

**МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**

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

ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНАЯ ЭЛЕКТРОТЕХНИКА

№ 2

Нижний Новгород 2019

УДК 621.3
ББК 31.2

Интеллектуальная электротехника / НГТУ им. Р.Е. Алексеева. – Нижний Новгород, 2019. № 2 (6). – 119 с.

Выходит 4 раза в год

Главный редактор А.Б. Лоскутов

зам. гл. редактора

Андрей Борисович Дарьенков канд. техн. наук, доцент
Елена Николаевна Соснина д-р техн. наук, проф.

отв. секретарь

Андрей Владимирович Шалухо канд. техн. наук

отв. редактор

Валерия Игоревна Казакова канд. филос. наук, доцент

гл. редактор выпуска

Иван Алексеевич Липужин канд. техн. наук

ЧЛЕНЫ РЕДКОЛЛЕГИИ:

Геннадий Яковлевич Вагин	д-р техн. наук, профессор
Николай Иванович Воропай	член-корр. РАН, д-р техн. наук, профессор
Леонид Абрамович Герман	д-р техн. наук, профессор
Игорь Васильевич Гуляев	д-р техн. наук, профессор
Анатолий Викторович Кузнецов	д-р техн. наук, профессор
Александр Леонидович Куликов	д-р техн. наук, профессор
Виктор Николаевич Мещеряков	д-р техн. наук, профессор
Георгий Борисович Онищенко	д-р техн. наук, профессор
Александр Сергеевич Плехов	канд. техн. наук, доцент
Александр Юрьевич Смирнов	д-р техн. наук, доцент
Владимир Георгиевич Титов	д-р техн. наук, профессор
Олег Станиславович Хватов	д-р техн. наук, профессор
Юрий Иванович Хохлов	д-р техн. наук, профессор
Александр Иванович Чивенков	д-р техн. наук, профессор
Roustiam Chakirov	Dr.-Ing., Prof. Dr., проф. H-BRS, Германия

Учредитель:

федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования «Нижегородский государственный технический университет
им. Р.Е. Алексеева»

(603950, Нижегородская обл., г. Нижний Новгород, ул. Минина, д. 24)

Электронная версия журнала: <https://ie.nntu.ru>

ISSN 2658-6754

УДК 621.3

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

СОДЕРЖАНИЕ

ХРОНИКИ	4
ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ КОМПЛЕКСЫ И СИСТЕМЫ	6
Серебряков А.С., Осокин В.Л. Математическая модель электромагнитных процессов в трансформаторе с учетом потерь в магнитопроводе.....	6
Попов А.А., Попова В.А., Гуляев И.В., Briz del Blanco F. Улучшение динамических характеристик асинхронного двигателя с использованием различных методов перемодуляции для энергоэффективного управления.....	17
Терентьев П.В., Филатов Д.А., Плаксин М.А. Сравнительный экспериментальный анализ искусственных источников света для освещения сельских территорий.....	28
Кочеганов Д.М., Стеклов А.С., Серебряков А.В. Структура энергоэффективной ветро-дизель энергетической установки переменной скорости вращения.....	42
Попов С.В., Бишлетов А.В., Бурмакин О.А., Гуляев В.Н. Особенности работы автоматизированной системы управления автономной электростанции.....	53
Лоскутов А.А., Кузина О.В. Анализ применения резистивного заземления нейтрали в распределительных электрических сетях на основе имитационного моделирования.....	61
Ефимов А.Ю., Алехин А.О. Оценка надежности электроснабжения потребителей первой и второй категории.....	74
Колосов Р.В. Моделирование солнечных батарей.....	85
СИЛОВАЯ ЭЛЕКТРОНИКА	94
Рогинская Л.Э., Гусаков Д.В., Масалимов Д.Р. Исследование 18-пульсных авто- и трансформаторно-выпрямительных устройств.....	94
Сугаков В.Г., Варламов Н.С., Малышев Ю.С. Цифровое фазосдвигающее устройство в трехфазных выпрямителях напряжения.....	104
Наши авторы	114

ХРОНИКИ

БОРИС ВАСИЛЬЕВИЧ ПАПКОВ (к 75-ЛЕТИЮ СО ДНЯ РОЖДЕНИЯ)

23 апреля 2019 г. исполнилось 75 лет со дня рождения доктора технических наук, профессора, видного ученого в области надежности электроэнергетических систем, Бориса Васильевича Папкова.



В 1961 г., после окончания средней школы № 9 Советского района г. Горького, Борис Васильевич начал свою трудовую деятельность лаборантом и техником по приборам в Горьковском зенитно-ракетном училище войск ПВО. В 1962 г. он поступил на дневное отделение электротехнического факультета Горьковского политехнического института им. А.А. Жданова. В 1962-1963 гг., параллельно с учебой, работал электрослесарем второго разряда на Горьковском заводе электромонтажных конструкций.

В декабре 1967 г. Б.В. Папков окончил Горьковский политехнический институт им. А.А. Жданова по специальности «Электроснабжение промышленных предприятий и городов». В 1968-1969 гг. был инженером в отделе главного энергетика Горьковского машиностроительного завода. В 1969 г. профессор Ю.Л. Мукосеев и доцент Е.М. Червонный пригласили Бориса Васильевича работать ассистентом кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий и городов» ГПИ им. А.А. Жданова.

В 1973-1974 гг. Б.В. Папков обучался в очной аспирантуре. Его научным руководителем был Ю.Л. Мукосеев. В 1974 г. Борис Васильевич защитил диссертацию по теме «Исследование ущерба при отказах электрооборудования в системах электроснабжения нефтеперерабатывающих заводов» на соискание ученой степени кандидата технических наук. В 1981 г. ему присвоено звание доцента по кафедре «Электроснабжение промышленных предприятий и городов».

В 1994 г. во Всероссийском научно-исследовательском институте электроэнергетики (ВНИИЭ) Б.В. Папков защитил диссертацию «Исследование, разработка и совершенствование методов обоснования решений по управлению электропотреблением в промышленных системах электро-

снабжения» на соискание ученой степени доктора технических наук. В 1996 г. ему присвоено звание профессора.

В 1995-2001 гг. Борис Васильевич работал в должности заведующего кафедрой «Электроэнергетика» Нижегородского государственного технического университета, а затем, до 2014 г. – профессором кафедры «Электроэнергетика, электроснабжение и силовая электроника». С 2014 г. по настоящее время Борис Васильевич – профессор кафедры «Электрификация и автоматизация» Нижегородского государственного инженерно-экономического университета.

Б.В. Папков – известный специалист в области надежности систем электроэнергетики, автор более 400 опубликованных научных работ по данной тематике: докладов, статей, монографий, учебных пособий. Результаты научно-исследовательских работ, выполненных при участии и под руководством Б.В. Папкова, внедрены на ряде предприятий нефтеперерабатывающей, химической, машиностроительной, бумажной и легкой промышленности. Они использованы в таких организациях, как ООО «Газпром трансгаз Нижний Новгород», региональная служба тарифов Нижегородской области, а также в ряде проектных организаций. Кроме того, эти результаты рекомендованы к использованию Федеральной энергетической комиссией РФ, подразделениями АО «Нижновэнерго» и комитетом ценовой политики администрации Нижегородской области, переданы в ФГУ ПФО «Ростехнадзор».

Под руководством профессора Б.В. Папкова защищены шесть кандидатских диссертаций. Борис Васильевич – член оргбюро постоянно действующего международного научного семинара РАН «Методические вопросы исследования надежности больших систем энергетики им. Ю.Н. Руденко»; член диссертационных советов Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева и Ивановского государственного энергетического университета им. В.И. Ленина; член НТС ОАО «Интер РАО ЕЭС».

В 2005 г. Министерством образования и науки РФ за заслуги в области образования Б. В. Папков награжден нагрудным знаком «Почетный работник высшего профессионального образования РФ». В 2018 г. за успешную работу и большой вклад в развитие энергосистемы Б.В. Папков награжден почетной грамотой Министерства энергетики и ЖКХ Нижегородской области.

Коллектив редколлегии и редакции журнала «Интеллектуальная электротехника» желает Борису Васильевичу Папкову долгих лет жизни, крепкого здоровья и новых научных достижений.

ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ КОМПЛЕКСЫ И СИСТЕМЫ

УДК 621. 314.2

А.С. Серебряков, В.Л. Осокин

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПРОЦЕССОВ В ТРАНСФОРМАТОРЕ С УЧЕТОМ ПОТЕРЬ В МАГНИТОПРОВОДЕ

Нижегородский государственный инженерно-экономический университет

На основании уравнений состояния предложена математическая модель электромагнитных процессов в трансформаторе с учетом потерь в магнитопроводе. Для учета потерь в сердечнике добавлена еще одна электрическая цепь, имеющая магнитную связь с первичной обмоткой трансформатора. Показано, что каждый реальный двухобмоточный трансформатор с учетом потерь в магнитопроводе есть трехобмоточный трансформатор. Электромагнитные процессы в обмотках трансформатора описываются уравнениями, составленными с учетом того, что, по принципу Ленца, ЭДС, индуцированная за счет изменения тока, имеет направление, препятствующее изменению тока, вызывающего эту ЭДС. Иными словами, положительное направление ЭДС самоиндукции направлено против положительного направления тока. Это отличает предложенную модель от моделей, принятых в литературе по электромеханике, и позволяет ввести единообразие в записи уравнений состояния для машин постоянного и переменного тока. Зависимость напряженности магнитного поля в сердечнике от индукции аппроксимирована с помощью гиперболического синуса. В MATHCAD исследованы переходные процессы при включении трансформатора под напряжение. Результаты исследования предложенной математической модели могут быть использованы при проектировании и эксплуатации интеллектуальных систем релейной защиты и автоматики силовых трансформаторов, питающих сложную переменную нагрузку. К таким трансформаторам можно отнести, например, тяговые трансформаторы электроподвижного состава железных дорог, электрифицированных на переменном токе.

Ключевые слова: магнитная цепь трансформатора, потери в магнитопроводе, потери на гистерезис и вихревые токи, поток рассеивания, ток намагничивания, трансформатор, холостой ход, электромагнитные процессы.

1. Введение

Уравнения состояния и математическая модель электромагнитных процессов в трансформаторе при отсутствии потерь в стали были рассмотрены в [1]. В реальном трансформаторе при перемагничивании сердечника, выполненного из тонких листов ферромагнитного материала, возникают потери, называемые потерями холостого хода. Поэтому намагничивание происходит по несовпадающим кривым, и образуется петля гистерезиса (рис. 1) [2-4].

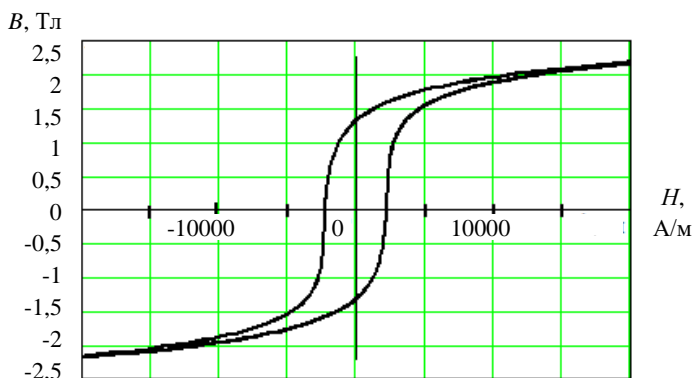


Рис. 1. Петля гистерезиса при перемагничивании ферромагнитного сердечника с частотой 50 Гц

Потери в сердечнике $P_{\text{ст}}$ (магнитные потери или потери в стали) складываются из потерь на гистерезис $P_{\text{Г}}$ (перемагничивание) и потерь на вихревые токи $P_{\text{В}}$ (токи Фуко):

$$P_{\text{ст}} = P_{\text{Г}} + P_{\text{В}}. \quad (1)$$

Эта энергия расходуется на перемагничивание и вихревые токи и преобразуется в тепло. Она прямо пропорциональна площади петли гистерезиса, которая снята при заданной частоте (динамическая петля гистерезиса). Ширина петли гистерезиса, а, следовательно, и ее площадь, растет с увеличением потерь в сердечнике. Потери на гистерезис обусловлены тем, что при перемагничивании стали для уменьшения остаточной индукции до нуля требуется затратить определенную величину магнитодвижущей силы $F = H_{\text{С}} \cdot l$, где $H_{\text{С}}$ – коэрцитивная сила, l – длина средней магнитной линии в магнитопроводе.

Мощность потерь на гистерезис:

$$P_{\Gamma} = \sigma_{\Gamma} \cdot f \cdot B_m^n \cdot G, \quad (2)$$

где σ_{Γ} – коэффициент гистерезиса (зависит от марки стали); f – частота колебаний магнитной индукции; B_m – амплитуда магнитной индукции; G – масса сердечника; n – коэффициент, зависящий от величины магнитной индукции ($n = 1,6$ при $B_m < 1$ Тл; $n = 2$ при $B_m > 1$ Тл).

Мощность потерь на вихревые токи:

$$P_{\text{В}} = \sigma_{\text{В}} \cdot f^2 \cdot B_m^2 \cdot G, \quad (3)$$

где $\sigma_{\text{В}}$ – коэффициент вихревых токов (зависит от марки стали и пропорционален квадрату толщины листа).

При $B_m > 1$ Тл, потери в стали:

$$P_{\text{СТ}} = \sigma_{\Gamma} \cdot f \cdot B_m^2 \cdot G + \sigma_{\text{В}} \cdot f^2 \cdot B_m^2 \cdot G. \quad (4)$$

Потери в стали пропорциональны квадрату магнитной индукции.

II. Материалы и методы

Согласно (4), мощность потерь на гистерезис P_{Γ} пропорциональна частоте, а мощность потерь на вихревые токи $P_{\text{В}}$ – квадрату частоты. Поэтому, если произвести замеры потерь в стали $P_{\text{СТ}}$ при одной и той же амплитуде магнитной индукции при двух разных частотах f_1 и f_2 , то можно условно разделить $P_{\text{СТ}}$ на P_{Γ} и $P_{\text{В}}$.

При частоте 50 Гц потери не разделяют, а для вычисления суммарных потерь пользуются выражением на основе (4):

$$P_{\text{СТ}} = \sigma_{\Gamma} \cdot f \cdot B_m^2 \cdot G + \sigma_{\text{В}} \cdot f^2 \cdot B_m^2 \cdot G = (\sigma_{\Gamma} \cdot f + \sigma_{\text{В}} \cdot f^2) \cdot B_m^2 \cdot G = P_{1/50} \cdot B_m^2 \cdot G, \quad (5)$$

где $P_{1/50}$ – удельные потери в стали при $B_m = 1$ Тл и $f = 50$ Гц, (Вт/кг).

Величина удельных потерь зависит от марки стали и в среднем составляют 0,5-3,1 Вт/кг. При $B_m = 1,7$ Тл, удельные потери лучших сортов стали составляют 1,05-1,1 Вт/кг. Для аморфных сталей эти потери в три-четыре раза меньше [5-7].

Следовательно, для учета потерь в сердечнике трансформатора при перемагничивании, необходимо сумму всех элементарных ЭДС в каждом листе ферромагнитного сердечника представить в виде одной ЭДС. Эта ЭДС наводится в отдельной обмотке, которая дополнительно вводится в

расчетную схему трансформатора и имеет магнитную связь с первичной обмоткой (рис. 2). Эта обмотка замыкается на сопротивление R_3 , потери в котором равны мощности потерь в ферромагнитном сердечнике [8]. Число витков в дополнительной обмотке w_3 можно взять равным 1, либо равным любому другому числу, но при этом необходимо подобрать соответствующие значения R_3 и L_3 .

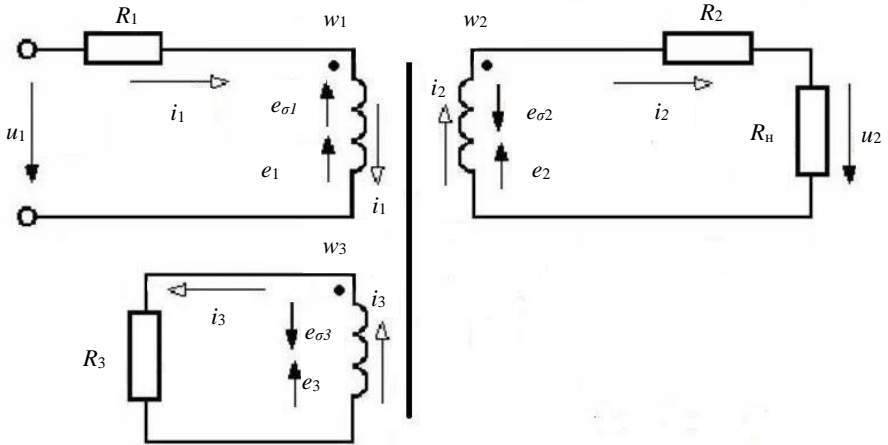


Рис. 2. Расчетная схема трансформатора с учетом потерь в магнитопроводе

Таким образом, реальный двухобмоточный трансформатор должен представляться как трехобмоточный.

III. Уравнения состояния и математическая модель трансформатора с учетом потерь в магнитопроводе

Уравнения, описывающие электромагнитные процессы в трансформаторе, расчетная схема которого изображена на рис. 2, имеют вид:

- для первичной обмотки w_1 :

$$R_1 \cdot i_1 + L_{\sigma 1} \cdot \frac{di_1}{dt} + w_1 \cdot \frac{d\Phi}{dt} = u_1. \quad (6)$$

- для вторичной обмотки w_2 :

$$R_2 \cdot i_2 + R_H \cdot i_2 + L_{\sigma 2} \cdot \frac{di_2}{dt} = w_2 \cdot \frac{d\Phi}{dt}. \quad (7)$$

- для дополнительной обмотки w_3 , учитывающей потери в сердечнике:

$$R_3 \cdot i_3 + L_{\sigma 3} \cdot \frac{di_3}{dt} = w_3 \cdot \frac{d\Phi}{dt}. \quad (8)$$

- для магнитной цепи по закону полного тока:

$$H \cdot l = \sum F = F_1 - F_2 - F_3 = w_1 \cdot i_1 - w_2 \cdot i_2 - w_3 \cdot i_3; \quad (9)$$

или, с учетом аппроксимации кривой намагничивания гиперболическим синусом:

$$H = \alpha \cdot \sinh(\beta \cdot B) = \alpha \cdot \sinh\left(\beta \cdot \frac{\Phi}{Q}\right); \quad (10)$$

$$\alpha \cdot l \cdot \sinh\left(\beta \cdot \frac{\Phi}{Q}\right) = w_1 \cdot i_1 - w_2 \cdot i_2 - w_3 \cdot i_3.$$

Продифференцируем уравнение (10):

$$\alpha \cdot l \cdot \frac{\beta}{Q} \cdot \cosh\left(\beta \cdot \frac{\Phi}{Q}\right) \cdot \frac{d\Phi}{dt} = w_1 \cdot \frac{di_1}{dt} - w_2 \cdot \frac{di_2}{dt} - w_3 \cdot \frac{di_3}{dt}. \quad (11)$$

Обозначим $A = \alpha \cdot l \cdot \frac{\beta}{Q}$ и $b = \frac{\beta}{Q}$. Тогда уравнение (11) примет вид:

$$A \cdot \cosh(b \cdot \Phi) \cdot \frac{d\Phi}{dt} = w_1 \cdot \frac{di_1}{dt} - w_2 \cdot \frac{di_2}{dt} - w_3 \cdot \frac{di_3}{dt}. \quad (12)$$

Запишем систему четырех дифференциальных уравнений (6,7,8) и (12) в канонической форме:

$$L_{\sigma 1} \cdot \frac{di_1}{dt} + w_1 \cdot \frac{d\Phi}{dt} = u_1 - R_1 \cdot i_1; \quad (13)$$

$$-L_{\sigma 2} \cdot \frac{di_2}{dt} + w_2 \cdot \frac{d\Phi}{dt} = (R_2 \cdot i_2 + R_H \cdot i_2); \quad (14)$$

$$-L_{\sigma 3} \cdot \frac{di_3}{dt} + w_3 \cdot \frac{d\Phi}{dt} = R_3 \cdot i_3; \quad (15)$$

$$w_1 \cdot \frac{di_1}{dt} - w_2 \cdot \frac{di_2}{dt} - w_3 \cdot \frac{di_3}{dt} - A \cdot \cosh(b \cdot \Phi) \cdot \frac{d\Phi}{dt} = 0. \quad (16)$$

Систему дифференциальных уравнений (13-16) представим в матричном виде:

$$\begin{bmatrix} L_{\sigma 1} & 0 & 0 & w_1 \\ 0 & -L_{\sigma 2} & 0 & w_2 \\ 0 & 0 & -L_{\sigma 3} & w_3 \\ w_1 & -w_2 & -w_3 & -A \cdot \cosh(b \cdot \Phi) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \frac{di_1}{dt} \\ \frac{di_2}{dt} \\ \frac{di_3}{dt} \\ \frac{d\Phi}{dt} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u_1 - R_1 \cdot i_1 \\ (R_2 + R_H) \cdot i_2 \\ R_3 \cdot i_3 \\ 0 \end{bmatrix}. \quad (17)$$

Решая систему методом Крамера, определим производные искоемых величин. Уравнения в форме Коши для машинного решения примут вид:

$$\frac{di_1}{dt} = \frac{\Delta_1}{\Delta}; \quad \frac{di_2}{dt} = \frac{\Delta_2}{\Delta}; \quad \frac{di_3}{dt} = \frac{\Delta_3}{\Delta}; \quad \frac{d\Phi}{dt} = \frac{\Delta_4}{\Delta}, \quad (18)$$

где Δ – главный определитель системы; $\Delta_1, \Delta_2, \Delta_3, \Delta_4$ – определители, которые получаются из главного определителя после замены соответствующего столбца столбцом свободных членов.

IV. Результаты исследования

На рис. 3 приведены результаты решение системы дифференциальных уравнений (18) в интегрированном пакете MATHCAD численным методом Рунге-Кутты четвертого порядка [9]. Решение системы уравнений (15) произведено согласно [1].

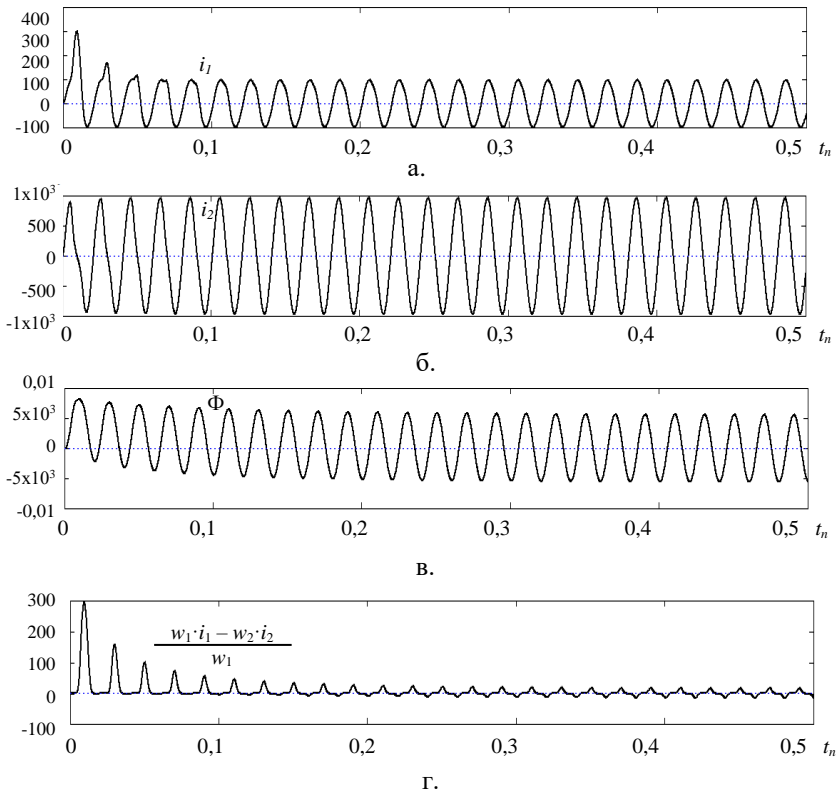


Рис. 3. Результаты решения системы нелинейных дифференциальных уравнений (18) в интегрированном пакете MATHECAD

На рис. 4 показаны мгновенные значения тока намагничивания i_0 и магнитного потока Φ в сердечнике трансформатора. Несмотря на то, что кривые достигают максимального значения одновременно, кривая тока проходит через ноль раньше. Следовательно, ток опережает поток в сердечнике. Потери в стали приводят к тому, что в кривой тока появляется активная составляющая.

Кривая намагничивания $B = f(H)$, полученная на разработанной модели, имеет вид петли гистерезиса (рис. 1). Следовательно, из-за потерь на перемагничивание сердечника, изменение магнитной индукции (увеличение и уменьшение) происходит по несовпадающим кривым.

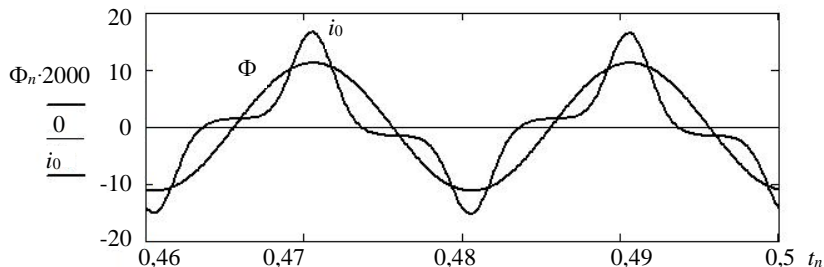


Рис. 4. Ток намагничивания i_0 и магнитный поток Φ в сердечнике трансформатора с учетом потерь в сердечнике

На рис. 5 показаны петли гистерезиса в процессе включения трансформатора. Видно, что во время переходного процесса сердечник намагничивается несимметрично, симметрия устанавливается постепенно в течение нескольких периодов. Полностью симметричное перемагничивание сердечника наступает только в конце переходного режима.

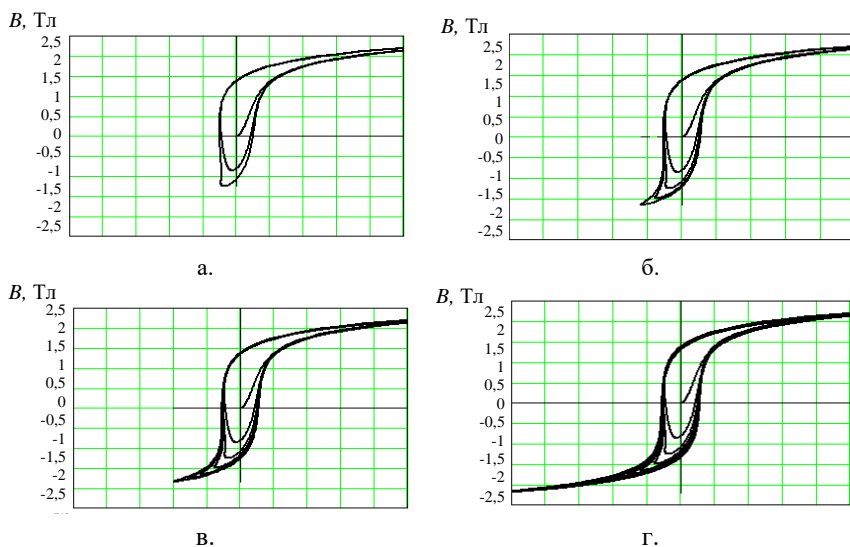


Рис. 5. Намагничивание сердечника трансформатора при его включении в моменты времени:
а) $t = 0,05$ с, б) $t = 0,09$ с, в) $t = 0,13$ с, г) $t = 0,5$ с

Установившееся значение тока намагничивания в реальных трансформаторах невелико и составляет несколько процентов от номинального тока трансформатора. Поэтому в установившемся режиме токи в обмотках и поток в сердечнике практически можно считать синусоидальными. Следовательно, для анализа установившихся процессов в однофазном трансформаторе можно воспользоваться комплексным методом, согласно которому несинусоидальный ток намагничивания представляется синусоидальным с действующим значением, аналогичным такому же у несинусоидальной кривой.

Комплексный метод позволяет отказаться от решения дифференциальных уравнений. Однако при расчете нестационарных процессов требуется решать нелинейные дифференциальные уравнения. В этом случае, особенно когда речь идет о разработке современных интеллектуальных систем релейной защиты и автоматики, следует использовать предложенную математическую модель трансформатора с учетом потерь в стали.

V. Заключение

На основании уравнений состояния предложена математическая модель электромагнитных процессов в трансформаторе с учетом потерь в магнитопроводе. С помощью предложенной модели в интегрированном пакете MATCAD исследованы переходные процессы при включении трансформатора под напряжение. Исследована динамика изменения семейства петель гистерезиса при включении трансформатора.

Результаты исследования предложенной математической модели могут быть использованы при проектировании и эксплуатации интеллектуальных систем релейной защиты и автоматики силовых трансформаторов, питающих сложную переменную нагрузку. К таким трансформаторам можно отнести, например, тяговые трансформаторы электроподвижного состава железных дорог, электрифицированных на переменном токе.

Результаты могут быть использованы при разработке ферромагнитных преобразователей параметров электрической энергии.

© Серебряков А.С., 2019

© Осокин В.Л., 2019

Библиографический список

- [1] Серебряков А.С., Осокин В.Л. Уравнения состояния и математическая модель электромагнитных процессов в трансформаторе // Интеллектуальная электротехника. 2019. № 1. С. 55-68.
- [2] Костенко М.П., Пиотровский Л.М. Электрические машины. В 2-х частях. Ч.1. Машины постоянного тока. Трансформаторы. Учеб. для студ. вузов. Изд. 3-е, перераб. Л.: Энергия, 1972. – 544 с.

- [3] Вольдек А.И., Попов В.В. Электрические машины. Введение в электромеханику. Машины постоянного тока и трансформаторы. Учеб. для вузов. СПб.: Питер, 2007. – 320 с.
- [4] Петров Г.Н. Электрические машины. В 3-х частях. Ч.1. Введение. Трансформаторы. Учеб. для вузов. М.: Энергии, 1974. – 240 с.
- [5] Беспалов В.Я., Котеленец Н.Ф. Электрические машины: Учеб. пособие для студ. высш. учеб. заведений. М.: Академия, 2006. – 320 с.
- [6] Копылов И.П. Электрические машины. Учеб. для вузов. 6-е изд. М.: Высшая школа, 2009. – 607 с.
- [7] Лизунов С.Д., Лоханин А.К. Силовые трансформаторы. Справочная книга. М.: Энергоиздат, 2004. – 616 с.
- [8] Серебряков А.С. Трансформаторы: учеб. пособие. М.: Издательский дом МЭИ, 2013. – 360 с.
- [9] Серебряков А.С., Шумейко В.В. MATHCAD и решение задач электротехники. Учеб. пособ. для вузов ж.-д. транспорта. М.: Маршрут, 2005. – 240 с.

A.S. Serebryakov, V.L. Osokin

MATHEMATICAL MODEL OF ELECTROMAGNETIC PROCESSES IN TRANSFORMER WITH ACCOUNT LOSS IN MAGNETIC CORE

Nizhny Novgorod State University of Engineering and Economics
Knyaginino, Russia

Abstract. A mathematical model of electromagnetic processes in a transformer taking into account losses in the magnetic circuit is proposed on the basis of the equations of state. To account for losses in the core, one more electrical circuit has been added, which has a magnetic connection with the primary winding of the transformer. It is shown that each real two-winding transformer, taking into account losses in the magnetic circuit, is a three-winding transformer. Electromagnetic processes in the transformer windings are described by equations composed taking into account the fact that, according to the Lenz principle, an EMF induced by a change in current has a direction that prevents the change in current causing this EMF. The positive direction of the self-induced EMF is directed opposite the positive direction of the current, which distinguishes the proposed model from the one adopted in the literature and allows one to introduce uniformity in writing the equations of state for DC and AC machines. The dependence of the magnetic field strength in the core on induction is approximated using the hyperbolic sine. Transients processes when turning on the transformer has been investigated in MATHCAD. The results of the study of the proposed mathematical model can be used in the design and operation of intelligent relay protection and automation systems for power transformers that supply complex variable loads, for example, traction transformers of electric rolling stock of railways electrified with alternating current.

Keywords: electromagnetic processes, idle, leakage flux, losses in magnetic core, losses to hysteresis and eddy currents, magnetizing current, transformer, transformer magnetic circuit.

References

- [1] A.S. Serebryakov and V.L. Osokin, «State equations and mathematical model of electromagnetic processes in transformer», *Smart Electrical Engineering*, vol. 1, pp. 55-69, March 2019.
- [2] M.P. Kostenko and L.M. Piotrovsky, *Elektricheskiye mashiny. Part 1. Mashiny postoyannogo toka. Transformatory*. 3rd ed. St. Petersburg: Energy, 1972 (in Russian).
- [3] A.I. Voldek and V.V. Popov, *Elektricheskiye mashiny. Vvedeniye v elektromekhaniki. Mashiny postoyannogo toka i transformatory*. St. Petersburg: Piter, 2007 (in Russian).
- [4] G.N. Petrov, *Elektricheskiye mashiny. Part 1. Vvedeniye. Transformatory*. Moscow: Energia, 1974 (in Russian).
- [5] V.Ya. Bespalov and N.F. Kotelenets, *Elektricheskiye mashiny*. Moscow: Publishing Center «Academy», 2006 (in Russian).
- [6] I.P. Kopylov, *Elektricheskiye mashiny*. Moscow: Higher school, 2009, P. 607 (in Russian).
- [7] S.D. Lizunov and A.K. Lokhanin, *Silovyye transformatory. Spravochnaya kniga*. Moscow: Energoizdat, 2004 (in Russian).
- [8] A.S. Serebryakov, *Transformatory*. Moscow: Publishing House MEI, 2013 (in Russian).
- [9] A.S. Serebryakov and V.V. Shumeiko, *MATHCAD i resheniye zadach elektrotekhniki*. Moscow: Marshrute, 2005 (in Russian).

