

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ
Белорусский национальный технический университет

Энергетический факультет

ЭНЕРГЕТИКА БЕЛАРУСИ – 2021

Материалы Республиканской
научно-практической конференции

26 мая 2021 г.

Минск
БНТУ
2021

УДК 620.9(06)
ББК 31я43
Э65

С о с т а в и т е л ь:
Прокопеня Иван Николаевич

В сборник включены материалы Республиканской научно-практической конференции по секциям: «Электроэнергетика» и «Теплоэнергетика».

Требования к системе: IBM PC-совместимый ПК стандартной конфигурации, дисковод CD-ROM. Программа работает в среде Windows.

Открытие электронного издания проводится посредством запуска файла РНПК_май_2021. Возможен просмотр электронного издания непосредственно с компакт-диска без предварительного копирования на жесткий диск компьютера.

Дата доступа в сети: 22.07.2021. Объем издания: 6,8 Мб. Заказ 395.

Белорусский национальный технический университет
пр-т Независимости, 65, г. Минск, Республика Беларусь
Тел (017) 292-40-81, факс (017) 292-91-37

ISBN 987-985-583-658-3

© Белорусский национальный
технический университет, 2021

СОДЕРЖАНИЕ

ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКА	8
АЛГОРИТМ ПРИМЕНЕНИЯ МОДИФИЦИРОВАННОГО ПРИНЦИПА МАКСИМУМА ДЛЯ ПОСТРОЕНИЯ ОПТИМАЛЬНОГО РЕГУЛЯТОРА	
Новиков С.О., к-т техн. наук, доцент, Новикова Л.И., ст. преподаватель.....	9
РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ РАБОТЫ ТРАНСФОРМАТОРОВ С РАЗЛИЧНЫМИ СХЕМАМИ СОЕДИНЕНИЯ ОБМОТОК ПРИ ДВУХФАЗНОЙ НЕСИММЕТРИЧНОЙ НАГРУЗКЕ	
Зеленькевич А.И., ст. преподаватель, Прищепов М.А., д-р. техн. наук, профессор, Збродыга В.М., к-т. техн. наук, доцент	13
ТРЕНАЖЕР ПО СИММЕТРИРОВАНИЮ ФАЗНЫХ НАГРУЗОК РЭС	
Яр-Мухамедов И.Г., доцент, и. о. ст. научного сотрудника	18
ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ РАБОТЫ ДЕЛИТЕЛЬНОЙ ЗАЩИТЫ МИНИ-ТЭЦ В СРЕДЕ МАТЛАВ	
Петрашевич Н.С., ст. преподаватель	22
АВТОМАТИЧЕСКИЙ ВВОД РЕЗЕРВА НА ЛИНИЯХ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ 10 КВ С НЕСКОЛЬКИМИ ИСТОЧНИКАМИ ПИТАНИЯ	
Калентионок Е.В., к-т техн. наук, доцент, Горновская Е.Н., магистрант.....	26
УЧЕТ РЕВЕРСА МОЩНОСТИ В ПРЕДЕЛАХ ПОЛУЧАСА ПРИ РАСЧЕТЕ РЕЖИМОВ И ПОТЕРЬ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ ПО ГРАФИКАМ ЦИФРОВЫХ ПРИБОРОВ УЧЕТА В ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЯХ ЭНЕРГОСИСТЕМ	
Фурсанов М.И., д-р техн. наук, профессор, Макаревич В.В., ст. преподаватель, Гецман Е.М, ст. преподаватель.....	31
АНАЛИЗ ПРОБЛЕМ ИНТЕГРИРОВАНИЯ ВЕТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК В ЭНЕРГОСИСТЕМУ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ	
Попкова Н.А., магистр техн. наук.....	37
ПОТЕНЦИАЛ ВЫБРОСОВ ПАРНИКОВЫХ ГАЗОВ В ЖИЗНЕННОМ ЦИКЛЕ ВЕТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ УСТАНОВКИ	
Попкова Н.А., магистр техн. наук, Гецман Е.М., магистр техн. наук	40

ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ РАЗГРУЗКИ ТРАНЗИТА ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СЕТИ НАПРЯЖЕНИЕМ 35 КВ В АВАРИЙНОМ РЕЖИМЕ НА ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЕ НАИБОЛЕЕ ОТВЕТСТВЕННЫХ ПОТРЕБИТЕЛЕЙ	
Калентионок Е.В., к-т техн. наук, доцент, Волков А.А., ст. преподаватель	44
ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ МИНИЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ В ГОРОДСКОЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СЕТИ	
Старжинский А.Л., к-т техн. наук, доцент	48
К ВОПРОСУ О ВЫБОРЕ ЗОН НЕЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ АДАПТИВНОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ДВУХТРАНСФОРМАТОРНОЙ ПОТРЕБИТЕЛЬСКОЙ ПОДСТАНЦИИ	
Счастный В.П., к-т. техн. наук, доцент	53
ПРИМЕНЕНИЕ ДАТЧИКОВ В СИСТЕМЕ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО УПРАВЛЕНИЯ ОСВЕЩЕНИЕМ	
Гаврилович О.Н., ст.преподаватель	58
ОСОБЕННОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ЛИНИЙ С ДВУСТОРОННИМ ПИТАНИЕМ В НАРУЖНОМ ОСВЕЩЕНИИ	
Калечиц В.Н. ст. преподаватель.....	60
ВЕТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКАЯ УСТАНОВКА С АВТОМАТИЧЕСКИМ РЕГУЛЯТОРОМ ВЫХОДНОГО НАПРЯЖЕНИЯ	
Горностай А.В., к-т. техн. наук, доцент	63
НЕДОСТАТКИ ИЗОЛЯЦИИ ИЗ СПЭ И МЕТОДЫ ИХ ПРЕОДОЛЕНИЯ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ КАБЕЛЕЙ	
Протасеня М.Л., ст. преподаватель.....	66
КОНТРОЛЬ КАЧЕСТВА ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ В СИСТЕМАХ АСКУЭ ПРОМЫШЛЕННЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ	
Козловская В.Б., к-т. техн. наук., доцент, Шинкович А.А., инженер-электроник.....	69
ВЕТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКАЯ УСТАНОВКА С АВТОМАТИЧЕСКИМ ОГРАНИЧИТЕЛЕМ ВРАЩАЮЩЕГО МОМЕНТА	
Горностай А.В., к-т. техн. наук	71
СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ГАЗОРАЗРЯДНЫХ И СВЕТОДИОДНЫХ ИСТОЧНИКОВ СВЕТА В НАРУЖНОМ ОСВЕЩЕНИИ	
Смоловская Д.М., магистр техн. наук, ассистент.....	74

К ВОПРОСУ ВЫБОРА УСТАНОВОК РАСПРЕДЕЛЕННОЙ ГЕНЕРАЦИИ ЭНЕРГИИ

Константинова С.В., к-т. техн. наук, доцент77

ОСОБЕННОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ МИКРОПРОЦЕССОРНЫХ И ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ РАСЦЕПИТЕЛЕЙ

Капустинский А.Ю., ассистент82

РАСЧЕТ СОСТАВЛЯЮЩИХ УСИЛИЙ ОТ ОТПАЙКИ НА ОШИНОВКУ РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНОГО УСТРОЙСТВА

Бладыко Ю.В., к-т. техн. наук, доцент88

РЕЗУЛЬТАТЫ МЕХАНИЧЕСКОГО РАСЧЕТА ОШИНОВКИ С ОТПАЙКОЙ В СЕРЕДИНЕ ПРОЛЕТА

Бладыко Ю.В., к-т. техн. наук, доцент92

ЧАСТОТНЫЙ МЕТОД ДИАГНОСТИКИ ОБМОТОК СТАТОРОВ АСИНХРОННЫХ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ

Зеленко В.В., ст. преподаватель, Суходолов Ю.В., к-т. техн. наук, доцент,
Сизиков С.В., к-т. техн. наук, доцент98

МОДЕЛИРОВАНИЕ СХЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕМ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МИКРОКОНТРОЛЛЕРА

Матвеев И.П., кандидат технических наук, доцент103

АКТИВНЫЙ СИЛОВОЙ ФИЛЬТР НА ОСНОВЕ АДАПТИВНОЙ ФИЛЬТРАЦИИ

Первенёнок Р.Е., к-т. техн. наук, доцент, Сицко А.Л.107

АДРЕСНО-РЕГУЛИРУЕМОЕ ПОТОКОРАСПРЕДЕЛЕНИЕ В ВЫСОКОВОЛЬТНОЙ СЕТИ БЕЛОРУССКОЙ ЭНЕРГОСИСТЕМЫ

Александров О.И., к-т техн. наук, доцент, Пекарчик О.А.,
ст. преподаватель112

АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ СОПРОТИВЛЕНИЯ ЗАМКНУТОГО КОНТУРА ОБМОТКИ ТРАНСФОРМАТОРА

Исаев А.В., ст. преподаватель, Суходолов Ю.В., к-т. техн. наук, доцент,
Сизиков С.В., к-т. техн. наук, доцент120

КЛАССИФИКАЦИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ГЕНЕРАТОРОВ ВОЗВРАТНО-ПОСТУПАТЕЛЬНОГО ДВИЖЕНИЯ С ПОСТОЯННЫМИ МАГНИТАМИ

Менжинский А.Б., к-т. техн. наук, Малашин А.Н., к-т. техн. наук, доцент,
Сизиков С.В., к-т. техн. наук, доцент123

**ПОДХОД К КОМБИНИРОВАННОМУ ПРИМЕНЕНИЮ МЕТОДОВ
ТЕОРИИ ПОЛЯ И МАГНИТНЫХ ЦЕПЕЙ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ
ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ ЭНЕРГИИ
ВОЗВРАТНО-ПОСТУПАТЕЛЬНОГО ДВИЖЕНИЯ**

Менжинский А.Б., к-т. техн. наук, Малашин А.Н., к-т. техн. наук, доцент,
Сизиков С.В., к-т. техн. наук, доцент127

**СПОСОБ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ИНДУКТИВНЫХ ПАРАМЕТРОВ
ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ МАШИНЫ С МНОГОФАЗНОЙ
ДРОБНОЙ ЗУБЦОВОЙ ОБМОТКОЙ**

Пантелеев С.В., Малашин А.Н., к-т. техн. наук, доцент,
Сизиков С.В., к-т. техн. наук, доцент132

**СПОСОБ ВЕКТОРНОГО УПРАВЛЕНИЯ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫМ
ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕМ ДЛЯ ОБЕСПЕЧЕНИЯ
ПОЛИГАРМОНИЧЕСКОГО РЕЖИМА РАБОТЫ
МНОГОФАЗНОЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ МАШИНЫ**

Пантелеев С.В., Малашин А.Н., к-т. техн. наук, доцент, Сизиков С.В.,
к-т. техн. наук, доцент,136

**СТАНДАРТИЗАЦИЯ И ИННОВАЦИИ В ОБЛАСТИ ИЗМЕРЕНИЙ
ПАРАМЕТРОВ ОПТИЧЕСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ**

Савкова Е.Н. к-т. техн. наук, доцент, Баранов П.О., Чжан Ю., аспирант.....142

**МЕТРОЛОГИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ РАСПРЕДЕЛЕНИЙ
ВЕРОЯТНОСТЕЙ НЕПРЕРЫВНЫХ И ДИСКРЕТНЫХ ВЕЛИЧИН
В ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ИЗМЕРЕНИЯХ**

Савкова Е.Н. к-т. техн. наук, доцент, Лагунов Д.В., Науменко М.В.,
Бороденок И.М.145

**КОНЦЕПЦИЯ ГЛОБАЛЬНЫХ РИСКОВ
В ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ИЗМЕРЕНИЯХ**

Савкова Е.Н., к-т. техн. наук, доцент, Сипачев И.В.152

**ЦЕЛЕСООБРАЗНОСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ НАКОПИТЕЛЕЙ
ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ В ЭНЕРГОСИСТЕМЕ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ**

Гецман Е.М., магистр техн. наук, Мешкова А.Н.157

**МОДЕЛИРОВАНИЕ РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНОЙ СЕТИ СРЕДНЕГО
НАПЯЖЕНИЯ В MATLAB SIMULINK**

Новаш И.В., к-т техн. наук, доцент, Мешкова А.Н.162

**ИЗУЧЕНИЕ РАБОТЫ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ РЕЛЕЙНЫХ
ЗАЩИТ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ КОМПЬЮТЕРНЫХ
ПРОГРАММНЫХ КОМПЛЕКСОВ**

Новаш И.В., к-т техн. наук, доцент, Пузиновский В.Д., магистрант166

ТЕПЛОЭНЕРГЕТИКА170

ГЛУБОКАЯ РАЗГРУЗКА ПАРОГАЗОВЫХ УСТАНОВОК

Качан С.А., к-т. техн. наук, доцент171

**К ВОПРОСУ РЕГУЛИРОВАНИЯ СУТОЧНОГО ГРАФИКА
ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ НАГРУЗОК ПОСЛЕ ВВОДА
В ЭКСПЛУАТАЦИЮ БЕЛОРУССКОЙ АЭС**

Богдан Е.В., Карницкий Н.Б., д-р техн. наук., профессор175

**ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ ЭЛЕКТРОГИДРОУДАРНОЙ
УСТАНОВКИ, ДЛЯ ДИСПЕРГИРОВАНИЯ БУРОГО УГЛЯ,
В ПРОЦЕССЕ ПРОИЗВОДСТВА ВОДОУГОЛЬНОГО ТОПЛИВА**

Францкевич Н.В., ст. преподаватель, Францкевич А.В., ст. научный
сотрудник, Юницкий А.Э., генеральный конструктор, Арнаут С.А.
начальник конструкторского бюро181

**ВОЗНИКНОВЕНИЕ ГИДРАВЛИЧЕСКОГО УДАРА В СИСТЕМАХ
ТЕПЛОСНАБЖЕНИЯ ПРИ ЗАКРЫТИИ ЗАДВИЖКИ**

Ракевич С.И., Назаров В.И., к-т техн. наук., доцент185

Электроэнергетика

УДК 681.513.5

АЛГОРИТМ ПРИМЕНЕНИЯ МОДИФИЦИРОВАННОГО ПРИНЦИПА
МАКСИМУМА ДЛЯ ПОСТРОЕНИЯ ОПТИМАЛЬНОГО РЕГУЛЯТОРА
ALGORITHM FOR APPLYING THE MODIFIED MAXIMUM PRINCIPLE
TO CONSTRUCT AN OPTIMAL CONTROLLER

Новиков С.О., к-т техн. наук, доцент, Новикова Л.И., ст. преподаватель
Белорусский национальный технический университет, г. Минск, Беларусь
S. Novikov, Ph.D., associate professor, L. Novikova., senior lecturer
Belarusian National Technical University, Minsk, Belarus

Аннотация. Рассматривается задача позиционного управления электроприводом постоянного тока с переменным моментом инерции по критерию минимума электрических потерь с учетом локальных ограничений.

Annotation. The problem of positional control of a direct current electric drive with a variable moment of inertia is considered according to the criterion of minimum electrical losses, taking into account local constraints.

Ключевые слова: *Оптимальное управление, модифицированный принцип максимума, момент инерции, двигатель постоянного тока.*

Key words: *Optimal control, modified maximum principle, moment of inertia, DC motor.*

ВВЕДЕНИЕ

Предлагается алгоритм применения положений модифицированного принципа максимума для управления электромеханической системой с переменными параметрами нагрузки, рассматриваемой как электропривод с двигателем постоянного тока (ЭПТ), корректирующей обратной связью по скорости и переменным моментом инерции [1].

ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

Методика применения модифицированного принципа максимума предполагает следующий порядок. Уравнение равновесия моментов на валу ЭПТ может быть представлено в виде (1):

$$J(\alpha) \frac{dv}{dt} = \mu_3 - \hat{\mu}_H(\alpha, v) \quad (1)$$

где $\hat{\mu}_H(\alpha, v) = \mu_H + (v^2/2) * (dJ(\alpha)/d\alpha)$, $\mu_H - const$.

Поскольку, для электропривода $dq/dt = i^2$ и $d\alpha/dt = v$ тогда систему уравнений движения электропривода (1) запишем в следующем виде:

$$\frac{dq}{dt} = i^2, \quad J(\alpha) \frac{dv}{dt} = i - \hat{\mu}_H, \quad \frac{d\alpha}{dt} = v \quad (2)$$

где q – потери;

i – ток якоря, который в относительных единицах равен μ_3 .

Граничные условия при этом имеют вид:

$$v(0) = 0, v(T) = 0, \alpha(0) = 0, \alpha(T) = \alpha_T \quad (3)$$

На решениях системы (2), при соблюдении условий (3), требуется выбрать такой закон изменения тока якоря, который доставит минимум функционалу (4):

$$q = \int_0^T i^2 dt \rightarrow \min \quad (4)$$

Произведем замену аргумента t на v , при этом система уравнений привода (2) примет следующий вид (5):

$$\frac{dq}{dv} = \frac{J(\alpha) * i^2}{i - \hat{\mu}_H(\alpha, v)}, \quad \frac{dt}{dv} = \frac{J(\alpha)}{i - \hat{\mu}_H(\alpha, v)}, \quad \frac{d\alpha}{dv} = \frac{J(\alpha) * v}{i - \hat{\mu}_H(\alpha, v)} \quad (5)$$

а граничные условия для этой задачи будут следующие (6):

$$q(0) = 0, v(0) = v_0 = 0, v(T) = v_T = 0, \alpha(0) = 0, \alpha(T) = \alpha_T \quad (6)$$

Для системы (6) запишем функцию Л.С. Понтрягина (7):

$$H = \frac{(\psi_0 i^2 + \psi_1 + \psi_2 v) J(\alpha)}{i - \hat{\mu}_H(\alpha, v)} \quad (7)$$

Уравнения для сопряженных переменных, «новых коэффициентов», имеют вид (8):

$$\begin{aligned} \frac{d\psi_0}{dv} = -\frac{\partial H}{\partial q} &\equiv 0, & \frac{d\psi_1}{dv} = -\frac{\partial H}{\partial t} &\equiv 0 \\ \frac{d\psi_2}{dv} = -\frac{\partial H}{\partial v} &= \\ = -\frac{(\psi_0 i^2 + \psi_1 + \psi_2 v) J(\alpha)}{(i - \hat{\mu}_H(\alpha, v))^2} &\left[\frac{\partial J(\alpha)}{\partial \alpha} (i - \hat{\mu}_H(\alpha, v)) + \left(\frac{v^2}{2}\right) \frac{\partial^2 J(\alpha)}{\partial \alpha^2} \right] \end{aligned} \quad (8)$$

Из условия $\frac{\partial H}{\partial i} = 0$, выбираем $\psi_0 = 1$ и определяем оптимальный закон изменения тока якоря (9):

$$i^* = \hat{\mu}_H(\alpha, v) \pm \sqrt{\hat{\mu}_H(\alpha, v) + \psi_1 + \psi_2 v} \quad (9)$$

Обозначим некоторую ступень постоянства $J(\alpha)$ и ψ_2 индексом j , а следующую за ней индексом $j + 1$. Точки разрывов кусочно-постоянной функции $J(\alpha)$ от аргумента v не зависят. Поэтому гамильтониан в оптимальном процессе непрерывен. Исходя из этого и приравниваются соответствующие индексы j и $j + 1$:

$$\frac{(i_j^* + \psi_1 + \psi_{2j} v_j) J_j}{i_{j+1}^* - \hat{\mu}_{Hj}} = H_j = H_{j+1} = \frac{(i_{j+1}^* + \psi_1 + \psi_{2j+1} v_{j+1}) J_{j+1}}{i_{j+1}^* - \hat{\mu}_{Hj+1}} \quad (10)$$

Отсюда (10), с учетом выражения для тока (9), получаем

$$\pm J_j i_j^* = \pm J_{j+1} i_{j+1}^* \quad (11)$$

где знак «+» соответствует участку разгона;

знак «-» участку торможения.

Подставляя (9) в (11), получаем формулу для определения ψ_{2j+1} в виде

$$\psi_{2j+1} = \left(\left(\frac{J_j i_j^*}{J_{j+1}} + \hat{\mu}_H(\alpha, v) \right)^2 - \hat{\mu}_{Hj+1}^2 - \psi_1 \right) / v_j \quad (12)$$

Для моделирования работы системы управления с регулятором (9), необходимо выбрать начальные значения для «коэффициентов» ψ_1 и ψ_2 . Поскольку в начальный момент времени $v = 0$, то начальное значение ψ_2 может быть практически любым, и (9) принимает следующий вид (13):

$$i^* = \mu_H \pm \sqrt{\mu_H + \psi_1} \quad (13)$$

Отсюда, принимая во внимание ограничения, которые накладываются на ЭПТ и условие (4) можно произвести выбор начального значения для ψ_1 . Необходимо отметить, что значение для ψ_1 выбирается только один раз, т. е. в начальный момент времени. Рекомендуемое начальное значение для ψ_1 можно выбрать исходя из номинальных параметров ЭПТ согласно (14), а значение ψ_2 затем рассчитывается автоматически на каждом шаге итерационного вычислительного процесса.

$$\psi_1 = (i_H - \mu_H)^2 - \mu_H \quad (14)$$

Процесс позиционирования имеет участки разгона и торможения. Из непрерывности гамильтониана в оптимальном процессе следует непрерывность оптимального управления (тока i^*) и поэтому переключение на торможение происходит при скорости $v = v_n$, определяемой из условия $\hat{\mu}_H(\alpha, v) + \psi_1 + \psi_2 v = 0$. Задаваясь для системы (2) с регулятором (9) начальными значениями констант ψ_1 и ψ_2 так, чтобы выполнялись граничные условия (3). Полученный процесс и является решением задачи в исходной постановке.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Исходя из выше изложенного, алгоритм расчета может быть представлен в следующем виде:

– Ввод исходных данных $(\mu_0, k_1, k_2, k_3, t, \psi_1, \psi_2, k)$ и инициализация переменных $(v = 0, \alpha = 0, t = 0, q = 0, \mu_H = \mu_0)$;

– Вычисление момента инерции и момента сопротивления нагрузки, значения тока и скорости на n -м шаге;

– Модификация значения угла для следующего шага;

– Вычисление моментов инерции и момента сопротивления нагрузки, значений тока и скорости, вычисление электрических потерь, коэффициента Ψ_2 на $n + 1$ -м шаге;

– Подготовка вычислительной процедуры к следующему шагу. Проверка условий окончания процедуры управления, если $\hat{\mu}_H(\alpha, v) + \psi_1 + \psi_2 v \geq 0$, то участок разгона обозначаем $k = 1$ и переходим к шагу 3, иначе в (11) $k = -1$ и значение под корнем берем по модулю, после чего переходим к шагу 6;

– Проверка условий окончания процедуры расчета управления, если скорость больше нуля, то переход к шагу 3, иначе к шагу 7.

ЛИТЕРАТУРА

1. Панасюк, В.И. Оптимальное управление в технических системах / В.И. Панасюк, В.Б. Ковалевский, Э.Д. Политыко. – Минск : Навука і тэхніка, 1990. – 272 с.

2. Новиков, С.О. Проектирование оптимального по потерям регулятора для управления ЭПТ с переменным моментом инерции в системе программирования CoDeSys / С.О. Новиков, А.В. Пащенко // Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ. Энергетика. – Минск : БНТУ, 2009. – № 3. – С. 28–34.

УДК 621.313

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ РАБОТЫ ТРАНСФОРМАТОРОВ
С РАЗЛИЧНЫМИ СХЕМАМИ СОЕДИНЕНИЯ ОБМОТОК
ПРИ ДВУХФАЗНОЙ НЕСИММЕТРИЧНОЙ НАГРУЗКЕ
RESULTS OF STUDYING OPERATION OF TRANSFORMERS WITH
DIFFERENT WINDING CONNECTION SCHEMES AT TWO-PHASE NON-
SYMMETRIC LOAD

Зеленькевич А.И., ст. преподаватель, Прищепов М.А., д-р. техн. наук, профессор,
Збродыга В.М., к-т. техн. наук, доцент

Белорусский государственный аграрный технический университет,
г. Минск, Беларусь

A. Zelenkevich, Art. teacher, M. Prishchepov, Dr. tech. sciences, professor,
V. Zbrodyga, Cand. tech. Sciences, Associate Professor
Belarusian State Agrarian Technical University, Minsk, Belarus

Аннотация. В работе представлены результаты экспериментальных исследований работы трансформаторов с различными схемами соединения обмоток при однофазной несимметричной нагрузке.

Annotation. The paper presents the results of experimental studies of the operation of transformers with different winding connection schemes with a single-phase unbalanced load.

Ключевые слова: трансформатор, качество электрической энергии, несимметрия токов и напряжений.

Keywords: transformer, quality of electrical energy, unbalance of currents and voltages.

ВВЕДЕНИЕ

Несимметрия электрических нагрузок вызывает несимметрию напряжений. При несимметричном режиме существенно ухудшаются условия работы электроприемников, снижается надежность работы системы электроснабжения. Отклонение напряжения у электроприемников перегруженных фаз может превысить допустимое значение. В системах электроснабжения сельскохозяйственных потребителей авторы предлагают использования для симметрирования напряжений трансформатор со схемой соединения обмоток «звезда-двойной зигзаг с нулевым проводом» (Y/2Z_n) [1, 2].

ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

Проведенные теоретические исследования работы трансформатора со схемой соединения обмоток «звезда-двойной зигзаг с нулевым проводом» при несимметричной нагрузке подтвердили [3], что снижение несимметрии напряжений происходит вследствие компенсации составляющих нулевой последовательности. Также были проведены экспериментальные исследования подтверждающие способность данного трансформатора обеспечивать наиболее высокий уровень симметрии напряжений на его выводах, по сравнению с другими

схемами, при несимметричном характере нагрузки. Рассматривался режим, когда ток в двух фазах изменялся в пределах от 0 до $1,2 \cdot I_n$, а в третьей фазе был равен нулю. Величины напряжений показаны в процентах от соответствующих номинальных напряжений.

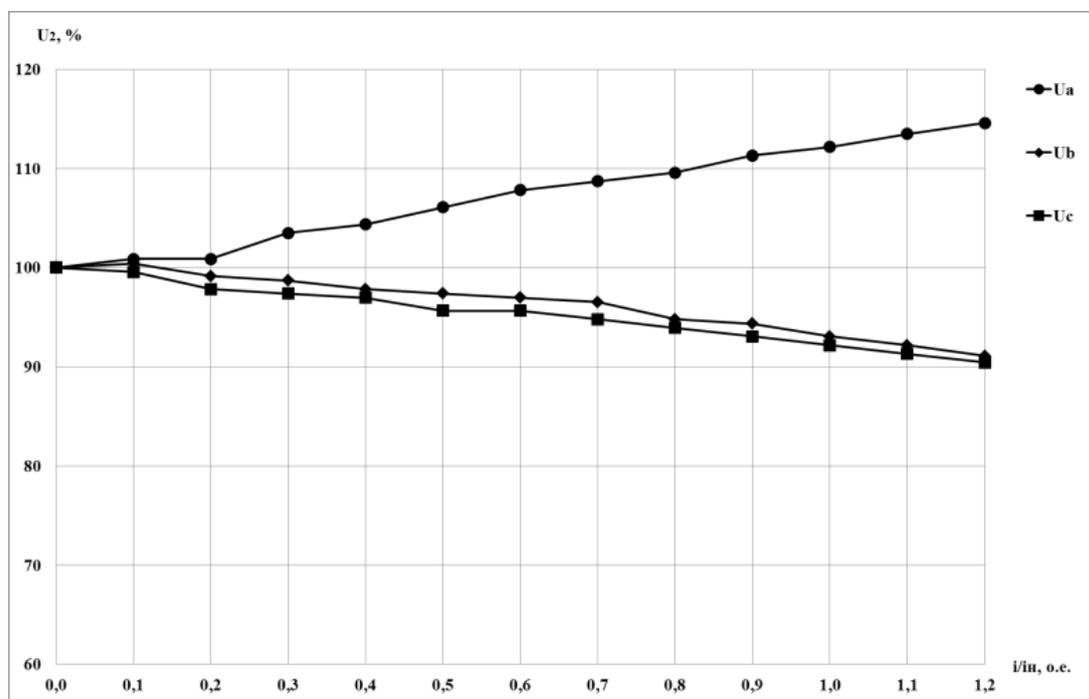


Рисунок 1 – Зависимость вторичных напряжений от тока нагрузки для трансформатора со схемой соединения обмоток «звезда-звезда с нулевым проводом» для режима $I_a = 0, I_b = I_c = 0 \dots 1,2 I_n$

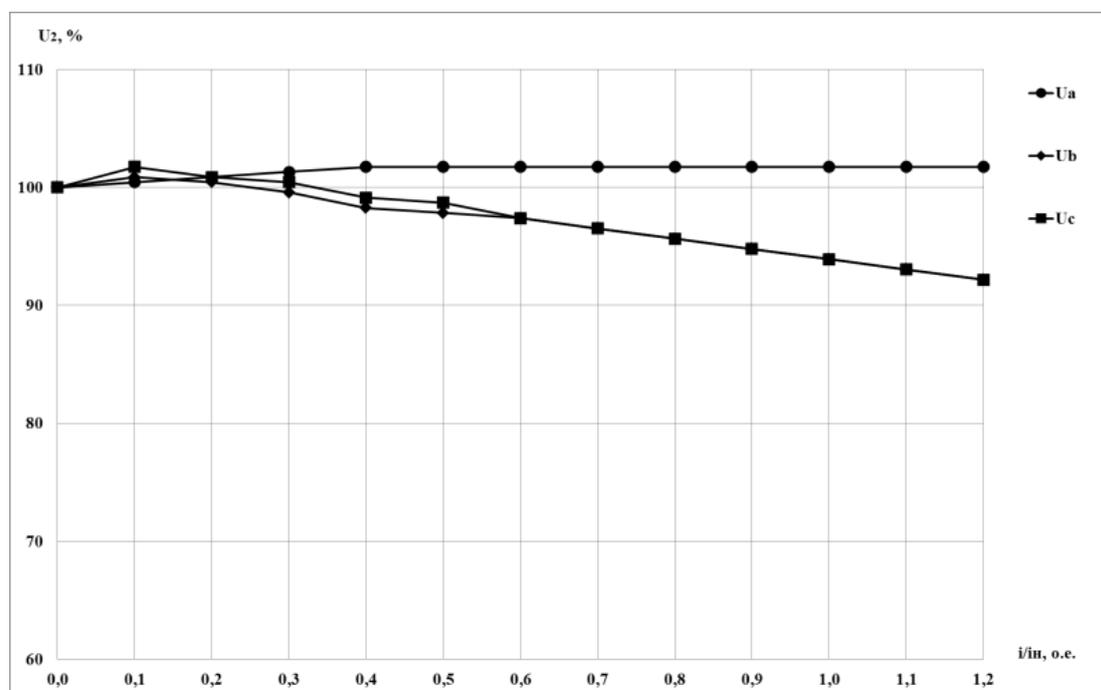


Рисунок 2 – Зависимость вторичных напряжений от тока нагрузки для трансформатора со схемой соединения обмоток «звезда-звезда с нулевым проводом с симметрирующим устройством» для режима $I_a = 0, I_b = I_c = 0 \dots 1,2 I_n$

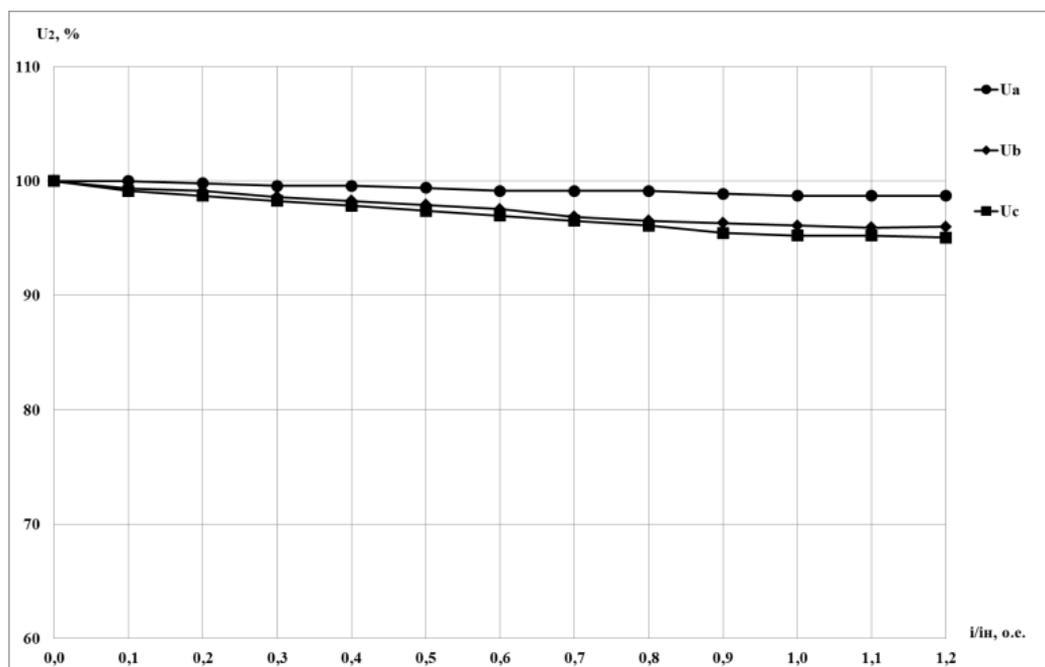


Рисунок 2 – Зависимость вторичных напряжений от тока нагрузки для трансформатора со схемой соединения обмоток «звезда-двойной зигзаг с нулевым проводом» для режима $I_a = 0$, $I_b = I_c = 0 \dots 1,2 I_n$,

Как видно из рисунков 1–3 при увеличении двухфазной нагрузки напряжение в нагружаемых фазах снижается для всех исследуемых схем соединений трансформатора. Напряжение в третьей фазе для схем соединений «звезда-звезда с нулевым проводом» и «звезда-звезда с нулевым проводом с симметрирующим устройством» возрастает, а для схемы «звезда-двойной зигзаг с нулевым проводом» – снижается.

При номинальном значении однофазной нагрузки в фазе «С» величины вторичных напряжений трансформатора, в процентах от номинального значения, составляют для схемы соединений «звезда-звезда с нулевым проводом» $U_a = 112,17 \%$, $U_b = 93,04 \%$, $U_c = 92,17 \%$, «звезда-звезда с нулевым проводом с симметрирующим устройством» $U_a = 101,74 \%$, $U_b = 93,91 \%$, $U_c = 93,90 \%$, «звезда-двойной зигзаг с нулевым проводом» $U_a = 98,70 \%$, $U_b = 96,09 \%$, $U_c = 95,22 \%$. Отклонение напряжения для схемы соединений «звезда-звезда с нулевым проводом» выходит за допустимые ГОСТ 32144-2019 пределы $\pm 10 \%$, для схемы «звезда-звезда с нулевым проводом с симметрирующим устройством» находятся близко от предельных значений. Отклонения напряжений для схемы «звезда-двойной зигзаг с нулевым проводом» не превышают $4,96 \%$, что является наилучшим результатом для исследуемых схем.

Зависимости коэффициентов несимметрии напряжений вторичной стороны от токов нагрузки для принятых режимов, для каждой из исследованных схем приведены на рисунках 4 и 5, из которых видно, что рост несимметрии нагрузки вызывает увеличение коэффициентов несимметрии напряжений.

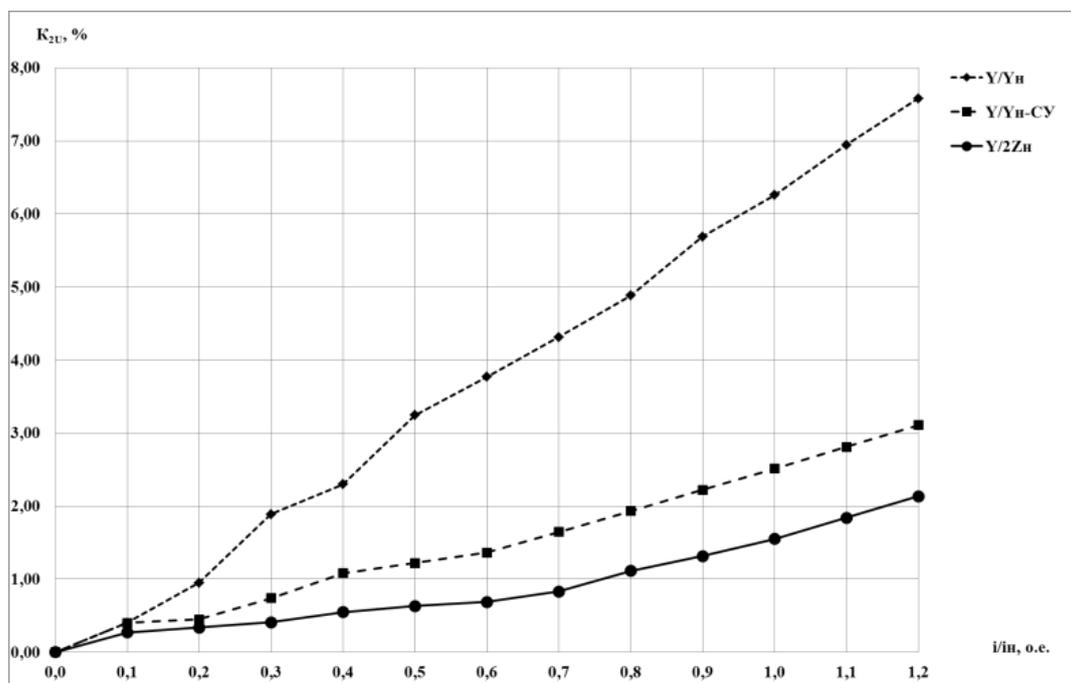


Рисунок 4 – Зависимость коэффициента несимметрии напряжений по обратной последовательности от тока нагрузки для трансформаторов с различными схемами соединения обмоток для режима $I_a = 0$, $I_b = I_c = 0 \dots 1,2 I_n$,

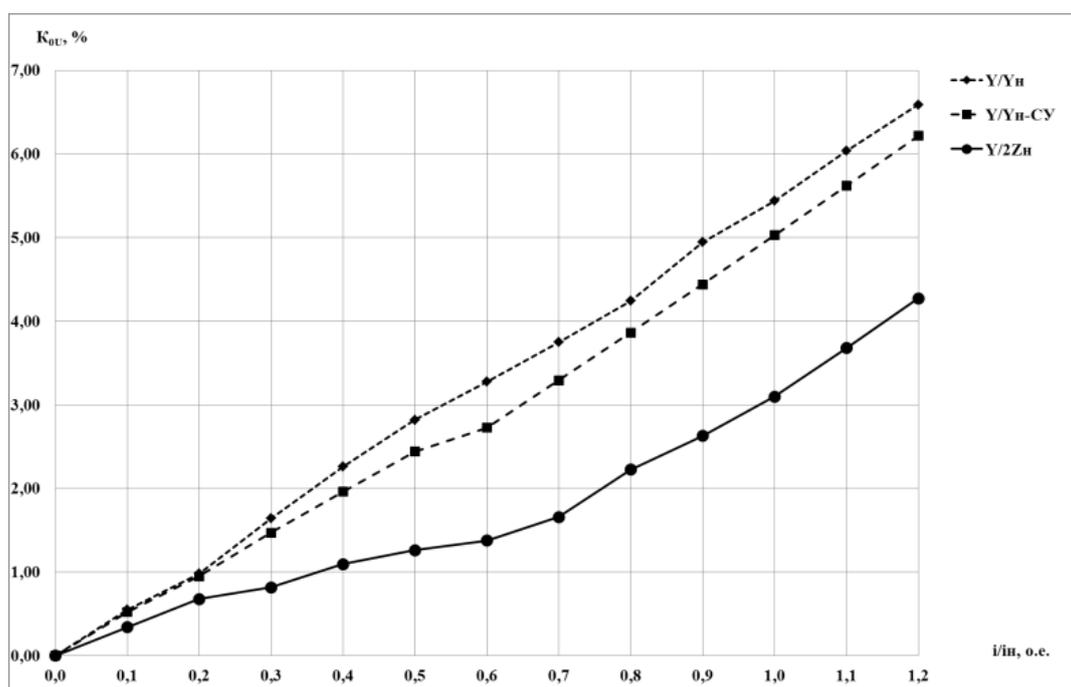


Рисунок 5 – Зависимость коэффициента несимметрии напряжений по нулевой последовательности от тока нагрузки для трансформаторов с различными схемами соединения обмоток для режима $I_a = 0$, $I_b = I_c = 0 \dots 1,2 I_n$,

При номинальном значении нагрузки коэффициент несимметрии напряжения по обратной последовательности для схемы соединений «звезда-звезда с нулевым проводом» равен 6,25 % для схемы «звезда-звезда с нулевым проводом с

симметрирующим устройством» 2,51 %, для схемы «звезда-двойной зигзаг с нулевым проводом» равен 1,55 %. Коэффициент несимметрии напряжений по нулевой последовательности для схемы соединений «звезда-звезда с нулевым проводом» равен 5,44 %, для схемы «звезда-звезда с нулевым проводом с симметрирующим устройством» 5,03 %, для схемы «звезда-двойной зигзаг с нулевым проводом» равен 3,1 %.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Экспериментальные исследования подтвердили способность трансформатора со схемой соединения обмоток «звезда-двойной зигзаг с нулевым проводом» обеспечивать наиболее высокий уровень симметрии вторичных напряжений даже при глубокой несимметрии нагрузки. При номинальном значении однофазной нагрузки отклонения вторичных напряжений не превышают 4,96 %, коэффициент несимметрии напряжений по обратной последовательности не превышает 1,55 %, коэффициент несимметрии напряжений по нулевой последовательности не превышает 3,1 %.

ЛИТЕРАТУРА

1. Патент №16008 Трехфазный симметрирующий трансформатор с четной группой соединения обмоток: / А.И. Зеленкевич, В.М. Збродыга; заявитель Учреждение образования «Белорусский государственный аграрный технический университет» – № а 20100121; заявл. 2010.02.01; опубл. 30.06.2012 // Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 2012. – № 3. – С. 180-181.
2. Прищепов, М.А. Особенности преобразования электрической энергии в трансформаторе со схемой соединения обмоток «звезда-двойной зигзаг с нулевым проводом / М.А. Прищепов, В.М. Збродыга, А.И. Зеленкевич // Агропанорама. – 2017. – № 5. – С. 16-25.
3. Прищепов, М.А. Работа трансформатора со схемой соединения обмоток «звезда-двойной зигзаг с нулевым проводом» при несимметричной нагрузке / М.А. Прищепов, В.М. Збродыга, А.И. Зеленкевич // Агропанорама. – 2018. – № 6. – С. 25–31.

УДК 621.316:004.9:372.862

ТРЕНАЖЕР ПО СИММЕТРИРОВАНИЮ ФАЗНЫХ НАГРУЗОК РЭС
PHASE LOAD BALANCING APPLICATION

Яр-Мухамедов И.Г., доцент, и.о. ст.научного сотрудника

Институт машиноведения и автоматики НАН КР, г. Бишкек, Кыргызстан

Ildar G. Yar-Mukhamedov, docent, senior researcher,

The Institute of Machine Science and Automation of the National Academy of Sciences
of the Kyrgyz Republic, Bishkek, Kyrgyzstan

Аннотация. Описано компьютерное обучающее приложение-тренажер для изучения возможностей балансирования фазных нагрузок распределительной сети, выработки навыков оценки ситуаций и планирования требуемых управляющих воздействий. Приложение имеет типовую структуру и реализовано с использованием минимальных средств для обеспечения переносимости на любые доступные аппаратно-программные платформы.

Abstract. The described computer training application is designed to study the possibilities of balancing the phase loads of the electric grid, to develop skills for assessing situations and planning the required control actions. The application has a typical structure and implementation in order to ensure portability to any available hardware and software platforms.

Ключевые слова: обучающая программа; симметрирование фаз; распределительные электросети.

Keywords: Training program; phase balancing; distribution power grids.

ВВЕДЕНИЕ

Одним из важных резервов повышения эффективности народного хозяйства остаются технические и коммерческие потери электроэнергии в распределительных электрических сетях (РЭС) напряжением 0,4 кВ [1, 2]. Пространственная распределенность и массовость бытовых потребителей создают определенные трудности в управлении электросетевым хозяйством.

Минимизация технических потерь связана с двумя основными эксплуатационными факторами. Во-первых, это сдвиг фаз, приводящий к потерям реактивной составляющей электроэнергии. Во-вторых – дисбаланс фазных нагрузок, обуславливающий увеличение потерь как в РЭС, так и в трансформаторной подстанции. Первый фактор регулируется с помощью устройств компенсации фазового сдвига на стороне потребителя, если они могут быть скомплексированы с потребляющими установками, для которых известны реактивные составляющие нагрузки, либо на трансформаторной подстанции, для повышения КПД трансформаторов. Второй фактор, до последнего времени, не мог быть оперативно контролируем и возможности оперативного управления балансом фазных нагрузок открылись лишь с появлением аппаратно-программных средств автоматизированных систем контроля и учета электроэнергии (АСКУЭ) [3], а

также разработки коммутаторов фазных токов (КФТ) [4] вкуче с алгоритмами управления на основе данных АСКУЭ [5].

Массовое распространение «умных» электронных счетчиков, внедрение АСКУЭ и планы по снижению технических и коммерческих потерь электроэнергии [1] обуславливают необходимость подготовки как студентов соответствующих специальностей, так и действующих специалистов эксплуатационных организаций. Для решения этой задачи и было разработано компьютерное обучающее приложение – тренажер по симметрированию фазных нагрузок РЭС.

ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

Модель сети. Полагаем, что распределительная электросеть (РЭС) напряжением 0,4 кВ разбита на ряд участков, включающих в свой состав потребителей как с трехфазной, так и однофазной нагрузкой. Причем последние могут иметь либо коммутируемое (через коммутатор фазных токов – КФТ), либо некоммутируемое присоединение к одному из фазных проводников четырехпроводной трехфазной линии. Межабонентские участки (МАУ) линии имеют определенное сопротивление (импеданс). По этой причине абонентские счетчики электроэнергии фиксируют постепенное снижение напряжения от начальных к конечным участкам РЭС. Полагаем также, что по данным оперативных измерений автоматизированных систем контроля и учета электроэнергии нам известны токи потребления абонентов и коэффициенты мощности.

Сразу отметим, что для эффективного функционирования распределительной энергосистемы требуется учитывать, как минимум, и амплитудные, и фазовые соотношения. В представляемой задаче рассматриваются только амплитудные либо действующие значения токов, т. е. предполагается, что фазовые сдвиги не влияют на потери электроэнергии. Это справедливо, если уже обеспечена компенсация фазовых сдвигов и переключения не приведут к их нарушению, либо их влияние несущественно по сравнению с потерями от дисбаланса фазных нагрузок. Таким образом, здесь рассматривается частный случай или часть более общей задачи. Это оправдано как с практической эксплуатационной, так и образовательной точки зрения.

На рисунке 1 показан один участок (секция), включающий по одному потребителю (абоненту) каждого из типов: трехфазного, однофазного с постоянным подключением, однофазного с коммутируемым подключением к одной из фаз через коммутатор фазных токов (КФТ). В действительности потребителей может быть больше, причем разных типов, а некоторые типы потребителей на конкретном участке могут и отсутствовать.

Слева секция соединяется с трансформаторной подстанцией либо продолжает сеть от предыдущего участка. Справа через линии следует другой участок либо сеть здесь заканчивается, если участок является последним. Количество участков (секций) в модели сети не фиксировано и определяется их реальным количеством в РЭС.

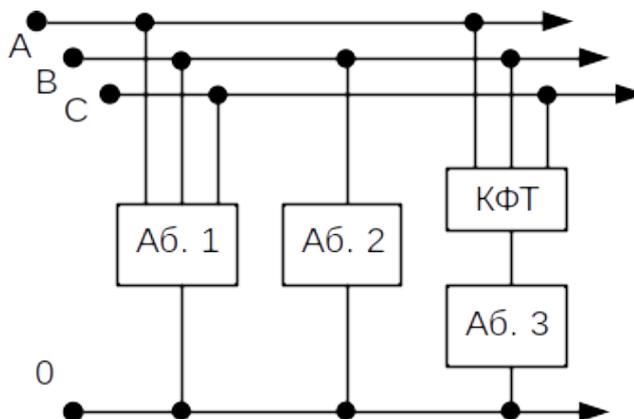


Рисунок 1 – Схема участка с типовыми потребителями

Исходные данные обучающего приложения имеют следующую структуру:

<Количество сетей (вариантов заданий)>

<Количество секций (участков) в сети>

<Количество абонентов на Первом участке>

<Тип> <Переключаемый> <Фаза> <Ток1> <Ток2> <Ток3>

... ..

<Тип> <Переключаемый> <Фаза> <Ток1> <Ток2> <Ток3>

<Количество абонентов на Втором участке>

<Тип> <Переключаемый> <Фаза> <Ток1> <Ток2> <Ток3>

... ..

<Тип> <Переключаемый> <Фаза> <Ток1> <Ток2> <Ток3>

... ..

Тип абонента: однофазный либо трехфазный. Признак «Переключаемый» показывает, подключен ли абонент через коммутатор фазных токов. Поле «Фаза» – это номер фазы, к которой подключен однофазный абонент. Далее задаются токи, потребляемые от каждой из фаз.

Функции приложения. Вначале пользователю предлагается выбрать номер варианта задания. После загрузки отображаются основные характеристики РЭС и приложение ожидает ввода команды. Набор команд невелик и включает в себя следующие основные.

– Отображение состояния отдельного участка (токи, потребляемые каждым из абонентов), включая суммарные фазные токи.

– Отображение фазных токов, потребляемых участками и всей РЭС.

– Отображение токов межабонентских участков на протяжении всей РЭС.

– Отображение величины несимметрии потребляемых токов.

– Переключение абонента рассматриваемого участка на другую фазу.

Параллельно отображается критериальный показатель, в качестве которого используется сумма квадратов отклонений фазных токов всех участков от нормативных значений.

Характер приложения, выводимой информации, а также необходимость протоколирования работы пользователя обусловили выбор формы организации взаимодействия с пользователем. Это – традиционное консольное приложение.

Компьютерная реализация. Разработка велась в среде GNU OS на языке C. В качестве компилятора использовался gcc, но может использоваться и tcc. Программа является автономной и не требует установки (портатбельное приложение). Это важно при его использовании в учебных классах, так как не требуются права администратора. Исходные данные имеют формат простого текстового файла и их можно подготовить с использованием любого редактора.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенные исследования и разработки показывают, что имеются резервы повышения энергоэффективности народного хозяйства и средства достижения этой цели не только на путях автоматизации учета и контроля, но и в части подготовки кадров для решения вновь выявляющихся задач оперативного управления РЭС, а также тестирования и разработки новых алгоритмов выработки управляющих воздействий для АСУ ТП энергообъектов.

Следующей задачей, также настоятельно требующей решения, является задача оперативной компенсации фазовых сдвигов и, при необходимости, снижения токов нулевого провода. Расчеты показывают, а эксплуатационная практика подтверждает, что подчас плотность тока нулевого провода, обусловленная фазовыми сдвигами, может превышать плотность тока фазных линий.

ЛИТЕРАТУРА

1. Концепция сотрудничества государств-участников СНГ в области инновационного развития энергетики и разработки передовых энергетических технологий. План первоочередных мероприятий по реализации Концепции. [Электронный ресурс]. Утвержден решением Совета глав правительств СНГ от 1 июня 2018 г. Режим доступа: <http://energo-cis.ru/wyswyg/file/Documents EES SNG/Razdel 1/1.32. Концепция инновационного развития энергетики.pdf>. (Дата обращения 12.04.2021).

2. Правила пользования электрической энергией. [Электронный ресурс]. Утверждены постановлением правительства КР от 22 августа 2012 г. № 576. Режим доступа: <http://cbd.minjust.gov.kg/act/view/ru-ru/93715>. (Дата обращения 12.04.2021).

3. Еремина М.А. Развитие автоматических систем коммерческого учета энергоресурсов (АСКУЭ) // Молодой ученый. 2015. № 3. С. 135–138.

4. Патент № 2101 (КР). Способ симметрирования фазных токов распределительной сети 0,4кВ и устройство его осуществления / Б.К.Такырбашев, Т.Т. Оморов, А.В. Новиков, А.Г. Боронин //Бюллетень. 2018, №10. С. 16–17.

5. Оморов Т.Т. Симметрирование распределенной электрической сети методом цифрового регулирования // Мехатроника, автоматизация, управление. 2018. Т. 19, № 3. С.194–200.

УДК 621.311

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ РАБОТЫ ДЕЛИТЕЛЬНОЙ
ЗАЩИТЫ МИНИ-ТЭЦ В СРЕДЕ MATLAB
DETERMINING THE EFFICIENCY OF DIVIDING PROTECTION
FOR MINI-CHP IN MATLAB

Петрашевич Н.С., ст. преподаватель
Белорусский национальный технический университет, г. Минск, Беларусь
N. Petrashevich, Senior Lecturer
Belarusian national technical University, Minsk, Belarus

Аннотация. В статье представлен способ оценки эффективности делительной автоматики мини-ТЭЦ путем анализа результатов моделирования в среде MATLAB

Abstract: The paper presents a method for evaluating the efficiency of the dividing protection for mini-CHP by analyzing the simulation results in MATLAB

Ключевые слова: делительная защита, MATLAB, короткое замыкание, асинхронный ход.

Keywords: dividing protection, MATLAB, short circuit, asynchronous mode.

ВВЕДЕНИЕ

Энергосистема современной Беларуси включает в себя как крупные электростанции, установленной мощностью несколько ГВт, так и небольшие установки местной генерации, такие как газопоршневые мини-ТЭЦ промышленных предприятий. Такие мини-ТЭЦ работают синхронно с энергосистемой и могут оснащаться делительной автоматикой для предотвращения асинхронного режима. Способ оценки эффективности такой автоматики путем анализа режимов коротких замыканий представлен в данной работе.

ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

В ходе работы было исследована электрическая сеть (фрагмент которой представлен на рисунке 1), включающая мини-ТЭЦ с двумя генераторами мощностями по 1,25 МВт.

Для исключения подпитки места повреждения в сети 110 кВ, а также возможности несинхронного включения генераторов, в терминалах релейной защиты мини-ТЭЦ предусмотрен ряд делительных защит. В панелях управления газопоршневых установок (ТГ-1, ТГ-2) выполняется делительная автоматика по скачку вектора напряжения. Работа данной ДА основана на замере текущего угла напряжения на шинах генератора В нормальном режиме генератор работает синхронно с энергосистемой. При прохождении мгновенного значения через ноль, автоматика измеряет период напряжения. Далее данный период сравнивается с эталонным значением (соответствующим синхронной работе генератора).

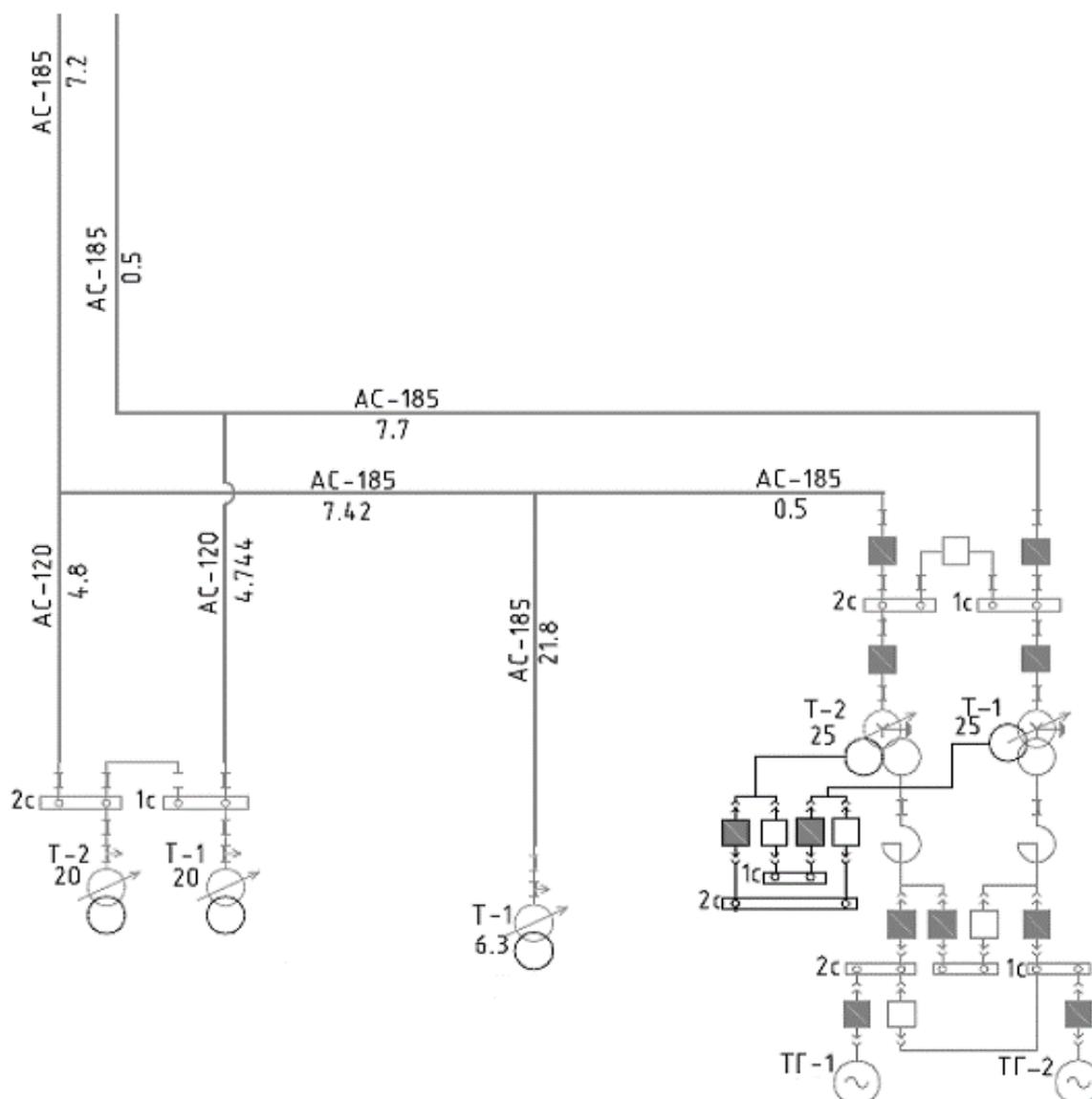


Рисунок 1 – Фрагмент схемы исследуемой сети

При потере связи с системой происходит ускорение или торможение генератора. Нулевое значение достигается раньше или позже эталонного на величину. По синхронной скорости и времени определяется угол, на который произошел скачок напряжения. Если скачок угла вектора напряжения превышает заданное значение, автоматика срабатывает без выдержки времени.

Для оценки эффективности делительной автоматики была создана модель в среде MATLAB. Фрагмент модели представлен на рисунке 2.

В ходе моделирования были рассмотрены условия работы защит при коротких замыканиях в различных точках сети и построены осциллограммы напряжений. Пример такой осциллограммы представлен на рисунке 3.

По полученным в ходе моделирования осциллограммам возможно определить момент прохождения напряжения через ноль и тем самым определить скачок угла вектора напряжения и запуск делительной автоматики.

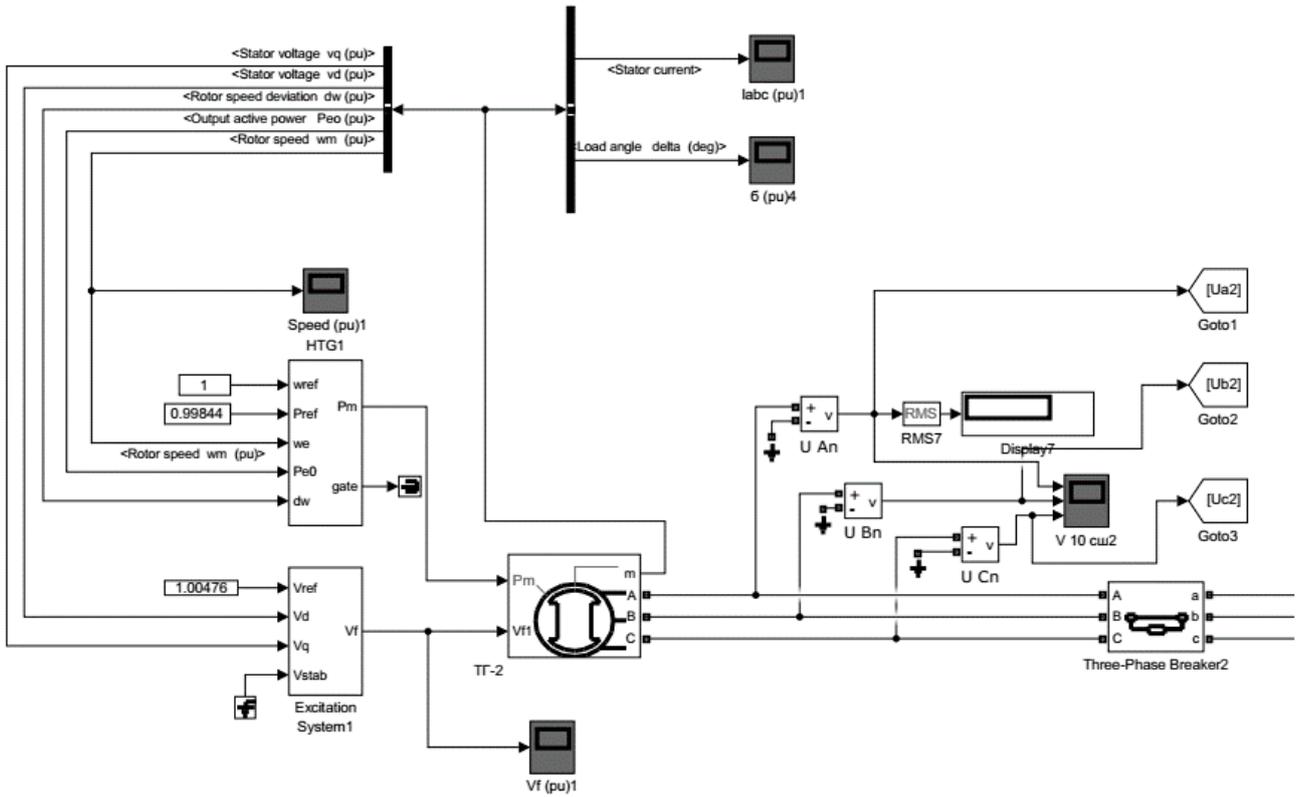


Рисунок 2 – Фрагмент модели, включающий ТГ-2 мини-ТЭЦ

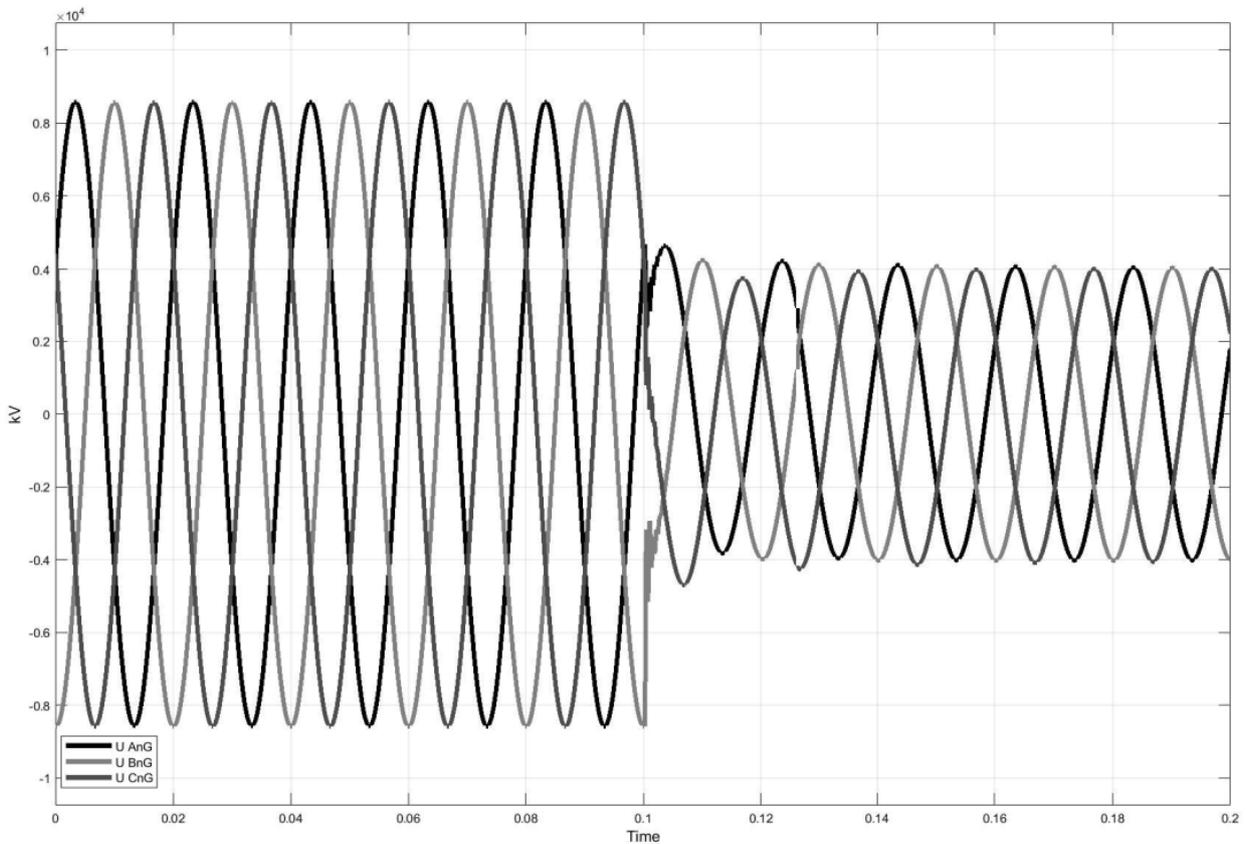


Рисунок 3 – Осциллограмма фазных напряжений при удаленном двухфазном на землю коротком замыкании

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе работы был апробирован способ оценки эффективности работы делительной автоматики в различных режимах путем моделирования в среде MATLAB. Это позволит повысить точность настройки терминала релейной защиты мини-ТЭЦ, количество которых достаточно велико в Республике Беларусь.

ЛИТЕРАТУРА

1. Калентионок Е.В. Устойчивость электроэнергетических систем. – Минск: Техноперспектива, 2008. – 375 с.

2. Калентионок, Е.В. Основы противоаварийного управления в энергосистемах [Электронный ресурс]: учебно-методическое пособие для студентов специальности 1-43 01 02 "Электроэнергетические системы и сети" / Белорусский национальный технический университет, Кафедра "Электрические системы"; Е.В. Калентионок, Ю.Д. Филипчик. – Минск: БНТУ, 2018.

УДК 621.316.11

АВТОМАТИЧЕСКИЙ ВВОД РЕЗЕРВА НА ЛИНИЯХ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ
10 КВ С НЕСКОЛЬКИМИ ИСТОЧНИКАМИ ПИТАНИЯ
AUTOMATIC LOAD TRANSFER SWITCHES ON 10 KV POWER LINES
WITH MULTIPLE POWER SUPPLIES

Калентионок Е.В., к-т техн. наук, доцент, Горновская Е.Н., магистрант
Белорусский национальный технический университет, г. Минск, Беларусь
E. Kalentionok, Candidate of technical Sciences, Docent,
E. Gornovskaya, Undergraduate,
Belarussian national technical University, Minsk, Belarus

Аннотация. Рассмотрена проблема выбора оптимального источника резервного питания в случае аварийного отключения основного в сетях 10 кВ с несколькими источниками питания. Определение наилучшего места включения АВР основано на анализе оперативных данных, находящихся в распоряжении диспетчера без осуществления трудоемких расчетов режимов.

Abstract. The problem of choosing the optimal backup power source in the event of an emergency shutdown of the main one in 10 kV networks with multiple power sources is considered. Determining the best place to turn on the ATS is based on the analysis of operational data available to the dispatcher without performing time-consuming calculations of modes.

Ключевые слова: распределительная сеть, автоматический ввод резерва, потери мощности.

Key words: distribution network, automatic load transfer switches, power loss.

ВВЕДЕНИЕ

При возникновении аварийной ситуации необходимо быстро принять решение по устранению последствий. После отключения поврежденного отдельного участка электрической линии необходимо срабатывание АВР или перед диспетчером возникает вопрос: в какой точке сети наиболее эффективно включение резервного источника для электроснабжения оставшихся потребителей, в случае, когда резервных источников питания несколько. Выбор оптимальной точки включения резервного питания позволит электроснабжающей организации сэкономить денежные средства и обеспечить потребителей качественной электроэнергией.

ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

Для исследования приняли линию с четырьмя резервными источниками питания (рисунок 1 ИП № 2-5). На исследуемой линии предусмотрена возможность автоматического секционирования. Это означает, что при возникновении короткого замыкания поврежденный участок автоматически отделяется от неповрежденной сети.

Составим схему замещения для дальнейшего расчета режимов. Узлам исследуемой сети будем присваивать следующие номера:

$$\underset{1}{X} \underset{2}{XX} \quad (1)$$

где 1 – номер источника питания данного узла (в нормальном, доаварийном режиме);

2 – порядковый номер самого узла (пример: 01, 02...n, 00–для ЦП).

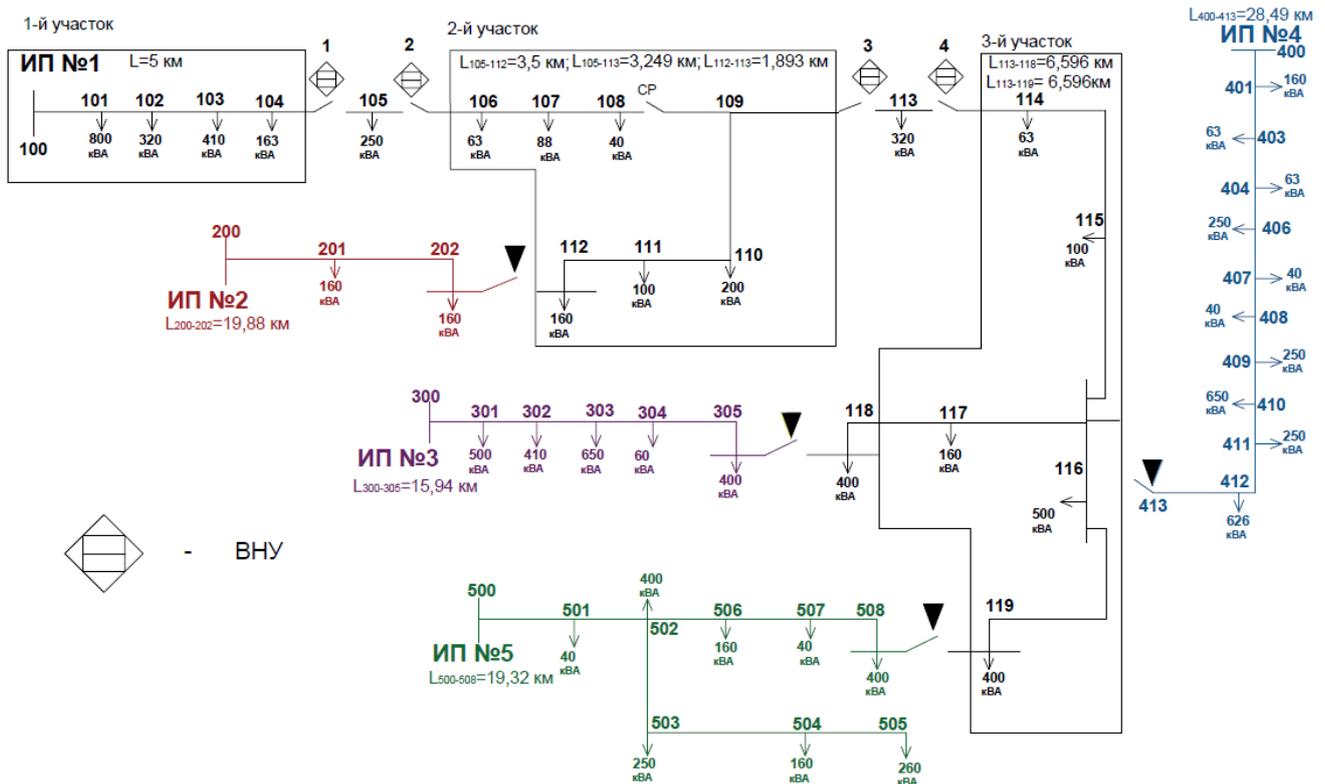


Рисунок 1 – Исследуемая схема сети

Параметры схемы замещения определим по формулам:

$$R_n = r_0 \cdot L, \text{ Ом}; \quad (2)$$

$$X_n = x_0 \cdot L, \text{ Ом}. \quad (3)$$

где r_0, x_0 – удельное активное и реактивное сопротивление линейного участка, Ом/км;

L – длина линейного участка, км.

Следующим этапом определяем потокораспределение по линиям для доаварийного и аварийного режимов по $S_{ном}$ трансформаторов (базовое потокораспределение).

Расчет режимов будем выполнять, изменяя коэффициент загрузки трансформаторов, потокораспределение по сети будет изменяться пропорционально коэффициенту загрузки:

$$S_{kз}^{m-n} = k_з \cdot S_{ном}^{m-n}, \text{кВА} \quad (4)$$

где m – номер начала участка;

n – номер конца участка;

$k_з$ – общий коэффициент загрузки трансформаторов в сети, о.е.;

Зададимся $\cos \varphi = 0,8$ и рассчитаем P, Q

$$P_{kз}^{m-n} = S_{kз}^{m-n} \cdot \cos \varphi, \text{кВт} \quad (5)$$

$$Q_{kз}^{m-n} = S_{kз}^{m-n} \cdot \sin \varphi, \text{квар} \quad (6)$$

$$I_{kз}^{m-n} = \frac{S_{kз}^{m-n}}{\sqrt{3} \cdot U_{ном}}, \text{А} \quad (7)$$

Определение потерь мощности производим по следующим выражениям:

$$\Delta P_{kз}^{m-n} = \frac{(P_{kз}^{m-n})^2 + (Q_{kз}^{m-n})^2}{U_{ном}^2} \cdot R_{л}, \text{кВт} \quad (8)$$

$$\Delta Q_{kз}^{m-n} = \frac{(P_{kз}^{m-n})^2 + (Q_{kз}^{m-n})^2}{U_{ном}^2} \cdot X_{л}, \text{квар} \quad (9)$$

где $P_{kз}^{m-n}$ – активная мощность на участке $m-n$, кВт;

$Q_{kз}^{m-n}$ – реактивная мощность на участке $m-n$, квар;

$U_{ном}$ – номинальное напряжение сети, кВ;

$R_{л}, X_{л}$ – активное и реактивное сопротивление линейного участка сети, Ом.

Для местных электрических сетей (35 кВ и ниже) характерны достаточно малые отклонения напряжения от номинального значения. Поэтому при расчете потерь напряжения его значение во всех точках сети принимается равным номинальному $U_{ном}$. Таким образом, расчет потерь напряжения ведется не по действительным напряжениям, а по номинальному [1, стр. 217].

$$\Delta U_{kз}^{m-n} = \frac{P_{kз}^{m-n} \cdot X_{л} + Q_{kз}^{m-n} \cdot R_{л}}{U_{ном}}, \text{кВ} \quad (10)$$

Перед расчетом режимов зададимся следующими условиями и ограничениями.

1. $\Delta P_{нагр} \rightarrow \min;$

2. $\Delta Q_{нагр} \rightarrow \min;$

3. $I_{нагр} \leq I_{дон};$

4. $U_{\min} \leq U_{\text{раб}} \leq U_{\max}$; примем ($U_{\min} = 9,0$ кВ; $U_{\max} = 11,0$ кВ).

Введем параметр $K_{кз}$

$$K_{кз} = L_{\max} \cdot I_{\text{нагр.ин}} \quad (11)$$

где L_{\max} – максимальная длина линии по магистрали, км;

$I_{\text{нагр.ин}}$ – ток нагрузки в начале питающего фидера, А.

Результаты расчета нормального режима сети приведены в таблице 1 (все точки нормального разрыва разомкнуты). $U_{\text{ин}} = 11$ кВ.

Таблица 1 – Результаты расчета нормального режима

	dP, кВт	dQ, квар	Umin, кВ	№ узла Umin	Ищп, А	$K_{кз}$, А*км	Примечание
Кз = 0,15							
ЦП1	11,16	4,67	10,69	118	35,76	530,89	Lmax = 14,85 км
ЦП2	0,21	0,12	10,94	202	2,52	50,22	Lmax = 19,91 км
ЦП3	1,99	1,15	10,87	305	15,92	253,80	Lmax = 15,94 км
ЦП4	16,13	7,55	10,41	412	18,85	537,24	Lmax = 28,49 км
ЦП5	3,95	1,87	10,78	508	13,48	260,42	Lmax = 19,32 км
Кз = 0,3							
ЦП1	44,63	18,69	10,39	118	71,52	1061,77	
ЦП2	0,84	0, 50	10,89	202	5,04	100,44	
ЦП3	7,96	4,6	10,75	305	31,84	507,60	
ЦП4	64,51	30,19	9,82	412	37,71	1074,48	
ЦП5	15,79	7,48	10,56	508	26,96	520,84	
Кз = 0,45							
ЦП1	100,41	42,05	10,08	118	107,29	1592,66	
ЦП2	1,88	1,12	10,83	202	7,57	150,67	
ЦП3	17,91	10,35	10,62	305	47,77	761,40	
ЦП4	145,14	67,92	9,22	412	56,56	1611,72	
ЦП5	35,52	16,83	10,34	508	40,44	781,27	
Кз = 0,6							
ЦП1	178,52	74,75	9,77	118	143,05	2123,54	
ЦП2	3,35	1,98	10,77	202	10,09	200,89	
ЦП3	31,84	18,40	10,50	305	63,69	1015,20	
ЦП4	183,51	85,88	9,00	412	63,60	1812,28	Кз.max = 0,506 (П.4)
ЦП5	63,14	29,9	10,12	508	53,91	19,32	
Кз = 0,75							
ЦП1	278,93	116,8	9,47	118	178,81	2654,43	
ЦП2	5,23	3,10	10,71	202	12,61	251,11	
ЦП3	49,75	28,75	10,37	305	79,61	1269,00	
ЦП5	98,65	46,74	9,89	508	67,39	1302,11	
Кз = 0,9							
ЦП1	392,79	164,5	9,18	118	212,19	3149,92	Кз.max = 0,89 (П.3)
ЦП2	7,54	4,46	10,66	202	15,13	301,33	
ЦП3	71,63	41,41	10,25	305	95,53	1522,80	
ЦП5	142,06	67,31	9,67	508	80,87	1562,53	

Далее предположим, что произошло аварийное отключение первого участка исследуемой линии. Участки 2 и 3 возможно запитать от источников питания № 2, № 3, № 4 и № 5. Поочередно для каждого варианта питания будем рассчитывать режим, изменяя коэффициент загрузки сети от 0,15 до 0,9 с шагом 0,15, отслеживая при этом соблюдение условий (3–4), при невыполнении которых расчет режимов для данного источника питания прекращается. После расчета всех аварийных режимов произведем сравнение уровня потерь мощности для каждого из режимов и выберем оптимальный вариант. Аналогичные расчеты произведем и для случая, когда произошло аварийное отключение участка № 2.

В ходе проведения эксперимента было выявлено, что наилучшим источником питания в аварийном режиме (при отключении первого участка исследуемой линии) будет ИП № 2. Коэффициент $K_{kз}$ оказался наименьшим в наиболее оптимальном варианте по критерию минимума потерь.

В результате исследования режимов при отключении второго участка исследуемой линии наиболее выгодным с точки зрения минимума потерь является источник питания № 3. Коэффициент $K_{kз}$ оказался наименьшим в наиболее оптимальном варианте по критерию минимума потерь.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Использование возможности секционирования неповрежденного участка линии и питание ее частей от разных источников эффективно с точки зрения снижения потерь и поддержания напряжения в заданных пределах.

Выбор резервного источника питания по критерию $K_{kз} = L_{\max} \cdot I_{\text{нагр.ли}} \rightarrow \min$, позволит обеспечить наименьший уровень потерь мощности в сети, при этом расчет коэффициента $K_{kз}$ на основе статических (L_{\max}) и динамических ($I_{\text{нагр}}$) данных требует наименьших трудозатрат, чем полный расчет режимов для всей сети.

ЛИТЕРАТУРА

1. Поспелов Г.Е. Электрические системы и сети: Учебник / Г.Е. Поспелов, В.Т. Федин, П.В. Лычев – Мн.: УП «Технопринт», 2004. – 720 с.

УДК 621.316.11

УЧЕТ РЕВЕРСА МОЩНОСТИ В ПРЕДЕЛАХ ПОЛУЧАСА
ПРИ РАСЧЕТЕ РЕЖИМОВ И ПОТЕРЬ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ
ПО ГРАФИКАМ ЦИФРОВЫХ ПРИБОРОВ УЧЕТА
В ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЯХ ЭНЕРГОСИСТЕМ
ACCOUNTING THE POWER REVERSE WITHIN HALF HOURS WHEN
CALCULATING THE MODES AND LOSSES OF ELECTRIC POWER ON THE
GRAPHICS OF DIGITAL MEASURING DEVICES IN THE INTELLIGENT
ELECTRIC NETWORKS OF POWER SYSTEMS

Фурсанов М.И., д-р техн. наук, профессор, Макаревич В.В., ст. преподаватель,
Гецман Е.М, ст. преподаватель

Белорусский национальный технический университет, г. Минск, Беларусь
Fursanov M.I., Doctor of technical Sciences, Professor, Makarevich V.V., Senior
Lecturer, Hetsman K.M., Senior Lecturer
Belarusian national technical University, Minsk, Belarus

Аннотация. Разработана модель учета реверса мощности в пределах одного интервала усреднения для использования полученных значений при расчете режимов и потерь электроэнергии по графикам цифровых приборов учета.

Модель основана на анализе информации по смежным интервалам и позволяет свести произвольное распределение реверса мощности внутри рассматриваемого интервала к двум вариантам. Первый вариант – когда предыдущий и последующий интервал имеют одно направление и второй вариант – когда предыдущий и последующий получас имеют разные направления. При наличии на предыдущем или последующем интервале реверса мощности, необходимо эти интервалы добавлять к моделируемому, до нахождения соседних интервалов с одинаковым направлением мощности.

Abstract. A model has been developed for accounting for power reverse within one averaging interval for using the obtained values when calculating the modes and energy losses according to the diagrams of digital metering devices. The model is based on the analysis of information on adjacent intervals and allows one to reduce the arbitrary distribution of the power reverse within the considered interval to two options. The first option is when the previous and next interval have the same direction and the second option is when the previous and next half hour have different directions. If there is a power reverse in the previous or subsequent interval, these intervals must be added to the simulated one, until neighboring intervals with the same power direction are found.

Ключевые слова: учет, реверс мощности, потребление, цифровой прибор учета, интервал.

Key words: metering, power reverse, consumption, digital meter, interval.

ВВЕДЕНИЕ

Для учета электроэнергии в распределительных электрических сетях (6–10)–0,38 кВ энергосистемы Республики Беларусь, как правило, используются цифровые

приборы учета [1], которые в отличие от индукционных, позволяют учитывать график потребления электроэнергии с получасовыми интервалами усреднения.

Цифровой прибор учета хранит за получасовой интервал усреднения четыре вида значений электроэнергии: "E+" – активная энергия потребления (импорт), "E-" – активная отданная энергия (экспорт/генерация), "R+" – реактивная энергия потребления (импорт), "R-" – реактивная отданная энергия (экспорт/генерация). На практике возникают ситуации, когда за получасовой интервал имеются не нулевые значения "E+" и "E-", а так же "R+" и "R-", что приводит к проблеме определения усредненных за полчаса значений активной (P) и реактивной (Q) мощности с учетом их направления.

Рассмотрим пример возможного распределения значений "E+" = 20 кВт·ч и "E-" = 20 кВт·ч по минутам. На рисунке 1 показаны граничные значения распределения. Первый случай (рисунок 1а) когда активная энергия потребления прошла за 1 мин, а активная энергия отдачи отдавалась в течение 29 минут и наоборот рисунок 1б. На рисунке 2 показано равномерное распределение, когда 15 минут электроэнергии потреблялась и столько же отдавалась.

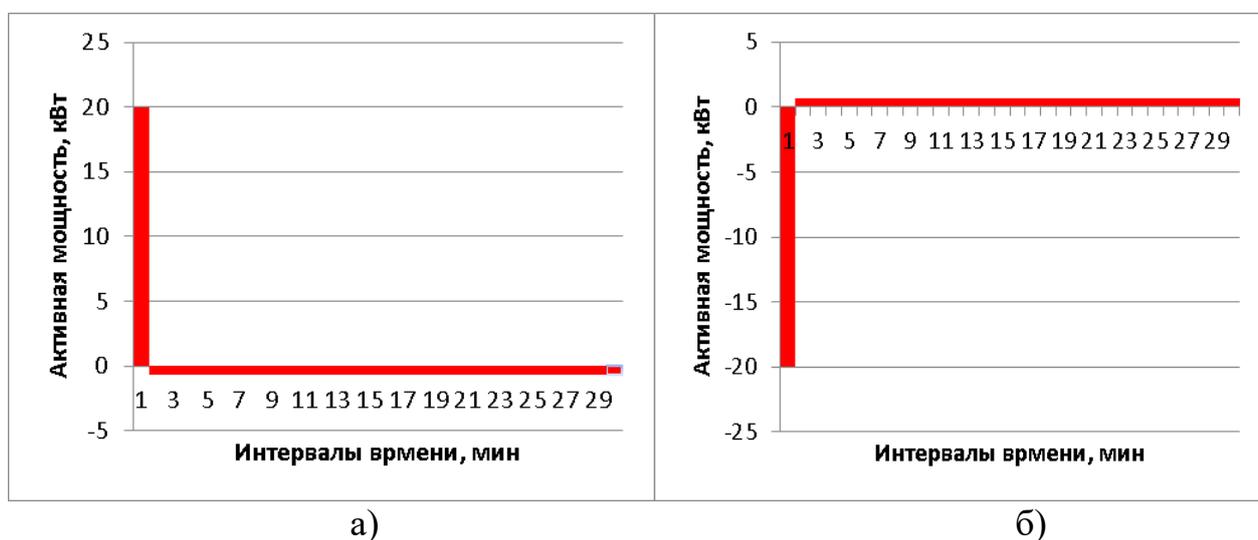


Рисунок 1 – Граничное распределение получасовых замеров электроэнергии по минутам



Рисунок 2 – Равномерное распределение получасовых замеров

Из показанных примеров видно, что возможные режимы при различных распределениях потребленной и отданной электроэнергии за получасовой интервал будут сильно отличаться. Поэтому возникла необходимость в разработке модели учета реверса мощности в пределах получаса при расчете режимов и потерь электроэнергии по графикам цифровых приборов учета.

ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

Реальная картина реверса мощности в пределах рассматриваемого интервала (получаса) может иметь произвольный характер, представленный на рисунке 3, однако имея, в наличие только зарегистрированные цифровыми приборами учета значения электроэнергии потребления и генерации не позволяют судить о величине и продолжительности протекания мощности в каждом направлении.

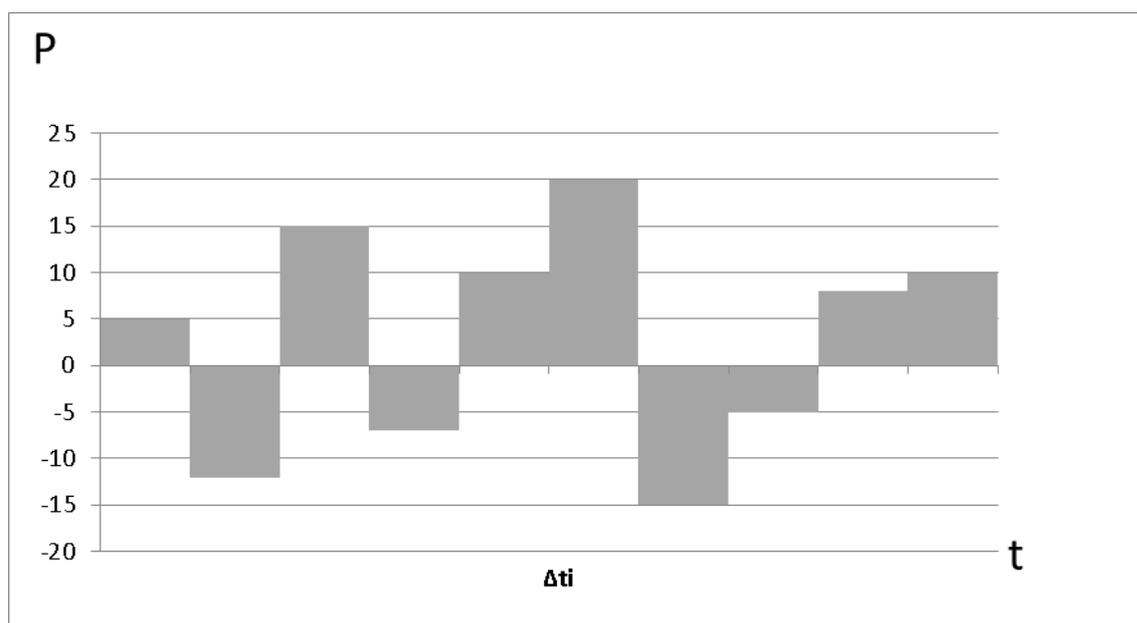


Рисунок 3 – Произвольный характер распределения реверса мощности в течение получасового замера электроэнергии

Для решения этой задачи предлагается учесть значения соседних i -х интервалов (получасов), зная в них направление потоков мощности можно произвольное распределение мощности внутри моделируемого интервала свести к двум вариантам.

Первый вариант – когда предыдущий ($i - 1$) и последующий получас ($i + 1$) имеют одно направление, например, положительное ("E+" – активная энергия потребления (импорт)), то получим три i -х интервала, рисунок 4.

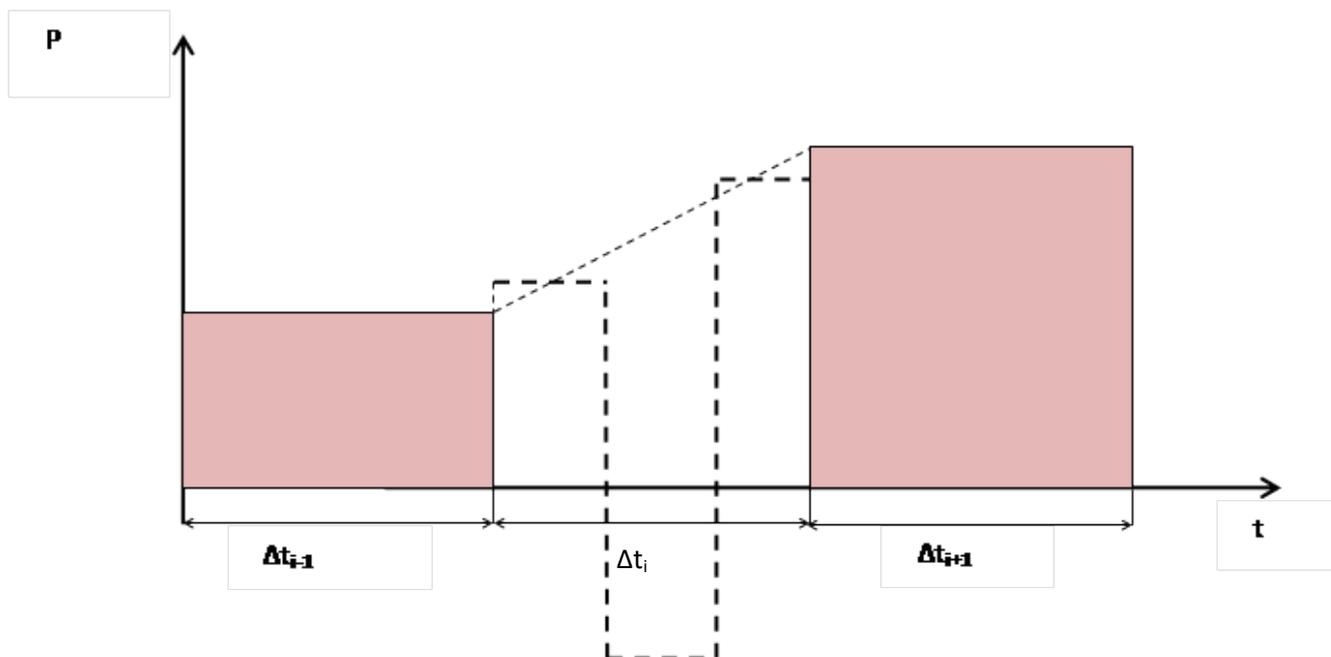


Рисунок 4 – Первый вариант моделирования распределения реверса мощности в течение получасового замера электроэнергии

Определение величин активной мощности и времени ее протекания внутри моделируемого (i -го) интервала производится следующим образом:

$$P_{cp_{i-1}}^{(+)} = \frac{W_{i-1}^{(+)}}{\Delta t_{i-1}}; \quad (1)$$

$$P_{cp_{i+1}}^{(+)} = \frac{W_{i+1}^{(+)}}{\Delta t_{i+1}}; \quad (2)$$

$$P_{cpi}^{(+)} = \frac{P_{cp_{i-1}}^{(+)} + P_{cp_{i+1}}^{(+)}}{2}; \quad (3)$$

$$P_{cpi}^{(-)} = \frac{W_{pi}^{(-)}}{\Delta t_i^{(-)}}; \quad (4)$$

$$\Delta t_i^{(+)} = \frac{W_{pi}^{(+)}}{P_{cpi}^{(+)}}; \quad (5)$$

$$\Delta t_i^{(-)} = \Delta t_i - \Delta t_i^{(+)} \quad (6)$$

Второй вариант – когда предыдущий ($i - 1$) и последующий интервал ($i + 1$) имеют разные направления, например предыдущий ($i - 1$) имеет отрицательное направление ("Е-" – активная отданная энергия (экспорт/генерация)), а последующий полчаса ($i + 1$) – положительное, рисунок 5.

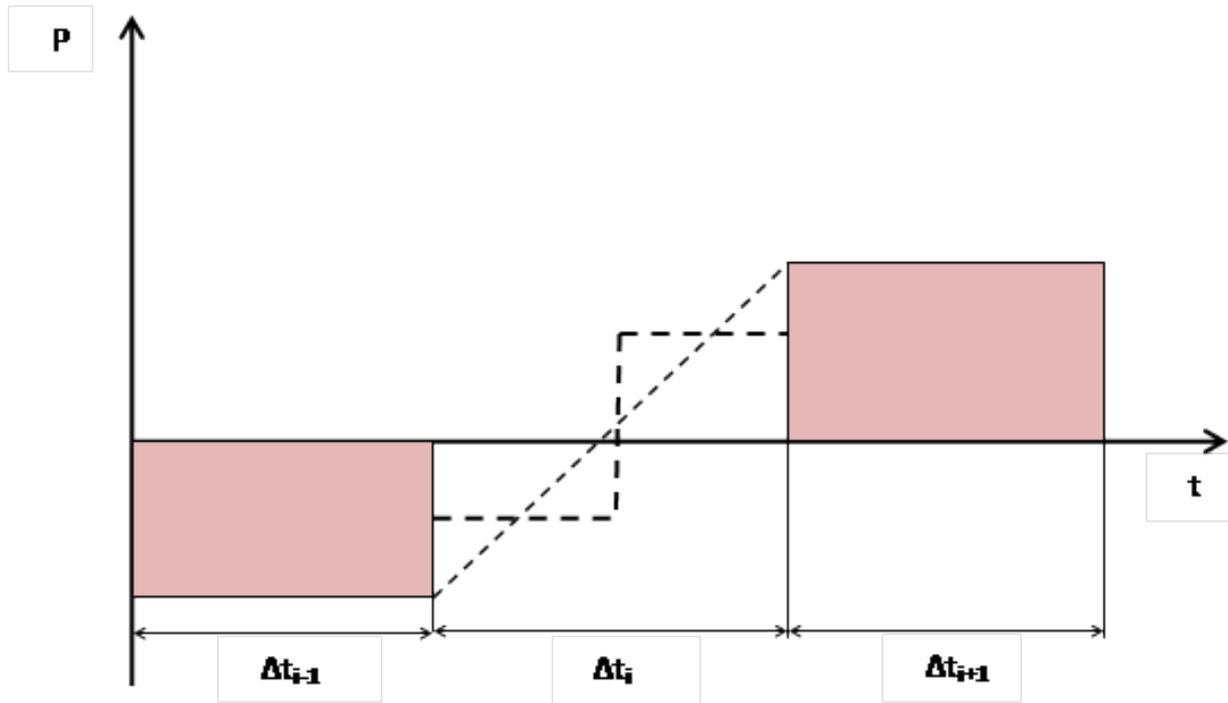


Рисунок 5 – Второй вариант моделирования распределения реверса мощности в течение получасового замера электроэнергии

Определение величин активной мощности и времени ее протекания внутри моделируемого (i -го) интервала производится по формулам (1–4):

$$P_{\text{ср}i}^{(-)} = P_{\text{ср}i-1}^{(-)} = \frac{W^{(-)}_{P_{i-1}}}{\Delta t_{i-1}}; \quad (1)$$

$$P_{\text{ср}i}^{(+)} = P_{\text{ср}i+1}^{(+)} = \frac{W^{(+)}_{P_{i-1}}}{\Delta t_{i+1}}; \quad (2)$$

$$\Delta t_i^{(-)} = \frac{W^{(-)}_{P_i}}{P_{\text{ср}i}^{(-)}}; \quad (3)$$

$$\Delta t_i^{(+)} = \frac{W^{(+)}_{P_i}}{P_{\text{ср}i}^{(+)}}. \quad (4)$$

При наличии на предыдущем ($i - 1$) или последующем интервале ($i + 1$) реверса мощности, необходимо эти получасы добавлять к моделируемому, до нахождения соседних получасов с одинаковым направлением мощности.

Аналогичным образом производится построение модели учета реверса реактивной мощности в пределах получаса при расчете режимов и потерь электроэнергии по графикам цифровых приборов учета.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработана модель учета реверса мощности в пределах интервала усреднения (получаса). Модель основана на анализе значения и направления мощности в соседних интервалах, зная в них постоянную величину и направление потоков мощности можно с достаточной достоверностью, произвольное распределение мощности внутри моделируемого интервала свести к двум вариантам.

Данная модель позволяет учитывать реверс мощности в пределах интервала усреднения в методиках расчета режимов и потерь электроэнергии по графикам цифровых приборов учета [1, 2].

ЛИТЕРАТУРА

1. Фурсанов М.И., Золотой А.А., Макаревич В.В. Расчет технологического расхода (потерь) электроэнергии в современных распределительных электрических сетях 0,38–10 кВ // Энергетика. Известия высших учебных заведений. – 2018. – № 5. – С. 408 – 423.
2. Фурсанов М.И., Макаревич В.В. Методика современного расчета потерь электроэнергии в электрических сетях 0,38–10 кВ // Ташкент. Проблемы энерго- и ресурсосбережения. № 3–4, 2018. – С. 76–81.

УДК 621.311

АНАЛИЗ ПРОБЛЕМ ИНТЕГРИРОВАНИЯ ВЕТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ
УСТАНОВОК В ЭНЕРГОСИСТЕМУ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ
ANALYSIS OF THE PROBLEMS OF INTEGRATING WIND POWER PLANTS
INTO THE ENERGY SYSTEM OF THE REPUBLIC OF BELARUS

Попкова Н.А., магистр техн. наук
Белорусский национальный технический университет, г. Минск, Беларусь
Papkova N.A., Master of Engineering Science
Belarussian national technical university, Minsk, Belarus

Аннотация. В работе рассматриваются проблемы интеграции ветроэнергетических установок (ВЭУ) в энергетическую систему. В силу непостоянства ветрового потока ВЭУ не могут характеризоваться высоким показателем энергетической эффективности.

Abstract. The paper deals with the problems of integrating wind power plants (into the energy system. Due to the variability of the wind flow, wind turbines cannot be characterized by a high energy efficiency index.

Ключевые слова: ветроэнергетические установки, энергетическая система, возобновляемые источники энергии.

Keywords: wind power plants, energy system, renewable energy sources.

ВВЕДЕНИЕ

Ветроэнергетика по праву занимает лидирующие позиции в рейтингах ежегодного прироста установленной мощности среди возобновляемых источников энергии (ВИЭ). Так, в период с 2010 по 2020 г. прирост установленной мощности составил 521 116 МВт (с 177 793 до 698 909 МВт соответственно), в Республике Беларусь этот показатель составил 118,4 МВт (с 1,9 до 120,3 МВт) [1]. Несмотря на огромные перспективы, до сих пор существует ряд ограничений, препятствующих широкому распространению применению ВЭУ.

ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

Главным замедляющим фактором масштабной интеграции ветровых энергетических станций в энергосистему является нестабильная выдача мощности ВЭУ, которая зависит от ветрового потока (его скорости, направления, плотности и равномерности). Крупные ВЭУ с установленной мощностью более 500 кВт также не могут эффективно работать при скоростях ветра меньше 5 м/с, как и при скоростях ветра больше 25 м/с. Кроме этого для возбуждения и генерации ВЭУ необходима реактивная мощность.

Дополнительной сложностью в случае ввода ВЭУ в распределительную электрическую сеть появляется необходимость установки преобразовательного устройства и системы управления, которая способна организовать передачу потоков мощности в распределительной сети от различных источников электрической энергии, контролировать объемы активной и реактивной

мощностей, а также мощности искажения. При подключении ВЭУ в распределительную сеть напряжением 0,4 кВ необходимо также озаботиться обеспечением бесперебойного питания и стабилизацией электрических параметров.

Опыт стран Европейского союза, США, Китая и Индии демонстрирует, что использование значительной доли ВЭУ в энергосистеме не только технически возможно, но и экономически выгодно. Если в энергосистеме доля ветровых электрических станций небольшая, то колебания графика генерации электрической энергии можно покрывать за счет имеющейся в энергосистеме резервной генерирующей мощности. В случае Республики Беларусь необходимо обеспечение маневренных энергетических источников, способных быстро реагировать на изменение графика нагрузки.

Внедрение ветроэнергетических установок в энергетическую систему страны поднимает вопрос эффективного прохождения ночного минимума. Известно, что график нагрузки Белорусской энергосистемы в настоящее время имеет относительно низкий коэффициент заполнения. С учетом наличия крупного действующего энергоблока БелАЭС, установленная мощность которого примерно соответствует 10 % от суммарной установленной мощности всей энергосистемы страны, образуется ситуация, в которой предпочтительнее ставить маневренные энергетические установки, которые способны в кратчайшие сроки набирать и сбрасывать необходимый объем мощности. Ветроэнергетические установки пока что не способны обеспечить на территории нашей страны подобный режим работы. Так же необходимо учесть, что распределительные электрические сети республики по большей части морально и физически устарели, их пропускная способность стала гораздо меньше запланированной.

С точки зрения диспетчерского управления ВЭУ представляют собой неуправляемый объект, что предполагает собой обязательный резерв энергетических мощностей энергоблоков, работающих на традиционных видах топлива, в роли которых выступает в основном природный газ и реге мазут.

Установленная мощность всех ВЭУ в Республике Беларусь, составляет 120 МВт [3], если принять что среднее максимальное значения коэффициента использования установленной мощности (КИУМ) равным 32 %, то получаемое среднее значение максимальное выработки будет равняется 38,4 МВт. Подобная ситуация принимается в качестве идеальной, когда все установки ВЭУ в стране одновременно работают в максимально достижимом для себя режиме выдача электрической мощности. Если же провести перерасчет полученного значения к максимальному достигнутому потреблению электроэнергии в стране, то окажется, что максимальная физически допустимая выдача электрической мощности всех работающих ВЭУ на территории страны составляет лишь 0,06 % от потребляемой мощности энергосистемы. Полученное значение не является серьезной цифрой для стран с развитой возобновляемой энергетикой, однако в сложившихся режимных условиях подобная малая доля объясняется невозможностью эффективного, с точки зрения технико-экономических показателей, управления энергосистемой в период ночных провалов потребления.

В любом случае энергетическая система Республики Беларусь достигла той точки развития, когда она требует перехода на новый технический и технологический уровень. Введение Белорусской АЭС стало первым шагом этого перехода, формирование интеллектуальных сетей станет следующим, за которым последует и увеличение доли возобновляемых источников электрической энергии.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В структуре генерирующих мощностей белорусской энергосистемы доля ВЭС все еще остается достаточно низкой по сравнению со странами с похожими климатическими и экономическими условиями. Для реализации плана по увеличению доли ВИЭ в составе энергетических источников страны необходимо подготовить инфраструктуру, базирующуюся на системе умных электрических сетей, а также выровнять график потребления электрической энергии за счет привлечения потребителей к данному процессу. Опыт стран европейского союза указывают на возможность эффективной работы ВИЭ в составе энергосистемы при наличии гибкой тарифной политики, заинтересованности всех игроков рынка, а также использовании технологий интеллектуального управления.

ЛИТЕРАТУРА

1. Международное агентство по возобновляемым источникам энергии [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.irena.org/wind> – Дата доступа: 26.03.2021.

2. Дубицкий Михаил Александрович, Рыкова Александра Андреевна Классификация резервов мощности электроэнергетических систем // Вестник ИРГТУ. 2014. № 8 (91). [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://cyberleninka.ru/article/n/klassifikatsiya-rezervov-moschnosti-elektroenergeticheskikh-sistem> – Дата доступа: 26.03.2021

3. Кадастр возобновляемых источников энергии Министерства природных ресурсов и охраны окружающей среды Республики Беларусь. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://195.50.7.239/Cadastre/Map>. – Дата доступа: 20.04.2021.

УДК 621.311

ПОТЕНЦИАЛ ВЫБРОСОВ ПАРНИКОВЫХ ГАЗОВ В ЖИЗНЕННОМ
ЦИКЛЕ ВЕТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ УСТАНОВКИ
POTENTIAL OF GREENHOUSE GAS EMISSIONS IN THE LIFE CYCLE
OF A WIND POWER PLANT

Попкова Н.А., магистр техн. наук, Гецман Е.М., магистр техн. наук
Белорусский национальный технический университет, г. Минск, Беларусь
Parkova N.A., Master of Engineering Science, Hetsman K.M., Master of Engineering
Science, Belarussian national technical university, Minsk, Belarus

Аннотация. В работе рассматривается полный жизненный цикл ветроэнергетической установки. Приводятся ключевые этапы цикла, анализируется потенциал негативного воздействия на окружающую среду каждого отдельного этапа. Учитывается реализация комплекса мер по повышению энергоэффективности и снижению выбросов парниковых газов.
Abstract. The paper considers the full life cycle of a wind power plant. The key stages of the cycle are presented, and the potential for negative environmental impact of each individual stage is analyzed. The implementation of a set of measures to improve energy efficiency and reduce greenhouse gas emissions is taken into account.

Ключевые слова: ветроэнергетические установки, энергетическая система, возобновляемые источники энергии, экологический след.
Keywords: wind power plants, energy system, renewable energy sources, ecological footprint.

ВВЕДЕНИЕ

Традиционные виды энергетических ресурсов в мире (природный газ, нефть и уголь) удовлетворяют примерно 70 % энергетических потребностей человечества, при этом электричество играет ведущую роль в нанесении ущерба окружающей среде, внося вклад примерно 32 % от суммарных глобальных выбросов CO₂ [1].

Современный образ жизни общества, а также постоянные потребности экономики в ископаемом топливе являются ключевыми факторами загрязнения природной среды, воздействия на здоровье человека и выбросов парниковых газов.

Возобновляемые источники энергии (ВИЭ) получили широкую поддержку со стороны ряда стран и внедрение соответствующих политических решений достаточно быстро (всего за одно десятилетие) в силу роста цен на топливо, высокого спроса на энергию, будущих энергетических ценных бумаг и необходимости сокращения выбросов парниковых газов (ПГ) в атмосферу Земли. В течении последних нескольких лет ветроэнергетика показала значительный прирост установленной мощности в мировом масштабе, в Республике Беларусь также наблюдается рост. Считается, что данная отрасль является «экологически чистой» в качестве источника электрической энергии, однако для подтверждения данного факта необходимо учитывать весь жизненный цикл установки.

ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

В контексте воздействия на окружающую среду и выбросов парниковых газов (таких как CO_2 , CH_4 , N_2O и т. д.) производство энергии является самым большим источником загрязнений. Для изучения и анализа подобного воздействия на окружающую среду обычно используются различные подходы, такие как оценка углеродного следа и жизненного цикла. В последние годы ветроэнергетика получает высокий уровень признания со стороны государства и местных сообществ, поскольку она устойчива, быстро растет и имеет неограниченные энергетические ресурсы. Производство электроэнергии из энергии ветра, создает впечатление того, что во время работы ветряных турбин нет никакой дополнительной экологической нагрузки на окружающую среду. Однако на самом деле выбросы «спрятаны» на протяжении других этапов жизненного цикла ветроэнергетических установок (ВЭУ), т. е. во время производства, монтажа, транспортировки, технического обслуживания и демонтажа. Таким образом, зная затраты различных энергетических и материальных ресурсов на каждом отдельном этапе цикла, можно точно измерить воздействие ВЭУ на окружающую среду. При учете затрат и результатов оценка включает в себя весь срок службы рассматриваемых продуктов от добычи сырья до переработки, производства, распределения, транспортировки, ремонта, технического обслуживания, переработки и утилизации.

Анализ литературы показывает, что потенциал выбросов парниковых газов в течение жизненного цикла ветряной турбины существенно зависит от трех основных условий: условий производства установки, используемого производственного процесса, конструкции и установленной мощности ВЭУ, а также местных условий ветра.

Жизненный цикл ветроэнергетической установки схематично показан на рисунке 1 [2].



Рисунок 1 – Полный жизненный цикл ветроэнергетической установки

Различные технологии производства электроэнергии имеют различные компромиссы в отношении стоимости, безопасности поставок, воздействия на окружающую среду, доступности технологий и т. д. Энергия ветра наносит очень

незначительный ущерб окружающей среде в течение активной фазы использования ВЭУ – эксплуатации, однако в течение всего жизненного цикла турбины все еще наблюдаются выбросы парниковых газов в атмосферу, которые возникают, например, в результате производства материалов, транспортировки, монтажа, эксплуатации и удаления.

Каждая ВЭУ имеет уникальный коэффициент выбросов. Считается, что благодаря достижениям в области ветроэнергетики выбросы в течение жизненного цикла в будущем сократятся. Для точной оценки влияния ВЭУ на окружающую среду важно оценить сокращение выбросов парниковых газов от ветроэнергетики, которое в настоящее время плохо изучено из-за его переменной производительности, установленных местоположений и огромных различий в физических параметрах.

Интенсивность выбросов парниковых газов оценивается в соответствии с номинальной мощностью ВЭУ, коэффициентом использования установленной мощности отдельной ВЭУ, диаметру ротора, высоте установки, годовой выработки электрической энергии. Для многомерного анализа интенсивности выбросов парниковых газов ветряных турбин используются все перечисленные ранее параметры.

В общем случае, коэффициент использования установленной мощности (КИУМ) ВЭУ рассчитывается по формуле:

$$\text{КИУМ} = \frac{W_{\Gamma}}{P_{\text{уст}} \cdot 8760} \quad (1)$$

где W_{Γ} – выработка электрической энергии ВЭУ за год, кВт·ч;

$P_{\text{уст}}$ – установленная номинальная мощность ВЭУ, кВт;

8760 – количество часов в году.

Для точного подсчета ущерба окружающей среды необходимо использовать единую эталонную единицу измерения. Существующие сравнения в зарубежных исследованиях ограничены именно из-за разнообразия функциональных единиц, которые не позволяют точно определить ущерб окружающей среде. Трудность заключается в нахождении той самой единицы измерения, ведь необходимо определить ущерб от добычи ресурсов, транспортировки, хранения, утилизации и прочих этапов жизненного цикла. Подсчет экологического следа чаще всего ведется в единицах объема чистой воды, однако в данном случае такая единица измерения может оказаться не совсем точной.

Исследования [3] показали, что для «экологической» окупаемости ВЭУ мощностью 1МВт ей необходимо поработать 6,5 месяцев с КИУМ равным 45 %. Если обратиться к Кадастру ВИЭ Республики Беларусь, то можно увидеть, что для аналогичных установок в нашей стране КИУМ равняется в среднем 32 % [4], что негативно сказывается на сроке достижения экологической нейтральности подобных установок в нашей стране.

Также существует проблема определения всех этапов производств, ведь каждая ступень на рисунке 1 – самый сложный технологический процесс и не всегда

рационально объединять этапы или опускать отдельный. В разных странах совокупные потребности в энергии для ветряных турбин различны, и существует огромная разница в структуре энергоснабжения, а также в экономических показателях.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Процесс оценки влияния ВЭУ на окружающую среду представляет собой перспективное и сложное направление, развитие которого потребует учитывать множество переменных. Необходимость выполнения данного решения является неоспоримым подходом, ведь подобная оценка различных ресурсов помогает обеспечить страну наиболее экологически нейтральными и эффективными источниками электрической энергии и позволит в будущем снизить нагрузку на окружающую среду и климат. Для стран, имеющих наибольший потенциал сокращения выбросов путем реализации рентабельных мер и сохранения энергетической независимости и конкурентоспособности производимых товаров на международном рынке, выбор в пользу ВИЭ является следующим шагом развития.

ЛИТЕРАТУРА

1. World Energy Outlook 2020 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2020> – Дата доступа: 26.03.2021.
2. R. Bhandari , В.Кumar, F. Mayer Life cycle greenhouse gas emission from wind farms in reference to turbine sizes and capacity factor // Journal of Cleaner Production / Vol. 277, 2020, [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652620334302> – Дата доступа: 26.03.2021.
3. Chipindula, Jesuina & Botlaguduru, Venkata & Du, Hongbo & Kommalapati, Raghava & Huque, Ziaul. (2018). Life Cycle Environmental Impact of Onshore and Offshore Wind Farms in Texas. Sustainability. 10. 2022. 10.3390/su10062022, [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://www.researchgate.net/publication/325770316_Life_Cycle_Environmental_Impact_of_Onshore_and_Offshore_Wind_Farms_in_Texas/fulltext/5b233382a6fdcc697464fb1f/325770316_Life_Cycle_Environmental_Impact_of_Onshore_and_Offshore_Wind_Farms_in_Texas.pdf?origin=publication_detail – Дата доступа: 20.04.2021.
4. Кадастр возобновляемых источников энергии Министерства природных ресурсов и охраны окружающей среды Республики Беларусь. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://195.50.7.239/Cadastre/Map> – Дата доступа: 20.04.2021.

УДК 621.316.15

ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ РАЗГРУЗКИ ТРАНЗИТА ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СЕТИ НАПРЯЖЕНИЕМ 35 КВ В АВАРИЙНОМ РЕЖИМЕ НА ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЕ НАИБОЛЕЕ ОТВЕТСТВЕННЫХ ПОТРЕБИТЕЛЕЙ
ESTIMATION OF THE EFFICIENCY OF UNLOADING THE TRANSIT OF THE ELECTRIC NETWORK WITH A VOLTAGE OF 35 KV IN EMERGENCY MODE TO THE POWER SUPPLY OF THE MOST RESPONSIBLE CONSUMERS

Калентионок Е.В., к-т техн. наук, доцент, Волков А.А., ст. преподаватель
Белорусский национальный технический университет, г. Минск, Беларусь
E. Kalentionok, Candidate of technical Sciences, Associate Professor,
A. Volkau, Senior Lecturer,
Belarusian national technical University, Minsk, Belarus

Аннотация. На основе расчета и анализа нормальных и аварийных режимов определена пропускная способность электрической сети напряжением 35 кВ и выполнена оценка эффективности разгрузки транзита путем отключения части нагрузки для сохранения питания наиболее ответственных потребителей. Abstract. Transfer capacity of 35 kV electric network was determined according to the calculation and analysis of normal and emergency modes. The efficiency of transit unloading was evaluated using the method of partial load disconnecting to maintain the most critical consumers power supply.

Ключевые слова: электрическая сеть, пропускная способность, напряжение.
Key words: power grid, capacity, voltage.

ВВЕДЕНИЕ

Основной задачей электрических сетей является электроснабжение потребителей электроэнергией в требуемом объеме и установленного стандартом качества [1]. Однако, при неблагоприятном сочетании ремонтных и аварийных режимов приходится осуществлять отключение части нагрузки для сохранения питания наиболее ответственных потребителей.

ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

На рисунке 1 приведена электрическая сеть напряжением 110-35 кВ. В нормальном режиме потребители получают питание от независимых источников – подстанций (ПС) напряжением 110 кВ ПС Западная и ПС Восточная. Электрическая сеть напряжением 35 кВ работает в разомкнутом режиме. Результаты расчета нормального режима представлены на рисунке 2. Напряжения в узлах находятся в допустимых пределах. Перегрузки по току головных участков отходящих от ПС линий электропередачи нет.

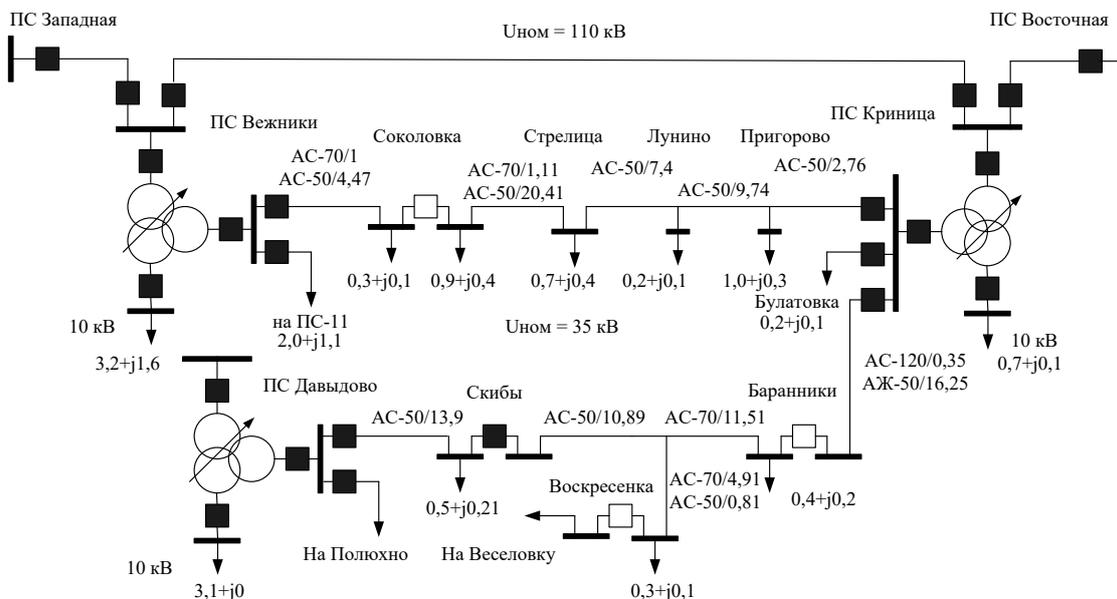


Рисунок 1 – Схема электрической сети

Для осуществления режима при такой схеме питания потребителей необходимо включить выключатель на ПС Баранники. При расчете режима с исходной нагрузкой режим не сходится. Для осуществления режима необходимо повысить напряжение на шинах ПС Давыдово, отключить нагрузку шин 35 кВ ПС Вежники (этих потребителей можно запитать от другого источника), и снижая нагрузку на шинах 10 кВ ПС Вежники, добиться сходимости режима при допустимом уровне напряжения в узлах электрической сети [2].

При неблагоприятном наложении аварийных отключений питающих линий напряжением 110 кВ ПС Западная – ПС Вежники и ПС Восточная – ПС Креница или при возникновении аварии на одной из них при проведении ремонтных отключений на другой питание потребителей возможно от еще одного независимого источника – подстанции напряжением 110/35 кВ ПС Давыдово.

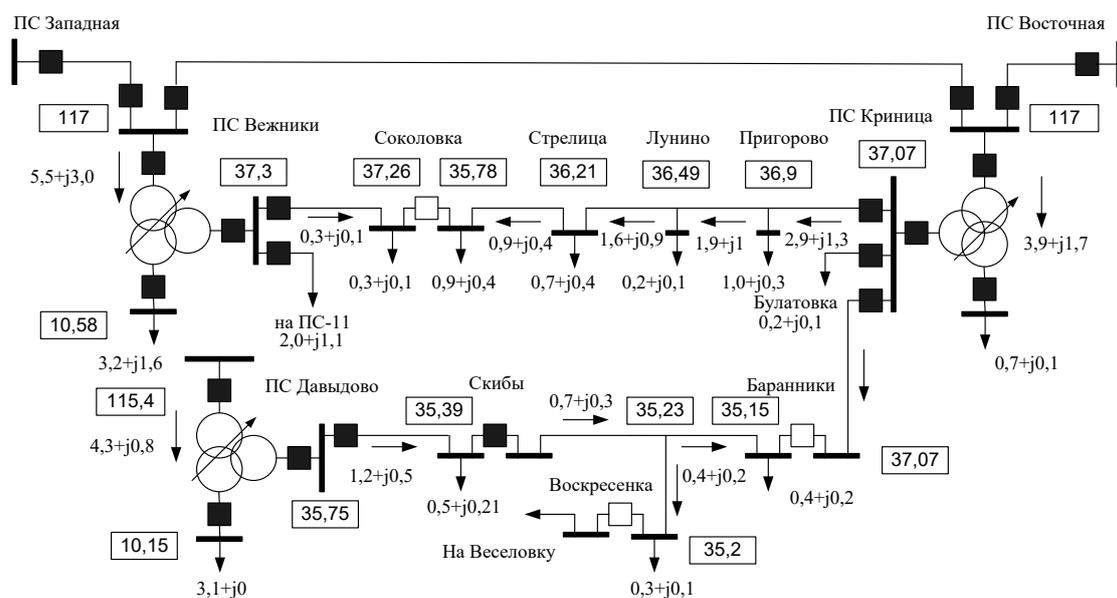


Рисунок 2 – Результаты расчета нормального установившегося режима электрической сети

Результаты расчета режима при снижении нагрузки до 0,9 МВт представлены на рисунке 3. Напряжения на шинах ПС Вежники составляют 30 кВ и 8,53 кВ и отклонения в сети не превышают 15 %.

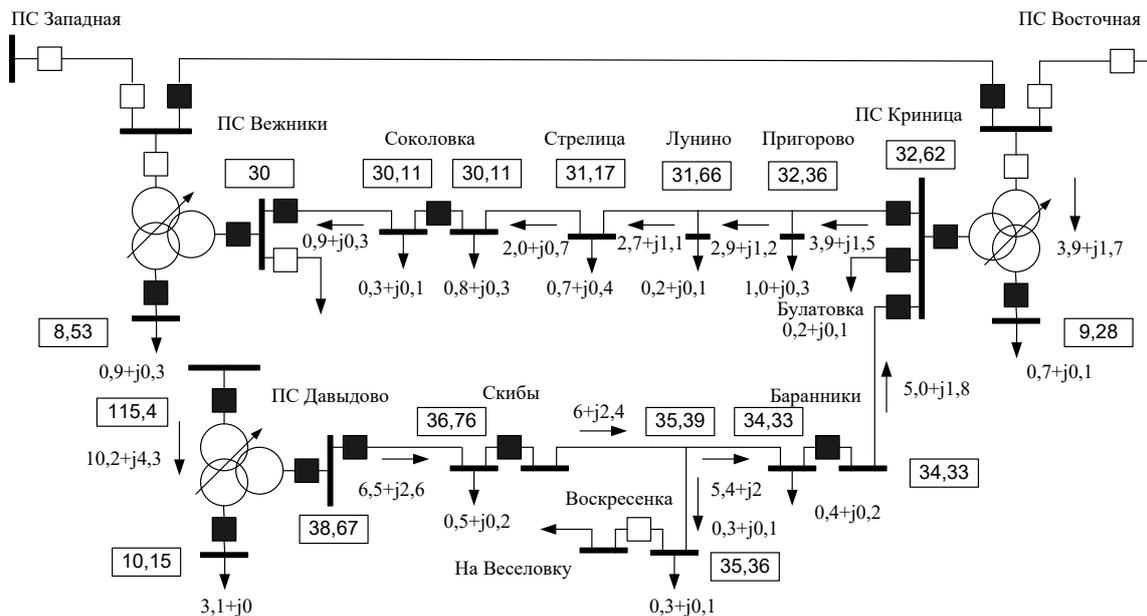


Рисунок 3 – Результаты расчета аварийного установившегося режима электрической сети

Определим, какой объем нагрузки наиболее ответственных потребителей ПС Вежники можно сохранить в работе за счет разгрузки узлов транзита. Для этого проводим серию расчетов режима, увеличивая объем отключаемой нагрузки узлов транзита электрической сети и одновременно увеличивая нагрузку на ПС Вежники. На рисунке 4 представлена зависимость передаваемой мощности до ПС Вежники от доли нагрузки транзитных узлов участка электрической сети 35 кВ.

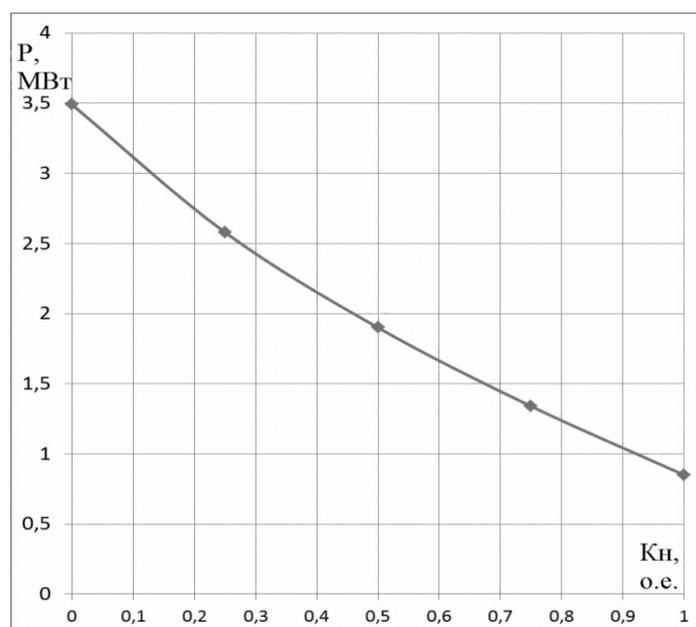


Рисунок 4 – Зависимость передаваемой мощности до ПС Вежники от доли нагрузки транзитных узлов участка электрической сети 35 кВ

Таким образом, при полном отключении нагрузки на транзитных ПС рассматриваемого участка электрической сети 35 кВ, мощность нагрузки потребителей ПС Вежники может быть увеличена с 0,9 МВт до 3,5 МВт. При этом следует обратить внимание, что загрузка трансформатора на ПС Давыдово в рассматриваемых режимах близка или несколько превышает номинальную мощность, но находится в допустимых пределах.

На рисунке 5 представлены эпюры отклонений напряжения в узлах транзита.

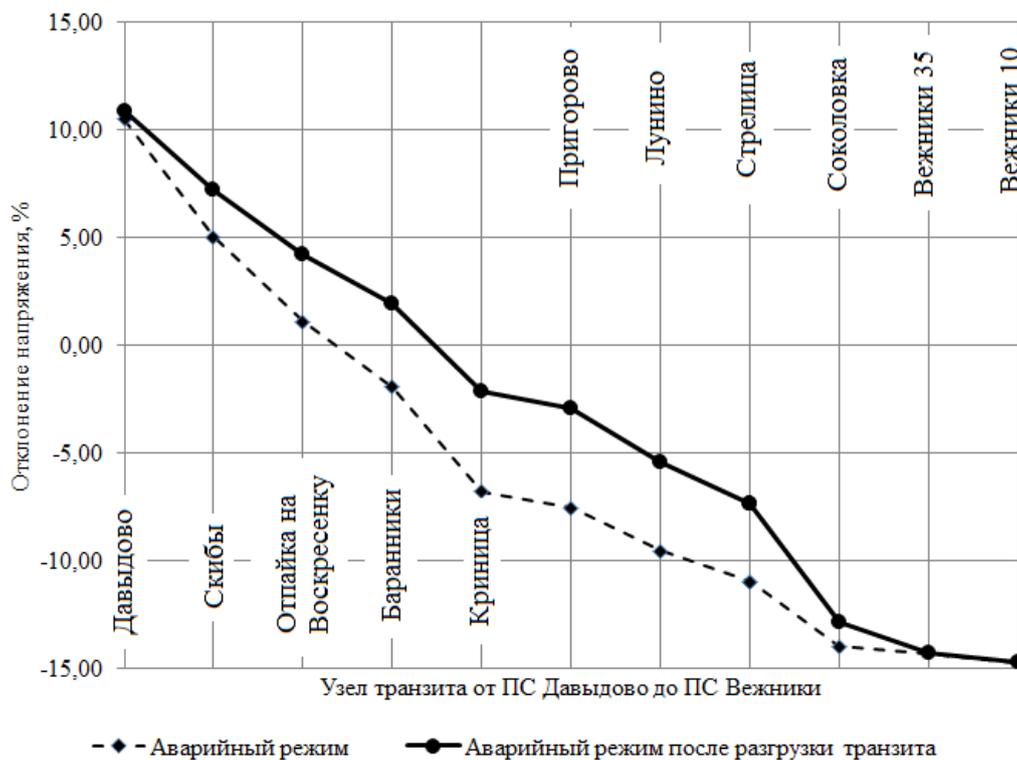


Рисунок 5 – Эпюры отклонений напряжения в узлах электрической сети

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате выполненной работы установили, что предел пропускной способности рассмотренной электрической сети в аварийном режиме определяется потерями напряжения. Без снижения нагрузки режим не существует. При полной разгрузке транзита из 5,2 МВт нагрузки на ПС Вежники можно сохранить в работе 3,5 МВт.

ЛИТЕРАТУРА

1. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения : ГОСТ 32144-2013. – Взамен ГОСТ 13109-97; введ. РБ 01.04.2016. – Минск : Государственный комитет по стандартизации Республики Беларусь, 2016. – 20 с.

2. Руководящие указания по устойчивости энергосистем : СТП 09110.20.560-05 (СО 09110.20.560-05)– Введен впервые; введ. РБ 01.03.2006. – Минск : ГПО “Белэнерго”, 2006. – 20 с.

УДК 621.315

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ
МИНИЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ В ГОРОДСКОЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СЕТИ
DETERMINATION OF THE EFFECTIVENESS OF THE USE OF MINI-POWER
PLANTS IN THE URBAN ELECTRICAL NETWORK

Старжинский А.Л., к-т техн. наук, доцент
Белорусский национальный технический университет, г. Минск, Беларусь
Starzhinsky A., Candidate of Technical Sciences, Docent
Belarusian national technical university, Minsk, Belarus

Аннотация. Определены значения критерия многоцелевой оптимизации при подключении миниэлектростанций к распределительному пункту или к системе глубокого ввода городской электрической сети.

Abstract. The values of the criterion for multi-purpose optimization have been determined when connecting mini-power plants to a distribution point or to a deep input system of a city electric network.

Ключевые слова: миниэлектростанция, критерий многоцелевой оптимизации.
Key words: mini-power plant, multipurpose optimization criterion.

ВВЕДЕНИЕ

Необходимость в строительстве собственной миниэлектростанции на котельных коммунальных хозяйств Республики Беларусь возникает по следующим причинам: – из-за потребности городской застройки, малых частных предприятий в тепловой энергии; – из-за необходимости обеспечения резервного питания ответственных потребителей; – значительной удаленности городской застройки (новые микрорайоны), малых частных предприятий от сетей энергосистемы; – из-за высоких тарифов на тепловую и электрическую энергию.

ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

На данном этапе работы нами исследуется возможность создания собственных миниэлектростанций с применением противодавленческих турбин на коммунальных котельных, а также оценке их количества, места подключения к системе электроснабжения, мощности и дисконтированных затрат.

Для определения эффективности сооружения миниэлектростанций на котельных нужна комплексная методика, учитывающая как дисконтированные затраты, так и показатели качества функционирования системы (изменение надежности системы распределительного пункта или системы глубокого ввода при внедрении генерирующих источников, влияние на окружающую среду, а также зависимости потребителя от поставщика энергии – энергосистемы). Здесь необходима оценка отдельно каждого из показателей с помощью метода многоцелевой оптимизации. Данный метод позволяют учитывать многие цели, имеющие как количественную, так и качественную характеристики.

Сооружение миниэлектростанций в узле потребления электроэнергии приводит: – к уменьшению стоимости одного киловатт-часа вырабатываемой на миниэлектростанции электроэнергии; – к изменению надежности электрообеспечения; – к уменьшению потребления электроэнергии узлом нагрузки от энергосистемы; – к увеличению уровня шума вблизи работы миниэлектростанции.

Миниэлектростанции, сооружаемые на коммунальных или производственных котельных малых и средних предприятий, использующих паровую турбину с противодавлением могут подключаться к энергосистеме посредством кабельных линий напряжением 6(10) кВ к системе распределительного пункта (РП) либо подключением генераторов миниэлектростанций к системе глубокого ввода.

Определим затраты на сооружения местных источников энергии (миниэлектростанций) подключаемых к РП 6–10 кВ городской электрической сети на основе дисконтированных затрат Z_d [1], т. е.

$$Z_d = E \cdot K + I + C \cdot B, \quad (1)$$

где E – коэффициент эффективности капитальных вложений, равен 0,095;

K – капитальные затраты;

I – ежегодные издержки;

C – стоимость использованного топлива, у.е./т.у.т.;

B – годовой расход топлива, т.у.т.

Пусть первоначально на шины РП 10 кВ работала миниэлектростанция с противодавленческой турбиной мощностью 3,5 МВт марки ТГ3,5АС/10,5 Р13/1,2 производства Калужского турбинного завода (такие турбины применяются в Республике Беларусь).

Если $m = 1, 2, 3, 4$ (что соответствует увеличению вырабатываемой мощности на собственной электростанции с 3,5 до 7,0; 10,5 и 14 МВт, дисконтированные затраты соответственно будут равны при длине КЛ в 1 км $Z_d = 937,97$ тыс. у.е при $m = 1$; $Z_d = 1872,67$ тыс. у.е при $m = 2$; $Z_d = 2807,37$ тыс. у.е при $m = 3$; $Z_d = 3742,07$ тыс. у.е при $m = 4$. Как видно из уравнения (1), стоимость кабельной линии длиной до 1 км слабо влияет на значение дисконтированных затрат.

Дисконтированные затраты по системе глубокого ввода напряжением 35 кВ.

$$Z_{дг}^{35} = E \cdot K_{Г35} + (p_l \cdot K_{0л} \cdot L_1 + p_n \cdot K_{n35} + \Delta W_1^{35} \cdot \beta_1) + (p_n \cdot K_{он} \cdot L \cdot m + p_n \cdot (3 \cdot K_{он} + K_{Г.уд} \cdot P_{уем}) \cdot m + \Delta W \cdot \beta_2) + m \cdot C \cdot v_{уд} \cdot W \cdot 10^{-9}, \quad (2)$$

где ΔW_1 – потери электроэнергии в системе глубокого ввода напряжением 35 кВ и выше;

ΔW – потери электроэнергии в кабельной линии, связывающей турбогенератор и РП;

β_1 – стоимость одного киловатт-часа потерянной электроэнергии в системе глубокого ввода;

β_2 – стоимость одного киловатт-часа потерянной электроэнергии в кабельной линии, связывающей турбогенератор и РП;

L_1 – длина воздушной линии системы глубокого ввода, км;

L – длина кабельной линии от турбогенератора до РП 6(10) кВ;

$K_{п35}$ – капитальные затраты на сооружение подстанций глубокого ввода напряжением 35 кВ;

$K_{0л}$ – стоимость сооружения одного километра воздушной линии электропередачи напряжением 35 кВ и выше на железобетонных двухцепных опорах;

$$p_l = 0,028; p_n = 0,094.$$

Система глубокого ввода 35 кВ ($n = 1$ – нагрузка системы глубокого ввода 3,5 МВт, $n = 2$ – нагрузка системы глубокого ввода 7 МВт, $n = 3$ – нагрузка системы глубокого ввода 10,5 МВт; $m = 1$ – нагрузка миниэлектростанции 3,5 МВт; $m = 2$, $P_r = 7$ МВт; $m = 3$, $P_r = 10,5$ МВт; $m = 4$, $P_r = 14$ МВт) $n = 0$ $m = 4$
 $Z_{дг}^{35} = 20,46L + 4012,73$ тыс. у.е.; $n = 1$ $m = 1$ $Z_{дг}^{35} = 20,46L + 1208,63$ тыс. у.е.; $n = 1$ $m = 2$ $Z_{дг}^{35} = 20,46L + 2143,33$ тыс. у.е.; $n = 1$ $m = 3$ $Z_{дг}^{35} = 20,46L + 3078,03$ тыс. у.е.; $n = 2$ $m = 1$ $Z_{дг}^{35} = 23,96L + 1287,67$ тыс. у.е.; $n = 2$ $m = 2$ $Z_{дг}^{35} = 23,96L + 2222,57$ тыс. у.е.; $n = 3$ $m = 1$ $Z_{дг}^{35} = 27,22L + 1392,07$ тыс. у.е.

Как видно из выражений, сооружение РП 6(10) кВ с подключением генераторов миниэлектростанций более целесообразно, чем сооружение систем глубокого ввода с подключением генераторов, т. к. $Z_{дг}^{35} > Z_d$.

Определим значения показателей надежности электрической сети при подключении генераторов миниэлектростанции. Для оценки надежности работы применяются показатели: интенсивность отказов λ и средняя наработка на отказ $t_{cp} t_{cp} = 1/\lambda$. Вероятность безотказной работы элемента сети на интервале времени t определяется $p = e^{-\lambda \cdot t}$.

Надежность работы питающей электрической сети оценим по ее работоспособности или неработоспособности относительно выключателей питающих нагрузку подключенных к шинам распределительного пункта или шинам 10 кВ системы глубокого ввода.

Результаты расчета надежности системы РП и системы глубокого ввода при отсутствии и подключении генераторов на шины 10 кВ представлены в таблице 1.

Уровень шума для одного турбогенератора марки ТГ3,5АС/10,5Р13/1,2 с противоаварийной турбиной мощностью 3,5 МВт не превышает 93 ДБА. Шум от нескольких источников

$$L = L_i + 10 \cdot \lg n, \quad (3)$$

где L_i – уровень звука или звукового давления одного источника;

n – число источников шума с одинаковым уровнем звукового давления.

Для двух турбогенераторов интенсивность звука составит по формуле (3) 96 ДБА, для трех 97,8 ДБА, для четырех 99 ДБА.

Таблица 1 – Значение вероятности безотказной работы распределительного пункта и системы глубокого ввода

Напряжение системы РП, кВ	Протяженность КЛ, км	Значение вероятности безотказной работы сети				
		без генераторов	Система РП при подключении генераторов на шины напряжение 10 кВ			
			Количество генераторов мощностью 3,5 МВт			
			1	2	3	4
10	1,0	0,9967	0,9973	0,9978	0,9981	0,9983
Напряжение системы глубокого ввода, кВ	Протяженность ВЛ, км	Значение вероятности безотказной работы сети				
		без генераторов	Система глубокого ввода при подключении генераторов на шины напряжением 10 кВ			
			Количество генераторов мощностью 3,5 МВт			
			1	2	3	4
35	1,0	0,2734	0,5379	0,7061	0,8113	0,8788
	10,0	0,1421	0,4551	0,6539	0,7783	0,8579

Произведем оценку эффективности вариантов реконструкции питающей сети напряжением 10 кВ в условиях роста нагрузки как путем сооружения дополнительных питающих линий, так и путем максимального приближения наивысшего экономически целесообразного напряжения к распределительному пункту, т. е. путем сооружения глубоких вводов с учетом подключения к распределительному пункту или системе глубокого ввода генераторов миниэлектростанции при одновременном обеспечении: минимума дисконтированных затрат (цель № 1); максимальной вероятности безотказной работы (цель № 2); минимальной зависимости от энергосистемы (цель № 3); минимального уровня звукового давления (цель № 4);

Структуру целевой функции E представим в виде среднеарифметического значения [2]

$$E = \sum_{i=1}^n v_i \cdot e_i \rightarrow \max, \quad (4)$$

где v_i – оценка важности i -ой ($i = 1, 2, \dots, n$) цели;
 e_i – относительная эффективность i -ой цели.

Таблица 2 – Значения критерия оптимизации

Варианты	n _г , шт	Номер варианта оценки важности цели				
		1	2	3	4	5
Система распределительного пункта без генераторов	0	0,7521	0,8017	0,8013	0,6037	0,9003
Система глубокого ввода без генераторов напряжением 35 кВ	0	<u>0,46</u>	<u>0,4926</u>	<u>0,423</u>	<u>0,3702</u>	<u>0,4529</u>
		0,3671	0,3699	0,3221	0,2956	0,3038
Система распределительного пункта при подключении генераторов на шины напряжением 10 кВ	1	0,4995	0,4382	0,5094	0,4023	0,5574
	2	0,4714	0,3965	0,577	0,3811	0,5175
	3	0,4657	0,3856	0,5725	0,3806	0,5057
	4	0,7	0,5696	0,76	0,76	0,5944
Система глубокого ввода 35 кВ при подключении генераторов на шины напряжением 10 кВ	1	<u>0,3683</u>	<u>0,3202</u>	<u>0,4024</u>	<u>0,2973</u>	<u>0,3473</u>
		0,3428	0,296	0,3654	0,2760	0,3065
	2	<u>0,3941</u>	<u>0,3313</u>	<u>0,4567</u>	<u>0,3193</u>	<u>0,3938</u>
		0,3795	0,3184	0,4346	0,3076	0,3705
	3	<u>0,4174</u>	<u>0,3457</u>	<u>0,4964</u>	<u>0,3419</u>	<u>0,4284</u>
		0,4081	0,3375	0,4824	0,3345	0,4136
	4	<u>0,6693</u>	<u>0,5444</u>	<u>0,7115</u>	<u>0,7354</u>	<u>0,5453</u>
		0,6636	0,5395	0,7028	0,7309	0,5362

Примечание: числитель – при длине питающей линии 1 км; знаменатель – при длине питающей линии 10 км.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Из полученных результатов видно, что присоединение генераторов миниэлектростанции на шины 10 кВ распределительного пункта не выгодно, так как критерий оптимизации имеет меньшее значение для всех вариантов оценки важности целей в сравнении с их отсутствием. Идея подключения генераторов миниэлектростанции к шинам 10 кВ системы глубокого ввода не лишена оснований, особенно при одинаковой важности всех рассматриваемых целей и выделении в качестве наиболее важных двух целей – минимума дисконтированных затрат и максимума надежности работы сети. Значения критерия оптимизации имеет наибольшее значение при применении большего числа генераторов, т. е. трех или четырех штук.

ЛИТЕРАТУРА

1. Падалко, Л.П. Методы оценки финансово-экономической эффективности инвестирования энергетических объектов / Л.П. Падалко, И.В. Янцевич. – Минск: БНТУ, 2003. – 54 с.
2. Арзамцев, Д.А. Введение в многоцелевую оптимизацию энергосистем / Д.А. Арзамцев. – Свердловск. изд. УПИ, 1984. – 84 с.

УДК 621.316.1; 631.371

К ВОПРОСУ О ВЫБОРЕ ЗОН НЕЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ АДАПТИВНОЙ
СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ДВУХТРАНСФОРМАТОРНОЙ
ПОТРЕБИТЕЛЬСКОЙ ПОДСТАНЦИИ
ON THE ISSUE OF THE CHOICE OF INSENSITIVITY ZONES OF THE
ADAPTIVE CONTROL SYSTEM OF THE TWO-TRANSFORMER CONSUMER
SUBSTATION

Счастный В.П., к-т. техн. наук, доцент
Белорусский национальный технический университет, г. Минск, Беларусь
V. Schasny, Candidate of Technical Sciences. Docent
Belarusian National Technical University, Minsk, Republic of Belarus

Аннотация. В статье рассмотрены вопросы управления оборудованием адаптивной системы двухтрансформаторной потребительской подстанции, необходимость выбора зон нечувствительности срабатывания оборудования с целью избежания нежелательных переключений.

Annotation. The article discusses the management of the adaptive system of the two-transformer consumer substation, the need to select areas of insensitivity of the equipment to avoid unwanted switches.

Ключевые слова: трансформаторная подстанция, адаптивная система, компенсация реактивной мощности, зоны нечувствительности.

Keywords: transformer substation, adaptive system, removable power compensation, insensitivity zones.

ВВЕДЕНИЕ

Использование высокотехнологичного оборудования на современных промышленных предприятиях с регулируемым электроприводом на базе управляемых тиристорных устройств, источников бесперебойного питания электроприемников, современных аппаратов электросварки и дуговых электрических печей, установок индукционного нагрева, газоразрядных источников излучения приводит к изменению характера и баланса нагрузок в электрических сетях. Увеличивается доля нагрузки с нелинейными характеристиками, уменьшается пропускная способность электрических сетей, ухудшается качество электроэнергии и надежность электроснабжения. Не обеспечиваются нормальные условия работы электроприемников, возрастают потери. Важную роль в нормальном функционировании электрообеспечения предприятия играют потребительские трансформаторные подстанции, их надежность и экономичность. Они должны быть с адаптивной системой управления оборудованием. Эта система должна иметь возможность регулирования напряжения, уровня реактивной мощности и высших гармоник тока и напряжения, автоматическое повторное включение, оперативное переключение ввода-вывода трансформаторов на параллельную работу, включение и отключение коммутационных аппаратов отходящих линий низкого напряжения, блокировки от обратной трансформации,

обеспечивать взаимосвязь регулирования различных параметров и релейной защиты. Адаптивная система управления оборудованием трансформаторной подстанции должна иметь управляющую связь с более высоким уровнем энергосистемы.

ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

Построение адаптивной системы управления оборудованием трансформаторной подстанции с применением цифровых мультиметров и анализаторов должно выполняться с учетом возможности расширения своих функциональных возможностей. Набор оборудования, коммутационных аппаратов и функциональных возможностей адаптивной системы должен быть экономически обоснован.

При выборе архитектуры построения адаптивной структуры управления оборудованием конкретной потребительской трансформаторной подстанцией необходимо учитывать ряд факторов: наличием на предприятии дежурного персонала (диспетчерской), существующую степень автоматизации, аналоговых или цифровых каналов связи, возможность размещения оборудования в распределительном пункте подстанции с необходимыми температурными условиями, финансовые возможности предприятия др.

Наиболее дорогостоящая архитектура, представляющая реализацию функции измерения, управления, защита, передачи данных и т. д. для трансформаторной подстанции с использованием многочисленных мультиметров с программным обеспечением и мощные серверные платформы, расположенные в серверном помещении и способные обрабатывать большое количество данных и решать множество алгоритмических задач в режиме реального времени. Для потребительских подстанций это недоступно. Можно расширить возможности имеющихся систем управления и защиты. В этом случае использовать устройства, отвечающие за отдельные функции. Например, на каждый фидер установить цифровой терминал с контроллером присоединения, заменить блок аналогового ввода и дискретного ввода-вывода на цифровой интерфейс, добавить аналоговые и дискретные сопряжители, сетевые коммутаторы и т. д. Разработанных устройств для достижения этой архитектуры с использованием поддержки протоколов HART, Modbus и другие достаточно много. Однако, такой подход тоже весьма затратный для потребительской подстанции. Наиболее приемлемый, на мой взгляд, использование основного регулятора (сервера) на базе сервисных платформ небольшой производительности, позволяющего выполнять наиболее необходимые поставленные задачи для потребительской трансформаторной подстанции.

На рисунке 1 представлена предлагаемая схема адаптивной системы управления потребительской двухтрансформаторной подстанцией.

Двухтрансформаторная подстанция содержит набор силового оборудования, коммутационных аппаратов, датчиков тока и напряжения, расположенных в распределительных устройствах высокого и низкого напряжения.

Блоки силового оборудования отходящих линий снабжены коммутационными аппаратами, датчиками тока и напряжения, обеспечивающими возможность контроля состояния аппаратов и формирования управляющих сигналов для дистанционного управления с блока регулятора. Принцип работы регулятора основан на анализе поступающих сигналов с блоков контроля токов и

напряжений, анализаторов качества напряжений, формирования управляющих сигналов с помощью программного обеспечения и заданных режимов [1]. Это позволяет управлять коммутационными аппаратами, осуществлять контроль их включения и отключения, выбирать оптимальный уровень компенсации реактивной мощности, высших гармоник тока и напряжения, не выходя за допустимые пределы уровня напряжения. Количество ступеней регулирования установки компенсации реактивной мощности (КРМ) выбирается после предварительного обследования объекта и установки надбавки с помощью переключателя без возбуждения на трансформаторах с учетом требований к трансформаторам при параллельной работе [2].

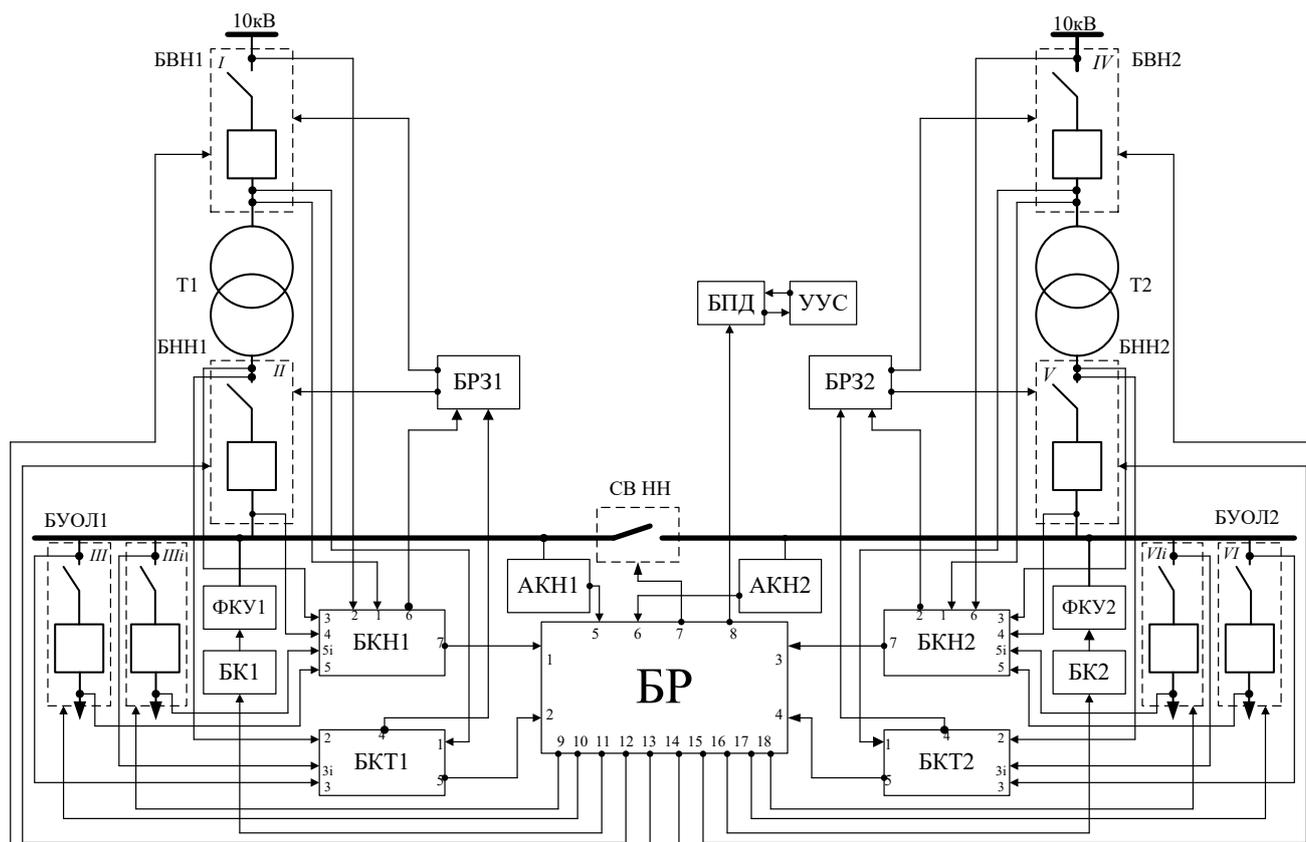


Рисунок 1 – Схема адаптивной системы управления потребительской двухтрансформаторной подстанции: БВН1, БВН2, БНН1, БНН2 – управляемый блок силового оборудования высокого и низкого напряжения; БКН1, БКН2 – блок контроля напряжений; БКТ1, БКТ2 – блок контроля токов; ФКУ1, ФКУ2 – фильтро-компенсирующее устройство; БК1, БК2 – блок коммутации; АКН1, АКН2 – анализатор качества напряжения; БР – блок регулятор; СВНН – секционный выключатель низкой стороны; Т1, Т2 – силовой трансформатор; БРЗ1, БРЗ2 – блок релейной защиты; БУОЛ1, БУОЛ2 – управляемый блок силового оборудования отходящих линий; БПД – блок передачи данных; УУС – удаленная управляющая связь с диспетчерской и более высоким уровнем энергосистемы

В представленной схеме не используются КРМ с блоками статических конденсаторов, так как они очень чувствительны к перегрузкам по току, которые зависят от несинусоидальности напряжения. Для подавления высших гармоник требуются силовые фильтры, представляющие собой последовательно включенные

емкости и индуктивности с частотой настройки (резонанса) на конкретную гармонику сети [3]. Поэтому, целесообразно использовать фильтро-компенсирующие устройства (ФКУ). Работа ФКУ в представленной схеме основана на анализе токов, напряжений, реактивной мощности, токов высших гармоник при заданной последовательности подключения отдельных ступеней. В программе формирования управляющих сигналов взят порядок возрастания номера гармоник. Токораспределение высших гармоник производится в соответствии с алгоритмом переключения ступеней от низшего уровня к высшему и наоборот, с контролем тока блока статических конденсаторов, включенных для компенсации реактивной мощности.

Наиболее сложная задача при разработке адаптивной системы состоит в учетывании факторов взаимовлияния различных режимов регулирования и оперативных переключений на трансформаторной подстанции. Согласно заданному режиму регулирования реактивной мощности, отклонения напряжения, обеспечения синусоидальности напряжения на стороне низшего напряжения подстанции должны поддерживаться в допустимом диапазоне [4]. Предел между минимальным и максимальным значениями заданных режимов определяется как уровень безопасности. В этом уровне формируются команды «повышение» - «понижение», «включение» - «отключение». Однако, особенно при резко переменной нагрузке, наличии технических средств встречного регулирования (РПН), возникают кратковременные величины формирующие вышеуказанные команды. Поэтому, во избежании нежелательных переключений, необходимо вводить зоны нечувствительности. При этом, если несколько режимов регулирования воздействуют на один и тот же показатель, следует задавать различные выдержки по времени и «преорететность». Например, сформированы команды на включение секции ФКУ и переключения надбавки на РПН. Зона нечувствительности для РПН выше чем ФКУ, так как «преоретет» ФКУ в компенсации реактивной мощности, что приводит к изменению уровня напряжения. Технических средств для встречного регулирования напряжения на шинах 0,4 кВ потребительских подстанций нет, вследствие чего при максимальной нагрузке отклонения напряжения на шинах 0,4 кВ обычно отрицательные, а при минимальной нагрузке, положительные. Это надо учитывать при выборе надбавки на трансформаторе подстанции с учетом выбора ФКУ конкретного объекта и разработке программного обеспечения.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Использование предложенного устройства адаптивного управления потребительской двухтрансформаторной подстанции позволяет повысить качество электроэнергии, пропускную способность сетей и их надежность, уменьшить потери. Правильный выбор зон нечувствительности в пределах уровня безопасности требуемых параметров регулирования позволяет адаптивной системе управления трансформаторной подстанции поддерживать в автоматическом режиме уровень напряжения, реактивную мощность, уровень высших гармоник, что благоприятно сказывается на работе релейной защиты, отсутствии отказов и ложных срабатываний оборудования.

Адаптивная система управления потребительской двухтрансформаторной подстанцией может управляться и удаленно. Все параметры работы подстанции архивируются и доступны как в текущем времени, так и за определенный период. Информация хранится в блоке памяти регулятора и по запросу, через блок передачи данных, выводится на диспетчерский пункт, а также предоставляется в другие организации. На удаленном блоке управляющей связи с диспетчерской или более высоким уровнем энергосистемы существует возможность, как принимать информацию, так и давать команду на включение или отключение ФКУ, управлять коммутационными аппаратами.

ЛИТЕРАТУРА

1. Счастный, В.П. Устройство управления оборудованием двухтрансформаторной подстанции при параллельной работе трансформаторов / В.П. Счастный, А.И. Зеленкевич // Энергосбережение – важнейшее условие инновационного развития АПК: материалы Междунар. науч.-техн. конф. – Минск: БГАТУ, 2019. – С. 55–58.

2. Счастный, В.П. Особенности выбора установок компенсации реактивной мощности / В.П. Счастный, А.И. Зеленкевич // Техническое и кадровое обеспечение инновационных технологий в сельском хозяйстве: материалы Междунар. науч.-техн. конф., в 2 ч. – Минск: БГАТУ, 2019. – Ч. 1. – С. 393–394.

3. Прокопчик, В.В. Повышение качества электроснабжения и эффективности работы электрооборудования предприятий с непрерывными технологическими процессами: Монография / Под ред. д.т.н., проф. Б.И. Кулрина. – