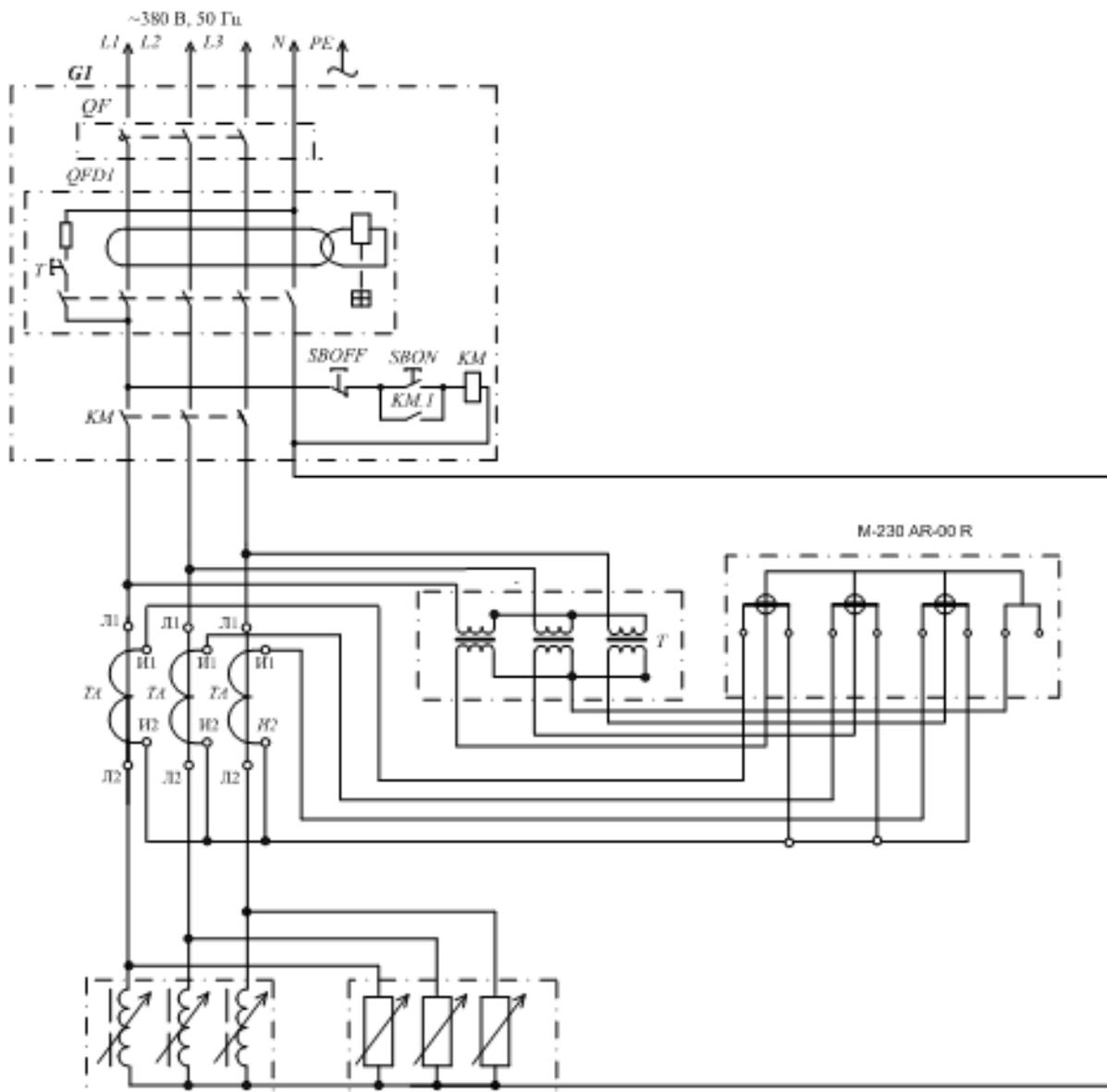


Рис. 2. Электрическая принципиальная схема лабораторного стенда «Учет электрической энергии»

Библиографический список

1. Правила учета электрической энергии: утв. Минтопэнерго РФ и Минстроем РФ 19, 26 сентября 1996 г. // информационно-правовое обеспечение «Гарант» - URL: <http://base.garant.ru/136707/> (дата обращения 20.02.2017).
2. Об энергосбережении: Федеральный закон от 23 ноября 2009 г. №261-ФЗ // Кон-сорциум кодекс: электронный фонд правовой и нормативно-технической документации – URL: <http://docs.cntd.ru/document/902186281> (дата обращения 20.02.2017).
3. Вагин, Г.Я. Учет энергоресурсов: комплекс учебно-методических материалов / Г.Я. Ва-гин, А.М. Мамонов; НГТУ им. Р.Е. Алексеева. Нижний Новгород, 2014. – 107 с.
4. Красник, В.В. Управление электрохозяйством предприятий // Litres.2017. С. 74-84.

УДК 621.316

А.В. Шагидуллин

ЗОНЫ УЧЕТА-НЕУЧЕТА СОПРОТИВЛЕНИЙ КОНТАКТНЫХ СОЕДИНЕНИЙ НИЗКОВОЛЬТНЫХ КОММУТАЦИОННЫХ АППАРАТОВ

Казанский государственный энергетический университет

Статья посвящена проблеме учета основных схемных и режимных параметров цеховых сетей, влияющих на величину эквивалентного сопротивления низковольтных сетей промышленных предприятий. Рассмотрены условия, при которых неучет сопротивлений контактных соединений коммутационных аппаратов не приводит к значительной погрешности при определении эквивалентного сопротивления сети 0,4 кВ.

The article is devoted a problem of the account of the basic circuit and regime parameters of the workshop nets influencing quantity of the equivalent resistance of secondary networks of the industrial enterprises. The conditions under which the neglect resistance contact connections of switching devices does not lead to the considerable error in the determination of the equivalent resistance of networks with voltage of 0.4 kV.

Ключевые слова: низковольтные сети, коммутационные аппараты, автоматический выключатель, магнитный пускатель, эквивалентное сопротивление.

Key words: low-voltage network, switching devices, circuit breaker, magnetic switch, the equivalent resistance.

Как известно, эквивалентное сопротивление схемы цеховой сети является определяющим параметром для расчета потерь электроэнергии [1] и, следовательно, расхода электроэнергии. Потери электроэнергии, определяемые квадратом эффективного тока и эквивалентным сопротивлением схемы, являются одним из важнейших показателей, характеризующим экономичность работы сетей. Определение величины потерь с минимально возможной погрешностью необходимо для решения задач, возникающих при планировании расходов электроэнергии и эксплуатации цеховых сетей [2]. При планировании электропотребления и оценке потерь в качестве основной характеристики схемы с различным набором количества и типа аппаратов, установленных на линии, используется эквивалентное сопротивление всей цепи [3].

Для оценки степени влияния основных факторов, определяющих эквивалентное сопротивление цеховой сети, исследуем параметры схемы электропитания участка механического цеха с преобладанием радиальных линий (рис. 1).

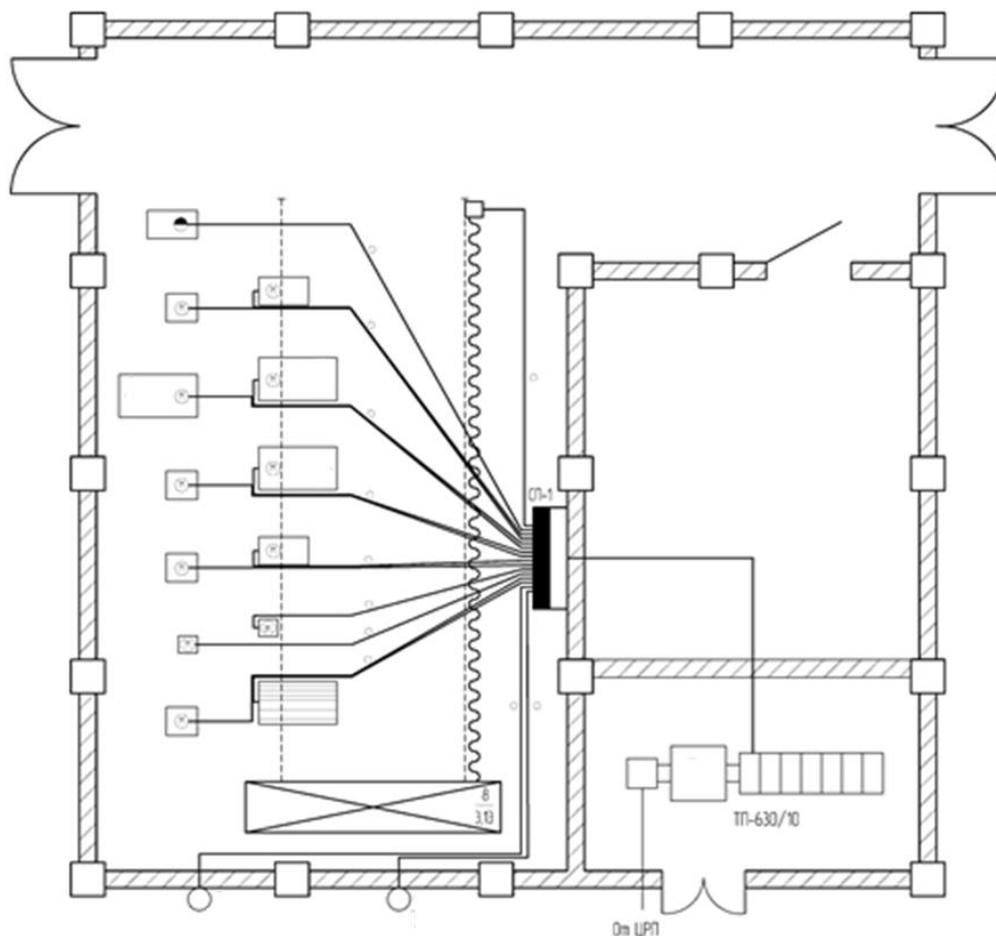


Рис. 1. Радиальная схема электроснабжения участка механического цеха

Эквивалентное сопротивление радиальной сети определяется по выражению [4]:

$$R_{\text{экв}} = \frac{\sum_{i=1}^n r_{i,20} \cdot l_i}{n} \left[1 + \alpha (\Theta_{i,\text{пр}} - 20^\circ) \right] + \frac{\sum_{i=1}^m r_{i,\text{ап}}}{n}, \quad (1)$$

где $r_{i,\text{ап}}$ – сопротивления контактных соединений, установленных на линии низковольтных коммутационных аппаратов; l_i – длина линии, м; $r_{i,20}$ – удельное сопротивление 1 м проводника при температуре 20°C , мОм/м; α – температурный коэффициент увеличения сопротивления материала проводника линии, для меди равный $0,0044 \text{ } 1/^\circ\text{C}$, для алюминия $0,0042 \text{ } 1/^\circ\text{C}$; n – количество приемников электроэнергии; m – количество аппаратов в схеме.

Температура нагрева токопроводящей жилы определяется по выражению [5]:

$$\Theta_{\text{пр}} = k_3^2 \cdot (T_{\text{доп}} - \Theta_{\text{окр}}) + \Theta_{\text{окр}}, \quad (2)$$

где k_3^2 – среднеквадратичный коэффициент загрузки линии; $T_{\text{доп}}$ – допустимая температура жилы кабеля, которая определяется по справочным данным; $\Theta_{\text{пр}}$ – температура жилы провода, изменяющаяся в зависимости от температуры среды и загрузки линии, °C; $\Theta_{\text{окр}}$ – температура окружающей среды.

Для определения эталонного эквивалентного сопротивления поэлементно находятся потери мощности в каждой линии участка радиальной сети ΔP_i :

$$R_3 = \frac{\sum_{i=1}^n \Delta P_i}{3I_{\text{сум}}^2} = \frac{\sum_{i=1}^n I_{i,p}^2 \left\{ r_{i,20} \cdot l_i \left[1 + \alpha (\Theta_{i,\text{пр}} - 20^\circ) \right] + \sum_{i=1}^N r_{i,\text{ап}} \right\}}{I_{\text{сум}}^2}, \quad (3)$$

где $I_{i,p}$ – расчетный ток i -го участка сети, А; $I_{\text{сум}}$ – суммарный ток n -го количества электроприемников, А; N – количество аппаратов на линии.

На рис. 2 представлена динамика изменения значения эквивалентного сопротивления участка цеховой сети, представленного на рис. 1, при учете и неучете таких параметров, как:

- нагрев проводников током нагрузки $\Theta_{\text{пр}}$;
- сопротивления коммутационных аппаратов $r_{i,\text{ап}}$;
- k_3^2 - среднеквадратичный коэффициент загрузки линии.

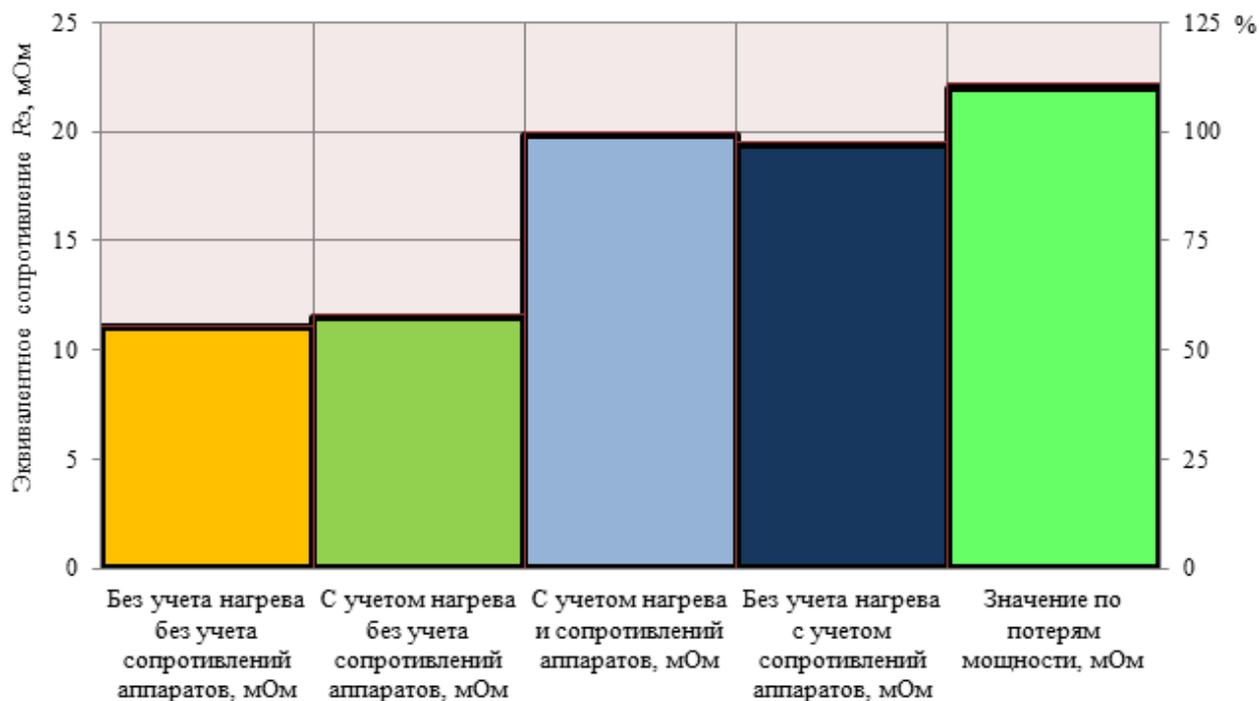


Рис. 2. Значения эквивалентного сопротивления участка цеховой сети с учетом влияния основных параметров оборудования

Эквивалентное сопротивление радиальной сети без учета сопротивления коммутационных аппаратов определяется [6] по выражению:

$$R_{\text{экв}} = \frac{\sum_{i=1}^n r_{i,20} \cdot l_i}{n} \left[1 + \alpha (\Theta_{i,\text{пр}} - 20^\circ) \right] \quad (4)$$

По результатам исследований проанализированы и определены условия учета-неучета сопротивления коммутационных аппаратов для различных схем радиальных цеховых сетей со следующими изменяющимися параметрами:

- количество приемников электроэнергии 6-8;
- длина линии 5-200 м;
- сечение линии 2,5 – 240 мм²;
- количество коммутационных аппаратов на линии: 1 автоматический выключатель; 1 автоматический выключатель и 1 магнитный пускатель; 2 автоматических выключателя и 1 магнитный пускатель.

Результаты учета-неучета сопротивления коммутационных аппаратов приведены на рис. 3 - 4, где АВ – количество автоматических выключателей, МП – магнитных пускателей, установленных на линии.

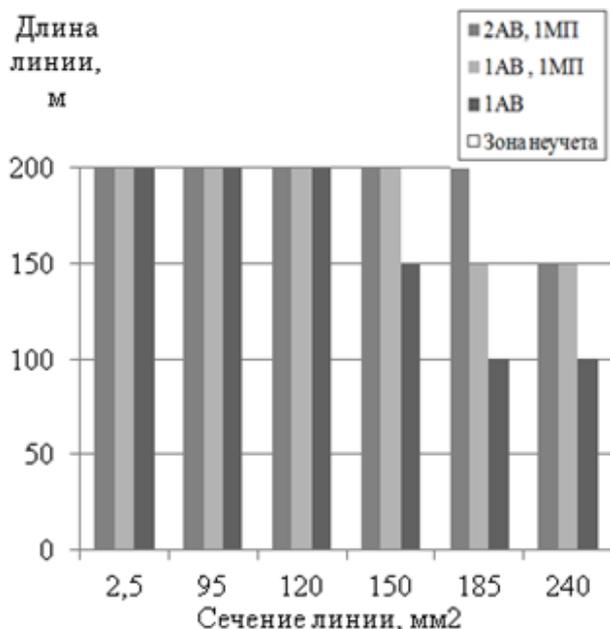


Рис. 3. Зона учета сопротивления коммутационных аппаратов в эквивалентном сопротивлении цеховой сети с 6-ю радиальными линиями

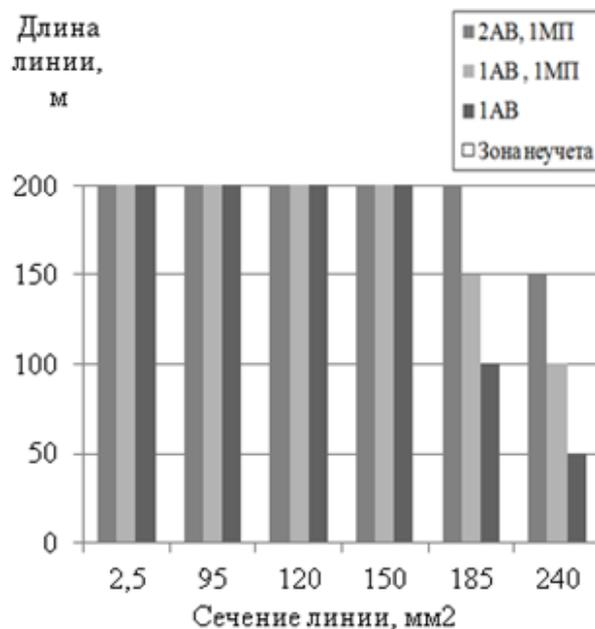


Рис. 4. Зона учета сопротивления коммутационных аппаратов в эквивалентном сопротивлении цеховой сети с 8-ю радиальными линиями

Таким образом, определение эквивалентного сопротивления по выражению (4) для вариантов оборудования схем, не попадающих в зону учета сопротивлений контактов, приведет к разнице менее 5% по сравнению с учетом сопротивлений коммутационных аппаратов в эквивалентном сопротивлении.

Приведенные номограммы упрощают алгоритм определения эквивалентного сопротивления низковольтных сетей для различных схем.

Библиографический список

1. **Федоров, А.А.** Основы электроснабжения промышленных предприятий / А.А. Федоров, В.В. Каменева. – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 472 с.
2. **Кузнецов, Р.С.** Аппараты распределения электрической энергии на напряжение до 1000В / Р.С. Кузнецов. – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Энергия, 1970. – 544 с.
3. **Шевченко, В.В.** Определение сопротивления контактных соединений низковольтных коммутационных аппаратов / В.В. Шевченко, Е.И. Грачева // Промышленная энергетика. 2002. №1. С. 42-43.
4. **Грачева, Е.И.** Потери электроэнергии в низковольтных сетях: монография / Е.И. Грачева. – Казань: Казан. гос. энерг. ун-т, 2004. – 128 с.
5. Справочник по проектированию электрических сетей / под ред. Д.Л. Файбисовича. – М.: Изд-во НИЦ ЭНАС, 2005. – 320 с.
6. **Шагидуллин, А.В.** Расчет эквивалентного сопротивления радиальных схем при вычислении потерь электроэнергии / А.В. Шагидуллин, Е.И. Грачева; А.Н. Хаерова // Электрооборудование: эксплуатация и ремонт. 2014. №9. С. 10-16.

УДК 620.1

А.В. Сидорова, Д.А. Семенов

ОПРЕДЕЛЕНИЕ R-ФАКТОРА МАТЕМАТИЧЕСКИМ МЕТОДОМ

Нижегородский государственный инженерно-экономический университет

Рассмотрена методика определения величины времени крутизны роста напряжения и R-фактора математическим методом. Приведены результаты расчета R-фактора графическим методом и по методике для силовых высоковольтных кабелей с пропитанной бумажной изоляцией.

This work discusses the method of determining the time of the slope of voltage increase and the R-factor by the mathematical method. It is shown the results of calculation of R-factor by graphical method and by method for high voltage power cables with impregnated paper insulation.

Ключевые слова: высоковольтный кабель, бумажно-пропитанная изоляция, индекс поляризации, индекс электропроводности, R-фактор, увлажнение изоляции.

Key words: high voltage cables, paper-impregnated insulation, polarization index, the index of electrical conductivity, R-factor, moisturizing isolation.

Важным элементом при проведении работ по увеличению срока службы силовых высоковольтных кабелей с пропитанной бумажной изоляцией (ПБИ) является неразрушающая диагностика состояния кабелей и прогнозирование срока их службы. Исследование диагностических параметров проводят путем сочетания аналитических методов решения поставленной задачи с помощью схем замещения и моделирования на ЭВМ, применяя более точные и сложные модели. Поэтому задача повышения точности математических моделей, применяемых при аналитических расчетах и моделировании на ЭВМ, является актуальной.

Рассмотрим методику определения величины времени крутизны роста напряжения и R-фактора математическим методом. Для этого проведем анализ изоляции высоковольтных кабелей с ПБИ ААШВ-3×95, питающих электроустановки 1ГЦН-4 и 1ТВН-1.

Результаты многочисленных исследований многослойной изоляции кабелей с ПБИ показали, что по скорости нарастания возвратного напряжения можно судить о состоянии изоляции. Чем ниже скорость нарастания (начальная крутизна возвратного напряжения), тем состояние изоляции лучше [2].

Согласно методическим рекомендациям [2] с внесенными поправками, исходя из проведенного анализа процессов в многослойной изоляции силовых кабелей с пропитанной бумажной изоляцией, степень старения изоляции определяют такие показатели, как индекс поляризации $PIRV$ и индекс электропроводности $LIRV$, формулы для вычисления которых имеют вид:

$$\begin{aligned}
 PIRV &= 10 \cdot \left| \frac{U_{B \max}}{A_-} \right|; \\
 LIRV &= 100 \cdot \left| \frac{U_{B \max}}{Q_-} \right|,
 \end{aligned}
 \tag{1}$$

где A_- – сумма интенсивностей короткоживущих отрицательных компонент, прямо пропорциональная остаточной поляризации контролируемой изоляционной системы в момент $t=0$, т.е. в момент начала измерений ВН; $U_{B \max}$ – максимальное значение возвратного напряжения; Q_- – сумма площадей под отрицательными компонентами, которая пропорциональна заряду, протекающему за время релаксации отрицательных компонент.

Уменьшение величины $PIRV$ для пропитанной бумажной изоляции может быть вызвано усыханием бумаги. Увеличение показателя $LIRV$ может быть вызвано увлажнением изоляции даже в тех случаях, когда это не приводит еще к увеличению сквозного тока проводимости [6].

По результатам разложения кривой возвратного напряжения на составляющие были определены данные показатели для рассматриваемых кабелей с ПБИ 1ГЦН-4 и 1ТВН-1, полученные результаты приведены в табл. 1 и 2.

Таблица 1

Показатели состояния бумажной изоляции кабеля 1ГЦН-4

$U_{B \max}, B$	t_{\max}, c	$PIRV, \text{о.е.}$	$LIRV, \text{о.е.}$	$\overline{\tau}_-, c$
456	154	8,1	1,8	45

Таблица 2

Показатели состояния бумажной изоляции 1ТВН-1

$U_{B \max}, B$	t_{\max}, c	$PIRV, \text{о.е.}$	$LIRV, \text{о.е.}$	$\overline{\tau}_-, c$
426	41	7,8	5,6	14

Проанализировав данные табл. 1 и 2, проведем оценку состояния исследуемых кабелей с ПБИ. Состояние кабеля 1ГЦН-4 (табл. 1) по показателю $LIRV$ ($LIRV=1,8$) работоспособное, увлажнение отсутствует, но имеет низкую степень старения и увлажнения изоляции по показателю $PIRV$ ($PIRV=8,1$), т.е. состояние кабеля работоспособное с незначительными отклонениями изоляции по показателю $PIRV$. А состояние кабеля 1ТВН-1 (табл. 2) работоспособное, ухудшенное по показателю $LIRV$ ($LIRV=5,6$), что соответствует высокой степени старения и увлажнения изоляции. По показателю среднего времени короткоживущих компонент кривой возвратного напряжения $\overline{\tau}_-$, кабель находится в предельном состоянии.

В качестве физического критерия, оценивающего старение бумажно-масляной изоляции, выступает Р-фактор, который в процессе старения увели-

чивается. Он не зависит от геометрических параметров проверяемого объекта и рассчитывается по формуле:

$$P = \frac{U_{B \max}}{S \cdot t_{\max}} ;$$

$$S = \frac{U_{B \max}}{t_s},$$
(2)

где $U_{B \max}$ – максимальное значение возвратного напряжения, В; S – крутизна роста напряжения, В/с; t_{\max} – время точки максимума, с; t_s – время крутизны роста напряжения, с.

На рис. 1 построены кривые возвратного напряжения для кабелей с ПБИ по данным, полученным при заряде в 2,5 кВ изоляции 1 ГЦН-4, 1ТВН-1. Для проведения исследования и получения кривых возвратного напряжения, было использовано устройство диагностики электрической изоляции УДЭИ-1 [4,5].

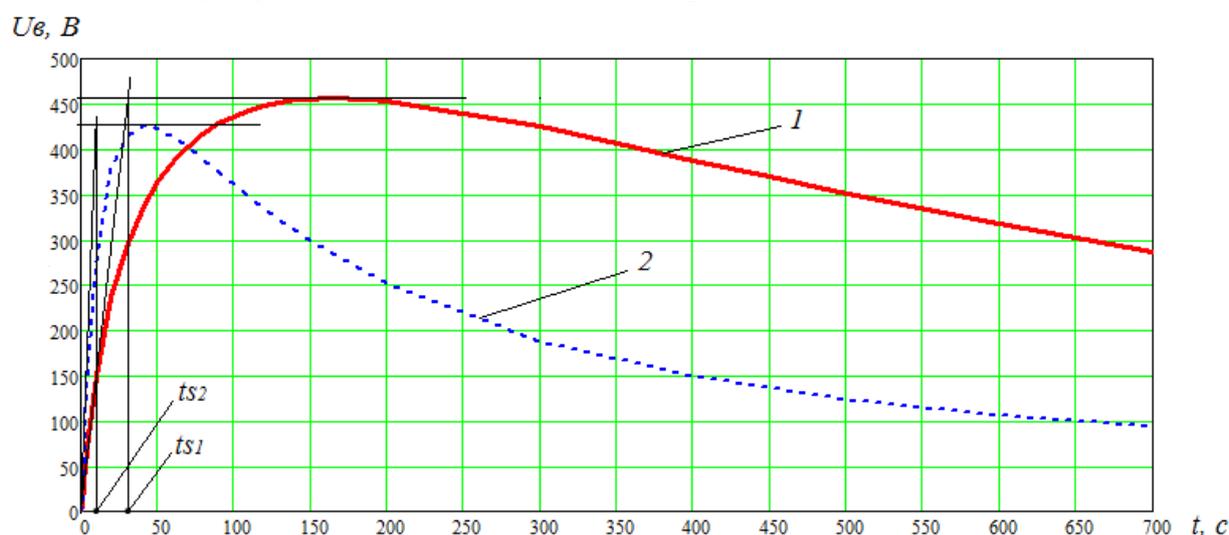


Рис. 1. Кривые возвратного напряжения для кабелей с ПБИ, полученные при заряде изоляции:
1 – 1ГЦН-4; 2 – 1ТВН-1

По рис.1 графическим способом определим крутизну роста напряжения и, подставив полученные значения в формулу (2), рассчитаем Р-фактор для изоляции рассматриваемых кабелей:

$$P_1 = \frac{456}{\frac{456}{30} \cdot 154} = 0,19 ;$$
(3)

$$P_2 = \frac{426}{\frac{426}{9} \cdot 41} = 0,22 .$$
(4)

Согласно данным работы [1], так как $P_1 < 0.2$, то можно сделать вывод, что изоляция кабеля 1ГЦН-4 является не увлажненной, так как $P_2 > 0.2$ - изоля-

ция кабеля 1ТВН-1 является увлажненной, это подтверждает оценку состояния кабелей по показателям табл. 1 и 2.

В процессе проводимых практических исследований для определения значения P – фактора необходимо по экспериментальным находить значения времени крутизны роста напряжения t_s .

Известна формула определения возвратного напряжения [3]:

$$U_s = U_{02}e^{-\frac{t}{T_2}} - U_{01}e^{-\frac{t}{T_1}}, \quad (5)$$

где U_{01}, U_{02} – значение напряжений на слоях в начальный момент времени; T_1, T_2 – постоянные времени слоев изоляции.

С точки зрения математики, рассматриваемую задачу можно представить как задачу поиска экстремума функции (5). Для дальнейших математических расчетов введем следующие обозначения: $a = U_0$, $b = T_2$, $c = T_1$, $x = t$. С учетом этого выражение (5) примет вид:

$$U_s = a(e^{-\frac{x}{b}} - e^{-\frac{x}{c}}), \quad (6)$$

где a , b , c – параметры.

Разложив данную функцию в ряд Тейлора и, исследуя его, пришли к выводу [7], что поведение функции, представляющей кривую возвратного напряжения, в окрестностях точки экстремума с большой точностью сходится с поведением параболы.

Для нахождения параметров a , b , c возьмем три значения экспериментальных данных вблизи точки экстремума и построим по ним параболу, а коэффициенты определим по следующим формулам:

$$\begin{aligned} a &= -\frac{x_1 y_2 - x_1 y_3 - x_2 y_1 + x_2 y_3 + x_3 y_1 - x_3 y_2}{x_1^2 x_2 - x_1^2 x_3 - x_1^2 x_2 + x_3^2 x_1 + x_2^2 x_3 - x_3^2 x_2}; \\ b &= \frac{x_1^2 y_2 - x_1^2 y_3 - x_2^2 y_1 + x_2^2 y_3 + x_3^2 y_1 - x_3^2 y_2}{(x_1 - x_2)(x_1 x_2 - x_1 x_3 - x_2 x_3 + x_3^2)}; \\ c &= \frac{x_1^2 x_2 y_3 - x_1^2 x_3 y_2 - x_1 x_2^2 y_3 + x_1 x_3^2 y_2 + x_2^2 y_1 x_3 - x_2 x_3^2 y_1}{(x_1 - x_2)(x_1 x_2 - x_1 x_3 - x_2 x_3 + x_3^2)}, \end{aligned} \quad (7)$$

где $x_1, y_1, x_2, y_2, x_3, y_3$ – координаты выбранных точек.

Теперь вычислим через параметры (7) величину времени крутизны роста напряжения t_s . Для этого проведем касательную к началу переходной характе-

ристики, уравнение которой имеет вид: $y - c = xb$ и прямую $y = y_{\max} = -\frac{b^2}{4a} + c$.

Координата точки пересечения касательной и прямой есть величина t_s . Более точные результаты при определении времени крутизны роста напряжения (t_s) получаются, если вместо проведенной касательной к началу переходной харак-

теристики, определить по значению переходной функции при $t = t_s$, так как показано на рис. 2.

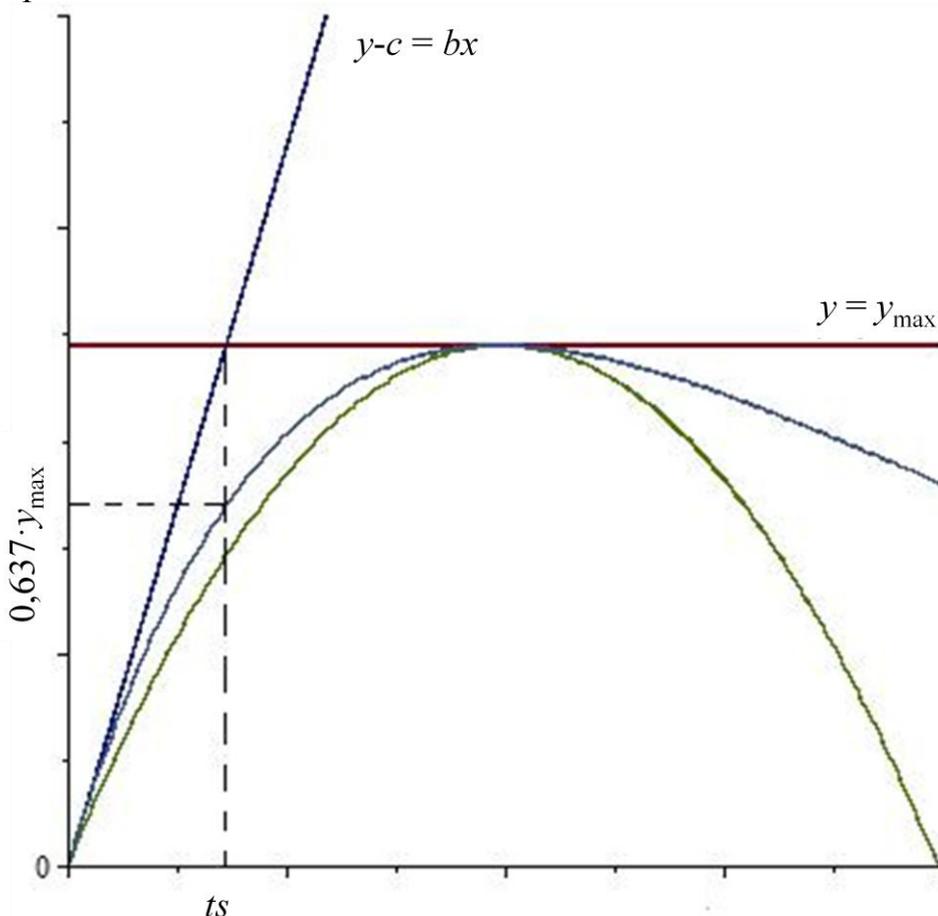


Рис. 2. Схема построений для определения величины t_s

Учитывая изложенное, получаем следующую формулу для расчета t_s математическим методом:

$$t_s = -\frac{0.00025(1425ca + 637b^2)}{ab}. \quad (8)$$

По формуле (8) рассчитали значение t_s и величину Р-фактора для исследуемых кабелей, получили для 1ГЦН-4: $t_{s1} = 27,28, P_1 = 0,18$, для 1ТВН-1: $t_{s2} = 9,68, P_2 = 0,24$.

Проведенный анализ отклонений позволяет сделать вывод, что полученные формулы (2), (7), (8) расчета t_s и Р-фактора для кабеля с ПБИ можно использовать на практике для повышения точности при определении параметров увлажненности кабеля.

В перспективе планируется провести модернизацию программного обеспечения устройства УДЭИ-1 [4, 5], где в качестве дополнительного критерия при проведении комплексной диагностики состояния кабеля с ПБИ будет использована данная методика расчета Р-фактора, что повысит точность определения состояния кабеля.

Библиографический список

1. **Patsch, R.** p-Factor, a Meaningful Parameter for the Evaluation of Return Voltage Measurements / R. Patsch, O. Kouzmine. CEIDP '02, Cancun, Mexico, 2002.
2. МР 1.2.02.0168-2013 «Диагностика технического состояния кабелей с пропитанной бумажной изоляцией на атомных станциях». – М., 2013.
3. **Серебряков, А.С.** Диагностика корпусной изоляции распределительных трансформаторов / А.С. Серебряков, Д.А. Семенов // Электро - Электротехника, электроэнергетика, электротехническая промышленность. 2013. № 1. С. 47-51.
4. **Серебряков, А.С.** Устройство для измерения израсходованного срока службы электрической изоляции электрооборудования / А.С. Серебряков, Д.А. Семенов // Карельский научный журнал. 2014. №4. С.178-180.
5. Пат. на полезную модель № 119125 РФ. Устройство для контроля качества электрической изоляции / Серебряков А.С., Семенов ДА., Степанов Б.С., Игнаткин Д.Н. Оpubл. 10.08.2012. Бюл. №22.
6. **Кононенко, А.И.** Новые показатели восстановленного напряжения для контроля состояния электрической изоляции / А.И. Кононенко, А.В. Хохряков, Р.В. Слабоус, Д.А. Ратников // Электро - Электротехника, электроэнергетика, электротехническая промышленность. 2012. №5. С. 47-52.
7. **Фихтенгольц, Г.М.** Курс дифференциального и интегрального исчисления. – М.: Наука, Главная редакция физико-математической литературы. 1970. Т. II. – 800 с.

АКТУАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКИ

ПРОГРАММА РАЗВИТИЯ ОПОРНОГО УНИВЕРСИТЕТА

СБОРНИК НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИХ СТАТЕЙ

Редактор Е.В. Комарова

Компьютерный набор и вёрстка: А.В. Шалухо, А.В. Бахтин, Н.В. Шумский

Подписано в печать 01.08.2017. Формат 60 x 84^{1/16}.
Бумага офсетная. Печать офсетная. Усл. печ. л. 13,25.
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.