УДК 621.313.333

А.А. Попов¹, В.А. Попова¹,
И.В. Гуляев¹, F. Briz del Blanco²

УЛУЧШЕНИЕ ДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ РАЗЛИЧНЫХ МЕТОДОВ ПЕРЕМОДУЛЯЦИИ ДЛЯ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОГО УПРАВЛЕНИЯ

¹ Национальный исследовательский
Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарева
² Университет Овьедо

Проблема энергосбережения продолжает быть актуальной для мировой экономики. Поскольку электропривод (ЭП) является основным потребителем электроэнергии, его энергоэффективность также находится в центре внимания научных исследований. Основной проблемой энергоэффективного управления являются низкие показатели динамики, неприемлемые в некоторых промышленных установках. Так, в машинах, работающих при малых нагрузках в течение длительных периодов времени, снижают уровень потока ротора. В таком случае динамика системы будет напрямую зависеть от возможности намагнитить ротор. Предложен метод улучшения динамики АД при полеориентированном управлении, основанный на использовании всех доступных ресурсов инвертора для максимально быстрого намагничивания ротора двигателя. Ступенчатая команда момента заменяется линейно возрастающей, что позволяет достичь улучшенных динамических характеристик электропривода и снизить механическую нагрузку на трансмиссию. В настоящей работе рассмотрены методы перемодуляции при достижении ограничений по напряжению во время переходного процесса с использованием предложенной системы управления.

Ключевые слова: асинхронный двигатель, динамика электропривода, методы перемодуляции, МТРА, моделирование, MatLab, полеориентированное управление.

1. Введение

Электропривод – основной потребитель электроэнергии во всем мире. Во многих отраслях промышленности он играет ключевую роль в качестве главного источника механической энергии. Использование энергоэффективных законов управления позволит существенно снизить энергопотребление промышленности в целом. В литературе представлено несколь-

ко решений поставленной задачи. Наиболее распространенным и изученным является метод минимума статорных токов (в зарубежной научной периодике – МТРА). Он обеспечивает эффективность близкую к методу минимизации полных потерь и при этом проще в реализации. Энергоэффективность МТРА достигается благодаря снижению потока ротора при работе на малой нагрузке [1]. В то же время, в сравнении с традиционной системой управления, использующей номинальный поток независимо от нагрузки, данный метод имеет существенный недостаток. Так, при изменении команды момента возникает необходимость намагнитить ротор двигателя, что, из-за большой константы времени ротора, может происходить сравнительно долго.

В работе [2] предложена стратегия, изменяющая ступенчатую команду момента на постепенно возрастающую. Это позволяет повысить динамику системы, используя весь доступный ток на намагничивание ротора, а также снизить нагрузку на механическую часть привода. При этом учитываются не только ограничения по току, но и ограничения по напряжению. Данная работа рассматривает различные способы перемодуляции во время переходного процесса при недостаточном напряжении на звене постоянного тока для следования заданным командам токов.

II. Основная часть

На рис. 1 представлена блок-схема системы управления асинхронным двигателем (АД) с полеориентированной системой управления. Она включает в себя блок формирования наклонной команды момента, блок формирования команд токов на основании предложенного алгоритма, синхронный ПИ регулятор, блок ограничения команд напряжений, преобразователь, двигатель и наблюдатель потока.

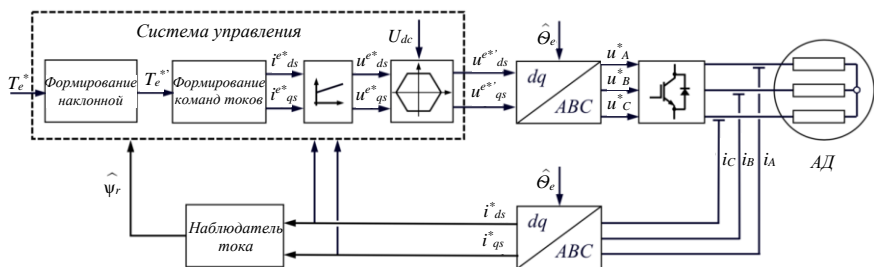


Рис. 1. Блок-схема системы управления асинхронным двигателем

Команда момента T_e^* поступает на вход системы управления, в блоке «формирование наклонной» происходит расчет максимально возможного угла наклона прямой команды момента с учетом начальных и конечных условий и формируется новая команда T_e^{**} . Затем

рассчитываются команды токов по осям dq исходя из заданного алгоритма, описанного в [3]. Команды напряжений, необходимых для следования командам токов, формируют с использованием регуляторов тока. При этом, как только команда напряжения выходит за границы доступного напряжения, ее необходимо ограничить.

III. Области регулирования электропривода

Выделяют две области регулирования для электропривода: область постоянного момента (при скоростях ниже номинальной) и область постоянной мощности (при скоростях выше номинальной). Графическое представление основных параметров электропривода в данных областях представлено на рис. 2, а.

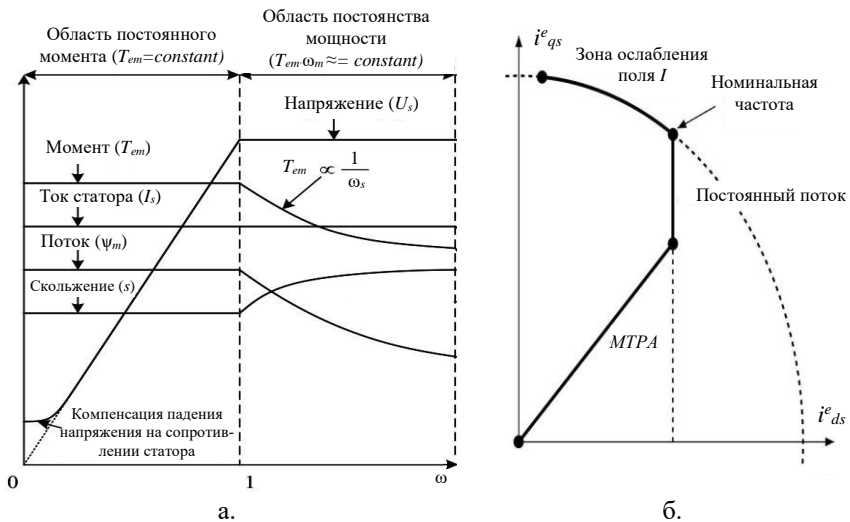


Рис. 2. Области регулирования асинхронного двигателя (а); траектория движения вектора тока по мере увеличения скорости вращения ротора в синхронной системе координат (б)

На низких скоростях вращения противоЭДС мала, напряжения на звене постоянного тока достаточно для создания номинальных токов и поддержания номинального момента. Большой запас по напряжению на инверторе позволяет регуляторам работать корректно и рассматривать только ограничения по току для построения системы управления потоком. При работе на скоростях, близких к номинальным, также возможно получение номинального момента и токов. При построении системы управления, тем не менее, следует рассматривать ограничения по току, а также ограничения по напряжению во время переходного процесса.

В области постоянной мощности машина работает при ограничениях по току и напряжению в установившемся режиме. Доступного напряжения на преобразователе недостаточно для формирования номинального момента.

IV. Метод минимума статорных токов

Для обеспечения энергоэффективности в режимах работы с низкой нагрузкой и на скоростях ниже номинальной используется метод минимума статорных токов. Данный метод показывает характеристики, близкие к методу минимума полных потерь, при этом он хорошо изучен и прост в реализации. Уравнение момента для асинхронного двигателя представлено в (1). В установившемся режиме уравнение можно представить в виде (2).

$$T_e = \frac{2}{3} \cdot p \cdot \frac{L_m}{L_r} \cdot \psi_{dr}^e \cdot i_{qs}^e; \quad (1)$$

$$T_e = \frac{2}{3} \cdot p \cdot \frac{L_m}{L_r} \cdot i_{ds}^e \cdot i_{qs}^e. \quad (2)$$

Нетрудно заметить из (2), что для получения максимального момента при минимуме токов, необходимо соблюдать условие: $i_{ds}^e = i_{qs}^e$. При достижении током по оси d значения равного номинальному, дальнейшее его увеличение нецелесообразно, т.к. не приведет к дальнейшему увеличению потока ротора двигателя. Вектор тока в синхронной системе координат в зависимости от скорости вращения ротора представлен на рис. 2, б.

V. Формирование команды момента в условиях ограничения по току

При изменении команды момент на валу не может быть изменен мгновенно, в соответствии с командами токов. Для повышения динамики при поступлении новой команды необходимо намагнитить ротор как можно быстрее. Это возможно при использовании всего доступного тока, но такой подход вызовет задержку в изменении момента на время намагничивания, а также последующий бросок после завершения процесса. В качестве альтернативы предлагается заменить ступенчатую команду момента на линейно возрастающую. Это позволит снизить нагрузку на механическую трансмиссию и сохранить высокие динамические характеристики.

На рис. 3 представлены результаты моделирования предложенного алгоритма. Ступенькообразная команда с 0,3 о.е. до номинального момента была заменена на линейно-возрастающую. При этом угол наклона новой команды выбран таким образом, чтобы переходные процессы в токах, потоке и моменте завершились одновременно. Это гарантирует отсутствие

бросков в конце переходного процесса и использование всего доступного тока для намагничивания ротора.

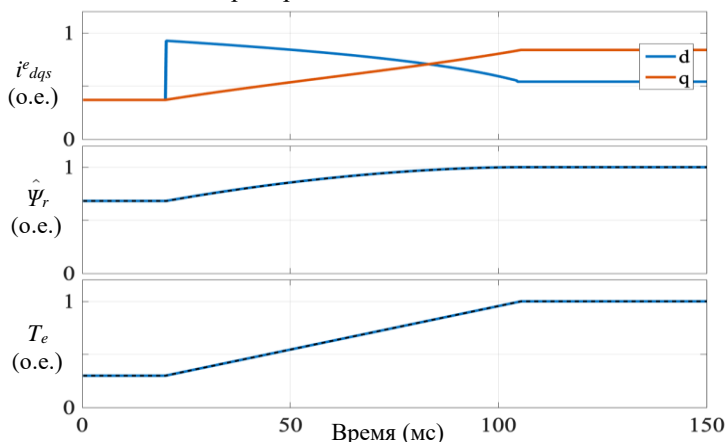


Рис. 3. Результаты моделирования предложенного алгоритма.

Команда момента изменяется от 0,3 до 1 о.е.

Сверху вниз: dq токи статора, поток ротора, момент

VI. Формирование команды момента с учетом ограничений по напряжению

Для формирования наклонной команды момента необходимо определить угол ее наклона. В работе [2] используются методы численного моделирования и бинарный поиск для подбора оптимального угла наклона. При скоростях, близких к номинальным, необходимо принимать во внимание не только ограничения по току, но и ограничения по напряжению во время переходного процесса. Недостаток напряжения на инверторе может привести к насыщению регуляторов тока и их некорректной работе. При этом следует рассмотреть различные варианты ограничения команды вектора напряжения.

VII. Методы перемодуляции

Все доступное напряжение на преобразователе можно обозначить шестиугольником, размеры которого будут зависеть от напряжения на звене постоянного тока U_{dc} (рис. 4, а). При этом область, ограниченная вписанной окружностью, называется линейной, а остальное пространство – нелинейной областью. Если вектор напряжения вращается в линейной области, преобразователь может воспроизвести его. Однако при выходе команды напряжения за пределы шестиугольника его необходимо ограничить. В литературе можно встретить три основных метода перемодуляции: с ми-

нимальной ошибкой по фазе, с минимальной дистанцией и с минимальной ошибкой по амплитуде. Они представлены на рис. 4, б.

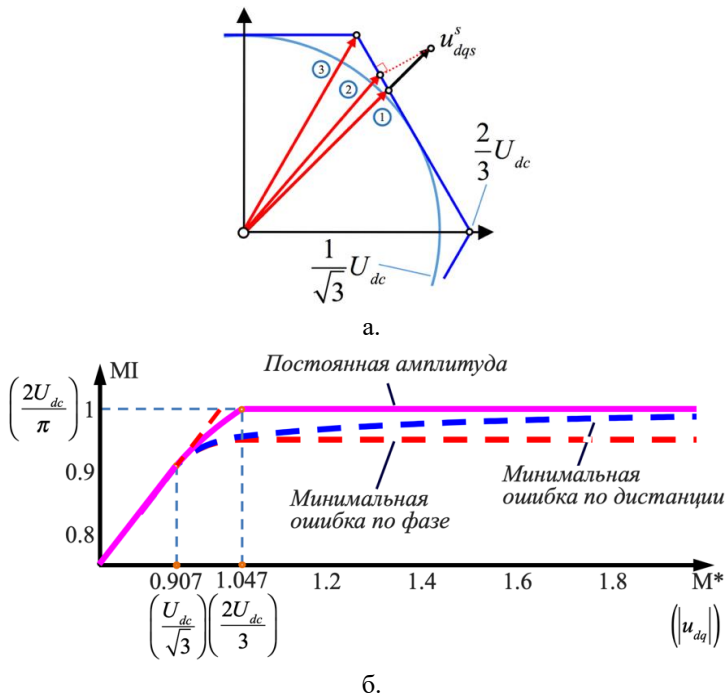


Рис. 4. Ограничения напряжения на преобразователе частоты и варианты его ограничения: минимальная ошибка по фазе (1), минимальная дистанция (2), минимальная ошибка по амплитуде (3) (а); коэффициент модуляции для различных методов перемодуляции (б)

Линейность, гармонические искажения, а также рабочие характеристики ограниченного сигнала напряжения напрямую зависят от коэффициента модуляции. Обозначим его как соотношение:

$$MI = \frac{U_{dqs}^s}{2 / \pi \cdot U_{dc}}. \quad (3)$$

В числителе данного выражения – амплитуда фундаментальной компоненты вектора напряжения, в знаменателе – максимальное напряжение, доступное на преобразователе [4]. Режим работы, при котором вектор

напряжения переходит от одного угла шестиугольника к другому, называется шести-ступенчатой модуляцией. При данном типе модуляции MI равно 1.

Для электропривода, работающего во второй зоне, во время переходного процесса для следования заданию токов необходимо учитывать не только ограничения по току, но и ограничения по напряжению. Использование всего доступного напряжения на инверторе в таком случае позволит сохранить динамику регуляторов тока. Рассмотрим вектор u^s_{dq} , вращающийся в стационарной системе координат. В то время как его длина меньше $U_{dc} / \sqrt{3}$, коэффициент модуляции растет пропорционально росту длины вектора и достигает $MI = \pi / 2 \cdot \sqrt{3} = 0,907$ на границе линейной области. Дальнейший его рост определяется техникой перемодуляции.

Очевидным решением задачи является ограничение длины вектора напряжения до границ шестиугольника и тем самым обеспечить его достижимость. Фаза вектора при этом остается неизменной. Однако, при достижении вектором длины $2/3 \cdot U_{dc}$, коэффициент модуляции насыщается в районе 0,952. При этом порядка 4,8 % потенциала преобразователя не задействовано [5]. Это делает данный подход неприменимым для перехода к шестиступенчатой модуляции.

Другим решением является перемодуляция с минимальной дистанцией. Основным ее отличием от предыдущего метода является сохранение большей амплитуды вектора напряжения, но при этом изменяется и фаза. При анализе коэффициента модуляции видно, что данный вид перемодуляции постепенно увеличивает значение MI и достигает 0,98. Как и в предыдущем варианте, остается неиспользованным около 2 % напряжения на преобразователе [6]. Метод с минимальной ошибкой по амплитуде «поворачивает» вектор напряжения в сторону ближайшего угла шестиугольника до его касания шестиугольника или достижения угла. Таким образом, в момент, когда длина вектора напряжения становится равна $2/3 \cdot U_{dc}$, система приходит к шестиступенчатой модуляции. Поскольку результирующие вектора близки к вершинам ограничивающего шестиугольника, коэффициент модуляции быстро возрастает в нелинейной области [7]. Отклонение составляет менее 5 % и может быть скомпенсировано замкнутой системой управления.

VIII. Результаты моделирования

На рис. 5 представлены результаты моделирования предложенной системы управления в зоне ослабления поля. Скорость ротора составляет 1,1 о.е. от номинальной. Команда момента изменяется с 0,1 до 0,7 о.е. от номинального значения. При этом используется коэффициент наклонной прямой для формирования команды момента без учета ограничений по напряжению. Как было отмечено ранее, на скорости, близкой к номиналь-

ной, ограничения по напряжению достигаются только во время переходного процесса. Для ограничения команды напряжений используется метод перемодуляции с постоянной амплитудой. Как показано на рис. 5, при достижении потоком своего максимального для этой зоны значения вектор u_{dqs} выходит из линейной зоны, а применение перемодуляции вызывает искажения в формах тока. Тем не менее, система управления остается стабильной, что доказывает применимость данного метода перемодуляции для ограничения команды напряжения, а также возможность использования рассчитанных ранее коэффициентов для формирования наклонной команды момента.

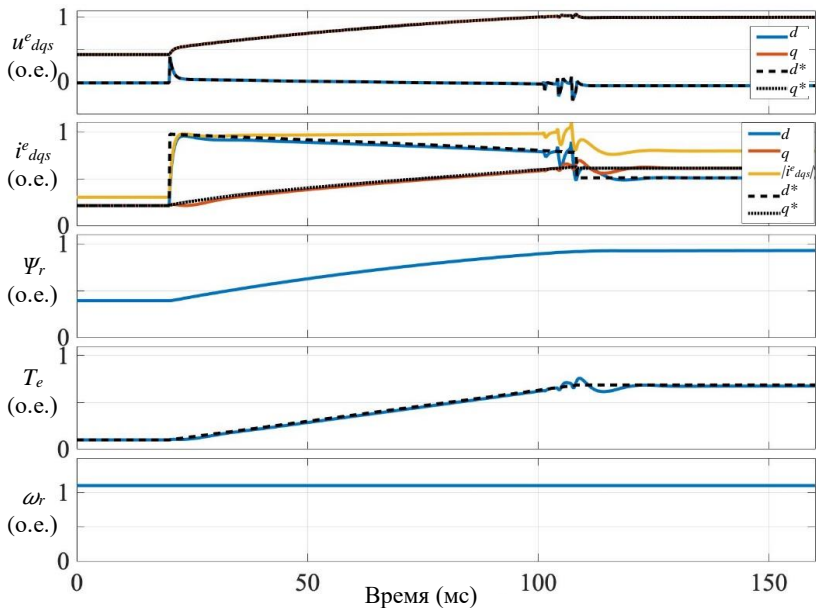


Рис. 5. Результат моделирования предложенной системы управления с ограничениями по напряжению во время переходного процесса.

Команда момента изменяется от 0,1 до 0,7 о.е. Скорость вращения ротора равна 1,1 от номинальной величины. Сверху вниз: dq напряжения статора,

dq токи статора, поток ротора, момент, скорость ротора

IX. Заключение

В работе рассмотрены методы перемодуляции при достижении ограничений по напряжению во время переходного процесса. Представлены три основных метода перемодуляции: с минимальной ошибкой по фазе,

с минимальной дистанцией и с минимальной ошибкой по амплитуде. Проанализирована возможность применения каждого из методов для перехода к шестиступенчатой модуляции. Перемодуляция с минимальной ошибкой по амплитуде позволяет перейти от линейного режима работы к шестиступенчатой модуляции, причем достаточно быстро для применения в предложенной системе управления. Это дает возможность использования всего доступного на преобразователе напряжения для поддержания работы регуляторов тока во время переходного процесса.

Исследования выполнены при финансовой поддержке Российского научного фонда (грант №15-19-20057П).

© Попов А.А., 2019

© Попова В.А., 2019

© Гуляев И.В., 2019

© Briz del Blanco F., 2019

Библиографический список

- [1] Kwon C., Suhdooff S.D. An adaptive maximum torque per amp control strategy // Proceeding of the IEEE International Conference on Electric Machines and Drives. 2005. P. 783-788.
- [2] Popov A., Lapshina V., Gulyaev I., Briz F. Improving the dynamic response of FOC induction machines operated with reduced rotor flux // Proceeding of the 25th International Workshop on Electric Drives: Optimization in Control of Electric Drives, January, 2018. Ural, Russia. IWED-2018.
- [3] Popov A., Lapshina V., Briz F. Gulyaev I. Dynamic operation of FOC induction machines under current and voltage constraints // Proceedings of the 19th European Conference on Power Electronics and Applications (EPE-2017). 2017, P. 1-10.
- [4] Hava A.M., Kerkman R.J., Lipo T.A. Carrier-based PWM-VSI overmodulation strategies: Analysis, comparison, and design // IEEE Transactions on Power Electronics. 1998. № 13 (4). P. 674-689.
- [5] Lin Y., Lai Y.S. Voltage control technique for the extension of DC-link voltage utilization of finite-speed SPMSM drives // IEEE Transactions on Industrial Electronics. 2012. № 59 (9). P. 3392-3402.
- [6] Kwon T.S., Sul S.K. Novel antiwindup of a current regulator of a surface-mounted permanent-magnet motor for flux-weakening control // IEEE Transactions on Industry Applications. 2006. № 42 (5). P. 1293-1300.
- [7] Bolognani S., Zigliotto M. Novel digital continuous control of SVM inverters in the overmodulation range // IEEE Transactions on Industry Applications. 1997. № 33 (2). P. 525-530.

A.A. Popov ¹, V.A. Popova ¹,
I.V. Gulyaev ¹, F. Briz del Blanco ²

IMPROVING THE DYNAMIC CHARACTERISTICS OF AN INDUCTION MOTOR USING VARIOUS OVERMODULATION METHODS FOR ENERGY EFFICIENT CONTROL

¹ National Research Ogarev Mordovia State University
Saransk, Russia
² University of Oviedo
Oviedo, Spain

Abstract. The problem of energy saving continues to be a relevant issue in the global economy. At the same time electric drive is the main consumers of energy. The efficiency of drives is another topical issue too and a great deal of research is being carried out to solve this problem. The main thing for efficient control is low dynamic that makes it unacceptable in industry application. In motors, which are regularly operated at low load for a long time the flux level should be reduced. In this case, the dynamics of the motor will be defined by the rotor time constant. The proposed method improves the dynamic of induction motor (IM) under FOC. This is done by using all available inverter resource to increase rotor flux. The step-like command of torque is replaced by ramp-like command. This type of command reduces the stress on the mechanical transmission and improves the electric drive dynamics. This paper considers overmodulation methods during the transient process.

Keywords: electric drive dynamics, FOC, induction motor, MatLab, MTPA, overmodulation methods, simulation.

References

- [1] C. Kwon and S.D. Suhdooff, «An adaptive maximum torque per amp control strategy», in proc. *IEEE International Conference on Electric Machines and Drives*, 2005, pp. 783-788.
- [2] A. Popov, V. Lapshina, I. Gulyaev and F. Briz, «Improving the dynamic response of FOC induction machines operated with reduced rotor flux», in proc. *25th International Workshop on Electric Drives: Optimization in Control of Electric Drives*, Jan. 2018, Ural, Russia, IWED-2018.
- [3] A. Popov, V. Lapshina, F. Briz and I. Gulyaev, «Dynamic operation of FOC induction machines under current and voltage constraints», in proc. *19th European Conference on Power Electronics and Applications (EPE-2017)*, pp.1-10.
- [4] A.M. Hava, R.J. Kerkman and T.A. Lipo, «Carrier-based PWM- VSI overmodulation strategies: Analysis, comparison, and design», *IEEE Transaction on Power Electronics*, vol. 13, no. 4, pp. 674-689, Jul. 1998.

-
- [5] Y. Lin and Y.S. Lai, «Voltage control technique for the extension of DC-link voltage utilization of finite-speed SPMSM drives», *IEEE Transaction on Industrial Electronics*, vol. 59, no. 9, pp. 3392-3402, Sep. 2012.
 - [6] T.S. Kwon and S.K. Sul, «Novel antiwindup of a current regulator of a surface-mounted permanent-magnet motor for flux-weakening control», *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 42, no. 5, pp. 1293-1300, Sep.-Oct. 2006.
 - [7] S. Bolognani and M. Zigliotto, «Novel digital continuous control of SVM inverters in the overmodulation range», *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 33, no. 2, pp. 525-530, Mar., Apr. 1997.

УДК 621.321

П.В. Терентьев, Д.А. Филатов, М.А. Плаксин

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ИСКУССТВЕННЫХ ИСТОЧНИКОВ СВЕТА ДЛЯ ОСВЕЩЕНИЯ СЕЛЬСКИХ ТЕРРИТОРИЙ

Нижегородская государственная сельскохозяйственная академия

В настоящее время как в России, так и за рубежом, активно проводятся исследования светильников наружного освещения. В статье рассматривается взаимное влияние источников света и электрических сетей для оценки нормального функционирования и энергоэффективной работы при замене источников наружного освещения. Объект исследования – светильники наружного освещения с газоразрядными источниками света (с лампой ДРЛ и с лампой ДНаТ) и светодиодные светильники. Для исследований использованы: линейный автотрансформатор регулируемый РНО-250-2-М, анализатор качества электроэнергии Circutor AR-5L, люксметр Testo 545. В результате получены математические выражения изменения фактических параметров светильников при изменении уровня питающего напряжения. Получены суммарные коэффициенты гармонических составляющих тока. При изменении уровня питающего напряжения $\pm 10\%$ от $U_{ном}$ для светильников с лампой ДРЛ и ДНаТ изменяется величина активной мощности тока и светового потока. Потребляемая активная мощность и световой поток светодиодных светильников остаются неизменными и равными номинальным значениям; однако суммарный коэффициент гармонических составляющих тока светодиодных светильников больше, чем у светильников с разрядными лампами. Связанные с этим возможные негативные эффекты для работы питающих электросетей требуют дальнейших исследований.

Ключевые слова: гармоники тока, изменение уровня напряжения, светодиодные светильники, светильники с разрядными лампами.

1. Введение

Потребление электроэнергии сельским хозяйством по разным оценкам составляет 15,3...16 млрд кВт·ч, из которых на долю освещения приходится 15 % [1, 2]. При этом затраты по оплате электроэнергии на наружное освещение ложатся на муниципальные органы власти. В настоящее время в ряде районов Нижегородской области постепенно идет модернизация уличного освещения на селе. Однако сельские электрические сети характеризуются физическим старением и низким качеством электроэнергии [3-5], которое может негативно влиять на нормальное функционирование осветительных установок и снижать эффективность их работы. В

настоящее время как в России, так и за рубежом проводятся исследования светильников наружного освещения [6-10]. Однако, мы полагаем, что этих исследований недостаточно. Целью настоящей работы является изучение взаимного влияния источников света и электрических сетей для оценки нормального функционирования и энергоэффективной работы при модернизации действующих источников наружного освещения.

II. Материалы и методы

В настоящее время в качестве источников света для наружного освещения сельских территорий преобладают светильники с лампами ДРЛ. Модернизация систем освещения сводится к замене светильников с лампами ДРЛ на светильники с лампами ДНаТ или на светодиодные светильники. Объект исследования – светильники наружного освещения с газоразрядными источниками света (с лампой ДРЛ и с лампой ДНаТ) и светодиодные светильники.

Исследования взаимного влияния источников света и электрических сетей проводились в лаборатории «Светотехника» НГСХА. Для исследований использовано следующее оборудование: амперметр, вольтметр, ваттметр, линейный автотрансформатор (ЛАТР), анализатор качества электроэнергии. Регулировка питающего напряжения для источника света осуществлялась линейным автотрансформатором. Показания снимались анализатором качества электроэнергии AR-5L. Контролировались параметры тока, питающего напряжения, потребляемой мощности амперметром, вольтметром, ваттметром и варметром соответственно.

III. Результаты

Для исключения непроизводительных затрат электроэнергии необходимо, чтобы источники света после включения в течение минимально возможного времени выходили на номинальный режим.

На рис. 1 представлены результаты замера выхода на номинальный режим светильника РКУ с лампой ДРЛ. Общее время выхода светильника РКУ с лампой ДРЛ на номинальный режим при номинальном потреблении электроэнергии составляет 180 с (0,05 ч). При этом резкий набор светового потока осуществляется через 60 с после пуска. При годовом среднесуточном режиме работы источника света 10 ч непроизводительные затраты составляют 0,5 % от годового потребления электроэнергии.

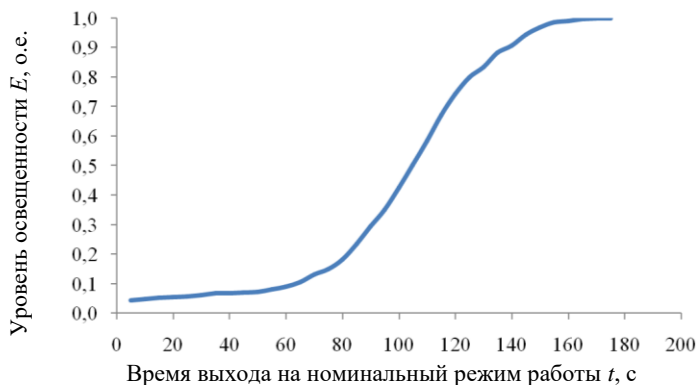


Рис. 1. Зависимость выхода светильника с лампой ДРЛ на номинальный режим от времени

На рис. 2 представлены результаты замера выхода на номинальный режим светильника ЖКУ с лампой ДНаТ. Общее время выхода светильника ЖКУ с лампой ДНаТ на номинальный режим при номинальном потреблении электроэнергии составляет 800 с (0,22 ч). При годовом среднесуточном режиме работы источника света 10 ч непроизводительные затраты составляют 2,2 % от годового потребления электроэнергии.

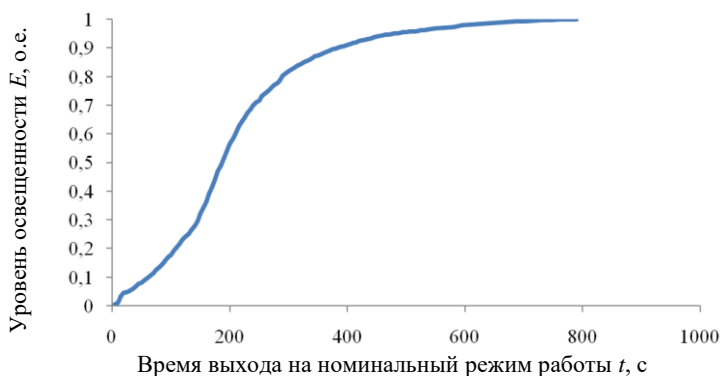


Рис. 2. Зависимость выхода светильника с лампой ДНаТ на номинальный режим от времени

На рис. 3 представлены результаты замера выхода на номинальный режим светодиодного светильника. Выход светодиодного светильника PRO STREET 100 на номинальный, т.е., заявленный производителем ре-

жим, при номинальном потреблении электроэнергии происходит мгновенно. Однако при эксплуатации световой поток за 120 мин падает до $0,956 \cdot E_{\text{ном}}$, а затем стабилизируется. При годовом среднесуточном режиме работы источника света 10 ч непроизводительные затраты составляют 4,4 % от годового потребления электроэнергии.

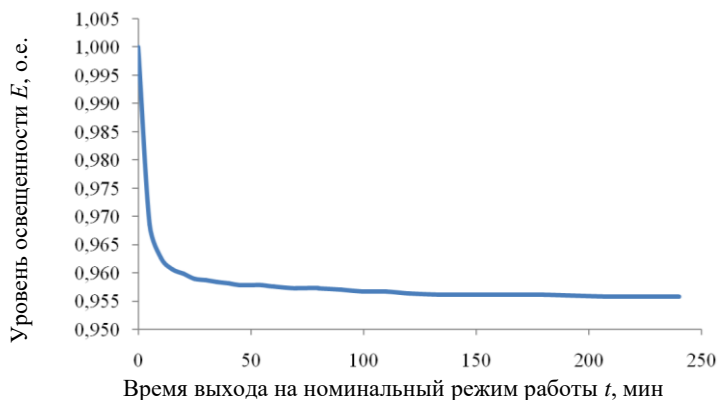


Рис. 3. Зависимость выхода светодиодного светильника на номинальный режим от времени

Необходимо отметить, что потребление мощности светильником с лампой при номинальном режиме может отличаться от номинальной мощности лампы. Это обусловлено дополнительными потерями в пускорегулирующей аппаратуре (ПРА) осветительных приборов. Результаты замеров показали, что дополнительные потери в светильниках с лампами ДРЛ составили 9 % от номинальной мощности лампы, в светильниках с лампами ДНаТ – 17 %, в светодиодных светильниках – 0 %.

Сельские электрические сети характеризуются низким качеством электроэнергии. Общий диапазон изменения напряжения колеблется в интервале 15-20 % от номинального значения. Проведены исследования влияния изменения уровня питающего напряжения на параметры источников света. На рис. 4-12 точками показаны результаты исследований, сплошной линией – линия тренда.

На рис. 4 представлены результаты исследования влияния уровня питающего напряжения на активную мощность светильника с лампой ДРЛ. При напряжении $0,9 \cdot U_{\text{ном}}$ мощность снижается на 25,3 %. При напряжении $1,1 \cdot U_{\text{ном}}$ мощность увеличивается на 27,9 %. На основании результатов исследования получено математическое выражение изменения

фактического потребления активной мощности $P_{\text{ф. дрл}}$ при изменении уровня питающего напряжения:

$$P_{\text{ф. дрл}} = P_{\text{ном}} \cdot (2,6 \cdot K_U - 1,6);$$

$$R^2 = 9981, \quad (1)$$

где $P_{\text{ном}}$ – номинальное потребление активной мощности, Вт; $K_U = K_{\text{ф}} / K_{\text{ном}}$ – изменение уровня питающего напряжения, о.е.

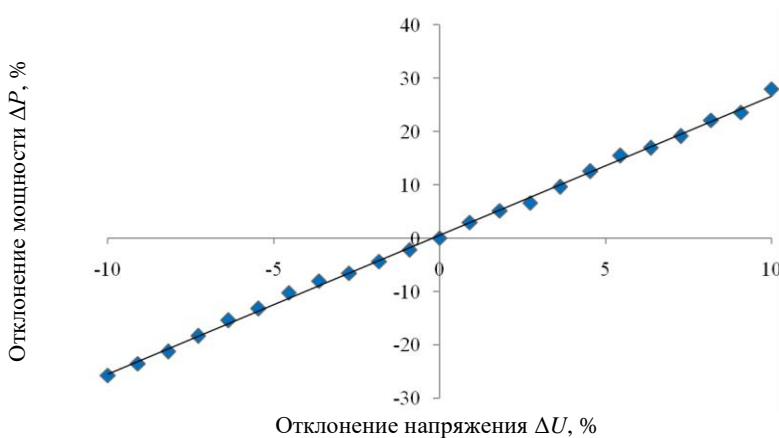


Рис. 4. Зависимость потребления активной мощности светильника с лампой ДРЛ от изменения уровня питающего напряжения

Увеличение мощности при увеличении напряжения сопровождается увеличением тока, а при уменьшении напряжения – уменьшением тока. На рис. 5 представлены результаты исследования влияния уровня питающего напряжения на величину тока светильника с лампой ДРЛ. При напряжении $0,9 \cdot U_{\text{ном}}$ величина тока снижается на 23,7 %. При напряжении $1,1 \cdot U_{\text{ном}}$ потребление электроэнергии увеличивается на 22,2 %. На основании результатов исследования получено математическое выражение изменения величины тока $I_{\text{ф. дрл}}$ при изменении уровня питающего напряжения:

$$I_{\text{ф. дрл}} = I_{\text{ном}} \cdot (2,23 \cdot K_U - 1,23);$$

$$R^2 = 9974, \quad (2)$$

где $I_{\text{ном}}$ – номинальный ток, А.

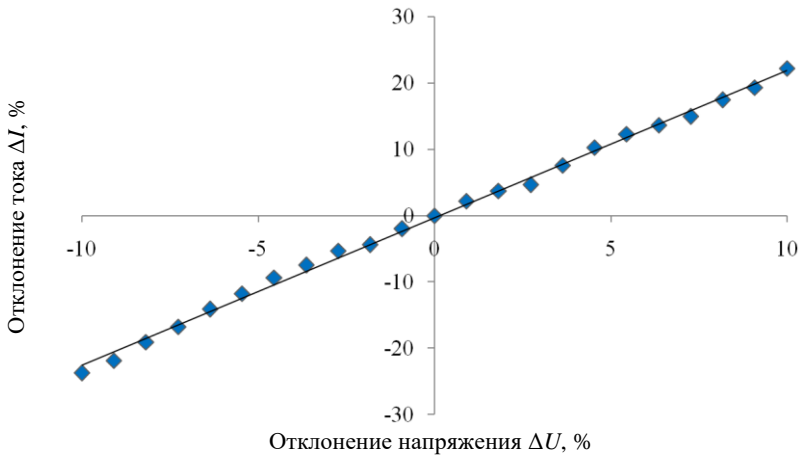


Рис. 5. Зависимость уровня тока светильника с лампой ДРЛ от изменения уровня питающего напряжения

На рис. 6 представлены результаты исследования изменения уровня питающего напряжения на активную мощность светильника с лампой ДНаТ. При напряжении $0,9 \cdot P_{\text{ном}}$ мощность снижается на 20,6 %. При напряжении $1,1 \cdot P_{\text{ном}}$ мощность увеличивается на 26,7 %. На основании результатов исследования получено математическое выражение изменения фактического потребления активной мощности $P_{\text{ф.днат}}$ при изменении уровня питающего напряжения:

$$P_{\text{ф.днат}} = P_{\text{ном}} \cdot (2,42 \cdot K_U - 1,42);$$

$$R^2 = 9948.$$
(3)

Увеличение мощности при увеличении напряжения сопровождается увеличением тока, а при уменьшении напряжения – уменьшением тока. На рис. 7 представлены результаты исследования влияния уровня питающего напряжения на величину тока светильника с лампой ДНаТ. При напряжении $0,9 \cdot U_{\text{ном}}$ величина тока снижается на 13,9 %. При напряжении $1,1 \cdot U_{\text{ном}}$ потребление электроэнергии увеличивается на 6,9 %. На основании результатов исследования получено математическое выражение изменения величины тока $I_{\text{ф.днат}}$ при изменении уровня питающего напряжения:

$$I_{\text{ф.днат}} = I_{\text{ном}} \cdot (0,93 \cdot K_U + 0,07);$$

$$R^2 = 9616.$$
(4)

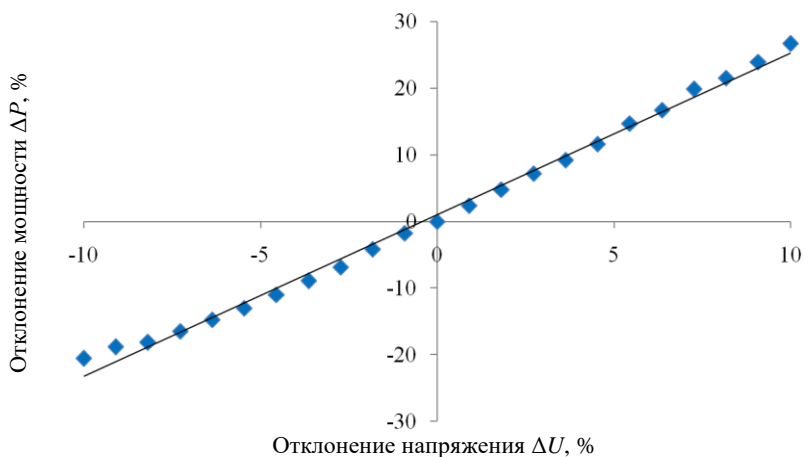


Рис. 6. Зависимость потребления активной мощности светильника с лампой ДНаТ от изменения уровня питающего напряжения

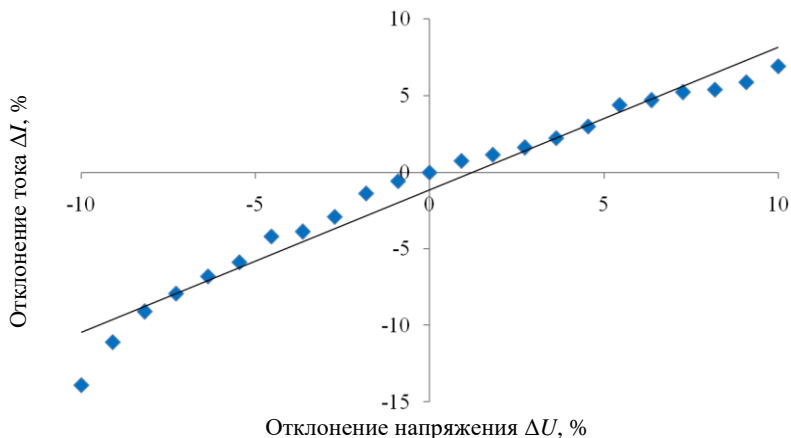


Рис. 7. Зависимость уровня тока светильника с лампой ДНаТ от изменения уровня питающего напряжения

Проведенные исследования показали, что потребляемая активная мощность для светодиодных светильников остается неизменной и равной номинальному значению при изменении уровня питающего напряжения $\pm 10\%$ от $U_{\text{ном}}$. Стабилизация параметров происходит главным образом за

счет изменения величины тока. На рис. 8 представлены результаты исследования влияния уровня питающего напряжения на величину тока светодиодного светильника PRO STREET 100. При напряжении $0,9 \cdot U_{\text{ном}}$ величина тока $1,09 \cdot I_{\text{ном}}$. При напряжении $1,1 \cdot U_{\text{ном}}$ величина тока $0,93 \cdot I_{\text{ном}}$.

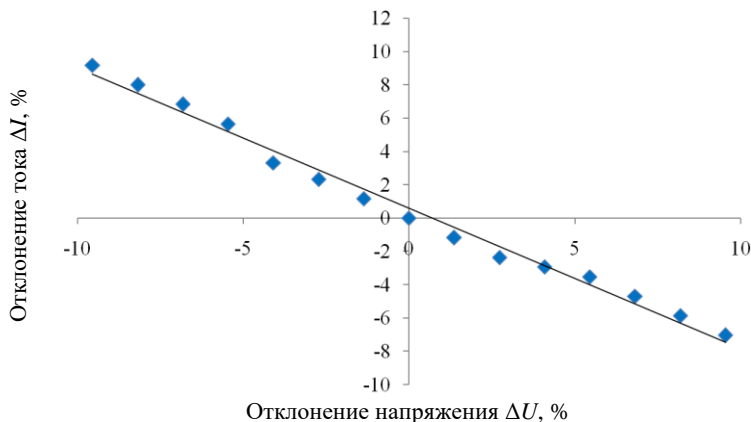


Рис. 8. Зависимость уровня тока светодиодного светильника PRO STREET 100 от изменения уровня питающего напряжения

На основании результатов исследования получено математическое выражение изменения величины тока $I_{\text{ф.днат}}$ при изменении уровня питающего напряжения:

$$I_{\text{ф.лед}} = I_{\text{ном}} \cdot (-0,84 \cdot K_U + 1,84);$$

$$R^2 = 9889.$$
(5)

Проведены исследования по влиянию изменения питающего напряжения на световой поток источников света. На рис. 9 представлены результаты влияния изменения уровня питающего напряжения на световой поток светильника с лампой ДРЛ. При напряжении $0,9 \cdot P_{\text{ном}}$ световой поток снижается на 31,7 %. При напряжении $1,1 \cdot P_{\text{ном}}$ световой поток увеличивается на 29,9 %. На основании результатов исследования получено математическое выражение изменения фактического светового потока $F_{\text{ф.дрл}}$ при изменении уровня питающего напряжения:

$$F_{\text{ф.дрл}} = F_{\text{ном}} \cdot (3,07 \cdot K_U - 2,07);$$

$$R^2 = 9997.$$
(6)

На рис. 10 представлены результаты влияния изменения уровня питающего напряжения на световой поток светильника с лампой ДНаТ. При напряжении $0,9 \cdot P_{\text{ном}}$ световой поток снижается на 19,4 %. При напряжении $1,1 \cdot P_{\text{ном}}$ световой поток увеличивается на 34,4 %. Получено математическое выражение изменения $F_{\text{ф.днат}}$ при изменении питающего напряжения:

$$F_{\text{ф.днат}} = F_{\text{ном}} \cdot (2,67 \cdot K_U - 1,67);$$

$$R^2 = 9719. \quad (7)$$

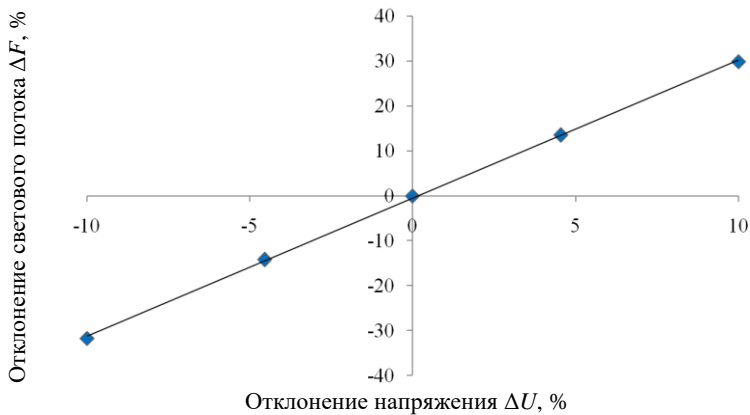


Рис. 9. Зависимость светового потока светильника с лампой ДРЛ от изменения уровня питающего напряжения

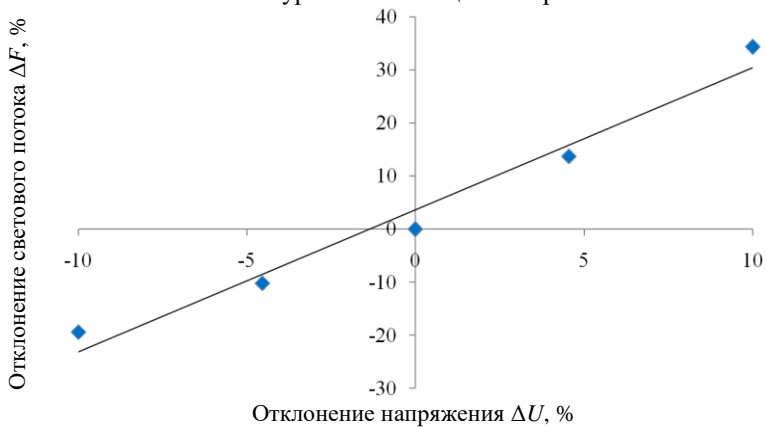


Рис. 10. Зависимость светового потока светильника с лампой ДНаТ от изменения уровня питающего напряжения

Проведенные исследования показали, что световой поток для светодиодных светильников остается неизменным и равным номинальному значению при изменении уровня питающего напряжения $\pm 10\%$ от $U_{\text{ном}}$.

Проведены исследования по влиянию изменения питающего напряжения на коэффициент мощности источников света. На рис. 11 представлены результаты влияния изменения уровня питающего напряжения на коэффициент мощности светильника с лампой ДРЛ. При напряжении $0,9 \cdot P_{\text{ном}}$ коэффициент мощности увеличивается на $8,9\%$. При напряжении $1,1 \cdot P_{\text{ном}}$ коэффициент мощности уменьшается на $5,41\%$. На основании результатов исследования получено математическое выражение изменения коэффициента мощности $\cos \varphi_{\text{дрл}}$ при изменении уровня питающего напряжения:

$$\cos \varphi_{\text{дрл}} = \cos \varphi_{\text{ном}} \cdot (-0,67 \cdot K_U + 1,67); \quad (8)$$

$$R^2 = 9798.$$

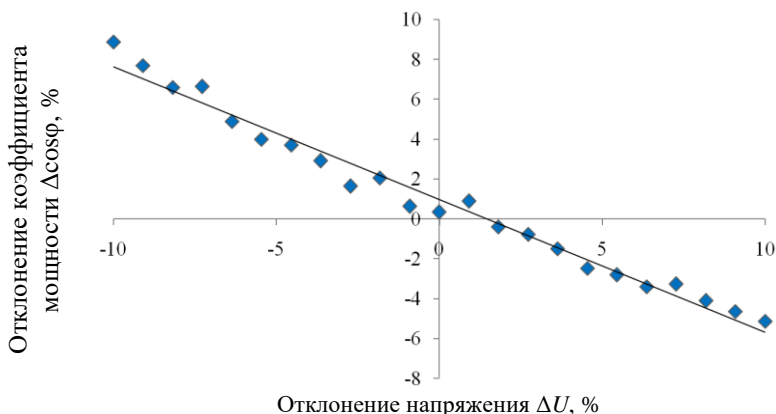


Рис. 11. Зависимость коэффициент мощности светильника с лампой ДРЛ от изменения уровня питающего напряжения

На рис. 12 представлены результаты влияния изменения уровня питающего напряжения на коэффициент мощности светильника с лампой ДНаТ. При напряжении $0,95 \cdot P_{\text{ном}}$ коэффициент мощности уменьшается на 1% , а при напряжении менее $0,95 \cdot P_{\text{ном}}$ коэффициент мощности возрастает. При напряжении $1,1 \cdot P_{\text{ном}}$ коэффициент мощности увеличивается на $7,8\%$. На основании результатов исследования получено математическое выражение изменения коэффициента мощности $\cos \varphi_{\text{днат}}$ при изменении уровня питающего напряжения:

$$\cos \varphi_{\text{ф.днат}} = \cos \varphi_{\text{ном}} \cdot (0,8 \cdot K_U + 0,2); \quad (9)$$

$$R^2 = 9917.$$

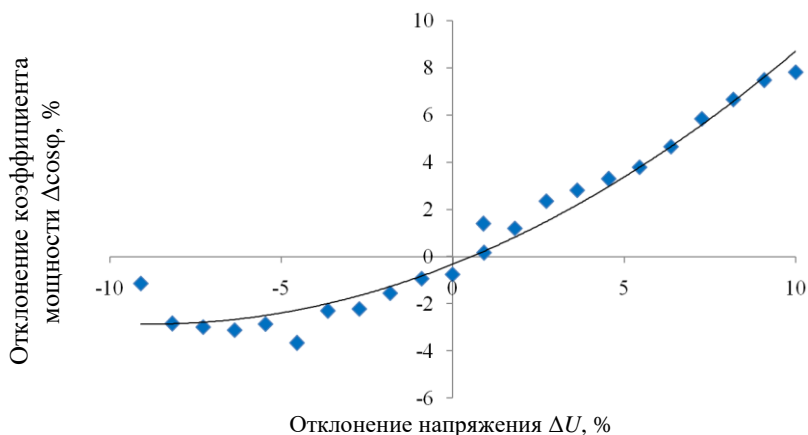


Рис. 12. Зависимость коэффициент мощности светильника с лампой ДНаТ от изменения уровня питающего напряжения

Проведенные исследования показали, что коэффициент мощности для светодиодных светильников остается неизменным и равным номинальному значению при изменении уровня питающего напряжения $\pm 10\%$ от $U_{\text{ном}}$. ГОСТ 32144-2013 ограничивает величину гармоник напряжения и не ограничивает величину гармоник тока. Однако большие величины этих гармоник приводят к негативным, а иногда и катастрофическим последствиям: перегрузке распределительных сетей из-за увеличения действующего значения тока; перегрузке нулевых проводников и выходу их из строя из-за суммирования токов высших гармоник, кратным трем; дополнительным потерям электрической энергии в электроприемниках и электрических сетях.

Измеренный суммарный коэффициент гармонических составляющих тока TND_i для светильника с лампой ДРЛ равен $10,3\%$, для светильника с лампой ДНаТ – $17,5\%$, для светодиодного светильника – $24,8\%$.

IV. Обсуждение

Проведенные исследования по электромагнитной совместимости различных типов светильников для наружного освещения с питающими электрическими сетями дали следующие результаты:

- 1) светодиодные фитосветильники в 4 раза быстрее выходят на номинальный режим, чем светильники ЖСП с лампами ДНаЗ; потенци-

- альные непроизводительные затраты составляют ЖСП с лампами ДНаТ 0,5-1 % от годового потребления электроэнергии;
- 2) изменение уровня питающего напряжения приводит к изменениям фактического потребления активной мощности, величины тока и светового потока для светильников с лампой ДРЛ и ДНаТ; получены математические модели этих процессов;
 - 3) потребляемая активная мощность и световой поток светодиодных светильников остаются неизменными и равны номинальным значениям при изменении уровня питающего напряжения $\pm 10\%$ от $U_{ном}$; стабилизация параметров происходит главным образом за счет изменения величины тока, получены математические модели;
 - 4) суммарный коэффициент гармонических составляющих тока светодиодного светильника больше, чем у светильников с разрядными лампами.

В. Заключение

Светодиодные светильники наружного освещения обладают большими преимуществами по сравнению со светильниками с разрядными лампами с ЭмПРА в отношении стабилизации потребляемой активной мощности и светового потока при изменении уровня питающего напряжения. Однако суммарный коэффициент гармонических составляющих тока светодиодных светильников больше, чем у светильников с разрядными лампами. Это может негативно сказаться на работе питающих электросетей и требует дальнейших исследований.

© Терентьев П.В., 2019

© Филатов Д.А., 2019

© Плаксин М.А., 2019

Библиографический список

- [1] Вагин Г.Я., Солнцев Е.Б., Малафеев О.Ю. Оценка характеристик систем освещения в России // Вестник Самарского государственного технического университета. Технические науки. 2016. № 3 (51). С. 78-86.
- [2] Юферев Л.Ю. Энерго-ресурсосберегающие осветительные и облучательные системы и установки сельскохозяйственного назначения на основе резонансной системы электропитания: автореферат дисс. док. техн. наук, МичГАУ, Мичуринск, 2015. – 43 с.
- [3] Филатов Д.А., Терентьев П.В. Электромагнитная совместимость систем электроснабжения и электрооборудования сельскохозяйственных предприятий при изменении уровня питающего напряжения // Вестник Нижегородской государственной сельскохозяйственной академии. 2016. № 3 (11). С. 57-62.
- [4] Филатов Д.А., Соснина Е.Н. О повышении энергоэффективности сельскохозяйственных предприятий // Материалы X юбилейной международ-

- ной научной конференции «Тинчуринские чтения». 25-27 марта 2015 г. Казань, КГЭУ, 2015. С. 163-164.
- [5] Филатов Д.А., Терентьев П.В. Качество электроэнергии и электромагнитная совместимость в электроэнергетике сельского хозяйства: учеб. пос.: Нижегородская ГСХА, 2017. – 116 с.
- [6] Товаров С.Ш., Маджидов Г.Х. Влияние отклонения напряжения на электрические величины осветительных ламп // Международный научно-исследовательский журнал. 2016. № 11 (54). С. 117-119.
- [7] Евминов Л.И., Кизева В.С. Сравнительный анализ различных источников света и оценка электромагнитной совместимости безэлектродных (индукционных) и светодиодных источников света // Вестник Гомельского государственного технического университета им. П.О. Сухого. 2013. № 1 (52). С. 60-66.
- [8] Евминов Л.И., Кизева В.С. Область применения и экспериментальные исследования электрических и светотехнических характеристик светильников для наружного и внутрицехового освещения // Вестник Гомельского государственного технического университета им. П.О. Сухого. 2014. № 3 (58). С. 36-44.
- [9] Боярская Н.П., Довгун В.П. Влияние светодиодных источников света на спектры токов и напряжений питающей сети // Вестник КрасГАУ. 2014. № 3 (90). С. 195-199.
- [10] Боярская Н.П., Темербаев С.А., Довгун В.П., Кабак А.Л., Колмаков В.О. Анализ спектрального состава токов и напряжений светодиодных и газоразрядных источников света // Вестник КрасГАУ. 2013. № 8. С. 180-184.

P.V. Terentev, D.A. Filatov, M.A. Plaksin

**COMPARATIVE EXPERIMENTAL ANALYSIS
OF ARTIFICIAL LIGHT SOURCES FOR ILLUMINATION
OF RURAL TERRITORIES**

Nizhny Novgorod State Agricultural Academy,
Nizhny Novgorod, Russia

Abstract. Currently, both in Russia and abroad, various studies of outdoor light fixtures are being conducted. However, these studies are not enough. The paper deals with mutual influence of light sources and electrical networks to assess the normal functioning and energy-efficient operation while upgrading existing sources of outdoor lighting to new ones. The object of study is outdoor lighting fixtures with gas-discharge light sources and LED lamps. The following equipment was used: linear adjusting autotransformer RNO-250-2-M, electric power quality analyzer Circutor AR-5L, lux meter Testo 545. Based on the results, mathematical expressions were obtained for changing the actual parameters of light fixtures when the supply voltage changes. The total harmonic components of the current are obtained. The magnitude of active power, current and luminous flux for light fixtures with DRL and HPS lamps were changed when changing the supply

voltage level $\pm 10\%$ of $U_{\text{ном}}$. The active power consumed and luminous flux of LED light fixtures remains unchanged and equal to nominal values. However, the total harmonic current component of LED lamps is larger than light fixtures with discharge lamps, which may adversely affect the operation of the power supply networks, which requires further research.

Keywords: current harmonics, discharge lamps, LED lights, voltage level change.

References

- [1] G.Ya. Vagin, E.B. Solntsev and O.Yu. Malafeev, «Estimation of characterization of lighting systems in Russia», *Vestnik of Samara State Technical University. Technical Sciences Series*, vol. 3, no. 51, pp. 78-86, 2016.
- [2] L.Yu. Yuferev, «*Ehnergo-resursosberegayushchie osvetitel'nye i obluchatel'nye sistemy i ustanovki sel'skohozyajstvennogo naznacheniya na osnove rezonansnoj sistemy ehlektropitaniya*», Doct. of Tech. S. thesis, Michurinsk State Agrarian University, Michurinsk, 2015 (in Russian).
- [3] D.A. Filatov and P.V. Terentyev, «Electromagnetic compatibility of systems of power supply and electric equipment of agricultural enterprises in case of change of level of the feeding tension», *Vestnik of Nizhny Novgorod State Agricultural Academy*, vol. 3, no. 11, pp. 57-62, July-Sept. 2016.
- [4] D.A. Filatov and E.N. Sosnina, «O povyshenii ehnergoeffektivnosti sel'skohozyajstvennyh predpriyatij», in proc. *2015 Tinchurinskie chteniya*, 2015, Kazan, Russia, pp. 163-164 (in Russian).
- [5] D.A. Filatov and P.V. Terent'ev, *Kachestvo ehlektroehnergii i ehlektromagnitnaya sovmestimost' v ehlektroehnergetike sel'skogo hozyajstva*. Nizhegorodskaya GSKHA, 2017 (in Russian).
- [6] S.Sh. Tovarov and G.H. Madjidov, «Influence of the deviation of tension on electrical quantities of lighting lamps», *International Research Journal*, vol. 11, no. 54, pp. 117-119, 2016.
- [7] L.I. Evminov and V.S. Kizeva, «Comparative analysis of various light sources and evaluation of electromagnetic compatibility of nonelectrode (induction) light sources and LED light sources», *Vestnik Gomel'skogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. P.O. Suhogo*, vol. 1, no. 52, pp. 60-66, 2013.
- [8] L.I. Yevminov and V.S. Kizeva, «Field of application and experimental studies of electric and light characteristics of lighting fittings for outdoor and intrashop lighting», *Vestnik Gomel'skogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. P.O. Suhogo*, vol. 3, no. 58, pp. 36-44, 2014.
- [9] N.P. Boyarskaya and V.P. Dovgun, «The light-emitting diode light source influence on the current spectra and the supply net voltages», *The Bulletin of KrasGAU*, vol. 3, no. 90, pp. 195-199, March 2014.
- [10] N.P. Boyarskaya, S.A. Temerbaev, V.P. Dovgun, A.L. Kabak and V.O. Kolmakov, «Spectral composition analysis of the current and voltage of led and gas-discharge light sources», *The Bulletin of KrasGAU*, vol. 8, no. 83, pp. 180-184, Aug. 2013.

УДК 621.314.21

Д.М. Кочеганов ¹, А.С. Стеклов ², А.В. Серебряков ³

СТРУКТУРА ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОЙ ВЕТРО-ДИЗЕЛЬ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ УСТАНОВКИ ПЕРЕМЕННОЙ СКОРОСТИ ВРАЩЕНИЯ

¹ Инжиниринговая компания «АСЭ»² Опытное Конструкторское Бюро Машиностроения им. И.И. Африкантова
³ ООО «АСМ НН»

Рассмотрены существующие автономные ветроэнергетические установки; определены их недостатки. Предложена структура ветроэнергетической установки, обеспечивающей повышение ее энергоэффективности. Приведена функциональная схема автономной ветроэнергетической установки; описан принцип ее работы. Эффект от применения предложенной структуры ветроэнергетической установки заключается в возможности отбора максимальной мощности с ветроколеса, параллельной работы каналов преобразования энергии от двигателя внутреннего сгорания (ДВС) и ветроколеса с распределением нагрузки между ними и выборе оптимальной скорости вращения ДВС, что соответствует оптимальному расходу топлива ДВС.

Ключевые слова: автономная электроэнергетическая система, ветроэнергетическая установка, ветро-дизель энергетическая установка, генераторный комплекс, электроснабжение, энергоэффективность.

1. Введение

Стремительное развитие новой аппаратной базы электромашиностроения, силовой электроники и микропроцессорной техники стимулирует разработчиков на создание высокотехнологичных, энергоэффективных, надежных и быстро окупаемых ветроэнергетических установок (ВЭУ) [1]. Сегодня к возобновляемым автономным источникам энергии (АИЭ) на базе ВЭУ предъявляются все более высокие требования по обеспечению надежности и энергоэффективности работы [2]. Типовые решения систем электроснабжения (СЭС) с ВЭУ реализуют только частные задачи, не обеспечивая комплекса проблем создания конкурентоспособных интеллектуальных источников электроснабжения (ИИЭ) на основе принципов активно-адаптивных «разумных» электросетей Smart Grid [3, 4]. Принятые в последнее время нормативные акты РФ стимулируют поиск инновационных энергосберегающих технологий СЭС на базе ВЭУ для объектов и потребителей различных отраслей.

Существующие автономные ВЭУ, вырабатывающие электроэнергию переменного напряжения стабилизированной частоты и амплитуды, имеют ряд недостатков [5, 6]:

- ограниченный диапазон скоростей ветрового потока, при котором возможен отбор мощности с ветроколеса (ВК);
- отсутствие параллельной работы источников электроэнергии (аккумуляторной батареи и генераторов переменного напряжения (ГПН), приводимых во вращение ВК и двигателем внутреннего сгорания (ДВС) с распределением общей нагрузки между ними;
- повышенный расход топлива (низкий КПД) ДВС, связанный с постоянной скоростью вращения его вала при меняющейся мощности нагрузки.

II. Структура энергоэффективной ВЭУ

Авторами предлагается структура ВЭУ с двумя каналами генерирования электроэнергии [7-12], каналом накопления энергии, выходным каналом, позволяющая устранить вышеуказанные недостатки и повысить энергоэффективность ВЭУ (рис. 1).

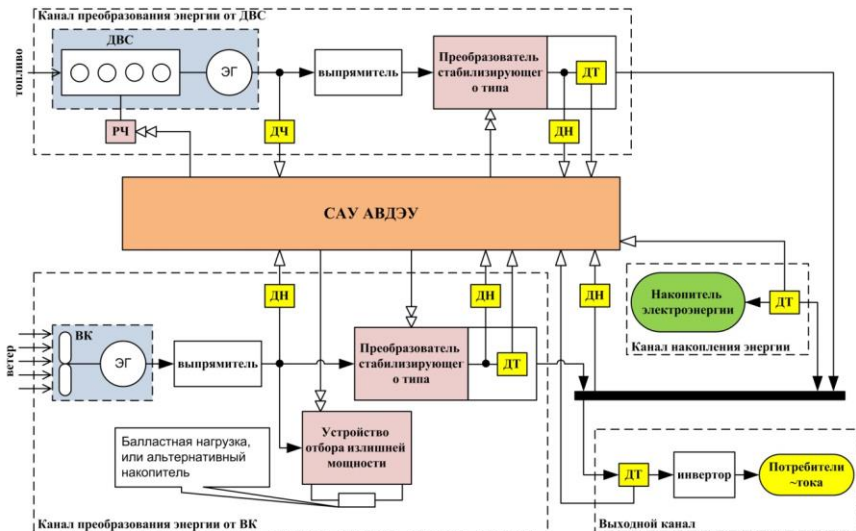


Рис. 1. Структура ВЭУ:

ДЧ – датчик частоты выходного напряжения; РЧ – регулятор частоты вращения;
ДН – датчик напряжения; ДТ – датчик тока

Одни из каналов генерирования электроэнергии – канал преобразования энергии от ветроколеса, содержащий последовательно соединенные

элементы: ветроколесо, ГПН, неуправляемый выпрямитель, преобразователь стабилизирующего типа. Указанный канал имеет ответвление от выпрямителя в виде последовательного соединения устройства отбора излишней мощности, а также балластной нагрузки либо альтернативного накопителя. Второй канал генерирования электроэнергии – канал преобразования энергии от ДВС, содержащий последовательно соединенные элементы: ДВС с регулятором скорости вращения, ГПН, неуправляемый выпрямитель, преобразователь стабилизирующего типа. Канал накопителя энергии включает в себя непосредственно сами накопители [12]. Три данных канала подключены на шину стабилизированного постоянного напряжения, к которой подключен выходной канал, состоящий из инвертора и выводных зажимов, для подключения потребителей (нагрузки) на переменное напряжение стабилизированной частоты и амплитуды [13]. В предложенной авторами ВЭУ осуществляется отбор максимальной мощности с ветроколеса при каждом значении скорости ветрового потока. Это происходит за счет использования преобразователей стабилизирующего типа и устройства отбора излишней мощности, управление которыми осуществляет система автоматического управления (САУ). При этом обеспечивается аккумулирование энергии в накопителе, преобразование в полезную работу в балластной нагрузке или преобразование в другой вид энергии в альтернативном накопителе. В дальнейшем эта энергия может быть использована для выполнения полезной работы [14, 15]. За счет использования преобразователей стабилизирующего типа, управление которыми осуществляет САУ, обеспечивается параллельная работа каналов преобразования энергии от ДВС и ветроколеса с распределением нагрузки между ними. САУ, посредством преобразователей стабилизирующего типа, обеспечивает отбор максимальной мощности с вала ветроколеса, указанный в первом аспекте. САУ также регулирует потребляемую мощность с ДВС при мощности нагрузки, превышающей мощность канала преобразования энергии от ветроколеса (при данной скорости ветра), но меньшей суммарной мощности канала преобразования энергии от ветроколеса (при данной скорости ветра) и канала преобразования энергии от ДВС (при номинальной мощности ДВС). За счет использования преобразователей стабилизирующего типа и регулятора скорости вращения ДВС, управление которыми осуществляет САУ, обеспечивается выбор оптимальной скорости вращения ДВС, в зависимости от потребляемой мощности нагрузкой от ДВС. Задание САУ оптимальной скорости, посредством регулятора скорости вращения ДВС, соответствует оптимальному расходу топлива ДВС [16, 17].

III. Функциональная схема энергоэффективной ВЭУ

Функциональная схема энергоэффективной ВЭУ приведена на рис. 2. Канал 27 преобразования энергии от ветроколеса 6 состоит непосредственно из самого ветроколеса 6, ГПН 7, приводимого во вращение ветроколесом 6, неуправляемого выпрямителя 8, установленного на выходе ГПН 7, преобразователя напряжения стабилизирующего типа 9, подключенного к выходу выпрямителя 8. К выходу неуправляемого выпрямителя 8 также подключен блок отбора излишней мощности 10, к выводам которого подключена балластная нагрузка или альтернативный накопитель энергии 11. Данный канал также снабжен датчиками выходного тока 21 и напряжения 22 преобразователя стабилизирующего типа 9. На выход выпрямителя 8 установлен датчик напряжения 20.

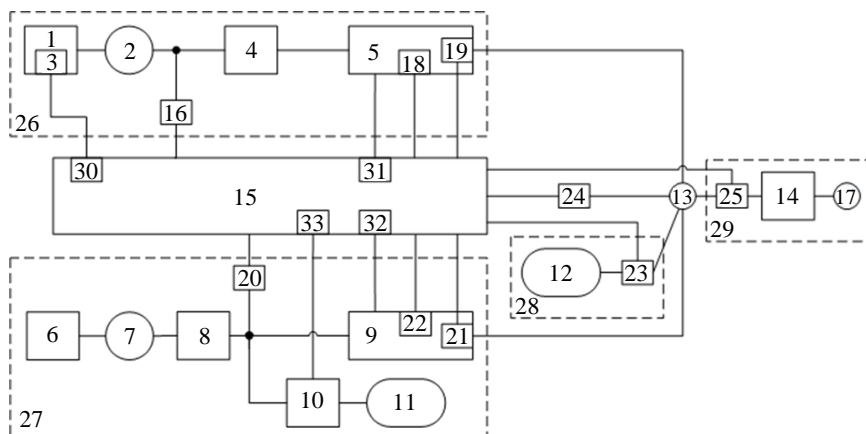


Рис. 2. Функциональная схема ветроэнергетической установки

Канал 26 преобразования энергии от ДВС 1 состоит непосредственно из самого ДВС 1, снабженного регулятором скорости вращения 3 ДВС 1, ГПН 2, приводимого во вращение ДВС 1, неуправляемого выпрямителя 4, установленного на выходе ГПН 2, преобразователя напряжения стабилизирующего типа 5, подключенного к выходу выпрямителя 4. Данный канал также снабжен датчиком скорости вращения 16 ДВС 1, датчиками выходного тока 19 и напряжения 18 преобразователя стабилизирующего типа 5 ДВС 1.

Канал 28 накопителя энергии 12 включает в себя непосредственно сами накопители 12, к примеру, аккумуляторные батареи. Данный канал также снабжен датчиками тока 23 накопителей энергии 12.

Три рассмотренных канала подключены на шину стабилизированного постоянного напряжения 13, снабженной датчиком напряжения 24, к которой подключен выходной канал 29, состоящий из инвертора 14, датчика тока нагрузки 25 и выводных зажимов 17, для подключения потребителей (нагрузки) на переменное напряжение стабилизированной частоты и амплитуды.

САУ 15 представлена в микропроцессорном варианте, к соответствующим ее входам подключены выходы указанных датчиков. Данная система на первом выходе 30, подключенном к регулятору скорости вращения 3 ДВС 1, формирует управляющие сигналы задания скорости вращения ДВС 1. На втором 31 и третьем 32 выходах САУ 15, подключенных к преобразователям стабилизирующего типа 5 и 9, установленных в каналах преобразования энергии от ДВС 1 и ветроколеса 6 соответственно, формируются управляющие сигналы. Они обеспечивают максимальный отбор мощности от ГПН 7 ветроколеса 6 и компенсационный отбор мощности от ГПН 2 ДВС 1, параллельную работу каналов отбора энергии от ДВС 1 и ветроколеса 6, а также распределение нагрузки между ними. На четвертом 33 выходе САУ 15, подключенном к блоку отбора излишней мощности 10, формируется сигнал в функции выходного напряжения выпрямителя 8, обеспечивающий посредством этого блока прогрузку генератора 7 на балластную нагрузку и/или альтернативный накопитель 11.

Устройство работает следующим образом: воздушный поток вращает ветроколесо 6, которое приводит во вращение ГПН 7. Напряжение переменной частоты и амплитуды с выхода генератора 7 подается на неуправляемый выпрямитель 8, посредством которого преобразуется в постоянное напряжение с плавающим уровнем амплитуды. Информация об уровне выходного напряжения выпрямителя 8 поступает в САУ 15 от датчика напряжения 20. Часть мощности, выработанной генератором 7, (либо вся мощность в случае, если устройство отбора излишней мощности 10 выведено САУ 15 из действия) передается дальше в канал 27 преобразования энергии от ветроколеса 6, а именно – на преобразователь стабилизирующего типа 9. Управление стабилизатором осуществляется по каналу 32 от САУ 15. САУ, в соответствии с параметрами, полученными с датчиков напряжения и тока 18-25, воздействует на преобразователь 9, обеспечивая стабилизацию напряжения на заданном уровне и регулирование потока энергии на выходе канала 27 преобразования энергии от ветроколеса 6 (на выходе преобразователя 9).

Часть мощности (излишек мощности), которая не потребляется нагрузкой с ВГ 7, уходит в устройство отбора излишней мощности 10, подключенное к выходу выпрямителя 8. К выводам данного устройства подключена балластная нагрузка и/или альтернативный накопитель энер-

гии 11. На балластной нагрузке 11 (ей может быть, к примеру, нагревательный элемент) тратится излишняя мощность, совершая работу. Альтернативный накопитель 11 аккумулирует избыток энергии, который поступает от ветроколеса 6. Управление устройством отбора излишней мощности 10 осуществляется по каналу 33 от САУ 15. В канале управления устройством отбора излишней мощности 33 управляющий сигнал 10 формируется по разностной функции сигнала с датчика напряжения 20 на выходе выпрямителя 8 и задания по напряжению. Устройство отбора излишней мощности 10 получает энергию от выпрямителя 8 в том случае, когда напряжение на входе выпрямителя 8 больше заданного значения. Во всех остальных случаях устройство отбора излишней мощности выведено из канала преобразования энергии 27 от ветроколеса 6 (отключено по входу посредством САУ 15).

В данном устройстве функция отбора максимальной мощности с ветроколеса 6 при данной скорости ветра реализуется САУ 15, которая в соответствии с заложенным алгоритмом управляет устройством отбора излишней мощности 10. Эта функция реализуется за счет увеличения отбираемой мощности с ГПН 7 до того момента, пока отбираемая мощность не достигнет возможного максимума при данной скорости потока ветра. Далее САУ 15, посредством канала управления 33, устанавливает это максимальное состояние. Оценка максимума выходной мощности генератора производится по приращению сигнала с датчика напряжения 20 на выходе выпрямителя 8. В случае положительного приращения, САУ 15 увеличивает значение отбираемой мощности, увеличивая поток энергии в устройство отбора излишней мощности 10, тем самым сводя приращение к нулю. В случае отрицательного значения приращения производится поиск максимума выходной мощности с ГПН 7 (выпрямителя 8) между предпоследним и последним значением. Таким образом, устройство отбора излишней мощности 10 выполняет две важные функции: осуществляет ограничение амплитуды напряжения на выходе ГПН 7 для защиты входных цепей преобразователя стабилизирующего типа 9, посредством прогрузки на балластную нагрузку или альтернативный накопитель 11. Следствием этого является получение максимальной мощности на выходе ГПН 7. Функция прогрузки ГПН 7 ветроколеса 6 посредством устройства отбора излишней мощности 10 возможна только в режиме превышения возможной максимальной мощности (которая может быть снята с ГПН 7 ветроколеса 6), по сравнению с потребляемой мощностью. Если потребляемая нагрузкой мощность превышает мощность, вырабатываемую ГПН 7 ветроколеса 6, САУ 15 вводит в работу канал 26 преобразования энергии от ДВС 1. САУ 15 в данном режиме обеспечивает отбор максимально возможной мощности с вала ветроколеса 6 при данной скорости ветра. Кроме того, осуществляет-

ся компенсация недостающей мощности с канала 26 преобразования энергии от ДВС 1. Это реализуется посредством включения на параллельную работу преобразователей стабилизирующего типа 5 и 9 каналов 26 и 27 соответственно, с распределением нагрузки между ними.

ДВС 1 приводит во вращение ГПН 2, к выводам которого подключен неуправляемый выпрямитель 4. Установка оптимальной частоты вращения вала ДВС 1, определенной потребляемой мощностью нагрузкой от ДВС 1, осуществляется посредством регулятора скорости вращения 3 ДВС 1. Управление им осуществляется по каналу от САУ 15. САУ по сигналам, полученным от датчиков напряжения 18 и тока 19, установленным на выходе преобразователя стабилизирующего типа 5, вычисляет потребляемую мощность нагрузкой от ДВС 1. В зависимости от потребляемой мощности нагрузкой от ДВС 1 и в соответствии с алгоритмом управления, в который заложены оптимальные зависимости скорости вращения ДВС 1 от мощности нагрузки ДВС 1, соответствующие минимальному расходу топлива, производится вычисление оптимальной скорости вращения ДВС 1. Далее находится разность между оптимальной и текущей скоростями вращения вала ДВС 1. Текущее значение скорости вращения вала ДВС 1 поступает в САУ от датчика скорости вращения 16 ДВС 1. Разностное значение преобразуется в управляющий сигнал, который подается САУ 15 на вход регулятора скорости вращения 3 ДВС 1, поддерживая тем самым частоту вращения вала ДВС 1 на оптимальном уровне, соответствующем минимальному потреблению топлива.

Поскольку скорость вращения вала ДВС 1 будет изменяться в зависимости от мощности нагрузки, то амплитуда и частота переменного напряжения ГПН 2 будет также изменяться в зависимости от мощности нагрузки ДВС 1. Выходное напряжение ГПН 2 переменной частоты и амплитуды посредством неуправляемого выпрямителя 4 преобразуется в постоянное напряжение с плавающим уровнем (амплитудой).

Роль регулятора потока мощности в канале 26 преобразования энергии от ДВС 1 выполняет преобразователь стабилизирующего типа 5, подключенный к выходам выпрямителя 4. Управление стабилизатором 5 осуществляется по каналу от САУ 15. САУ, в соответствии с параметрами, снятыми с датчиков напряжения и тока 18-25, оказывается воздействие на преобразователь 5, тем самым обеспечивая стабилизацию напряжения на заданном уровне и регулирование потока энергии на выходе канала ДВС (на выходе преобразователя 5). Ряд элементов, а именно: преобразователи стабилизирующего типа 9 и 5 канала преобразования энергии 27 от ветроколеса 6, канала 26 преобразования энергии от ДВС 1, накопители энергии 12, – подключен на шину стабилизированного постоянного напряжения 13. Накопители энергии 12 в данной системе играют роли резервного ис-

точника, а также демпфера. Накапливая энергию от источников 1-2, 6-7 и отдавая ее потребителю, они компенсируют скачки (пики, провалы) энергии, вызванные либо приложением/снятием нагрузки потребителей, либо выводом из действия одного из генерирующих элементов комплекса (выводом 1-2 либо 6-7). Таким образом, источники, оставшиеся в работе, как и нагрузка, частично либо полностью разгружаются от скачков энергии. Это облегчает процесс поддержания требуемых значений параметров напряжения, позволяет стабилизировать скорость вращения ДВС 1 и/или ветроколеса 6 при изменении нагрузки, а также позволяет демпфировать процесс вывод из действия одного из генерирующих элементов. Таким образом, обеспечивается экономия топлива ДВС 1, поскольку исключается «перегазовка» его, а также уменьшается вероятность останова ветроколеса 6. Информация о напряжении и токе в САУ 15 от накопителей энергии 12 поступает от датчика напряжения 24, шины стабилизированного постоянного напряжения 13 и датчика тока 23 в канале накопителей энергии 12. Распределение нагрузки между каналами выполняет САУ 15.

Для преобразования постоянного стабилизированного напряжения в переменное напряжение фиксированной частоты и амплитуды к шине стабилизированного постоянного напряжения 13 подключен инвертор напряжения 14. Нагрузка подключается к выводным зажимам 17 автономной электроэнергетической системы.

IV. Заключение

Предложенная авторами структура позволяет повысить энергоэффективность ВЭУ и обеспечивает:

- отбор максимальной мощности с ветроколеса при каждом значении скорости ветрового потока;
- параллельную работу каналов преобразования энергии от ДВС и ветроколеса с распределением нагрузки между ними;
- выбор оптимальной скорости вращения ДВС в зависимости от потребляемой мощности нагрузкой от ДВС, что соответствует оптимальному расходу топлива ДВС.

© Кочеганов Д.М., 2019

© Стеклов А.С., 2019

© Серебряков А.В., 2019

Библиографический список

- [1] Patel M.R. Shipboard electrical power systems. CRC Press, Taylor & Francis Group, 2012. – 370 p.
- [2] Васенин А.Б., Крюков О.В., Серебряков А.В., Плехов А.С. АСУ систем электроснабжения на принципах SMART GRID для объектов магистральных газопроводов // Автоматизация в промышленности. 2012. № 4. С. 36-38.

- [3] Крюков О.В., Серебряков А.В. Метод и система принятия решений по прогнозированию технического состояния электроприводных газоперекачивающих агрегатов // *Электротехнические системы и комплексы*. 2015. № 4 (29). С. 35-38.
- [4] Лукьянов С.И., Карандаев А.С., Евдокимов С.А., Сарваров А.С., Петушков М.Ю., Храмшин В.Р. Разработка и внедрение интеллектуальных систем диагностирования технического состояния электрического оборудования // *Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова*. 2014. № 1 (45). С. 129-136.
- [5] Серебряков А.В. Оптимизация диагностирования электромеханической части ветроэнергетических установок // *Электрооборудование: эксплуатация и ремонт*. 2013. № 3. С. 39-46.
- [6] Серебряков А.В., Титов В.Г., Чернов Е.А., Шахов А.В. Дифференцирование нагрузки в системах электроснабжения автономных потребителей // *Труды НГТУ им. П.Е. Алексеева*. 2015. № 2 (109). С. 203-209.
- [7] Thorsen V., Dalva M. Condition monitoring methods, failure identification and analysis for high voltage motors in petrochemical industry // *8th IEEE Int. Conf., EMD'97*. 1997. № 444. Pp. 109-113.
- [8] Thomson W.T., Rankin D. Case histories of rotor winding fault diagnosis in induction motors // *2nd Int. Conf. Proc. on Condition Monitoring*, March 1987.
- [9] Kliman G.B., Stein J. Induction motor fault detection via passive current monitoring // *Int. Conf. IECM '90*, 1990, Boston, USA. P. 13-17.
- [10] Thomson W.T., Chalmers S.J., Rankin D. On-line current monitoring and fault diagnosis in high voltage induction motors – case histories and cost savings in offshore installations // *Offshore Europe '87*, Sept. 1987, Aberdeen, UK, SPE-16577-MS.
- [11] Schoen R.R., Habetler T.G., Kamran F. Motor bearing damage detection using stator current monitoring // *IEEE Transactions on Industry Applications*. 1995. № 31 (6). P. 1274-1279.
- [12] Thomson W.T., Fenger M. Current signature analysis to detect induction motor faults // *IEEE Industry Application Magazine*. 2001. № 7 (4). P. 26-34.
- [13] Thomson W.T. A review of on-line condition monitoring techniques for three-phase squirrel-cage induction motors – past present and future // *IEEE Symposium on Diagnostics for Electrical Machines, Power Electronics and Drives*, 1999, P. 3-18.
- [14] Крюков О.В., Серебряков А.В., Васенин А.Б. Диагностика электромеханической части ветроэнергетических установок // *Електромеханічні і енергозберігаючі системи*. 2012. № 3 (19). С. 549-552.
- [15] Стеклов А.С., Титов В.Г., Серебряков А.В. Определение степени работоспособности судовых синхронных генераторов с применением искусственных нейро-нечетких сетей // *Вестник Чувашского университета*. 2016. № 1. С. 97-104.
- [16] Стеклов А.С. Нейронечёткое моделирование степени работоспособности трансформаторов судовых электроэнергетических установок // *Электротехнические системы и комплексы*. 2016. № 3. С. 39-43.

- [17] Серебряков А.В., Стеклов А.С., Титов В.Г. Новый алгоритм технического диагностирования гребных электродвигателей // Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика». 2017. Т.17. № 2. С. 82-88.

D.M. Kocheganov¹, A.S. Steklov², A.V. Serebryakov³

STRUCTURE OF ENERGY-EFFICIENT WIND-DIESEL POWER PLANT WITH VARIABLE ROTATION SPEED

¹ Engineering company ASE
Nizhny Novgorod, Russia

² Experimental design Bureau of mechanical engineering n.a. I.I. Afrikantov
Nizhny Novgorod, Russia

³ JSC «Architectural and Construction Workshop – NN»
Nizhny Novgorod, Russia

Abstract. The existing autonomous wind power plants are considered. Their shortcomings are defined. A structure of wind power plant, which provides an increase in its energy efficiency is proposed. A functional diagram of an autonomous wind power plant is presented. The principle of its operation is described. The effect of the proposed structure of wind power plant was expressed in the possibility of selecting the maximum power from the wind wheel, parallel operation of the energy conversion channels from the engine and the wind wheel with the load distribution between them and choosing the optimal speed of rotation of the engine, which corresponds to the optimal fuel consumption of the engine.

Keywords: autonomous electric power system, energy efficiency, generator, power supply, wind power plant, wind-diesel power plant.

References

- [18] M.R. Patel, *Shipboard Electrical Power Systems*. CRC Press, Taylor & Francis Group, 2012.
- [19] A.B. Vasenin, O.V. Krukov, A.V. Serebryakov and A.S. Plekhov, «Automated controls for power supply systems of gas mains' facilities based on Smart Grid concepts», *Automation in Industry*, vol. 4, pp. 36-38, Apr. 2012.
- [20] O.V. Krukov and A.V. Serebryakov, «Method and system of decision making of technical state forecast of electric gas compressor units», *Electrotechnical Systems and Complexes*, vol. 4, no. 29, pp. 35-38, 2015.
- [21] S.I. Lukjanov, A.S. Karandaev, S.A. Evdokimov, A.S. Sarvarov, M.Yu. Petushkov and V.R. Khramshin, «The development and implementation of intelligent systems for electrical equipment state diagnostics», *Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University*, vol. 1, no. 45, pp. 129-136, 2014.
- [22] A.V. Serebryakov, «Optimization of diagnostics of electromechanical part of windpower installations», *Electrical equipment: operation and repair*, vol. 3, pp. 39-46, March 2013.

- [23] A.V. Serebryakov, V.G. Titov, E.A. Chernov and A.V. Shakhov, «Differentiation loads in power systems autonomous consumers», *Transactions of NNSTU n.a. R.E. Alekseev*, vol. 2, no. 109, pp. 203-209, 2015.
- [24] V. Thorsen and M. Dalva, «Condition monitoring methods, failure identification and analysis for high voltage motors in petrochemical industry», in proc. *8th IEEE Int. conf. EMD'97, University of Cambridge*, no. 444, pp. 109-113, 1997.
- [25] W.T. Thomson and D. Rankin, «Case histories of rotor winding fault diagnosis in induction motors», in proc. *2nd Int. Conf. Proc. on Condition Monitoring*, University College Swansea, Swansea, UK, March 1987.
- [26] G.B. Kliman and J. Stein, «Induction motor fault detection via passive current monitoring», in proc. *Int. Conf. ICEM'90*, MIT, Boston, USA, pp 13-17, 1990.
- [27] W.T. Thomson, S.J. Chalmers and D. Rankin, «On-line current monitoring and fault diagnosis in high voltage induction motors – case histories and cost savings in offshore installations», in proc. *Offshore Europe '87*, Aberdeen, UK, SPE16577-MS, Sept. 1987.
- [28] R.R. Schoen, T.G. Habetler and F. Kamran, «Motor bearing damage detection using stator current monitoring» *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 31, no. 6, pp. 1274-1279, Nov./Dec. 1995.
- [29] W.T. Thomson and M. Fenger, «Current signature analysis to detect induction motor faults», *IEEE Industry Application Magazine*, vol. 7, no. 4, pp. 26-34, Jul./Aug. 2001.
- [30] W.T. Thomson, «A review of on-line condition monitoring techniques for three-phase squirrel-cage induction motors – past present and future», in proc. *IEEE Symposium on Diagnostics for Electrical Machines, Power Electronics and Drives*, Gijon, Spain, pp 3-18, Sept. 1999.
- [31] O.V. Krukov, A.V. Serebryakov and A.V. Vasenin, «Diagnosis electromechanical part of wind turbines», *Electromechanical and Energy-Saving Systems*, vol. 3, no. 19, pp. 549-552, 2012.
- [32] A.S. Steklov, V.G. Titov and A.V. Serebryakov, «Determination of degree of use of ship synchronous generators with the use of artificial neuro-fuzzy nets», *Bulletin of the Chuvash University*, no. 1, pp. 97-104, 2016.
- [33] A.S. Steklov, «Neuro-fuzzy modeling of the degree of efficiency of transformers at ship electric power plants», *Electrotechnical Systems and Complexes*, vol. 3, pp. 39-43, 2016.
- [34] A.V. Serebryakov, A.S. Steklov and V.G. Titov, «New technological diagnostics algorithm of required electric motors», *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Power Engineering*, vol. 17, no. 2, pp. 82-88, 2017.

УДК 62-5

С.В. Попов ¹, А.В. Бишлетов ²,
О.А. Бурмакин ¹, В.Н. Гуляев ³

ОСОБЕННОСТИ РАБОТЫ АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ АВТОНОМНОЙ ЭЛЕКТРОСТАНЦИИ

¹ Волжский государственный университет водного транспорта

² ООО «Электро Лэнд»

³ Нижегородский государственный технический университет
им. Р.Е. Алексеева

В настоящее время весьма актуальными являются задачи повышения надежности электроснабжения для потребителей первой категории. Статья посвящена исследованию работы автоматизированной системы управления автономной электростанцией. Представлена функциональная схема системы управления автономной электростанцией. Алгоритм работы системы управления предложено построить по принципу «ведущий-ведомый». Это позволяет одновременно регулировать параметры нескольких генераторов и синхронизировать параллельно работающие генераторы с электрической сетью. Регулирование активной и реактивной мощности после синхронизации с сетью обеспечивается за счет распределения нагрузки между генераторами и сетью. Функционирование системы по предложенному алгоритму рассмотрено на примере системы электроснабжения городской клинической больницы.

Ключевые слова: качество электроэнергии, несинусоидальность напряжения, параллельно работающие генераторы, регулирование параметров генераторов, системы электроснабжения.

1. Введение

Объекты первого уровня электроснабжения потребителей необходимо запитывать по двум вводам различных электрических систем. Для надежной работы на таких объектах устанавливаются аварийные источники электроснабжения потребителей, например, дизель-генераторные установки или другие [1].

Все чаще частные предприятия организуют независимое от городских сетей тепло-энергоснабжение собственных объектов, обеспечивая подогрев воды за счет автономных газовых котлоагрегатов. Газовое обеспечение котельных позволяет устанавливать на их территории газопоршневые генераторные машины, которые выполняют генерирование электроэнергии для собственных нужд [2-5]. Схема существующей системы элек-

троснабжения клинической больницы показана на рис. 1. Лаборатории и операционные оснащены дорогостоящим медицинским оборудованием, а сфера ответственности при проведении операций подразумевает особенно высокие требования как к бесперебойности электроснабжения, так и к качеству электроэнергии. Система электроснабжения имеет несколько источников: два вводных фидера, подключенных к различным сетевым энергосистемам; два газогенератора $G1$ и $G2$, мощностью по 190 кВт каждый; аварийный дизель-генератор G , предназначенный для обеспечения электропитания в аварийных случаях.

Все указанные источники объединены; по единой четырехпроводной системе электроснабжения они обеспечивают электропитанием потребителей клиники, подключенных к шинам ГРЩ. В различное время суток, в периоды плановых операций, во время «наплыва» пациентов нагрузка может изменяться от самого малого значения – 30-40 кВт, до максимального (при условии одновременного включения самых мощных потребителей) – 170-200 кВт. Для эффективного использования генераторных установок при малых значениях мощности, питание потребителей производится от сети по одному из вводов. В случае отключения одного ввода автоматика АВР (автоматический ввод резерва) подключит к шинам ГРЩ через автоматический выключатель $QFB1$ ($QFB2$), контактор $KMB1$ ($KMB2$) и общий сетевой контактор КМС другой вводной фидер.

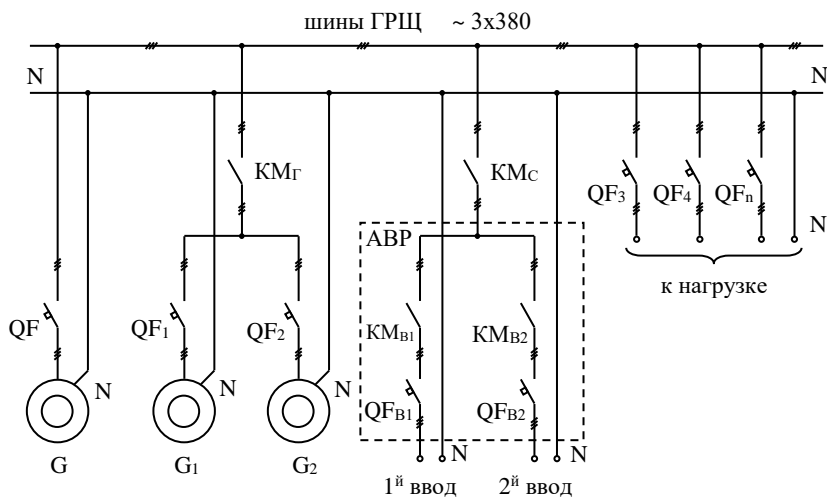


Рис. 1. Однолинейная схема электроснабжения клиники

II. Материалы и методы

На территории клиники отсутствует трансформаторная понижающая подстанция, поэтому электроэнергия, поступающая по линии электро-снабжения со стороны сетей, имеет низкое значение номинального напряжения – 380 В. Протяженность кабельных трасс и ограниченное сечение жил кабеля создают значительное падение напряжения ($\Delta u = 12-14\%$), что негативно сказывается на работе потребителей. Так, для получения напряжения на шинах ГРЩ в 380-400 В при средней нагрузке, необходимо завышать значение напряжения холостого хода вплоть до значений 420-430 В. Исходя из этих условий, при значительной мощности нагрузки (более 50-70 кВт) производится запуск газогенератора $G1$ ($G2$), который имеет автономную систему регулирования напряжения и обеспечивает стабилизацию напряжения в установившихся режимах на номинальном уровне.

Установленные требования по качеству электроснабжения предполагают переводные нагрузки с сетевого источника на генератор, подключенный с выполнением процесса синхронизации, [6]. Подключение генератора на шины автоматическим выполняется выключателем $QF1$ ($QF2$) и общим генераторным контактором КМГ.

III. Результаты исследования

При значительной мощности потребителей (около 170 кВт), подключенных к шинам ГРЩ, система автоматики генератора $G1$ ($G2$) выполняет синхронизацию к сети и за счет срабатывания сетевого контактора КМС включается на параллельную работу с сетью (рис. 2). Система управления ПЛК (программируемый логический контроллер) измерительным прибором ИПЗ контролирует потоки мощности, поступающие из сети и генератора ИП1 (ИП2), а также выполняет частичную загрузку сети при поддержании нагрузки генератора на уровне 150-170 кВт.

На функциональной схеме системы электроснабжения (рис. 2) показаны: каналы регулирования скорости вращения двигателя, напряжения генератора, блоки измерения электрических параметров, основные цепи управления. В канал регулирования скорости входит контроллер генератора КГ1 (КГ2), выполняющий функцию регулятора, который воздействует через исполнительное устройство на подачу газа в двигатель. Сигнал обратной связи по скорости формируется датчиком частоты вращения ДЧВ1 (ДЧВ2). Регулирование величины напряжения генератора также выполняется ПЛК, который воздействует на регулятор напряжения РН1 (РН2) генератора. Измерительные приборы ИП1-ИП3 выполняют измерение фазных напряжений и токов, вычисляют величины мощностей и передают данные в контроллер в виде цифрового кода. Также приборы имеют возможность отображения электрических параметров на экране, выполнять контроль и формирование сигнала при появлении обратного потока мощ-

ности источника. Процесс синхронизации выполняется синхронизатором С, воздействующим на канал регулирования скорости двигателя ПД1 (ПД2), а система управления ПЛК оказывает влияние на возбуждение ОВГ1 (ОВГ2) генератора G_1 (G_2). Процессы загрузки и разгрузки генератора (сети) производятся по тем же каналам.

В последнее время на территории клиники осуществляется строительство нового корпуса, что связано с будущим повышением числа и мощностей потребителей электроэнергии. Расчетная проектная нагрузка предварительно составляет порядка 160-180 кВт. Исходя из новых условий, алгоритм работы электростанции значительно изменится. Если ранее при одиночной работе одного генератора второй был в резерве, то в новых условиях система управления может обеспечить параллельную работу по алгоритму «ведущий-ведомый» со сменой приоритета.

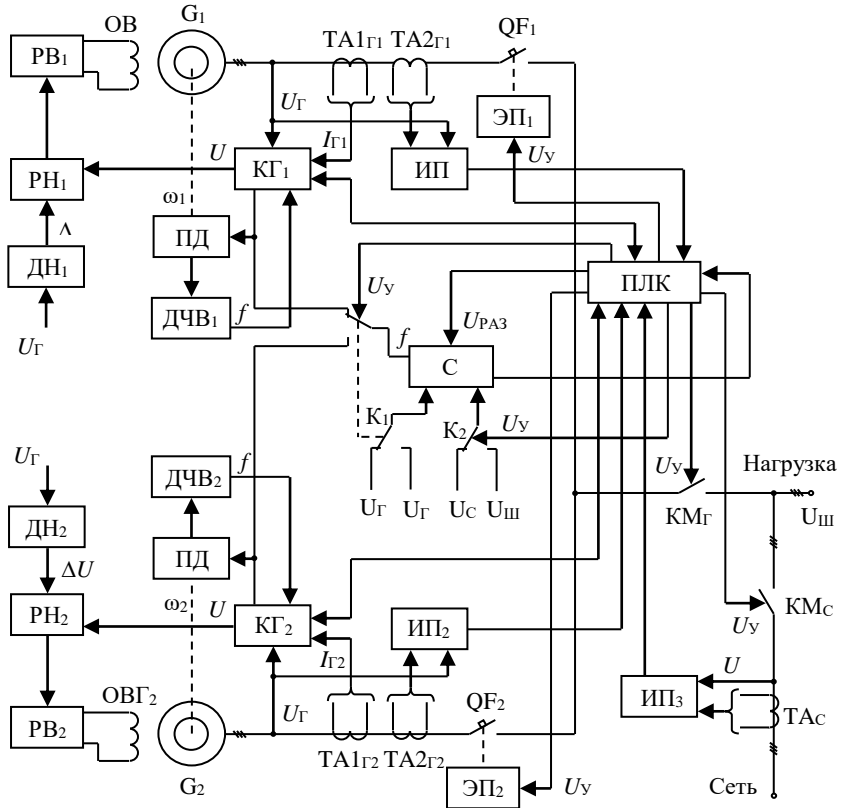


Рис. 2. Функциональная схема системы управления автономной электростанцией

Максимальная нагрузка параллельно работающих генераторов может составлять порядка 360-380 кВт, тогда в переходных режимах, например, при пуске гидравлического лифта (около 30 кВт), один из генераторов может быть перегружен. Рассмотренный режим работы электростанции не исключает отключения одного из генераторов, а, значит, и последующего «веерного» отключения второго. В связи с этим можно предположить, что для обеспечения надежной работы в переходных режимах целесообразно подключить параллельно работающие генераторы к сети, что является сложной как физической, так и технической задачей. Она может быть решена за счет внедрения в программируемый логический контроллер определенного алгоритма по контролю и регулированию параметров одновременно всех источников электроэнергии. Особую сложность представляет одновременное управление скоростью двигателей и напряжения генераторов, что может ввести один из генераторов в режим обратной мощности, а защита от двигательного режима может его отключить [7]. В ряде случаев при выполнении одновременного регулирования параметров нескольких генераторов используют метод ведущего и ведомого генератора [8]. При этом параметры ведущего генератора синхронизируются с параметрами сети, а ведомого – с параметрами ведущего. После выполнения синхронизации двух генераторов с сетью включается система распределения нагрузки между генераторами и сетью, выполняющая регулирование активной и реактивной мощности до заданных значений.

IV. Заключение

Описанный алгоритм работы автономной электростанции был реализован на базе электростанции городской клинической больницы. Система управления, построенная по принципу ведущий-ведомый, успешно выполняет синхронизацию двух параллельно работающих генераторов с сетью, хотя изменение состава нагрузки оказывает влияние на время переходных процессов (нередко с появлением обратной мощности). Следует отметить, что качество переходных процессов напрямую зависит от коммутации нагрузки в момент выполнения синхронизации, что носит сугубо вероятностный характер.

Предложенный алгоритм показал свою работоспособность и может быть реализован на базе автономных электростанций с большим числом генераторов для повышения надежности электроснабжения объектов I категории.

Библиографический список

- [1] Попов С.В., Бурда Е.М. Обеспечение нагрузки электрической мощностью в условиях ограниченной мощности сети // *Материалы НТК «Актуальные проблемы электроэнергетики»*. Н. Новгород: НГТУ им. Р.Е.Алексеева, 2015. С. 8-11.
- [2] Попов С.В., Бурда Е.М. Работа автономной электростанции параллельно с сетью в условиях низкого качества напряжения сети // *Вестник ВГУВТ*. 2015. № 44. С. 327-329.
- [3] Бурда Е.М., Попов С.В. Работа автономной электростанции параллельно с сетью в условиях низкого качества напряжения сети // *Вестник ВГУВТ*. 2015. № 44. С. 58-64.
- [4] Коробко Г.И., Попов С.В., Лебедев В.В. Обеспечение электромагнитной совместимости автономной электроэнергетической системы с мощными полупроводниковыми преобразователями // *Труды 16-го международного научно-методического форума «Великие реки 2014»*. Материалы НМК профессорско-преподавательского состава, аспирантов, специалистов и студентов «Проблемы использования и инновационного развития внутренних водных путей в бассейнах великих рек». Н. Новгород: Изд-во ВГАВТ, 2014. С. 72-76.
- [5] Попов С.В., Бурда Е.М. Вопросы эффективного расхода энергоресурсов в теплоэнергетических системах малой мощности // *Труды 17-го международного научно-методического форума «Великие реки 2015»*. Материалы НМК профессорско-преподавательского состава, аспирантов, специалистов и студентов «Проблемы использования и инновационного развития внутренних водных путей в бассейнах великих рек». Н. Новгород: Изд-во ВГУВТ, 2015. С. 34-37.
- [6] Бурмакин О.А., Коробко Г.И., Шилов М.П. Включение дизель-генератора с изменяемой частотой вращения на параллельную работу с сетью // *Проблемы использования и инновационного развития внутренних водных путей в бассейнах великих рек*. Труды международного научно-промышленного форума. Материалы научно-методической конференции профессорско-преподавательского состава, аспирантов, специалистов, студентов. Н. Новгород: Изд-во ВГУВТ. 2017. С. 136-138.
- [7] Степанов К.С., Гуляев В.Н., Александрова Е.Н., Наумов М.В. Тормозные режимы при возбуждении асинхронного двигателя постоянным током // *Актуальные проблемы электроэнергетики*. Н. Новгород: Изд-во НГТУ им. Р.Е. Алексеева. 2016. С. 202-206.
- [8] Коробко Г.И., Попов С.В., Бишлетов А.В., Матвеев О.А. Алгоритм автоматического выбора ведущего генератора автономной электростанции при параллельной работе трех и более генераторных агрегатов // *Труды 14-го международного научно-методического форума «Великие реки 2012»*. Материалы научно-методической конференции профессорско-преподавательского состава, аспирантов, специалистов и студентов «Проблемы использования и инновационного развития внутренних водных путей в бассейнах великих рек». Н. Новгород: Изд-во ВГАВТ, 2012. С. 282-284.

S.V. Popov¹, A.V. Bishletov², O.A. Burmakin¹,
V.N. Gulyaev³

FEATURES OF OPERATION OF AUTOMATED CONTROL SYSTEM OF AUTONOMOUS POWER STATION

¹ Volga State University of Water Transport,
Nizhny Novgorod, Russia

² «Electroland» Ltd,

Nizhny Novgorod, Russia

³ Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev,
Nizhny Novgorod, Russia

Abstract. Now days, the tasks of increasing the reliability of power supply to the first category consumers are extremely relevant. The article is devoted to the research of the automated control system of a stand-alone power plant. A functional diagram of the control system of the stand-alone power plant is presented. The algorithm of the control system is proposed to create on the principle of "master-slave". This will allow the simultaneous adjustment of several parameters of generators and synchronizing parallel generators with the electric grid. Regulation of active and reactive power after synchronization with the network is provided by distributing the load between the generators and the network. The system functioning according to the proposed algorithm is considered on the example of the city clinical hospital power supply system.

Keywords: power supply systems, power quality, non-sinusoidal voltage, parallel operating generators, regulation of generator parameters.

References

- [1] S.V. Popov and E.M. Burda, «Obespecheniye nagruzki elektricheskoy moshchnost'yu v usloviyakh ogranichennoy moshchnosti seti» in proc. *Aktual'nyye problemy elektroenergetiki*, 2015, NSTU, N. Novgorod, Russia, pp. 8-11 (in Russian).
- [2] S.V. Popov and E.M. Burda, «Rabota avtonomnoy elektrostantsii parallel'no s set'yu v usloviyakh nizkogo kachestva napryazheniya seti», *Vestnik VGUVT*, vol. 44, 2015, N. Novgorod: FGBOU VO «VGUVT», pp. 327-329 (in Russian).
- [3] E.M. Burda and S.V. Popov, «Rabota avtonomnoy elektrostantsii parallel'no s set'yu v usloviyakh nizkogo kachestva napryazheniya seti», *Vestnik VGUVT*, vol. 44, 2015, N. Novgorod: FGBOU VO «VGUVT», pp. 58-64 (in Russian).
- [4] G.I. Korobko, S.V. Popov and V.V. Lebedev, «Obespecheniye elektromagnitnoy sovmestimosti avtonomnoy elektroenergeticheskoy sistemy s moshchnymi poluprovodnikovymi preobrazovatelyami», in proc. *Trudy 16-go mezhdunarodnogo nauchno-metodicheskogo foruma «Velikiye reki 2014»*. *Materialy NMK professor-*

- sko-prepodavatel'skogo sostava, aspirantov, spetsialistov i studentov «Problemy ispol'zovaniya i innovatsionnogo razvitiya vnutrennikh vodnykh putey v basseynakh velikikh rek», 2014, N. Novgorod: «FGBOU VO VGAVT», pp. 72-76 (in Russian).
- [5] S.V. Popov and E.M. Burd, “Voprosy effektivnogo raskhoda energoresursov v teploenergeticheskikh sistemakh maloy moshchnosti», in proc. *Trudy 17-go mezhdunarodnogo nauchno-metodicheskogo foruma «Velikiye reki» 2015. Materialy NMK professorsko-prepodavatel'skogo sostava, aspirantov, spetsialistov i studentov «Problemy ispol'zovaniya i innovatsionnogo razvitiya vnutrennikh vodnykh putey v basseynakh velikikh rek»*, 2015, N. Novgorod: FGBOU VO «VGUVT», pp. 34-37 (in Russian).
- [6] O.A. Burmakin, G.I. Korobko and M.P. Shilov, «Vklyucheniye dizel'-generatora s izmenyayemoy chastotoy vrashcheniya na parallel'nyuyu rabotu s set'yu» in proc. *Trudy mezhdunarodnogo nauchno-promyshlennogo foruma. Materialy nauchno-metodicheskoy konferentsii professorsko-prepodavatel'skogo sostava, aspirantov, spetsialistov, studentov. Problemy ispol'zovaniya i innovatsionnogo razvitiya vnutrennikh vodnykh putey v basseynakh velikikh rek*, 2017, N. Novgorod: FGBOU VO «VGUVT», pp.136-138 (in Russian).
- [7] K.S. Stepanov, V.N. Gulyaev, E.N. Alexandrova and M.V. Naumov, «Tormoznyye rezhimy pri vzbuzhdenii asinkhronnogo dvigatelya postoyannym tokom», in proc. *Aktual'nyye problemy elektroenergetiki*, 2016, NSTU, Nizhny Novgorod, pp. 202-206 (in Russian).
- [8] G.I. Korobko, S.V. Popov, A.V. Biletov and O.A. Matveev, «Algoritm avtomaticheskogo vybora vedushchego generatora avtonomnoy elektrostantsii pri parallel'noy rabote trekh i boleye generatornykh agregatov» in proc. *Trudy 14-go mezhdunarodnogo nauchno-metodicheskogo foruma «Velikiye reki 2012». Materialy nauchno-metodicheskoy konferentsii professorsko-prepodavatel'skogo sostava, aspirantov, spetsialistov i studentov «Problemy ispol'zovaniya i innovatsionnogo razvitiya vnutrennikh vodnykh putey v basseynakh velikikh rek»*, 2012, N. Novgorod: FBOU VPO «VGAVT», pp. 282-284 (in Russian).

УДК 621.3

А.А. Лоскутов, О.В. Кузина

АНАЛИЗ ПРИМЕНЕНИЯ РЕЗИСТИВНОГО ЗАЗЕМЛЕНИЯ НЕЙТРАЛИ В РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЯХ НА ОСНОВЕ ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Нижегородский государственный технический университет
им. Р.Е. Алексеева

Мировая практика показывает положительные результаты использования резистивного заземления нейтрали в распределительных электрических сетях. Однако в России резистивное заземление нейтрали практически не используется. Это связано, в том числе, с отсутствием научно обоснованных технических решений по оптимальному выбору сопротивления резисторов. В настоящей работе произведен анализ использования резистивного заземления нейтрали в распределительных сетях среднего напряжения. Определены основные критерии выбора резисторов. Разработаны имитационные модели в программном комплексе PSCAD, исследующие электромагнитные переходные процессы в электрической сети в зависимости от типа заземления нейтрали и от конкретного сопротивления резистора. Определены коэффициенты чувствительности релейной защиты в зависимости от сопротивления резисторов. Установлено, что важным критерием выбора резистора является гарантированная чувствительность простых токовых защит.

Ключевые слова: имитационное моделирование, ОЗЗ, резистивное заземление нейтрали, чувствительность.

1. Введение

Вопросы заземления нейтрали в распределительных электрических сетях (РЭС) рассматривались во многих научных работах и являются предметом дискуссий [1-5]. Резистивное заземление нейтрали является наиболее широко используемым способом в мировой практике. Для России наиболее традиционным является режим изолированной нейтрали и компенсация тока однофазного замыкания на землю (ОЗЗ) с помощью дугогасящих реакторов. Резистивное заземление нейтрали для отечественных РЭС начали использоваться совсем недавно.

Наибольшее распространение во многих странах получило высокоомное и низкоомное заземление нейтрали. Заземление принято считать высокоомным, если ток в элементе, защищающем нейтраль, при ОЗЗ близок по модулю к емкостному току замыкания на землю, а низкоомным –

если ток в указанном элементе в тех же условиях достаточен для срабатывания простейших токовых защит от ОЗЗ [3]. Немногочисленные электрические сети 20 кВ в г. Москва выполнены с низкоомным заземлением нейтрали. Типовое сопротивление резисторов для этих сетей было выбрано 12 Ом, по аналогии с резисторами, используемыми на Западе [3, 6]. Однако научно обоснованных технических решений по оптимальному выбору сопротивления резисторов в зависимости от конфигурации сети и в различных условиях функционирования системы электроснабжения до сих пор очень мало.

Таким образом, актуальными задачами являются: исследование схем включения резисторов; обоснование и выбор параметров нейтралеобразующих трансформаторов; параметров срабатывания устройств РЗА; определение оптимального резистора по условию чувствительности РЗ; оценка положительных качеств использования резистивного заземления на напряжении 6-35 кВ в России. Для исследования электромагнитных переходных процессов в системе электроснабжения промышленного предприятия и в РЭС в зависимости от типа заземления нейтрали и от конкретного сопротивления резистора разработан ряд имитационных моделей в программном комплексе PSCAD.

II. Схемы подключения резисторов заземления нейтрали

В настоящее время применяются три схемы включением резистора: в нейтраль обмотки силового трансформатора 220(110)/10 кВ Y_0/Y_0 центра питания (рис. 1, а), подключение резисторов к нейтрали специального трансформатора заземления нейтрали (ТЗН) 10/0,4 кВ Y_0/Δ -11 (рис. 1, б) либо фильтра нулевой последовательности (ФНП) со схемой Z_0 (рис. 1, в).

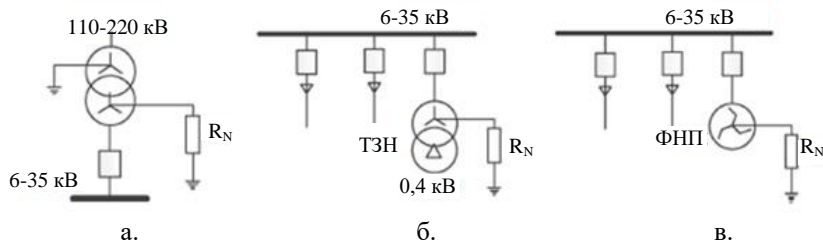


Рис. 1. Принципиальные схемы подключения резистора в сети 10 кВ при использовании: нейтрали обмотки силового трансформатора (а); ТЗН (б); ФНП со схемой «зигзаг» (в)

У схемы (рис. 1, а) имеется недостаток, который заключается в потере резистивного заземления секции шин при отключении питающего трансформатора. От этого недостатка освобождены схемы (рис. 1 б, в). При подключении резистора в нейтраль по схеме (рис. 1, а) формируется

связь шин высокого и среднего напряжения «по цепи нулевой последовательности», плановые и аварийные коммутации на стороне ВН приводят к переходному процессу и перенапряжениям в сети [1, 4].

Моделирование в PSCAD показало, что для схемы (рис. 1, а) при возникновении однофазного КЗ на удаленном конце КЛ 110 кВ, перенапряжения на КЛ 10 кВ достигают $U_{\text{П10}} = 4,6U_{\text{ф}}$ (кривая 1 « R_N в нейтрали трансформатора 110/10», рис. 2). При подключении резистора к нейтрали по схемам (рис. 1. б, в), шины 110 и 10 кВ разделены по нулевой последовательности. Протекание тока нулевой последовательности по нейтрали низкого напряжения в связи с этим исключается. Это приводит к уменьшению влияния переходных процессов, возникающих при несимметричных КЗ в сети 110 кВ, на напряжения и токи на стороне 10 кВ, соответственно к уменьшению перенапряжения на КЛ 10 кВ, которые снижаются на 22 % и не превышают $3,6U_{\text{ф}}$ (кривая 2 – « R_N в нейтрали ТЗН на 10/04», рис. 2).

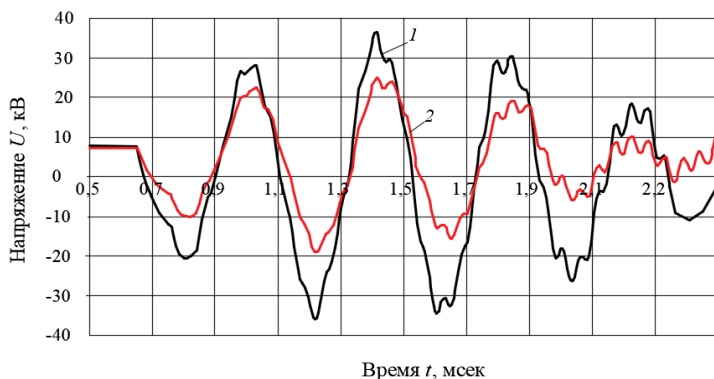


Рис. 2. Перенапряжение на конце КЛ 10 кВ при однофазном КЗ на КЛ 110 кВ: 1 – « R_N в нейтрали трансформатора 110/10; 2 – « R_N в нейтрали ТЗН на 10/04

III. Основные критерии выбора резисторов

Выбор тока, создаваемого резистором, происходит с учетом выбора двух противоположных задач: повышение чувствительности защит от замыкания на землю за счет увеличения тока однофазного замыкания на землю (реагирует на основную гармонику тока $3I_0$) или ограничение тока в месте повреждения (однофазное замыкание) для снижения объема разрушения оборудования.

Критерий 1 – ограничение перенапряжений при ОЗЗ:

$$R_N \leq \frac{U_{BH}}{\sqrt{3} \cdot I_C}. \quad (1)$$

Современная практика проектирования предусматривает варианты с минимальным нанесением ущерба оборудованию и быстрым устранением тока короткого замыкания. Для обеспечения селективной работы защиты от ОЗЗ ток резистора должен превышать наибольший нагрузочный ток присоединения, тогда поврежденное присоединение селективно отключится с малой выдержкой времени.

Критерий 2 – селективная работа защиты от ОЗЗ:

$$R_N \leq \frac{U_{BH}}{\sqrt{3} \cdot I_{с.з.макс}}. \quad (2)$$

В реальных условиях ток КЗ не должен превышать 12-30 кА (в зависимости от напряжения сети), что определяется номинальными токами отключения силовых выключателей в ячейках РУ. При таких коротких замыканиях в трансформаторах нулевой последовательности, а именно при равенстве первичных токов, вторичные токи при внешних КЗ и нормальной работе не равны по величине и не совпадают по фазе, откуда возникают значительные токи небаланса, от которых необходимо отстраивать ток срабатывания защиты от ОЗЗ.

Критерий 3 – отстройка от тока небаланса ТТ:

$$R_N \leq \frac{U_{BH}}{\sqrt{3} \cdot I_{неб}}. \quad (3)$$

По требованиям электробезопасности электроустановок с различными режимами заземления нейтрали [7, 8], допустимые значения напряжения прикосновения обеспечиваются нормированием сопротивлений заземления заземляющих устройств электроустановок.

Обычно токовая защита нулевой последовательности для сетей с изолированной или компенсированной нейтралью действует на сигнал. Это допускает длительное, до 2 ч, существование ОЗЗ. При этом на заземляющем устройстве, за счет протекания по нему тока ОЗЗ, происходит длительное повышение напряжения [9].

Критерий 4 – обеспечение условий электробезопасности:

$$R_3 \leq \frac{U_{пп}}{\sqrt{3} \cdot I_R}, \quad (4)$$

где R_3 – сопротивление заземляющего устройства, Ом; $U_{пр}$ – предельно допустимое напряжение прикосновения; I_R – номинальный ток резистора.

Очевидно, что повышение тока резистора приводит к ухудшению условий электробезопасности, большим потерям при нагревании и требует дополнительной проверки термической стойкости оборудования.

Критерий 5 – обеспечение термической устойчивости резистора:

$$R_N \leq \frac{U_{ВН}}{\sqrt{3} \cdot I_{ТЕРМ}}. \quad (5)$$

Помимо сопротивления резистора, величина тока ОЗЗ зависит от сопротивления заземляющего устройства и режима заземления экранов кабеля. При одностороннем разземлении кабеля увеличивается сопротивление контура и происходит уменьшение расчетного тока ОЗЗ. Также при расчете чувствительности необходимо учитывать снижение тока резистора за счет увеличения сопротивления резистора при нагреве.

IV. Моделирование электромагнитных переходных процессов в сети с резистивным заземлением нейтрали

На рис. 3 изображена масштабируемая модель городской сети 10 кВ с кабелями СПЭ-изоляции, предназначенная для моделирования различных режимов и управления присоединениями схемы. Для определения параметров действующих значений тока и напряжения используется блок быстрого преобразования Фурье. Для определения величины емкостного тока моделируется фильтр нулевой последовательности.

Был произведен ряд имитационных опытов, в ходе которых получены осциллограммы токов и напряжений, где видно, что ток ОЗЗ при резистивном заземлении нейтрали увеличивается, в отличие от изолированной нейтрали (рис. 4, 5). Это позволяет улучшить чувствительность защит. Осциллограмма напряжения показывает, что при замыкании фазы *A* на землю, потенциал фазы *A* стремится к 0, т.е. потенциалу земли, а напряжения фаз *B* и *C* относительно земли возрастут почти до линейных.

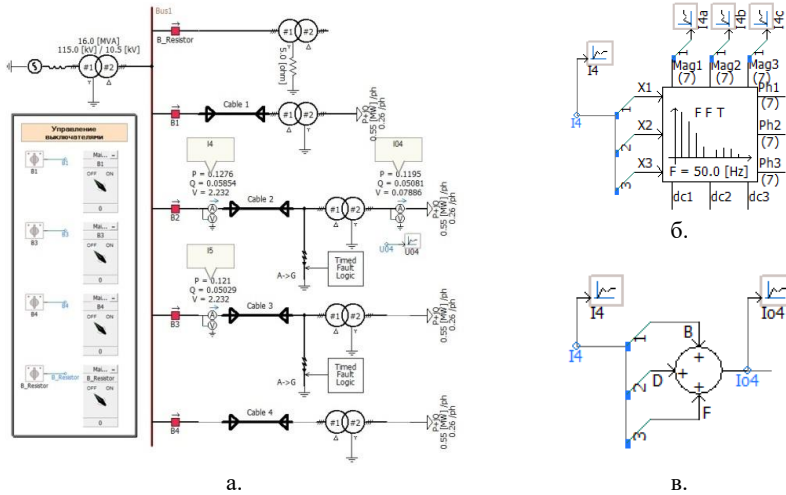


Рис. 3. Модель масштабируемой эквивалентной сети 10 кВ: модель сети с элементами управления (а); блок быстрого преобразования Фурье (б); фильтр нулевой последовательности (в)

К данному типу заземления была смоделирована простая ненаправленная токовая защита нулевой последовательности, которая срабатывает на отключение (рис. 6).

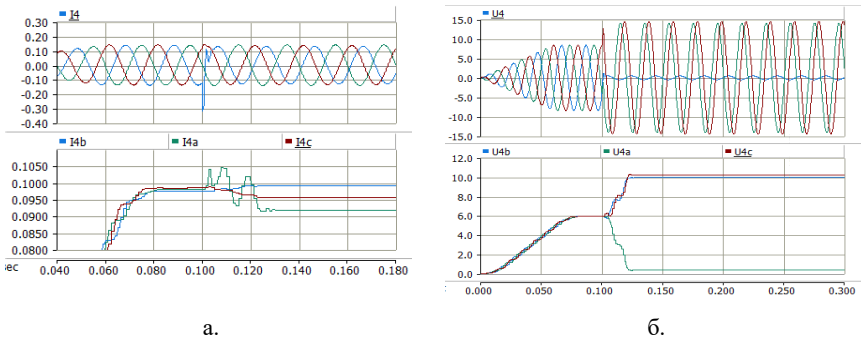


Рис. 4. Осциллограммы при ОЗЗ в сети с изолированной нейтралью: фазные токи (а); фазные напряжения (сверху мгновенные, снизу действующие) (б)

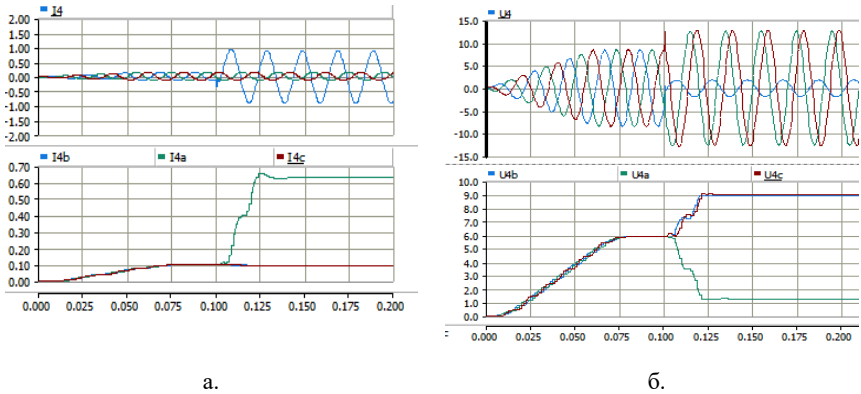


Рис. 5. Осциллограммы при ОЗЗ в сети с резистивно-заземленной нейтралью фазные токи (а); фазные напряжения (сверху мгновенные, снизу действующие) (б)

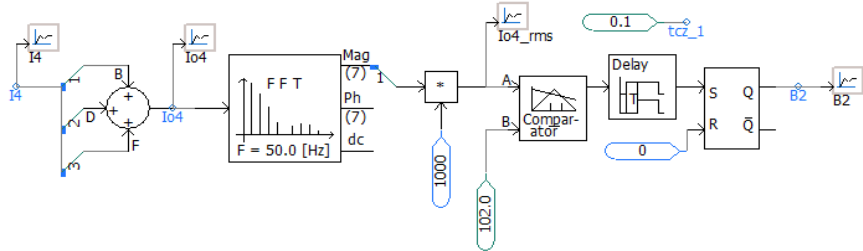


Рис. 6. Модель токовой защиты нулевой последовательности

Защита реагирует на составляющие нулевой последовательности полного естественного емкостного тока, проходящего по фазам защищаемого присоединения при замыкании на землю.

С помощью имитационного моделирования были проведены эксперименты, которые определяют оптимальный алгоритм выбора подходящего к данной сети резистора. В модели резистор подключается через ТЗН по схеме (рис. 1, б). Эффективность функционирования токовой защиты нулевой последовательности при внутренних ОЗЗ оценивается коэффициентом чувствительности. При этом ток срабатывания защиты выбирается из двух условий [7, 8, 10]:

1) отстройка от собственного емкостного тока защищаемого присоединения I_C :

$$I_{0с.з.}^{(1)} \geq K_{отс} \cdot K_{бр} \cdot I_C, \quad (6)$$

где $K_{отс} = 1,2$ – коэффициент отстройки, учитывающий погрешность реле тока; $K_{бр} = 3-4$ – коэффициент, учитывающий увеличение действующего значения I_C при дуговых перемежающихся ОЗЗ (рис. 7).

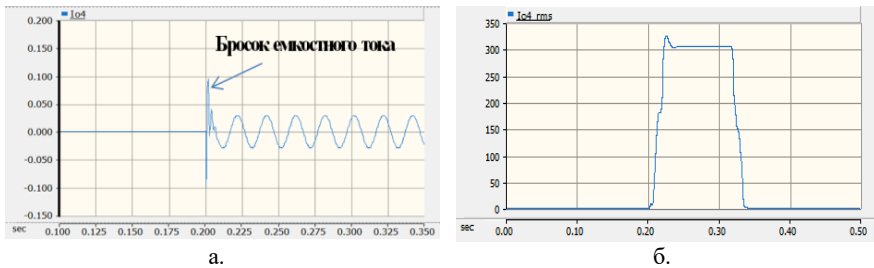


Рис. 7. Модельные осциллограммы:
отфильтрованный ток $3 \cdot I_0$ (а); действующее значение тока $3 \cdot I_0$ (б)

2) отстройка от максимального тока небаланса фильтра тока нулевой последовательности (ФТНП) в режимах без ОЗЗ или внешних междуфазных КЗ:

$$I_{0с.з.}^{(2)} \geq K_{отс} \cdot I_{нб \max} = K_{отс} \cdot K_{нб} \cdot I_{расч \max}, \quad (7)$$

где $K_{отс} = 1,2-1,5$ – для трехтрансформаторных ФТНП; $K_{нб} = 0,05-0,1$ – коэффициент небаланса.

Эффективность токовой защиты НП при внутренних ОЗЗ оценивается коэффициентом чувствительности:

$$K_{ч} = \frac{I_{0пов.min}}{I_{0с.з.}} \geq K_{ч \min \text{ доп}}. \quad (8)$$

Коэффициент чувствительности зависит от минимального тока ($3 \cdot I_0 = I_{0 \text{ пов min}}$), протекающего через место установки защиты, при внутреннем металлическом ОЗЗ. Минимально допустимое значение коэффициента чувствительности для защит с действием на отключение $k_{ч.min \text{ доп}} = 1,5-2$.

Значение $3 \cdot I_{0 \text{ пов min}}$ определяется следующим образом:
для сети с изолированной нейтралью:

$$I_{0пов.min} = I_{C\Sigma min} - I_{Cпов}, \quad (9)$$

где $I_{C\Sigma\min}$ – минимальное значение суммарного емкостного тока сети; $I_{C\text{пов}}$ – собственный емкостный ток защищаемого присоединения;
для сети с заземлением нейтрали через резистор:

$$I_{\text{пов.}\min} = \sqrt{(I_{C\Sigma\min} - I_{C\text{пов}})^2 + I_R^2}, \quad (10)$$

где $I_R = U_{\text{ф.ном}} / R_N$ – активная составляющая тока ОЗЗ.

Были проведены эксперименты на модели сети с изолированной нейтралью, в которых менялась конфигурация сети (протяженность неповрежденных фидеров). Длина защищаемого присоединения оставалась неизменной ($l = 10$ км). Использовались кабели СПЭ сечением 185 мм². В табл. 1 представлены полученные экспериментальные данные.

Таблица 1.

Экспериментальные данные для модели сети с изолированной нейтралью

$\Sigma L_{\text{сети}}$, км	$U_{\text{ф}}$, кВ	$I_{\text{оззф}}$, А	$I_{\text{пов.}\min}$, А	$I_{C\Sigma\min}$, А	$I_{C\text{пов}}$, А	$I_{\text{о.с.}}^{(1)}$, А	$I_{\text{расч. макс}}$, А	$I_{\text{пб}}$, А	$I_{\text{о.с.}}^{(2)}$, А	$K_{\text{ч}}$
11	10,2	102	3,7	40,9	37,2	133,9	100	5	6,25	0,028
15	10,2	102	18,6	55,8	37,2	133,9	100	5	6,25	0,139
22	10,1	91	44,2	81,0	36,8	132,6	100	5	6,25	0,333
25	10,1	90,5	55,2	92,0	36,8	132,6	100	5	6,25	0,4
28	10,1	90	66,3	103,1	36,8	132,6	100	5	6,25	0,5
35	10,13	101	92,3	129,3	36,9	132,9	100	5	6,25	0,7
38	10,15	101,5	103,6	140,6	37,0	133,2	100	5	6,25	0,8
47	10,18	103	137,3	174,4	37,1	133,6	100	5	6,25	1,0
59	10,2	104,5	182,2	219,4	37,2	133,9	100	5	6,25	1,4
62	10,24	105	194,1	231,4	37,3	134,4	100	5	6,25	1,4
72	10,3	110	232,8	270,4	37,5	135,2	100	5	6,25	1,7

В результате экспериментов определена величина коэффициентов чувствительности. В большинстве случаев коэффициент чувствительности $K_{\text{ч}}$ не удовлетворяет условию (8), из чего следует вывод о невозможности установки релейной защиты с действием на отключение в данной сети.

В табл. 2 и на рис. 8 представлены результаты эксперимента при использовании модели сети с резистивным заземлением нейтрали. В ходе эксперимента также определен $K_{\text{ч}}$, от которого зависит быстрота и точность исполнения защиты. Суммарная протяженность кабельных линий оставалась неизменной $\Sigma L_{\text{сети}} = 59$ км.

Таблица 2.
Экспериментальные данные для модели сети с резистивной нейтралью

№	$R, \text{ Ом}$	$I_{\text{расч. max}}, \text{ А}$	$I_{\text{озфф}}, \text{ А}$	$I_{\text{пов. min}}, \text{ А}$	$I_{\text{спов}}, \text{ А}$	$U_{\text{ф}}, \text{ кВ}$	$I_{\text{ос.з}}, \text{ А}$	$K_{\text{ч}}$
1	5	100	586	496	7,8	8,5	28,08	17,7
2	10	100	435	350	8,7	9,17	31,32	11,2
3	15	100	356	272,7	9,4	9,4	33,84	8,1
4	20	100	306	222	9,9	9,6	35,64	6,2
5	30	100	217,8	188	10,3	9,7	37,08	5,1
6	35	100	248	164	10,7	9,8	38,52	4,3
7	40	100	215,5	132	11	9,9	39,6	3,3
8	45	100	203,5	121,5	11,1	10	39,96	3,0
9	50	100	194	112	11,2	10	40,32	2,8
10	60	100	179	99	11,4	10	41,04	2,4
11	70	100	167,9	89	11,6	10,1	41,76	2,1
12	80	100	159,4	83,5	11,7	10,1	42,12	2,0
13	85	100	156	81	11,75	10,1	42,3	1,9
14	95	100	150,6	76,5	11,8	10,1	42,48	1,8
15	100	100	148,1	75	11,85	10,1	42,66	1,8
16	105	100	146	73,3	11,9	10,16	42,84	1,7
17	115	100	142	71	11,95	10,16	43,02	1,7

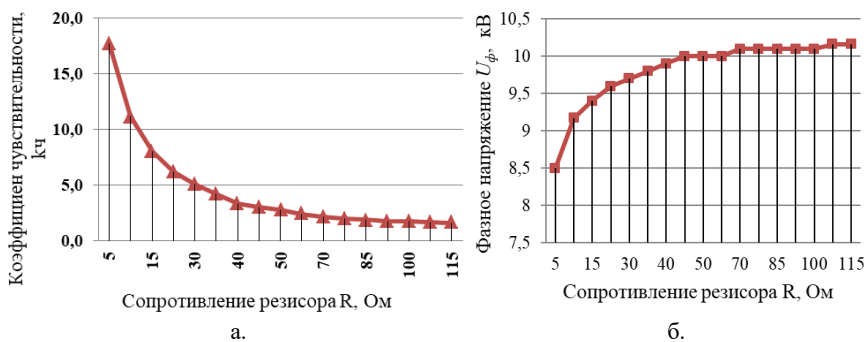


Рис. 8. Зависимости коэффициента чувствительности (а) и напряжения неповрежденных фаз (б) от параметров резистора

Результат показывает, что чувствительность защит в сети с резистивным заземлением нейтрали значительно выше, чем в сети с изолированной нейтралью при аналогичных параметрах. При токе резистора в диапазоне от 50 до 115 А, $K_{\text{ч}}$ удовлетворяет условию (8), что позволяет использовать простые токовые защиты с действием на отключение. Также

в данной сети снижаются перенапряжения на 12 %, что исключает возникновение феррорезонансных процессов и, следовательно – повреждение оборудования. Эксперименты показали, что чувствительность защиты может быть обеспечена уже при токе резистора $I_R = 50\text{A}$.

У. Заключение

1. Определены преимущества резистивного заземления нейтрали для создания условий надежного действия релейной защиты и сигнализации, подавления перенапряжений в начальной стадии ОЗЗ. Наиболее целесообразным является подключение резистора через трансформатор со схемой Z_0 или Y_0/Δ за счет разделения шин 110 кВ и 10 кВ по нулевой последовательности и общего снижения кратности перенапряжений.

2. В сетях, где внедряются кабельные линии с изоляцией из сшитого полиэтилена, а также сухие силовые трансформаторы, требующие усиленной защиты от перенапряжений путем применения соответствующих ОПН, целесообразно использовать резистивное заземление нейтрали, релейную защиту, действующую на отключение поврежденного участка линии и устройства АВР, также другие виды автоматики.

3. Режим резистивного заземления нейтрали должен быть использован в городских кабельных сетях, где это экономически оправданно и эффективно по сравнению с точки зрения безопасности человека и животного (напряжение прикосновения и шага). Критическим критерием выбора резистора является гарантированная чувствительность простых токовых защит.

Представленные результаты научно-исследовательской работы получены при поддержке гранта Президента Российской Федерации для государственной поддержки молодых российских ученых (МК-3210.2019.8). Соглашение № 075-15-2019-337 от 11.06.2019 г.

© Лоскутов А.А., 2019

© Кузина О.В., 2019

Библиографический список

- [1] Майоров А.В., Ширковец А.И. Режим нейтрали и организация релейной защиты от замыканий на землю в сети 20кВ // Релейная защита и автоматизация. 2016. № 3. С. 21-28.
- [2] Кужеков С.Л. О низкоомном заземлении нейтрали // Новости Электротехники. [Электронный ресурс]. URL: <http://www.news.elteh.ru/arh/2013/83/08.php> (дата обращения 10.05.2019).
- [3] Кужеков С.Л. Низкоомное заземление нейтрали в распредсетях напряжением 6-20кВ // Рускабель. [Электронный ресурс]. URL: https://www.ruscable.ru/article/Nizkoomnoe_zazemlenie_nejtrali_v_raspredsetyah_napryazheniem_6-20_kv/ (дата обращения 10.05.2019).

- [4] Майоров А.В. Разработка научно-технических решений по формированию электрической сети 20 кВ мегаполиса: дис. канд. техн. наук, АО «НТЦ ФСК ЕЭС», Москва, 2016. – 137 с.
- [5] Сарин Л.И., Ширковец А.И, и др. Опыт применения резистивного заземления нейтрали в электрических сетях 6-35 кВ // Энергетик. 2009. № 4. С. 13-14.
- [6] IEEE Std 142-2007. Recommended Practice for Grounding of industrial and Commercial Power Systems.
- [7] Шабад М.А. Расчеты релейной защиты и автоматики распределительных сетей. СПб.: ПЭИПК, 2010. – 350 с.
- [8] Булычев А. В., Наволочный А.А. Релейная защита в распределительных электрических сетях. М.: ЭНАС, 2011. – 207 с.
- [9] ГОСТ 12.1.038-82. Электробезопасность. Предельно допустимые значения напряжений прикосновения и токов. М.: ИПК Издательство стандартов, 2001.
- [10] Шуин В.А., Гусенков А.В. Защиты от замыканий на землю в электрических сетях 6-10кВ. М.: НТФ «Энергопрогресс», «Энергетик», 2001. – 103 с.

A.A. Loskutov, O.V. Kuzina

ANALYSIS OF THE USE OF RESISTIVE NEUTRAL GROUNDING IN ELECTRIC DISTRIBUTION NETWORKS ON THE BASIS OF SIMULATION

Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev
Nizhny Novgorod, Russia

Abstract. World practice shows positive results of using resistive neutral grounding in distribution electric networks. However, in Russia resistive neutral grounding is practically not used. In particular, this is due to the lack of scientifically based technical solutions for the optimal select of resistor resistance. An analysis of the use of resistive neutral grounding in medium voltage distribution networks was performed. The main criteria for selecting resistors are determined. Simulation models in the PSCAD software package that investigate electromagnetic transients in the electrical network depending on the type of neutral grounding and on the specific resistance of the resistor were developed. The sensitivity coefficients of the relay protection are determined depending on the resistance of the resistors. It has been established that an important criterion for the select of a resistor is the guaranteed sensitivity of simple current protection.

Keywords: resistive neutral grounding, single-phase earth fault, sensitivity, simulation, electrical safety.

References

- [1] A.V. Mayorov, A.I. Shirkovets and V.N. Valov, «Neutral mode and organization of relay protection against earth faults in a 20kV network», *Relay protection and automatization*, vol. 3, pp. 21-28, 2016 (in Russian).

-
- [2] S.L. Kuzhekov, «About low impedance neutral earthing», *Electrical Engineering News*, vol. 5, no. 83, 2013. [Online]. Available at: URL: <http://www.news.elteh.ru/arh/2013/83/08.php>. [Accessed: May, 10, 2019] (in Russian).
- [3] S.L. Kuzhekov, «Low-resistance neutral earthing in distribution networks with voltage of 6-20kV», *CABLE-news*, vol. 6, 2013. [Online]. Available at: URL: https://www.ruscable.ru/article/Nizkoomnoe_zazemlenie_nejtrali_v_raspredsetyax_napryazheniem_6-20_kv/. [Accessed: May, 10, 2019] (in Russian).
- [4] A.V. Mayorov, «*Development of scientific and technical solutions for the formation of an electrical network of 20 kV megalopolis*», dis. Cand. of Tech. S. thesis, JSC “STC FSK UES”, Moscow, 2016, P. 137 (in Russian).
- [5] L.I. Sarin and A.I. Shirkovets, «Experience of using resistive neutral grounding in electric networks of 6-35 kV», *Energetik*, vol. 4, pp. 13-14, 2009 (in Russian).
- [6] IEEE Std 142 – 2007. Recommended Practice for Grounding of Industrial and Commercial Power Systrms.
- [7] M.A. Shabad, *Calculations of relay protection and automation of distribution networks*. St. Petersburg: PEIPK, 2010, P. 350 (in Russian).
- [8] A.V. Bulychev and A.A. Navolochny, *Relay protection in distribution electric networks*. Moscow: ENAS, 2011, P. 207 (in Russian).
- [9] GOST 12.1.038-82. Electrical safety. Maximum allowable values of contact voltages and currents. Moscow: IPK Publishing house of standards, 2001 (in Russian).
- [10] V.A. Shuin and A.V. Gusenkov, *Protection against earth faults in electrical networks 6-10kV*. Moscow: NTF «Energoprogress», «Energetik», 2001, P. 103 (in Russian).

УДК 621.31

А.Ю. Ефимов, А.О. Алехин

ОЦЕНКА НАДЕЖНОСТИ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ПОТРЕБИТЕЛЕЙ ПЕРВОЙ И ВТОРОЙ КАТЕГОРИИ

Национальный исследовательский
Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарева

В статье рассмотрены вопросы оценки надежности электрооборудования и электрических сетей, применяемых для электроснабжения потребителей первой и второй категории. Проанализированы основные причины повреждения воздушных и кабельных линий, трансформаторных подстанций и распределительных пунктов. Приведены расчеты показателей надежности: вероятности безотказной работы, среднего времени восстановления и коэффициента готовности для потребителей первой и второй категории без использования автономного источника и совместно с ним (в течение года). Представлены функциональные схемы участка электрической сети и показаны этапы упрощения расчетной схемы. Сделан вывод о влиянии на безотказную работу системы электроснабжения автономного источника питания.

Ключевые слова: автономный источник питания, надежность, система электроснабжения, электрическая сеть.

1. Введение

Одной из основных задач электроэнергетики является оценка надежности электрических сетей, т.е., получение детальной количественной информации о свойствах системы, характеризующих ее безотказность, ремонтпригодность, долговечность и т.д. Под надежностью системы электроснабжения (СЭС) будем понимать, прежде всего, бесперебойное питание потребителя в заданные промежутки времени с заданными показателями.

II. Показатели надежности

Важным фактором, непосредственно влияющим на надежность СЭС, является «отказ». Можно выделить следующие типы отказов элементов СЭС:

- 1) короткое замыкание;
- 2) обрыв цепи;
- 3) несрабатывание.

Для оценки СЭС с точки зрения бесперебойной работы используются показатели надежности. Под показателями надежности понимают количественные характеристики СЭС, определяющие ее способность обеспе-

чивать электроэнергией потребителей. Значения показателей надежности могут быть получены с помощью испытаний или по результатам эксплуатации. Показатели надежности можно классифицировать на показатели для невосстанавливаемых изделий и для восстанавливаемых. Также могут быть использованы комплексные показатели. Оценку надежности элементов СЭС можно осуществлять на основе всех показателей или выбранной совокупности показателей.

К единичным показателям надежности невосстанавливаемых элементов относят:

$P(t)$ – вероятность безотказной работы;

$Q(t)$ – вероятность отказа;

$a(t)$ – частота отказов;

$\lambda(t)$ – интенсивность отказов;

T_{cp} – среднее время безотказной работы.

К единичным показателям надежности восстанавливаемых элементов относят:

$S(t)$ – вероятность восстановления;

$G(t)$ – вероятность невосстановления;

Va – частота восстановления;

$\mu(t)$ – интенсивность восстановления;

$T(t)$ – среднее время восстановления;

$\omega(t)$ – параметр потока отказов.

К комплексным показателям надежности восстанавливаемых элементов относят:

K_r – коэффициент готовности;

K_n – коэффициент неготовности (вынужденного простоя);

$K_{ог}$ – коэффициент оперативной готовности;

$T_{и}$ – коэффициент технического использования.

Вследствие достаточно сложной структуры, включающей большое количество элементов, оценка надежности электротехнических комплексов является, как правило, трудоемким процессом. Предлагаемые методы оценки надежности ориентированы в основном на конкретные случаи и не могут быть использованы применительно к распределительным сетям. Оценка надежности электроснабжения (ЭС) требует анализа возможных причин отказов элементов системы. При резервировании необходимо принимать во внимание время ввода резерва. Это позволит избежать нарушений в технологических процессах и возникновений аварийных ситуаций. Важным является правильный выбор электрооборудования и своевременное проведение ремонтов при эксплуатации электрооборудования.

В настоящее время не существует универсального метода расчета надежности схем электрических соединений, хотя имеется большое число

частных методов, основными из которых являются: аналитический, таблично-логический, метод, использующий теорию Марковских процессов; метод дерева отказов и др. Отличительные особенности методов определяются уровнем допущений, полнотой учитываемых факторов, структурой и содержанием требуемой исходной информации.

III. Оценка надежности

Для оценки надежности электрических сетей широкое распространение получили элементарные методы расчетов. Энергосистемы представляют собой сочетание последовательно и параллельно соединенных элементов. Определение показателей надежности таких структур производится поэтапным объединением (эквивалентированием) элементов по формулам для последовательно и параллельно соединенных элементов.

Была рассчитана вероятность безотказного электроснабжения потребителей первой и второй категории «П» без использования автономного источника (АИ) и совместно с ним в течение календарного года. Результаты средней наработки указаны в часах. Исходные данные представлены в табл. 1 и 2.

Схема электроснабжения без АИ представлена на рис. 1, схема электроснабжения с АИ – на рис. 2.

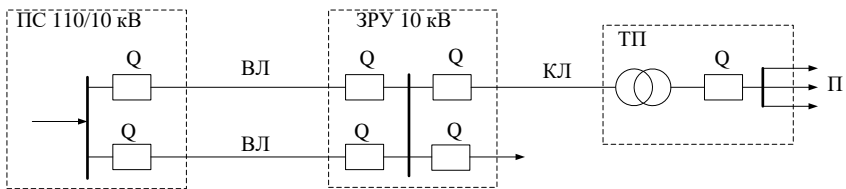


Рис. 1. Функциональная схема участка электрической сети без АИ

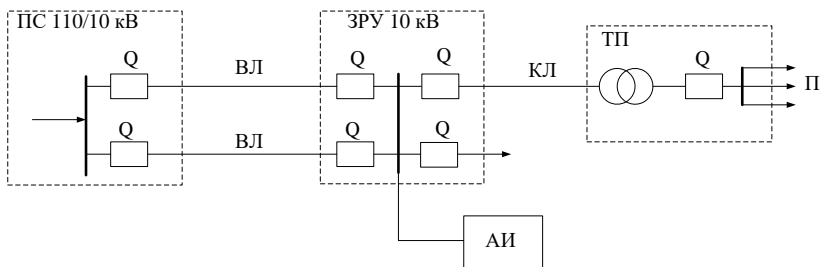


Рис. 2. Функциональная схема участка электрической сети с АИ

Таблица 1.
Среднее время аварийного простоя элементов сети

Элемент	Обозначение	Ед. из.	Значение
Линии	$t_{кл}$	(год)·10 ⁻³	1,80
Трансформатора	$t_{кт}$	(год)·10 ⁻³	0,03
Выключателя	$t_{кв}$	(год)·10 ⁻³	1,70
Сборных шин	$t_{кш}$	(год)·10 ⁻³	0,80

Таблица 2.
Интенсивность отказа элементов сети

Элемент	Обозначение	Ед. из.	Значение
Линии	$\lambda_{л}$	1/год	0,25
Трансформатора	$\lambda_{т}$	1/год	0,10
Выключателя	$\lambda_{в}$	1/год	0,15
Сборных шин	$\lambda_{ш}$	1/год	0,01

При выполнении расчетов учитывалось, что всем выключателям соответствуют два вида отказов: «короткое замыкание» и «обрыв». Интенсивность отказов равна $\lambda_{кз}=\lambda_{об}=0,5\cdot\lambda_{в}$. Последствиями отказа типа «короткое замыкание» являются короткое замыкание на сборных шинах и нарушение электроснабжения потребителей.

В расчетной схеме приняты следующие обозначения. Одной звездочкой (*) обозначен отказ выключателя, приводящий к короткому замыканию на сборных шинах. Двумя звездочками (**) обозначен отказ выключателя, приводящий к обрыву цепи.

Составим схему замещения сети без АИ (рис. 3).

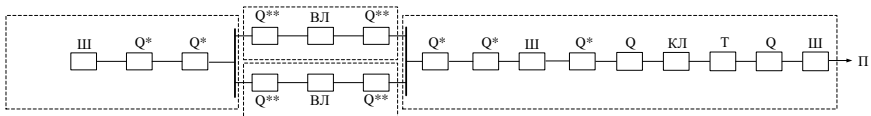


Рис. 3. Схема замещения электросети

Интенсивность отказов для узлов с последовательно соединенными элементами:

$$\lambda_A = 3 \cdot \lambda_{Ш} + 5 \cdot \lambda_{кз} + 2 \cdot \lambda_{в} + \lambda_{кЛ} + \lambda_{т}; \quad (1)$$

$$\lambda_{\text{Б}} = \lambda_{\text{В}} = \lambda_{\text{Д}} + 2 \cdot \lambda_{\text{об}}. \quad (2)$$

Определим интенсивность отказов для узлов А, Б и В:

$$\lambda_{\text{А}} = 3 \cdot 0,01 + 5 \cdot 0,075 + 0,15 + 0,03 = 0,835 \text{ год}^{-1};$$

$$\lambda_{\text{Б}} = \lambda_{\text{В}} = 2 \cdot 0,25 + 0,075 = 0,4 \text{ год}^{-1}.$$

В расчетной схеме все последовательно соединенные элементы объединим в узлы А, Б и В (рис. 4).

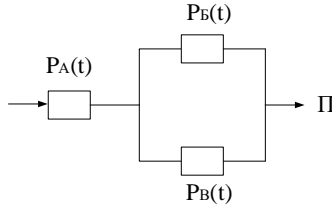


Рис. 4. Расчетная схема

Вероятность безотказной работы последовательно соединенных элементов узлов определяется по формуле:

$$P_{\text{А}}(t) = e^{-\lambda_{\text{А}} \cdot t}. \quad (3)$$

Определим вероятность безотказной работы узлов: А, Б и В, для момента времени $t=1$ год:

$$P_{\text{А}}(1) = e^{-0,835 \cdot 1} = 0,434;$$

$$P_{\text{Б}}(1) = P_{\text{В}}(1) = e^{-0,4 \cdot 1} = 0,670.$$

Для параллельно соединённых узлов Б и В (рис. 4) вероятность безотказной работы определим по формуле:

$$P_{\text{БВ}}(1) = 1 - (1 - P_{\text{Б}}(t)) \cdot (1 - P_{\text{В}}(t));$$

$$P_{\text{БВ}}(1) = 1 - (1 - 0,67) \cdot (1 - 0,67) = 0,891. \quad (4)$$

Дальнейшее упрощение расчетной схемы представлено на рис. 5.



Рис. 5. Упрощение расчетной схемы

При последовательном соединении узлов вероятность безотказной работы рассчитывается по формуле:

$$\begin{aligned} P_{\text{АБВ}}(1) &= P_{\text{А}}(t) \cdot P_{\text{БВ}}(t); \\ P_{\text{АБВ}}(1) &= 0,891 \cdot 0,434 = 0,386. \end{aligned} \quad (5)$$

Средняя наработка до отказа вычисляется по формуле:

$$\begin{aligned} T &= \frac{1}{\lambda_{\text{А}} + \lambda_{\text{Б}}} + \frac{1}{\lambda_{\text{А}} + \lambda_{\text{В}}} - \frac{1}{\lambda_{\text{А}} + \lambda_{\text{Б}} + \lambda_{\text{В}}}; \\ T &= \frac{1}{0,835 + 0,4} + \frac{1}{0,835 + 0,4} - \frac{1}{0,835 + 0,4 + 0,4} = 0,401 \text{ года}. \end{aligned} \quad (6)$$

или в часах:

$$T = 0,401 \cdot 8760 = 3512,792$$

Для каждого элемента сети вероятное время нахождения его в аварийном простое в течение времени $t = 1$ год, определяется:

$$T_{\text{авар}} = t_k \left(1 - e^{-\lambda_k t}\right). \quad (7)$$

Для каждого элемента определим вероятное время нахождения элемента в аварийном простое:

$$\begin{aligned} T_{\text{аварЛ}} &= 0,0018 \left(1 - e^{-0,25 \cdot 1}\right) = 39,84 \cdot 10^{-5} \text{ г}; \\ T_{\text{аварКЛ}} &= 0,001 \left(1 - e^{-0,1 \cdot 1}\right) = 9,52 \cdot 10^{-5} \text{ г}; \\ T_{\text{аварГ}} &= 0,03 \left(1 - e^{-0,03 \cdot 1}\right) = 88,72 \cdot 10^{-5} \text{ г}; \\ T_{\text{аварВ}} &= 0,0017 \left(1 - e^{-0,15 \cdot 1}\right) = 23,69 \cdot 10^{-5} \text{ г}; \\ T_{\text{аварШ}} &= 0,0008 \left(1 - e^{-0,01 \cdot 1}\right) = 0,8 \cdot 10^{-5} \text{ г}. \end{aligned}$$

Среднее время восстановления последовательной цепи из n элементов определяется по формуле:

$$T_B = 1 - \prod_{k=1}^n (1 - T_{\text{авар.}k}). \quad (8)$$

Определим среднее время восстановления:

$$T_B = 1 - (1 - 39,84 \cdot 10^{-5})^2 \cdot (1 - 9,52 \cdot 10^{-5})^1 \cdot (1 - 88,72 \cdot 10^{-5})^1 \cdot (1 - 23,69 \cdot 10^{-5})^7 \cdot (1 - 0,8 \cdot 10^{-5})^3 = 0,003\text{г.}$$

или в часах:

$$T_p = 0,003 \cdot 8760 = 30,27$$

Коэффициент готовности K_Γ , т. е. вероятность того, что участок сети окажется работоспособным в любой момент времени, вычисляется по формуле:

$$K_\Gamma = \frac{T_p}{T_p + T_B}. \quad (9)$$

Определим коэффициент готовности:

$$K_\Gamma = \frac{6817,12}{6817,12 + 30,27} = 0,991.$$

Аварийные и резервные источники питания используются для восстановления электроснабжения в случае, если на основной электросети произошла авария или любая другая внештатная ситуация, которая привела к существенному сокращению количества электроэнергии в сети.

При использовании автономного источника схема принимает следующий вид (рис. 6).

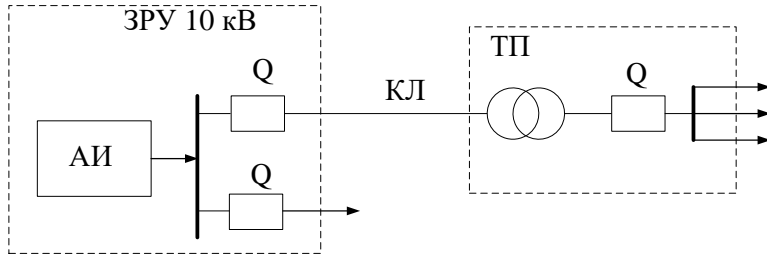


Рис. 6. Функциональная схема участка электрической сети, питающейся от автономного источника

Составим схему замещения сети с АИ (рис. 7).

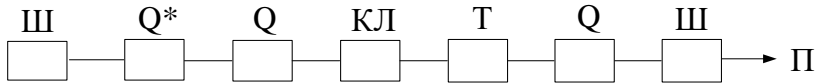


Рис. 7. Схема замещения электросети с аварийным источником

Интенсивность отказов для узлов с последовательно соединенными элементами вычисляется по формуле:

$$\lambda = 3 \cdot \lambda_{Ш} + 5 \cdot \lambda_{КЗ} + 2 \cdot \lambda_{В} + \lambda_{КЛ} + \lambda_{Т};$$

$$\lambda = 2 \cdot 0,01 + 1 \cdot 0,075 + 2 \cdot 0,15 + 0,1 + 0,03 = 0,525 \text{ год}^{-1} \quad (10)$$

Вероятность безотказной работы последовательно соединенных элементов узлов определяется по формуле 3.

$$P = e^{-0,525 \cdot 1} = 0,591.$$

Средняя наработка до отказа вычисляется по формуле:

$$T = \frac{1}{\lambda};$$

$$T = \frac{1}{0,525} = 1,9 \text{ года} \quad (11)$$

или в часах:

$$T = 1,9 \cdot 8760 = 16685,714$$

Для каждого элемента сети вероятное время нахождения его в аварийном простое в течение времени $t=1$ год, определяется по формуле 7.

$$T_{\text{аварКЛ}} = 9,52 \cdot 10^{-5} \text{ г};$$

$$T_{\text{аварТ}} = 88,72 \cdot 10^{-5} \text{ г};$$

$$T_{\text{аварВ}} = 23,69 \cdot 10^{-5} \text{ г};$$

$$T_{\text{аварШ}} = 0,8 \cdot 10^{-5} \text{ г}.$$

Среднее время восстановления последовательной цепи из n элементов определяется по формуле 8.

$$T_{\text{в}} = 1 - \left(1 - 9,56 \cdot 10^{-5}\right)^1 \cdot \left(1 - 23,69 \cdot 10^{-5}\right)^2 \cdot \left(1 - 0,8 \cdot 10^{-5}\right)^2 \cdot \left(1 - 88,72 \cdot 10^{-5}\right)^1 = 0,001 \text{ г}.$$

или, в часах:

$$T_{\text{р}} = 0,001 \cdot 8760 = 12,891$$

Коэффициент готовности $K_{\text{г}}$, т.е., вероятность того, что участок сети окажется работоспособным в любой момент времени, вычисляется по формуле 9:

$$K_{\text{г}} = \frac{16685,714}{16685,714 + 12,89} = 0,999.$$

IV. Выводы

Исследования показали, что вероятность безотказной работы Р системы электроснабжения без АИ меньше, чем в системе с АИ, $0,386 < 0,591$ соответственно. При этом среднее время восстановления $T_{\text{в}}$ системы электроснабжения без АИ больше, чем в системе с АИ, $30,27 > 12,89$ соответственно. Коэффициент готовности $K_{\text{г}}$ системы электроснабжения без АИ меньше, чем в системе с АИ, $0,991 < 0,999$ соответственно. Это показывает, что использование аварийного источника питания положительно сказывается на надежности системы электроснабжения потребителей первой и второй категории надежности. Обеспечивается защита подключенной

электротехники от любых перепадов напряжения в штатном режиме работы, что, в свою очередь, имеет следствием:

- 1) уменьшение опасности для жизни людей;
- 2) снижение риска поломки сложного и дорогостоящего оборудования;
- 3) уменьшение времени простоя оборудования, рабочих и технологического процесса на производстве;
- 4) снижение риска массового возникновения брака или недоотпуска продукции.

© Ефимов А.Ю., 2019

© Алехин А.О., 2019

Библиографический список

- [1] Агеев В.А. Сравнительный анализ методов расчета режимов электрических сетей // Сельский механизатор. 2018. № 1. С. 30-33.
- [2] Воротницкий В.Э. Снижение потерь электроэнергии в электрических сетях. Динамика, структура, методы анализа и мероприятия // Энергосбережение. 2005. № 2. С. 90-94; № 3. С. 92-97.
- [3] Малафеев С.И. Надежность электроснабжения: учеб.пос.. СПб.: Лань, 2017. – 368 с.
- [4] Слышалов В.К. Расчет показателей надежности распределительных электрических сетей при наличии автоматического включения резерва. Омск: Изд-во ГОУВПО, 2011. – 4 с.
- [5] Ефимов А.Ю. Математическое моделирование сельских электрических сетей с целью повышения их безотказной работы: автореф. дис. канд. техн. наук, Мордовский гос. ун-т им. Н.П. Огарева, Саранск, Россия, 2000. – 20 с.
- [6] Ефимов А.Ю., Кузнецов Д.В., Келейников С.А. и др. Оценка надежности систем теплоснабжения // Техническое обеспечение перспективных технологий. Сборник научных трудов. Саранск: Изд-во НИ МГУ им. Н.П. Огарева, 2001. С. 101-103.

A.Yu. Efimov, A.O. Alehin

**ASSESSMENT OF RELIABILITY OF POWER SUPPLY
CONSUMERS OF THE FIRST
AND SECOND CATEGORY**

Ogarev Mordovia State University
Saransk, Russia

Abstract. One of the most important tasks in the design and operation of electrical complexes and systems is to assess their reliability. The article is devoted to assessing the reliability of electrical equipment and electrical networks used to supply consumers of the first and second categories. An analysis of the main causes of damage to overhead and cable lines, transformer substations and distribution points was carried out. Calculations of reliability indicators (probability of failure-free operation, average recovery time, availability factor) for consumers of the first and second categories without using an autonomous source and together with it (during the year) were carried out. The functional diagrams of the electric network section are presented and the steps to simplify the design scheme are shown. It is concluded that the autonomous power source is wagging on the trouble-free operation of the power supply system.

Keywords: autonomous power supply, reliability, power supply system, electrical network.

References

- [1] V.A. Ageev, «Sravnitel'nyy analiz metodov rascheta rezhimov elektricheskikh setey», *Sel'skiy mekhanizator*, vol. 1, pp. 30-33, 2018 (in Russian).
- [2] V.E. Vorotnitsky, «Snizheniye poter' elektroenergii v elektricheskikh setyakh. Dinamika, struktura, metody analiza i meropriyatiya», *Energoberezheniye*, vol. 2, pp. 90-94, 2005 and vol. 3, pp. 92-97 (in Russian).
- [3] S.I. Malafeev, *Nadezhnost' elektrosnabzheniya: uch.posob.* St. Petersburg: Lan, 2017, P. 368 (in Russian).
- [4] V.K. Slyshalov, *Raschet pokazateley nadezhnosti raspredelitel'nykh elektricheskikh setey pri nalichii avtomaticheskogo vklucheniya rezervy.* Omsk: Izd-vo GOUVPO, 2011, P. 4 (in Russian).
- [5] A.Yu. Efimov, «*Matematicheskoye modelirovaniye sel'skikh elektricheskikh setey s tsel'yu povysheniya ikh bezotkaznoy raboty*», Cand. of Tech. S. thesis, Mordovia State University n.a. N.P. Ogareva, Saransk, Russia, 2000, P. 20 (in Russian).
- [6] A.Yu. Efimov, «*Otsenka nadezhnosti sistem teplosnabzheniya: stat'ya v sbornike statey kandidata tekhnicheskikh nauk*» Mordovia State University n.a. N.P. Ogareva, Saransk, Russia, pp. 101-103, 2001 (in Russian).

УДК 620.91

Р.В. Колосов

МОДЕЛИРОВАНИЕ СОЛНЕЧНЫХ БАТАРЕЙ

ЗАО «Сормовское электромонтажное предприятие»

Для апробации научно-технических решений в области систем электроснабжения с возобновляемыми источниками энергии актуальными являются задачи построения имитационных моделей и их отдельных составляющих. Статья посвящена вопросам построения математической и Matlab-модели солнечных элементов. Приведены математические выражения, описывающие связь между основными параметрами солнечного элемента. Обоснованы преимущества предложенного подхода. Представлена Matlab-модель солнечной батареи, позволяющая исследовать вольтамперную характеристику солнечного элемента при изменении различных параметров. С помощью Matlab-модели проведены исследования зависимости вольтамперной характеристики солнечного элемента от последовательного сопротивления. Результаты работы могут использоваться для изучения аварийных режимов и переходных процессов в элементах солнечных батарей.

Ключевые слова: возобновляемые источники энергии, вольтамперная характеристика, имитационная модель, солнечная батарея, Matlab.

1. Введение

При проектировании электротехнических комплексов с солнечными батареями общепринятым подходом, позволяющим исследовать функционирование элементов систем электроснабжения в различных условиях, является имитационное моделирование [1-5]. Изучение характеристик солнечного элемента предполагает создание его имитационной модели, которая будет электрически эквивалентна реальной энергоустановке. Идеальный солнечный элемент можно представить в виде постоянного источника тока, подключенного параллельный диоду. Однако, в действительности идеальные солнечные элементы отсутствуют, поэтому в имитационную модель добавляются шунтирующее и последовательное сопротивление [6-7].

II. Цели и задачи исследования

При проектировании солнечной батареи необходимо начать с разработки эквивалентной цепи, затем составить характеристическое уравнение солнечного элемента, разработать модель солнечной батареи для изучения вольт-амперной характеристики (ВАХ) солнечного элемента, и, наконец, оценить ее пригодность.

III. Методы решения

Имитационная модель солнечного элемента, представленного в виде постоянного источника тока, параллельного диоду, с добавлением шунтирующего и последовательного сопротивления, может быть описана следующими формулами. Ток, вызванный солнечной батареей, эквивалентен току источника, за вычетом тока, текущего через диод и тока, текущего через шунтирующий резистор:

$$I = I_L - I_D - I_{SH}, \quad (1)$$

где I – выходной ток (А); I_L – фотовозбужденный ток (А); I_D – ток диода (А); I_{SH} – ток шунта (А).

Ток через эти элементы управляется напряжением на них:

$$U_j = U + I \cdot R_s, \quad (2)$$

где U – напряжение на выходных клеммах (В), I – выходной ток (А), R_s – сопротивление последовательного резистора (Ω).

Модель для снятия вольт-амперных характеристик солнечных батарей выполнена на основе компонента simscape (Matlab Simulink). Модель основана на соединении солнечной батареи с переменным сопротивлением [8]. Внешний вид модели представлен на рис. 1.

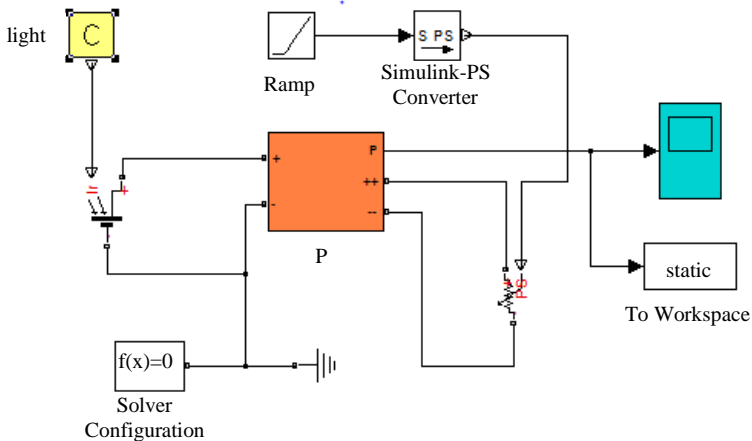


Рис. 1. Модель солнечных батарей

Здесь блок P – блок определения мгновенной мощности. Этот блок в развернутом состоянии представлен на рис. 2.

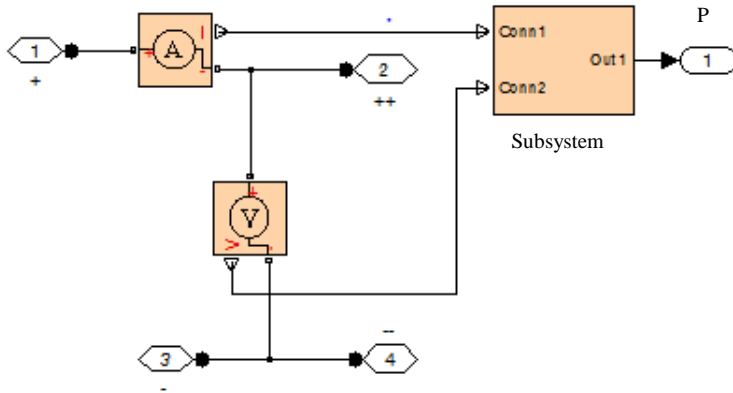


Рис. 2. Блок определения мгновенной мощности

Исходя из уравнений четырехслойного диода, ток, текущий через диод, определяется следующим образом.

$$I_D = I_0 \left\{ \exp \left[\frac{q \cdot V_j}{n \cdot k \cdot T} \right] - 1 \right\}, \quad (3)$$

где I_0 – обратный ток насыщения (А); n – фактор идеальности диода (1 для идеального диода); q – элементарный заряд; k – постоянная Больцмана; T – абсолютная температура; для кремния при 25 °С, $k \cdot T / q \approx 0,029$ В.

По закону Ома, ток, текущий через шунтирующий резистор:

$$I_{SH} = \frac{V_j}{R_{SH}}, \quad (4)$$

где R_{SH} – сопротивление шунта (Ω).

Подставляя это в исходное уравнение, получим характеристическое уравнение для солнечного элемента, учитывающее параметры элемента в выходном токе и напряжении.

$$I = I_L - I_0 \left\{ \exp \left[\frac{q \cdot (V + I \cdot R_S)}{n \cdot k \cdot T} \right] - 1 \right\} - \frac{V + I \cdot R_S}{R_{SH}}. \quad (5)$$

Другие методы приводят к тем же по виду уравнениям, однако с U в левой части. Оба вида уравнений идентичны, их упрощение приводит к одинаковым результатам. Поскольку в обеих частях уравнения присутствует I в трансцендентной функции, его аналитическое решение отсутствует. Однако уравнение может быть решено с помощью численных методов. Если отсутствует возможность прямого измерения параметров I_0 , n , R_S и R_{SH} , то общее применение характеристического уравнения может быть сведено к нелинейной регрессии значений этих параметров на основе их совместного эффекта на поведение солнечного элемента. Значения I_0 , R_S и R_{SH} зависят от физических размеров солнечного элемента. В сравнении с другими такими же элементами, элемент с двойной площадью покрытия в принципе имеет двойной I_0 , поскольку имеет двойную зону перехода, сквозь которую может протекать ток. Также вследствие двойной площади поперечного сечения, через которую протекает ток, такой элемент характеризуется половиной R_S и R_{SH} . Исходя из этого, характеристическое уравнение может быть записано в условиях плотности тока (или тока, протекающего в единице площади):

$$J = J_L - J_0 \left\{ \exp \left[\frac{q \cdot (V + J \cdot r_S)}{n \cdot k \cdot T} \right] - 1 \right\} - \frac{V + J \cdot r_S}{r_{SH}}, \quad (6)$$

где J – плотность тока (A/cm^2); J_L – плотность обратного тока насыщения (A/cm^2); r_S – удельное сопротивление последовательного резистора ($\Omega \cdot cm^2$); r_{SH} – удельное сопротивление шунта ($\Omega \cdot cm^2$).

Эта формула имеет несколько преимуществ. Одно из них заключается в том, что характеристики элементов с одной общепринятой площадью поперечного сечения могут сравниваться с элементами других физических размеров. Пока существуют ограничения в технологическом семействе, где все элементы должны быть одного размера, можно исследовать и сравнивать элементы между различными производителями. Другое преимущество состоит в том, что вычисления плотности, как и следовало ожидать, изменяют значения параметров к похожим степеням амплитуд, которые могут сделать числовое решение проще и точнее по сравнению с простым методом решения. Практическое ограничение этой формулировки – в том, что размеры элементов уменьшаются и вырастают некие паразитические эффекты, оказывающие влияние на значения извлеченных па-

раметров. Например, рекомбинация и нежелательные примеси в переходе растут с увеличением периметра элемента, поэтому очень маленькие элементы могут показывать высокие значения J_0 или низкие значения r_{sh} , по сравнению с большими элементами, будучи во всём остальном одинаковыми. В таких случаях сравнение между элементами должно быть выполнено внимательно, помня о данном эффекте.

На характеристическое уравнение температура может влиять двумя способами:

- через T по экспоненциальному закону (прямо);
- через эффекты на I_0 (косвенно).

Необходимо уточнить, что температура может оказывать влияние на все параметры, однако в данном случае оно наиболее выражено. Пока увеличение T уменьшает значение экспоненты, в характеристическом уравнении, значение I_0 увеличивается пропорционально $expT$. Результирующий эффект линейно снижает U_{oc} с увеличением температуры. Значение этого снижения обратно пропорционально U_{oc} . Это означает, что элементы с большими значениями U_{oc} меньше страдают от уменьшения напряжения при росте значений температуры. Для большинства кристаллов кремния, из которых состоят солнечные элементы, уменьшение напряжения составляет 0,5 %/°C. Высокоэффективные кристаллы кремния имеют характеризуются значением около 0,35 %/°C. В качестве сравнения может быть приведен аморфный кремний, у которого степень уменьшения напряжения находится в диапазоне 0,20-0,3 %/°C.

С ростом температуры незначительно увеличивается фотовозбужденный ток I_L , поскольку в элементе возрастает количество термовозбужденных носителей. Для кристаллов кремния данный эффект составляет около 0,065 %/°C, а для элементов из аморфного кремния его значение находится около 0,09 %. Совокупное влияние температуры на функционирование солнечного элемента может быть рассчитано на основе данных факторов при использовании характеристического уравнения.

С увеличением последовательного сопротивления падение напряжения, напряжение перехода и напряжение на зажимах становятся больше при том же токе. В результате обусловленная током часть ВАХ свисает к началу, вызывает значительное снижение напряжения на зажимах U и небольшое уменьшение I_{SC} . Снижение в I_{SC} также связано с большими значениями R_S . В этих режимах поведение солнечного элемента будет аналогично сопротивлению. При уменьшении сопротивления шунта ток, протекающий в отвод к шунту, увеличивается для данного уровня напряжения перехода. В результате обусловленная напряжением часть ВАХ спадает к началу, вызывая сильное снижение тока I и лёгкое снижение в U_{oc} . Очень низкие значения R_{sh} приводят к сильному снижению в U_{oc} . В большинстве

случаев для высоких значений последовательного сопротивления плохо шунтированный солнечный элемент изменят свою характеристику к характеристике, похожей на резистор.

Если представить сопротивление шунта бесконечным, характеристическое уравнение может быть решено относительно U_{oc} :

$$U_{oc} = \frac{k \cdot T}{q} \cdot \exp \left\{ \frac{I_{sc}}{I_0} + 1 \right\}. \quad (7)$$

Таким образом, при увеличении I_0 значения U_{oc} уменьшаются пропорционально обратному логарифму. Это математически описывает причину уменьшения U_{oc} при увеличении температуры. Физически обратный ток насыщения является мерой утечки зарядов через p - n переход в обратном смещении. Утечка – результат рекомбинаций зарядов в нейтральных областях с обеих сторон перехода.

Коэффициент излучения – подборный параметр, описывающий, насколько точно поведение диода соответствует теории, который предполагает p - n переход в диоде бесконечной плоскостью без рекомбинации в объемно-заряженных областях. Идеальное соответствие теории достигается при $n = 1$. Рекомбинация в объемно-заряженных областях преобладает над остальной рекомбинацией при $n = 2$.

IV. Результаты

Модель без системы управления создана для проведения статических анализов, при неизменном коэффициенте заполнения [9-11]. Внешний вид модели представлен на рис. 3.

V. Заключение

Создана работоспособная модель солнечной батареи для изучения ВАХ солнечного элемента при изменении различных параметров. В результате снижение эффективности находится в пределах 0,20-0,5 %/°C. Увеличение последовательного сопротивления и уменьшение величины шунта приводит к тому, что ВАХ солнечного элемента становится схожей с характеристикой обычного сопротивления.

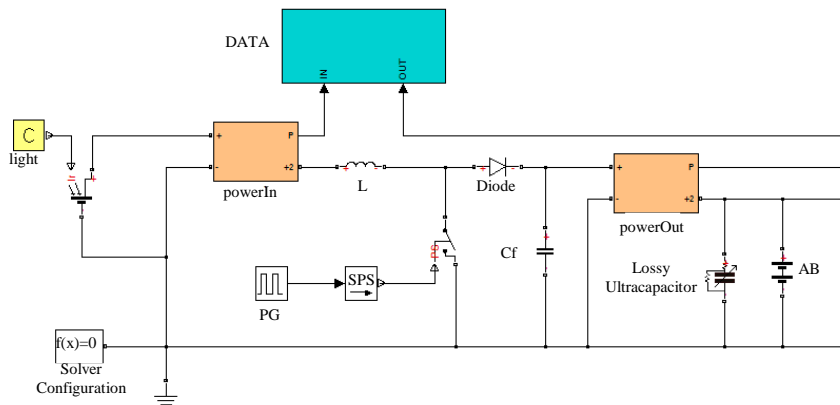


Рис. 3. Модель преобразователя без системы управления

© Колосов Р.В., 2019

Библиографический список

- [1] Уделов С.И. Возобновляемые источники энергии. Новосибирск: НГТУ, 2007. – 432 с.
- [2] Перова М.Б., Воропанова Ю.В. Эффективность объектов нетрадиционной электроэнергетики: Монография. Старый Оскол: ООО «ТНТ», 2004. – 152 с.
- [3] Минин В.А., Дмитриев Г.С. Перспективы освоения нетрадиционных и возобновляемых источников энергии на Кольском полуострове. Мурманск: Объединение Bellona, 2007. – 92 с.
- [4] Бреусов В.П., Елистратов В.В. Обоснование комбинированных энергосистем, работающих на энергии возобновляемых источников // Известия РАН, серия «Энергетика». 2002. № 6. С. 36-41.
- [5] European Smart Grids Technology Platform. Vision and Strategy for Europe's Electricity Networks of the Future. Luxembourg: Office for Official Publications of the European Communities, 2006 [Электронный ресурс]. URL: <http://www.oec.energy.gov/smartgrid.htm> (дата обращения 15.05.2019).
- [6] World Energy Outlook 2000. [Электронный ресурс]. URL: <http://www.worldenergyoutlook.org/media/weowebsite/2008-1994/weo2000.pdf> (дата обращения 15.05.2019).
- [7] World Energy Outlook 2012. [Электронный ресурс]. URL: <http://www.iea.org/textbase/npsum/weo2012sum.pdf> (дата обращения 15.05.2019).
- [8] Колосов Р.В. Возобновляемые источники энергии в системах малой генерации // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. 2013. № 3 (100). С. 207-211.
- [9] Колосов Р.В. Моделирование ветроэнергетических установок // Вестник Чувашского университета. 2014. № 2. С. 27-32.

- [10] Колосов Р.В. Особенности сопряжения возобновляемых источников (ВИЭ) в контексте развития интеллектуальной энергетической системы России // Электронный научный журнал «Инженерный вестник Дона». 2013. № 4. [Электронный ресурс]. URL: <http://www.ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2013/1922> (дата обращения 15.05.2019).
- [11] Колосов Р.В. Проектирование малых энергосистем на основе возобновляемых источников энергии // Электронный научный журнал «Инженерный вестник Дона». 2014. № 4. [Электронный ресурс]. URL: <http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/N4y2014/2713> (дата обращения 15.05.2019).

R.V. Kolosov

MODELLING OF SOLAR PANELS

JSC «Sormovskiy electrical enterprises»
Nizhny Novgorod, Russia

Abstract. The tasks of creating simulation models of power supply systems with renewable energy sources and their individual components are relevant for approbation of scientific and technical solutions in this field. The article is devoted to the construction of a mathematical and Matlab-model of solar cells. Mathematical formulas describing the relationship between the main parameters of a solar cell are given. The advantages of the proposed approach are substantiated. The Matlab-model of a solar battery which allows to study the current-voltage characteristic of the solar cell as different parameters change is presented. The dependence of the solar cell current-voltage characteristic on the series resistance was studied with the help of the Matlab-model. The results of the research can be used to study the emergency regimes and transients in solar cells.

Keywords: renewable energy sources, current-voltage characteristic, simulation model, solar battery, Matlab.

References

- [1] S.I. Udelov, *Renewable energy sources*. Novosibirsk: Publishing house of NSTU, 2007.
- [2] M.B. Perov and J.V. Voropaeva, *Effectiveness of unconventional objects of electric power industry*. Stary Oskol: LLC «TNT», 2004.
- [3] V.A. Minin and G.S. Dmitriev, *Perspektivy osvoyeniya netraditsionnykh i vobnovlyayemykh istochnikov energii na Kol'skom poluostrove*, Murmansk, 2007 (in Russian).
- [4] V.P. Breusov and V.V. Elistratov, «Obosnovaniye kombinirovannykh energosistem, rabotayushchikh na energii vobnovlyayemykh istochnikov», *Izvestiya RAN, seriya Energetika*, vol. 6, pp. 36-41, 2002 (in Russian).
- [5] *European Smart Grids Technology Platform. Vision and Strategy for Europe's Electricity Networks of the Future*. Luxembourg: Office for Official Publications of the

- European Communities*, 2006. [Online]. Available at: <http://www.oe.energy.gov/smartgrid.htm>. [Accessed: May, 15, 2019].
- [6] *World Energy Outlook*, 2000. [Online]. Available at: <http://www.worldenergyoutlook.org/media/weowebiste/2008-1994/weo2000.pdf>. [Accessed: May, 15, 2019].
- [7] *World Energy Outlook*, 2012. [Online]. Available at: <http://www.iea.org/textbase/npsum/weo2012sum.pdf>. [Accessed: May, 15, 2019].
- [8] R.V. Kolosov, «Vozobnovlyayemyye istochniki energii v sistemakh maloy generatsii», *Trudy Nizhegorodskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*, vol. 3, no. 100, pp. 207-211, 2013 (in Russian).
- [9] R.V. Kolosov, «Modelirovaniye vetroenergeticheskikh ustanovok», *Vestnik Chuvashskogo universiteta*, vol. 2, pp. 27-32, 2014 (in Russian).
- [10] R.V. Kolosov, «Osobennosti sopryazheniya vozobnovlyayemykh istochnikov v kontekste razvitiya intellektual'noy energeticheskoy sistemy Rossii», *Inzhenernyy vestnik Dona*, vol. 4, 2013. [Online]. Available at: <http://www.ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2013/1922>. [Accessed: May, 15, 2019] (in Russian).
- [11] R.V. Kolosov, «Proyektirovaniye malykh energosistem na osnove vozobnovlyayemykh istochnikov energii», *Inzhenernyy vestnik Dona*, vol. 4, 2014. [Online]. Available at: <http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/N4y2014/2713>. [Accessed: May, 15, 2019] (in Russian).

СИЛОВАЯ ЭЛЕКТРОНИКА

УДК 621.314.6

Л.Э. Рогинская, Д.В. Гусаков, Д.Р. Масалимов

ИССЛЕДОВАНИЕ 18-ПУЛЬСНЫХ АВТО- И ТРАНСФОРМАТОРНО-ВЫПРЯМИТЕЛЬНЫХ УСТРОЙСТВ

Уфимский государственный авиационный технический университет

В рамках повышения конкурентоспособности отечественных летательных аппаратов актуальной является концепция перехода к самолетам с полностью электрифицированным оборудованием. В статье представлены результаты исследований 18-пульсных авто- и трансформаторно-выпрямительных устройств, применяющихся для получения постоянного тока на борту летательных аппаратов. Приведены результаты компьютерного моделирования 18-пульсного трансформаторно-выпрямительного устройства. Особенностью трансформатора является использование аморфного сплава для снижения удельных потерь холостого хода. Представлены результаты исследования 18-пульсного автотрансформаторно-выпрямительного устройства с конфигурацией вторичных обмоток, обеспечивающей высокое качество выходного напряжения. Установлено, что моделирование методом конечных элементов позволяет определить выходные характеристики устройств с погрешностью до 7 %.

Ключевые слова: автотрансформаторно-выпрямительное устройство, аморфный сплав, компьютерное моделирование, летательный аппарат, трансформаторно-выпрямительное устройство.

1. Введение

Одним из наиболее перспективных направлений создания конкурентоспособного отечественного самолета является переход к концепции самолета с полностью электрифицированным оборудованием (условное устоявшееся наименование – «полностью электрический самолет» или ПЭС). Данное понятие предполагает самолет с единой централизованной системой электроснабжения, обеспечивающей все энергетические потребности самолета.

Основное преимущество архитектуры «электрического» самолета – широкие возможности управления энергией, поскольку работа электрогенераторов регулируется в точном соответствии с потребностями систем, а потери минимизируются. Так, по сравнению с традиционной схемой, экономия топлива может достигать 4 %, а снижение эксплуатационных расходов – 18 %. Однако такой переход к системе ПЭС увеличивает нагрузку на электрооборудование летательного аппарата, а также повышает ответственность работы всей системы электроснабжения и каждого ее элемента в отдельности. В ПЭС многие функции, которые обычно управляются гидравлическим, пневматическим и механическим приводом, заменяются устройствами, приводимыми в действие электрическим током [1, 2]. Такая замена уменьшает вес и объем системы, повышает общую надежность, возможности и ремонтпригодность, а также обеспечивает более длительный срок эксплуатации самолета. Для реализации преимуществ, предлагаемых концепцией ПЭС, необходимо решить несколько вопросов, таких как взаимодействие между источником питания и нагрузкой, нестабильности и генерации гармоник тока низкого порядка на стороне питания переменного тока.

Для преобразования переменного тока в постоянный ток используются многофазные трансформаторные выпрямители как основной источник питания благодаря своей простой структуре и высокой надежности. Гражданские самолеты используют трансформаторно-выпрямительное устройство (ТВУ) для преобразования 115 В частотой 400 Гц переменного тока в 27 В постоянного тока. Однако в последнее время автотрансформаторный выпрямитель привлекает больше внимания в аэрокосмической промышленности из-за его пониженного значения кВА по сравнению с ТВУ [3].

Особого внимания при разработке новых методов управления и эффективных преобразователей энергии требует высокая надежность и производительность для соответствия стандартам качества электроэнергии [4]. Для низкого пульсирующего выходного напряжения и меньшего общего гармонического искажения (ТНД) при входном токе питания, лучшими оказались многопульсные преобразователи переменного тока в постоянный ток. Поддерживая низкое ТНД на стороне переменного тока, эти преобразователи потребляют сравнительно мало энергии. Однако преобразователи мощности создают помехи существующей энергосистеме посредством электромагнитных помех, когда используются методы фильтрации активных гармоник. В случае методов фильтрации пассивных гармоник они создают помехи из-за возможного резонанса с емкостными фильтрами. К счастью, многопульсные преобразователи не используют высокочастотное переключение или емкостную фильтрацию, что могло бы вызвать

названные проблемы. В многопульсных преобразователях идея фильтрации основывается на собственном подавлении гармоник тока, а не на методе подавления магнитного потока, и приводит к снижению общих гармоник [5]. При питании выпрямителей от промышленной сети общего пользования число первичных фаз трансформатора выпрямителя задано: одна или три. Вместе с тем, число вторичных фаз трансформатора может быть больше числа первичных фаз. При необходимости число фаз вторичных напряжений трехфазного трансформатора может быть любым, в том числе и не кратным трем, что достигается при комбинации напряжений вторичных обмоток трансформатора, подобных соединению в зигзаг [6-7].

Идея многопульсного выпрямителя была разработана путем подключения двух или более основных 6-пульсных выпрямителей (в зависимости от количества фаз, генерируемых трансформатором) для получения многопульсной системы выпрямления [8]. Улучшение характеристик достигается за счет увеличения числа фаз, генерируемых автотрансформаторами, поскольку гармоники входного тока, вводимые в многопульсных преобразователях, имеют порядки $6m \pm 1$ с амплитудами $1 / (6m \pm 1)$, где m – число фаз [9]. Это означает, что 18-пульсные ТВУ будут иметь свои гармоники тока, то есть 17-е и 19-е, с гораздо меньшими амплитудами и будут давать очень небольшие искажения по сравнению с 6-пульсными и 12-пульсными преобразователями на входном источнике питания.

Сравнение 6-, 12- и 18-пульсных выпрямителей в [10] показывает, что 6-пульсные и 12-пульсные методы недостаточны для удовлетворения меньших гармонических искажений. Для достижения лучших гармонических характеристик необходимо применять 18-пульсную или более мощную систему преобразования. Конструкция еще более многофазных преобразователей имеют значительные габаритные размеры и более сложную конструкцию обмоток, поэтому 18-пульсные трансформаторы считаются оптимальным решением.

II. Автотрансформаторно-выпрямительное устройство

Для авиационных систем основополагающими критериями являются массогабаритные показатели изделий. Как было указано выше, для уменьшения габаритной мощности целесообразно использовать автотрансформаторно-выпрямительные устройства (АТВУ). В таких устройствах первичная и вторичная обмотки соединены напрямую. За счет этого они имеют не только магнитную, но и электрическую связь. Обмотка автотрансформатора имеет несколько выводов (как минимум 3), подключаясь к которым, можно получать разные электрические напряжения.

Один из вариантов 18-пульсного АТВУ представлен на рис. 1. В состав входит автотрансформатор (АТВ) и три параллельно соединенных трехфазных выпрямительных блока (ВВ1, ВВ2, ВВ3), состоящих из 18 ди-

Вторичные обмотки используются для генерации требуемых трех наборов напряжения (U_{a1}, U_{b1}, U_{c1}) , (U_{a2}, U_{b2}, U_{c2}) и (U_{a3}, U_{b3}, U_{c3}) . На вторичной стороне фазовый сдвиг между соседними напряжениями равен 40 эл. градусам.

В симметричной конфигурации автотрансформатор преобразует сбалансированный трехфазный источник переменного тока на девять фаз. При этом каждая фаза питания смещена от соседней на $\pm 40^\circ$. В данном случае ток каждого диода сдвинут от тока диода соседней фазы на 40° , в то время как ток каждой пары диодов сдвинут от соседней на 20° .

Диаграмма на рис. 5 показывает текущую последовательность проводимости диодных мостовых выпрямителей. Векторы напряжения на вторичной стороне могут быть получены путем соответствующего суммирования основных векторов с добавочными $(U_a, U_b$ и U_c , отмеченными на рис. 2). Из векторных диаграмм на рис. 5 можно вывести, что трехфазные напряжения вторичных обмоток могут быть заданы как функция трехфазных напряжений на первичной стороне. Один набор трехфазных напряжений на вторичной стороне трансформатора может быть задан в общем виде [11]:

$$\begin{cases} U_{a2} = U_A + \frac{k_1}{\sqrt{3}} \cdot (U_B - U_C) + \frac{k_2}{\sqrt{3}} \cdot (U_B - U_A) \\ U_{b2} = U_B + \frac{k_1}{\sqrt{3}} \cdot (U_C - U_A) + \frac{k_2}{\sqrt{3}} \cdot (U_C - U_B), \\ U_{c2} = U_C + \frac{k_1}{\sqrt{3}} \cdot (U_A - U_B) + \frac{k_2}{\sqrt{3}} \cdot (U_A - U_C) \end{cases}$$

где k_1 и k_2 – отношения витков между первичной и вторичной обмотками трансформатора. Для конфигурации коэффициенты поворота заданы как $k_1 = 0,51$ и $k_2 = 0,27$.

III. Компьютерное моделирование

Для определения электромагнитных характеристик 18-пульсного ТВУ была разработана его компьютерная модель в среде Ansys Maxwell (рис. 3). Предварительно были проведены численные расчеты для определения габаритных показателей и расчета количества витков. Мощность рассчитанного ТВУ составляет 10,5 кВА, магнитная индукция насыщения 1,5 Тл (магнитопровод выполнен из аморфного сплава 1 СР), частота питающего тока 400 Гц, напряжение питания 115 В, выходное напряжение 27 В.

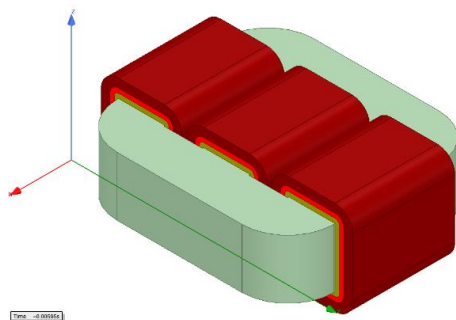


Рис. 3. 3D модель трансформатора ТВУ

Компьютерное моделирование проводилось при работе на активную нагрузку. Результаты моделирования представлены на рис. 4-5.

На рис. 4 показано распределение магнитной индукции по магнитопроводу ТВУ. На рис. 5 показаны осциллограмма напряжения на первичной (рис. 5, а) и вторичной обмотках (рис. 5, б).

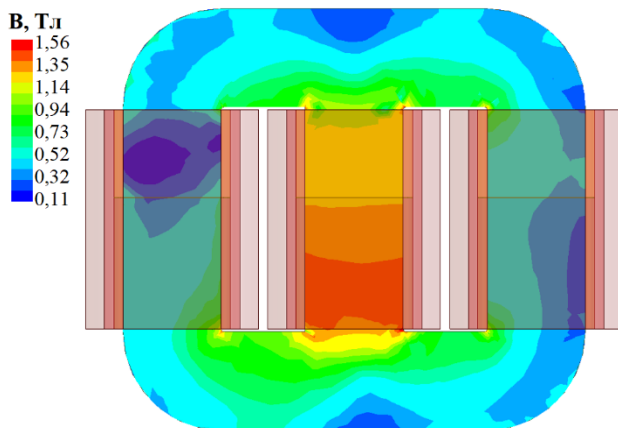


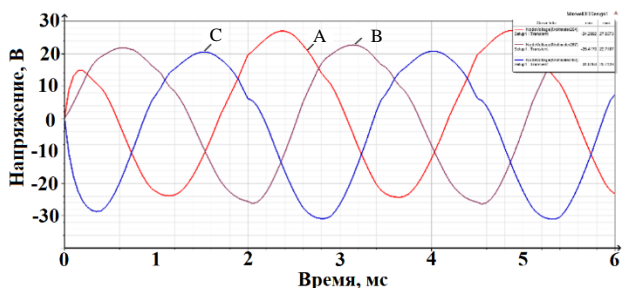
Рис. 4. Распределение магнитной индукции 18-пульсного ТВУ при работе под нагрузкой в момент времени

IV. Выводы

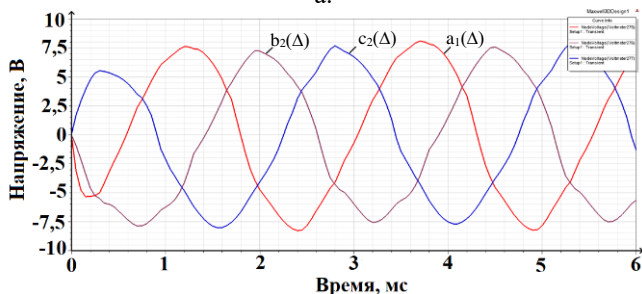
Использование авто- и трансформаторно-выпрямительных устройств уместно в различных классах напряжения и для различных целей применения. В целом в авиационной промышленности имеется тенденция

к переходу к автотрансформаторно-выпрямительным устройствам, благодаря уменьшению их габаритной мощности по сравнению с ТВУ. Недостаток таких устройств – наличие гальванической связи, что негативно скажется на надежности их работы.

Существующие методы преобразования тока и напряжения для получения заданных электромагнитных характеристик требуют повышения качества проектирования таких устройств путем применения современных методов моделирования, например, моделирования методом конечных элементов. С его помощью можно определить выходные характеристики устройств с погрешностью до 7%, а также уточнить результаты численных расчетов.



а.



б.

Рис. 5. Осциллограммы напряжений 18-пульсного ТВУ при работе на активную нагрузку: на первичной обмотке (а); на вторичной обмотке (б)

Работа выполнена при поддержке гранта Республики Башкортостан молодым ученым.

© Рогинская Л.Э., 2019

© Гусаков Д.В., 2019

© Масалимов Д.Р., 2019

Библиографический список

- [1] Quigley R.E.J. More electric aircraft // Eighth Annual Applied Power Electronics Conference and Exposition. 1993. Pp. 906-911.
- [2] Sarlioglu B., Morris C.T. More Electric Aircraft: Review, Challenges, and Opportunities for Commercial Transport Aircraft // IEEE Trans. on Transportation Electrification. 2015. № 1. Pp. 54-64.
- [3] Choi S., Enjeti P.N., Pitel I.J. Polyphase transformer arrangements with reduced kVA capacities for harmonic current reduction in rectifier-type utility interface // IEEE Trans. on Power Electronics. 1966. № 11. Pp. 680-690.
- [4] Khan S., Zhang X., Khan B.M., Ali H., Zaman H., Saad M. AC and DC Impedance Extraction for 3-Phase and 9-Phase Diode Rectifiers Utilizing Improved Average Mathematical Models // Energies. 2018. № 11 (3).
- [5] Swamy M., Kume T.J., Takada N. A Hybrid 18-Pulse Rectification Scheme for Diode Front-End Rectifiers with Large DC-Bus Capacitor // IEEE Trans. Ind. Appl. 2010. № 46 (6). Pp. 2484-2494.
- [6] Зиновьев Г.С. Основы силовой электроники: Уч. Новосибирск: Изд-во НГТУ, 1999. Ч.1. – 199 с.
- [7] Рогинская Л.Э., Горбунов А.С. Фазопреобразующий трансформатор как элемент системы повышения электромагнитной совместимости управляемого полупроводникового преобразователя с сетью и нагрузкой // Практическая силовая электроника. 2016. № 63. С. 28-35.
- [8] Burgos R., Uan-Zo-li A., Lacaux F., Wang F., Boroyevich D. Analysis and Experimental Evaluation of Symmetric and Asymmetric 18-Pulse Autotransformer Rectifier Topologies // 2007-IEEE Power Conversion Conference (PCC'07). Nagoya, Japan. 2007. Pp. 1286-1293.
- [9] Meng F., Xu X., Gao L. A Simple Harmonic Reduction Method in Multipulse Rectifier Using Passive Devices // IEEE Trans. Ind. Inform. 2017. № 13. Pp. 2680-2692.
- [10] Khan S, Zhang X., Saad M., Ali H., Muhammad Khan B., Zaman H. Comparative Analysis of 18-Pulse Autotransformer Rectifier Unit Topologies with Intrinsic Harmonic Current Cancellation // Energies. 2018. № 11 (6). Pp. 1-18.
- [11] Yang T., Bozhko S., Wheeler P., Wang S., Wu S. Generic functional modelling of multi-pulse auto-transformer rectifier units for more-electric aircraft applications // Chinese Journal of Aeronautics. 2018. № 31 (5). Pp. 883-891.

L.E. Roginskaya, D.V. Gusakov, D.R. Masalimov

RESEARCH OF 18-PULSE AUTO- AND TRANSFORMABLE DEVICES

Ufa State Aviation Technical University
Ufa, Russia

Abstract. The implementation of the concept of aircraft with fully electrified equipment is relevant in the framework of improving the domestic aircraft competitiveness. This paper presents the results of studies of 18-pulse auto- and transformer-rectifier units used to obtain direct current on a board of aircraft. The results of computer simulation of an 18-pulse transformer-rectifier unit are given. A feature of the transformer is the use of amorphous alloy to reduce the specific no-load losses. The results of the study of 18-pulse autotransformer-rectifier unit with the configuration of secondary windings providing high-quality output voltage are presented. It is established that the simulation by the finite element method allows to determine the output characteristics of devices with an error of up to 7 %.

Keywords: autotransformer-rectifier unit, amorphous alloy, computer modeling, aircraft, transformer-rectifier unit.

References

- [1] R.E.J. Quigley, «More electric aircraft», *Eighth Annual Applied Power Electronics Conference and Exposition*, pp. 906-911, 1993.
- [2] B. Sarlioglu and C.T. Morris, «More Electric Aircraft: Review, Challenges, and Opportunities for Commercial Transport Aircraft» *IEEE Trans. on Transportation Electrification*, vol. 1, pp. 54-64, 2015.
- [3] S. Choi, P.N. Enjeti and I.J. Pitel, «Polyphase transformer arrangements with reduced kVA capacities for harmonic current reduction in rectifier-type utility interface», *IEEE Trans. on Power Electronics*, vol. 11, pp. 680-690, 1966.
- [4] S. Khan, X. Zhang, B.M. Khan, H. Ali, H. Zaman and M. Saad, «AC and DC Impedance Extraction for 3-Phase and 9-Phase Diode Rectifiers Utilizing Improved Average Mathematical Models», *Energies*, vol. 11, no. 3, 2018.
- [5] M. Swamy, T.J. Kume and N. Takada, «A Hybrid 18-Pulse Rectification Scheme for Diode Front-End Rectifiers with Large DC-Bus Capacitor», *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 46, no. 6, pp. 2484-2494, 2010.
- [6] G.S. Zinoviev, *Osnovy silovoy elektroniki*. Novosibirsk: NSTU Publishing House, 1999, Part 1, P. 199 (in Russian).
- [7] L.E. Roginskaya and A.S. Gorbunov, «Phase-converting transformer as an element of controlled semiconductor converter electromagnetic compatibility increase with mains and load», *Practical power electronics*, vol. 63, P. 28-35, 2016.
- [8] R. Burgos, A. Uan-Zo-li, F. Lacaux, F. Wang and D. Boroyevich, «Analysis and Experimental Evaluation of Symmetric and Asymmetric 18-Pulse Autotransformer

- Rectifier Topologies», *2007 IEEE Power Conversion Conference – Nagoya (PCC'07)*, pp. 1286-1293, 2007.
- [9] F. Meng, X. Xu and L. Gao, «A Simple Harmonic Reduction Method in Multipulse Rectifier Using Passive Devices», *IEEE Trans. Ind. Inform.*, vol. 13, pp. 2680-2692, 2017.
- [10] S. Khan, X. Zhang, M. Saad, H. Ali, Khan B. Muhammad and H. Zaman, «Comparative Analysis of 18-Pulse Autotransformer Rectifier Unit Topologies with Intrinsic Harmonic Current Cancellation», *Energies*, vol. 11, no. 6, pp. 1-18, 2018.
- [11] T. Yang, S. Bozhko, P. Wheeler, S. Wang and S. Wu, «Generic functional modelling of multi-pulse auto-transformer rectifier units for more-electric aircraft applications», *Chinese Journal of Aeronautics*, vol. 31, no. 5, pp. 883-891, 2018.

УДК 621.316.722.3

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

ЦИФРОВОЕ ФАЗОСМЕЩАЮЩЕЕ УСТРОЙСТВО В ТРЕХФАЗНЫХ ВЫПРЯМИТЕЛЯХ НАПРЯЖЕНИЯ

Волжский государственный университет водного транспорта

Функционирование фазосмещающих устройств, входящих в систему управления полупроводниковыми преобразователями, тесно связано с качеством электрической энергии. Отклонение частоты и амплитуды питающего напряжения от номинального значения вносят изменения в моменты формирования импульсов коммутации, поступающие на вентили выпрямителя. В результате происходит изменение выходных параметров выпрямителя. В данной работе рассмотрено цифровое фазосмещающее устройство с блоком памяти, обеспечивающее высокую стабильность угла управления в условиях изменения частоты питающей сети, в составе системы управления для различных типов трехфазных управляемых выпрямителей. Целью исследования является значение изменения относительного среднего выпрямленного напряжения в зависимости от частоты напряжения сети и угла управления. Исследования проводились с помощью разработанной имитационной модели фазосмещающего устройства в составе управляемого выпрямителя. Представлены результаты моделирования в диапазоне частоты напряжения от 45 до 55 Гц и активного характера нагрузки. Путем сопоставления результатов моделирования установлено, что выходные параметры выпрямителя зависят не только от величины изменения частоты, но и от структуры схемы выпрямителя совместно с системой управления. Показана возможность применения разработанного цифрового фазосмещающего устройства с устойчивостью к нестабильности изменения частоты питающей сети в составе различных типов трехфазных выпрямителей. С его помощью уменьшается отклонение среднего значения выпрямленного напряжения для питания потребителей постоянного тока в судовых системах электроснабжения, характеризующихся периодическими отклонениями частоты напряжения вследствие изменения генерируемой и потребляемой мощности.

Ключевые слова: имитационная модель, полупроводниковый преобразователь, нестабильность частоты, системы управления, фазосмещающее устройство.

1. Введение

В настоящее время полупроводниковые преобразователи нашли широкое применение в судовых системах электроснабжения. В зависимости от назначения полупроводниковые преобразователи можно разделить на три основные группы: общего назначения, электроснабжения и электропривод механизмов [1]. Для питания мощных потребителей электриче-

ской энергии постоянного тока используются полупроводниковые преобразователи на основе трехфазных выпрямителей, характеризующие высоким значением выпрямленного напряжения и относительно малой его пульсацией [2]. Для регулирования выпрямленного напряжения используется фазосмещающее устройство (ФСУ), которое является основным элементом системы управления и определяет моменты формирования импульсов коммутации [3-6].

Отклонение частоты напряжения в системах электроснабжения водного транспорта негативно влияет на функционирование ФСУ. В результате происходит изменение параметров с выхода полупроводникового преобразователя, в частности, увеличение относительного отклонения среднего выпрямленного напряжения δU_d . В связи с этим разработано цифровое фазосмещающее устройство (ЦФСУ) с использованием блока памяти, корректирующего управляющий код в зависимости от частоты напряжения [7].

II. Методы и материалы

Для определения эффективности выпрямителя с ЦФСУ в составе системы управления проведено исследование имитационной модели, в результате которого модель показала низкое значение δU_d при изменении частоты напряжения [8]. Однако в данной работе проведен анализ на основе мостовой трехфазной схемы выпрямителя с несимметричным управлением. Целью настоящего исследования является анализ свойств ЦФСУ в составе различных схем трехфазных выпрямителей.

Диапазон исследуемых частот принимался в соответствии с [9-11] и составлял 45-55 Гц, а диапазон угла управления α выбирался в соответствии со схемой трехфазного выпрямителя. Имитационная модель (рис. 1) разработана в программном пакете MATLAB Simulink и состоит из двух программируемых источников трехфазного напряжения (Three-Phase Programmable Voltage Source 1 и Three-Phase Programmable Voltage Source 2), активных нагрузок Series RLC Load 1-Series RLC Load 3, мощность которых принималась 4 кВт, блоков синхронизации UC1 и UC2, блока измерения величины δU_d И1, блока системы управления с ЦФСУ СУ1 и СУ2. Описание системы управления с ЦФСУ и работы имитационной модели более подробно описано в работе [8].

Подсистемы силовой части трехфазных выпрямителей ПП1 и ПП2 показаны на рис. 2. В качестве блоков ПП1 и ПП2 используются подсистемы на основе трехфазной мостовой схемы с несимметричным управлением (рис. 2, а), трехфазной нулевой схемы (рис. 2, б), трехфазной мостовой схемы (рис. 2, в, г). В данные подсистемы входят группы тиристорov Thrystor-1-Thrystor-6 и диодов Diode-2-Diode 4, а также вольтметр Voltage Measurement-1 и обратный диод Diode-1.

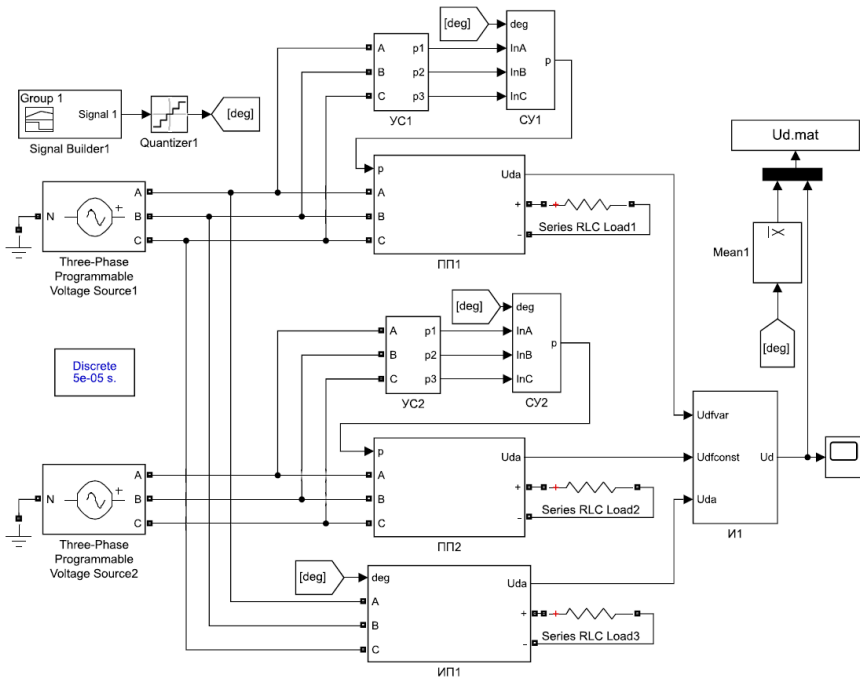


Рис. 1. Имитационная модель для исследования относительного среднего выпрямленного напряжения с различными типами трехфазных управляемых выпрямителей

Идеальный преобразователь ИП1 формирует на выходе напряжение U_d в зависимости от угла управления α и входного напряжения U в соответствии с регулировочной характеристикой, выраженная формулами [12]:

1) для трехфазной мостовой схемы с несимметричным управлением в диапазоне угла управления $0^\circ \leq \alpha \leq 180^\circ$:

$$U_d = \frac{3 \cdot \sqrt{3} \cdot U}{2 \cdot \pi} \cdot (1 + \cos \alpha); \quad (1)$$

2.1) для трехфазной нулевой схемы в диапазоне угла управления $0^\circ \leq \alpha < 30^\circ$:

$$U_d = \frac{3 \cdot \sqrt{3} \cdot U}{2 \cdot \pi} \cdot \cos \alpha; \quad (2)$$

2.2) для трехфазной нулевой схемы в диапазоне угла управления $30^\circ \leq \alpha \leq 150^\circ$:

$$U_d = \frac{3 \cdot \sqrt{3} \cdot U}{2 \cdot \pi} \cdot \left(\frac{1 + \cos(\alpha + 30^\circ)}{\sqrt{3}} \right); \quad (3)$$

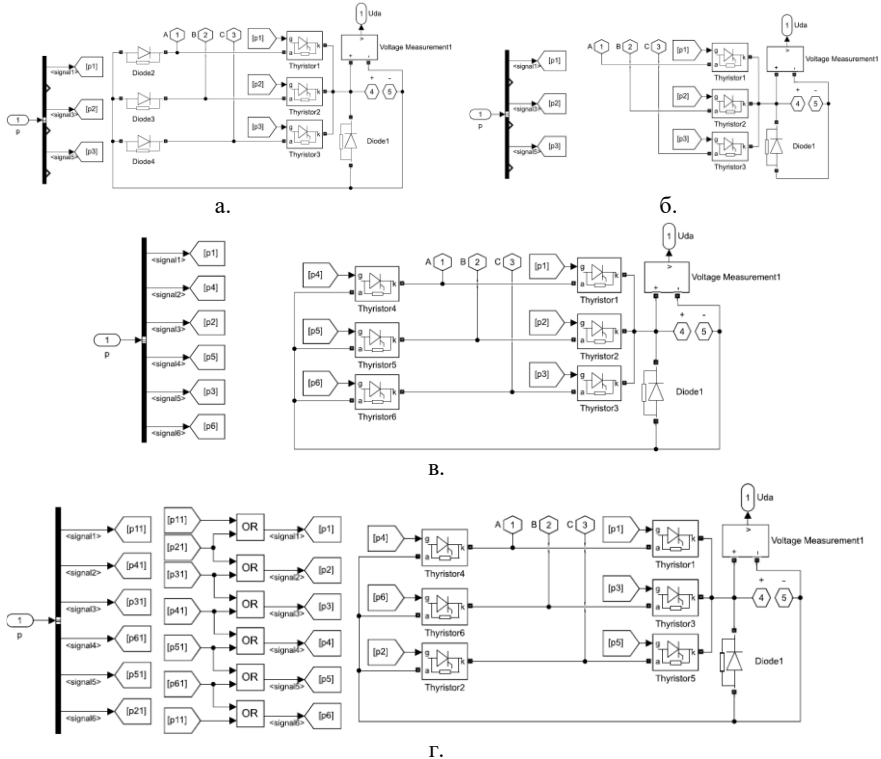


Рис. 2. Подсистема полупроводникового преобразователя:
 а) трехфазная мостовая схема с несимметричным управлением;
 б) трехфазная нулевая схема; в) трехфазная мостовая схема;
 г) трехфазная мостовая схема с подачей дублирующего импульса

3.1) для трехфазной мостовой схемы в диапазоне угла управления $0^\circ \leq \alpha < 60^\circ$:

$$U_d = \frac{3 \cdot \sqrt{3} \cdot U}{\pi} \cdot \cos \alpha; \quad (4)$$

3.2) для трехфазной мостовой схемы в диапазоне угла управления $60^\circ \leq \alpha \leq 120^\circ$:

$$U_d = \frac{3 \cdot \sqrt{3} \cdot U}{2 \cdot \pi} \cdot \left(1 + \frac{\cos \alpha}{2} - \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot \sin \alpha \right). \quad (5)$$

III. Результаты исследования

На основе данных результатов моделирования построены графические зависимости δU_d от угла управления α при частоте напряжения в диапазоне от 45 до 55 Гц.

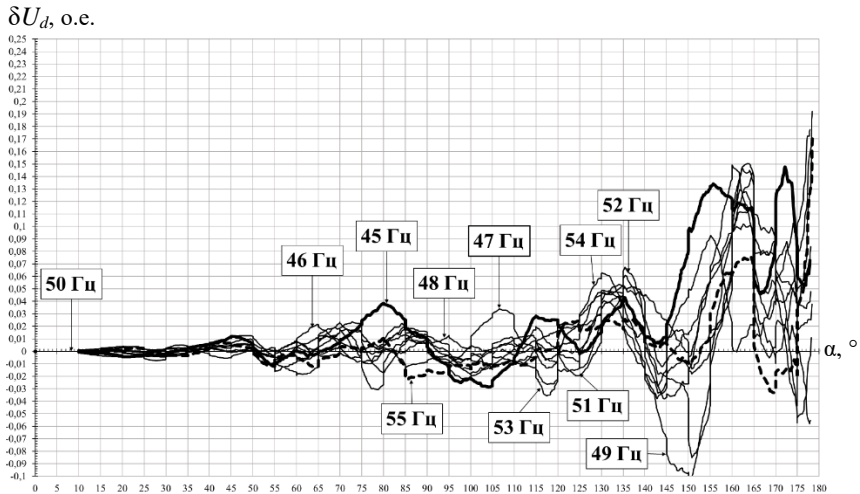


Рис. 3. Зависимость $\delta U_d(\alpha)$ при использовании трехфазной мостовой схемы с несимметричным управлением

На рис. 3 представлена зависимость $\delta U_d(\alpha)$ при использовании в качестве силового блока трехфазной мостовой схемы с несимметричным управлением. В диапазоне угла управления от 0 до 120° величина δU_d изменяется в интервале от -0,035 до 0,04 на исследуемой частоте напряжения. Максимумы значения δU_d зафиксированы при частоте напряжения равной 45 и 53 Гц в диапазоне угла управления $75-85^\circ$ и $115-120^\circ$ соответственно. При дальнейшем увеличении α до 175° наблюдается увеличение

значения δU_d до 0,15, при этом все характеристики имеют знакопеременный характер на всем протяжении изменения угла управления α .

δU_d , о.е.

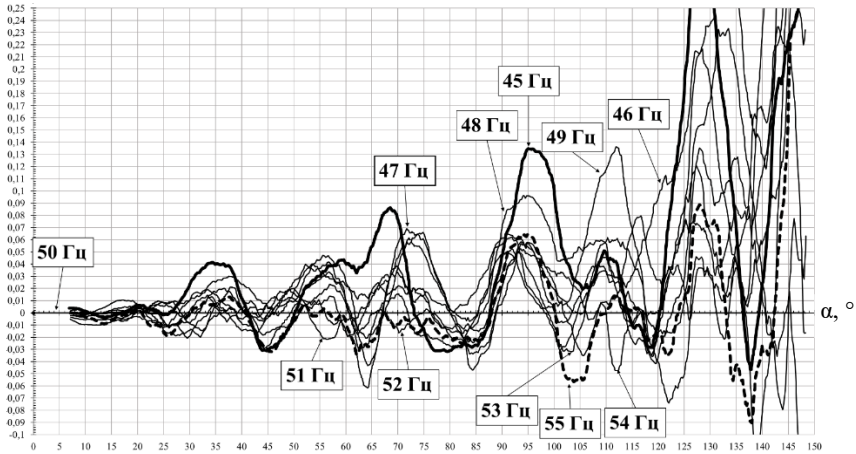


Рис. 4. Зависимость $\delta U_d(\alpha)$ при использовании трехфазной нулевой схемы

В случае использования трехфазной нулевой схемы выпрямителя (рис. 4) наблюдается увеличение δU_d в отличие от мостовой схемы с несимметричным управлением. В диапазоне угла управления α от 0° до 120° максимальные значения δU_d зафиксированы при частоте напряжения 45 и 55 Гц и равны 0,133 и -0,055 соответственно. Дальнейшее увеличение угла управления сопровождается резким увеличением значения δU_d . Наблюдаются пересечения характеристик через ноль и их знакопеременный характер.

При использовании трехфазной мостовой схемы максимальный диапазон регулирования открытия тиристорov составлял примерно 57° (рис. 5). Дальнейшее увеличение угла управления приводит к резкому увеличению значения δU_d , за счет снижения среднего выпрямленного напряжения. Однако на интервале $0^\circ \leq \alpha \leq 55^\circ$ значение δU_d не превышает 0,062. Так же, как и в предыдущих измерениях, характеристики δU_d имеют знакопеременный характер и пересекают ось абсцисс.

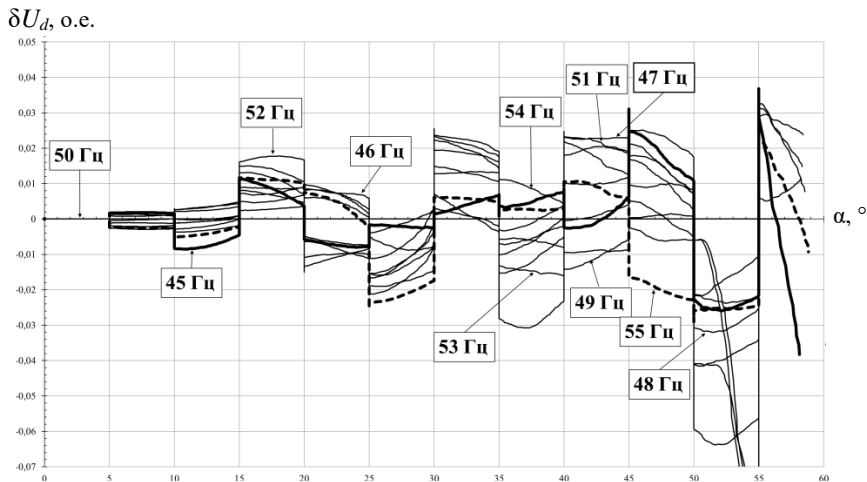


Рис. 5. Зависимость $\delta U_d(\alpha)$ при использовании трехфазной мостовой схемы

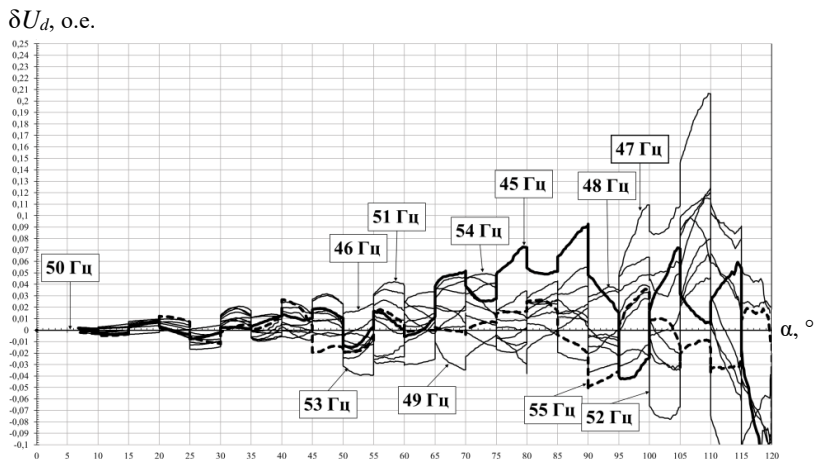


Рис. 6. Зависимость $\delta U_d(\alpha)$ при использовании трехфазной мостовой схемы с дублирующими импульсами коммутации

При формировании в трехфазных мостовых схемах дублирующих импульсов коммутации (рис. 6) максимальный диапазон регулирования составил порядка 120° . Как и в других случаях, зависимость $\delta U_d(\alpha)$ носит знакопеременный характер на исследуемых частотах питающего напряжения. В этом случае кривые $\delta U_d(\alpha)$ по характеру различаются от зависимостей при использовании одиночных импульсов. Значения δU_d в диапазоне

$0^\circ \leq \alpha \leq 55^\circ$ находятся в пределах от $-0,04$ до $0,04$, приблизительно в этих же пределах находится значения δU_d до угла управления равным 65° . Дальнейшее увеличение α так же приводит к возрастанию значения δU_d .

IV. Заключение

На основе данной имитационной модели установлено, что величина относительного среднего выпрямленного напряжения зависит от структуры силовой части полупроводникового преобразователя. Наибольшее значение δU_d наблюдалось при использовании трехфазной нулевой схемы, а наименьшее значение δU_d – при трехфазной мостовой схеме с несимметричным управлением. При этом, вне зависимости от схемы выпрямления характеристики, значения δU_d от частоты питающего напряжения имеют знакопеременный характер, который определяется структурой системы управления.

© Сугаков В.Г., 2019

© Варламов Н.С., 2019

© Малышев Ю.С., 2019

Библиографический список

- [1] Сугаков В.Г., Варламов Н.С. Цифровое фазосмещающее устройство и его области применения на объектах водного транспорта // Актуальные проблемы электроэнергетики. 2017. С. 99-103.
- [2] Анисимов Я.Ф., Васильев Е.П. Электромагнитная совместимость полупроводниковых преобразователей и судовых электроустановок. Л.: Судостроение, 1990. – 264 с.
- [3] Горбачев Г.Н., Чаплыгин Е.Е. Промышленная электроника. М.: Энергоатомиздат, 1988. – 320 с.
- [4] Иванов А.Г., Белов Г.А., Сергеев А.Г. Системы управления полупроводниковыми преобразователям. Чебоксары: Изд-во Чуваш. ун-та, 2010. С. 56-68.
- [5] Лихошерст В.И. Системы управления полупроводниковыми преобразователями электрической энергии: Учеб. пособие. Екатеринбург: УГТУ, 1998. С. 25-33.
- [6] Розанов Ю.К. Основы силовой электроники. М: Энергоатомиздат, 1992. С. 220-253.
- [7] Сугаков В.Г., Хватов О.С., Варламов Н.С. Цифровое фазосмещающее устройство, Пат. 2612055 РФ, заявл. 22.12.2015; опубл. 02.03.2017. – Бюл. № 7.
- [8] Сугаков В.Г. Обоснование реализации фазосмещающего устройства с коррекцией кода в зависимости от частоты напряжения // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С.О. Макарова. 2017. № 9 (4). С. 829-837.
- [9] Правила Российского Речного Регистра: в 5 т. М.: Российский речной регистр, 2017. Т. 2. Правила классификации и постройки судов (ПКПС). – 1885 с.

- [10] ГОСТ 32144-2013. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. М.: Стандартинформ, 2014. – 6 с.
- [11] Правила классификации и постройки морских судов Российского морского регистра судоходства. Часть XI. Электрическое оборудование. СПб: Российский морской регистр судоходства, 2018. – 131 с.
- [12] Домеников В.И. Стабилизированные источники электропитания судовых радиоэлектронной аппаратуры. Л.: Судостроение, 1971. – 400 с.

V.G. Sugakov, N.S. Varlamov, Yu.S. Malyshev

DIGITAL PHASE SHIFTING DEVICE AS A COMPONENT OF THREE-PHASE RECTIFIERS

Volga State University of Water Transport
Nizhny Novgorod, Russia

Abstract. The operation of phase-shifting devices included in the control system of semiconductor converters related to the quality of electrical energy. The deviation of the frequency and amplitude of the supply voltage from the nominal value introduces changes in the moments of formation of the commutation pulses of rectifier. As a result, the output parameters of the rectifier changes. This article considers a digital phase-shifting device with a memory block. This block provides a high stability of the control angle in the conditions of varying the frequency of the supply voltage and enters in part of a control system for various types of three-phase controlled rectifiers. The purpose of the research is to determine the value of the change of the relative average rectified voltage, depending on the frequency of the mains voltage and the control angle. The research has been carried out using the developed simulation model of a phase shifting device as part of a controlled rectifier. The results of modeling in the frequency range of the voltage from 45 to 55 Hz and the active load characteristic are presented. Analysis of simulation results established that the output parameters of the rectifier depend on the frequency change and the structure of the rectifier circuit with the control system. The results of the research showed the possibility of using the developed digital phase-shifting device with resistance to instability of changes in the frequency of the power supply network. The device is reducing the deviation of the average value of the rectified voltage to supply direct current consumers in the ship power supply systems, which characterized by periodic deviations of the frequency of the voltage due to changes in the generated and consumed power.

Keywords: control systems, frequency instability, phase-shifting device, simulation model, semiconductor converter.

References

- [1] V.G. Sugakov and N.S. Varlamov, «Цифровое fazosmeshchayushchee ustrojstvo i ego oblasti primeneniya na ob'ektah vodnogo transporta», in proc. *Aktual'nye problem elektroenergetiki*. Nizhniy Novgorod: NNSTU, pp. 99-103, 2017 (in Russian).
- [2] Ya.F. Anisimov and E.P. Vasil'ev, *Ehlektronnaya sovmestimost' poluprovodnikovyykh preobrazovatelej i sudovykh ehlektrostanovok*. St. Petersburg: Sudostroenie, 1990 (in Russian).
- [3] G.N. Gorbachev and E.E. Chaplygin, *Promyshlennaya ehlektronika*. Moscow: Ehnergoatomizdat, 1988 (in Russian).
- [4] A.G. Ivanov, G.A. Belov and A.G. Sergeev, *Sistemy upravleniya poluprovodnikovymi preobrazovatelyami*. Cheboksary: Izd-vo Chuvash. un-ta, 2010 (in Russian).
- [5] V.I. Lihosherst, *Sistemy upravleniya poluprovodnikovymi preobrazovatelyami ehlektricheskoy ehnergii*. Ekaterinburg: UGTU, 1998 (in Russian).
- [6] Yu.K. Rozanov, *Osnovy silovoy ehlektroniki*. Moscow: Ehnergoatomizdat, 1992 (in Russian).
- [7] V.G. Sugakov, O.S. Khvatov and N.S. Varlamov, «*Tsifrovoye fazosmeshchayushcheye ustrojstvo*», R.F. Patent 2612055, March 2, 2017 (in Russian).
- [8] V.G. Sugakov, N.S. Varlamov and Yu.S. Malyshev, «Rationale for realization of phase – shifting device with code adjustment depending on frequency of voltage», *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova*, vol. 9, no. 4, pp. 829-837, 2017 (in Russian).
- [9] *Pravila Rossiiskogo Rechnogo Registra, vol. 2*. Moscow: Rossiiskii rechnoi registr, 2017 (in Russian).
- [10] Electric energy. Electromagnetic compatibility of technical equipment. Power quality limits in the public power supply systems, GOST 32144-2013, July 2014.
- [11] *Pravila klassifikatsii postroiki morskikh sudov Rossiiskogo morskogo registra sudokhodstva. Chast' XI. Elektricheskoe oborudovanie*. St. Petersburg: Rossiiskii morskoi registr sudokhodstva, 2018 (in Russian).
- [12] V.I. Domenikov and L.M. Kazanskij, *Stabilizirovannye istochniki ehlektropitaniya sudovoy radioehlektromnoj apparatury*. St. Petersburg: Sudostroenie, 1971 (in Russian).

НАШИ АВТОРЫ**ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ КОМПЛЕКСЫ И СИСТЕМЫ**

Алехин Антон Олегович – магистрант Мордовского государственного университета им. Н.П. Огарева; **Alexin45@mail.ru**

Бишлетов Александр Владимирович – ведущий инженер ООО «ЭлектроЛэнд»; **bisav@yandex.ru**

Бурмакин Олег Анатольевич – доцент Волжского государственного университета водного транспорта, кандидат технических наук; **boa_71@mail.ru**

Гуляев Виктор Николаевич – доцент Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексева, кандидат технических наук; **gulyaev281@gmail.com**

Гуляев Игорь Васильевич – профессор Мордовского государственного университета им. Н.П. Огарева, доктор технических наук; **ivgulyaev@mail.ru**

Дарьенков Андрей Борисович – заведующий кафедрой Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексева, кандидат технических наук; **darenkov@nntu.ru**

Ефимов Александр Юрьевич – доцент Мордовского государственного университета им. Н.П. Огарева, кандидат технических наук; **mpcxp@mail.ru**

Колосов Роман Вадимович – инженер ЗАО «Сормовское электромонтажное предприятие»; **romio_86@bk.ru**

Кочеганов Дамир Михайлович – инженер инжиниринговой компании «АСЭ»; **Dk402@yandex.ru**

Кузина Ольга Владимировна – магистрант Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексева; **kyzinpervom@mail.ru**

Лоскутов Антон Алексеевич – доцент Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексева, кандидат технических наук; **loskutov_aa@nntu.ru**

Осокин Владимир Леонидович – заведующий кафедрой Нижегородского государственного инженерно-экономического университета, кандидат технических наук; **osokinvl@mail.ru**

Плаксин Максим Александрович – магистрант Нижегородской государственной сельскохозяйственной академии; **plaksin_95@mail.ru**

Попов Александр Александрович – инженер Мордовского государственного университета им. Н.П. Огарева; **alalpopov91@mail.ru**

Попов Сергей Васильевич – доцент Волжского государственного университета водного транспорта, кандидат технических наук; popovsev3@yandex.ru

Попова Виктория Александровна – аспирантка Мордовского государственного университета им. Н.П. Огарева; lapshina.viktoriya@gmail.com

Серебряков Александр Сергеевич – профессор Нижегородского государственного инженерно-экономического университета, доктор технических наук; a.sereb@mail.ru

Серебряков Артем Владимирович – заместитель генерального директора ООО «АСМ НН», кандидат технических наук; serebryakov@ardman.ru

Стеклов Алексей Сергеевич – инженер-конструктор АО «ОКБМ Африкантов», кандидат технических наук; steklov@okbm.nnov.ru

Терентьев Павел Валерьевич – доцент Нижегородской государственной сельскохозяйственной академии, кандидат технических наук; terentyevpv@inbox.ru

Филатов Дмитрий Алексеевич – доцент Нижегородской государственной сельскохозяйственной академии, кандидат технических наук; filatov230188@mail.ru

Fernando Briz del Blanco – профессор Университета Овьедо (Испания), Ph.D.; fernando@isa.uniovi.es

СИЛОВАЯ ЭЛЕКТРОНИКА

Варламов Никита Сергеевич – аспирант Волжского государственного университета водного транспорта; varlamov_nikita@mail.ru

Гусаков Денис Валерьевич – старший преподаватель Уфимского государственного авиационного технического университета, кандидат технических наук; gusakov.den@mail.ru

Мальшев Юрий Сергеевич – доцент Волжского государственного университета водного транспорта, кандидат технических наук; elektrikasp@mail.ru

Масалимов Денис Ришатович – магистрант Уфимского государственного авиационного технического университета; masalimov.denis@gmail.com

Рогинская Любовь Эммануиловна – профессор Уфимского государственного авиационного технического университета, доктор технических наук; Roginskaya36@mail.ru

Сугаков Валерий Геннадьевич – профессор Волжского государственного университета водного транспорта, доктор технических наук; elektrikasp@mail.ru

**MINISTRY OF SCIENCE AND HIGHER EDUCATION
OF THE RUSSIAN FEDERATION**

**NIZHNY NOVGOROD STATE TECHNICAL UNIVERSITY
n.a. R.E. ALEKSEEV**

SMART ELECTRICAL ENGINEERING

№ 2

Nizhny Novgorod 2019

Smart electrical engineering / NNSTU n.a. R.E. Alekseev. – Nizhny Novgorod, 2019. No. 2 (6). – 119 p.

The journal is issued 4 times in year

Editor-in-Chief A.B. Loskutov

EDITORIAL STAFF

A.B. Dar'enkov (associate Editor-in-Chief),
E.N. Sosnina (associate Editor-in-Chief), A.V. Shalukho (executive secretary),
V.I. Kazakova (executive editor), I.A. Lipuzhin (executive editor)

MEMBERS OF EDITORIAL BOARD:

Gennadiy Yakovlevich Vagin	Doctor of technical sciences, professor, professor NNSTU (Nizhny Novgorod, Russia)
Nikolay Ivanovich Voropai	Associate member of RAS, doctor of technical sciences, professor, head of the chair INRTU (Irkutsk, Russia)
Leonid Abramovich German	Doctor of technical sciences, professor, professor SSTU Branch in Nizhny Novgorod (Nizhny Novgorod, Russia)
Igor Vasilevich Gulyaev	Doctor of technical sciences, professor, professor MRSU (Saransk, Russia)
Anatoly Viktorovich Kuznetsov	Doctor of technical sciences, professor, head of the chair USTU (Ulyanovsk, Russia)
Alexander Leonidovich Kulikov	Doctor of technical sciences, associate professor, professor NNSTU (Nizhny Novgorod, Russia)
Viktor Nikolaevich Mescheryakov	Doctor of technical sciences, professor, head of the chair LSTU (Lipetsk, Russia)
Georgy Borisovich Onishchenko	Doctor of technical sciences, professor, scientific director LLC «STC Drive Technique» (Moscow, Russia)
Aleksandr Sergeevich Plekhov	Candidate of technical sciences, associate professor, associate professor NNSTU (Nizhny Novgorod, Russia)
Aleksandr Yur'evich Smirnov	Doctor of technical sciences, associate professor, leading design engineer JSC «Afrikantov OKBM» (Nizhny Novgorod, Russia)
Vladimir Georgievich Titov	Doctor of technical sciences, professor, professor NNSTU (Nizhny Novgorod, Russia)
Oleg Stanislavovich Khvatov	Doctor of technical sciences, professor, head of the chair FFEI HE «VSUWT» (Nizhny Novgorod, Russia)
Yuriy Ivanovich Khokhlov	Doctor of technical sciences, professor, professor FSAEIH SUSU (NRU) (Chelyabinsk, Russia)
Alexandr Ivanovich Chivenkov	Doctor of technical sciences, associate professor, professor NNSTU (Nizhny Novgorod, Russia)
Roustiam Chakirov	Dr.-Ing., Prof. Dr., professor H-BRS (Germany)

Electronic version of the journal:

<http://www.ie.nntu.ru>

ISSN 2658-6754

© Nizhny Novgorod State Technical University
n.a. R.E. Alekseev, 2019

CONTENT

CHRONICLES	4
ELECTROTECHNICAL COMPLEXES AND SYSTEMS	6
A.S. Serebryakov, V.L. Osokin Mathematical model of electromagnetic processes in transformer with account loss in magnetic core.....	6
A.A. Popov, V.A. Popova, I.V. Gulyaev, F. Briz del Blanco Improving the dynamic characteristics of an induction motor using various overmodulation methods for energy efficient control.....	17
P.V. Terentev, D.A. Filatov, M.A. Plaksin Comparative experimental analysis of artificial light sources for illumination of rural territories.....	28
D.M. Kochegonov, A.S. Steklov, A.V. Serebryakov Structure of energy-efficient wind-diesel power plant with variable rotation speed.....	42
S.V. Popov, A.V. Bishletov, O.A. Burmakin, V.N. Gulyaev Features of operation of automated control system of autonomous power station...	53
A.A. Loskutov, O.V. Kuzina Analysis of the use of resistive neutral grounding in electric distribution networks on the basis of simulation.....	61
A.Yu. Efimov, A.O. Alehin Assessment of reliability of power supply consumers of the first and second category.....	74
R.V. Kolosov Modelling of solar panels.....	85
POWER ENGINEERING	94
L.E. Roginskaya, D.V. Gusakov, D.R. Masalimov Research of 18-pulse auto- and transformable devices.....	94
V.G. Sugakov, N.S. Varlamov, Yu.S. Malyshev Digital phase shifting device as a component of three-phase rectifiers.....	104
Authors	114

ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНАЯ ЭЛЕКТРОТЕХНИКА

№ 2

Редакторы: **В.И. Казакова, И.А. Липужин**
Технический редактор: **И.Н. Терентьева**

Редакция:

603950, Нижний Новгород, ул. Минина, д. 24
smart_electric@nttu.ru

Свободная цена

Подписано в печать 28.06.2019. Дата выхода в свет: 01.07.2019

Формат 60x84 ¹/₁₆. Бумага офсетная.

Печать трафаретная. Усл. печ. л. 7,3. Тираж 300 экз. Заказ .

Нижегородский государственный технический университет
им. Р.Е. Алексеева. Типография НГТУ.

Адрес университета и полиграфического предприятия:
603950, Нижний Новгород, ул. Минина, 24.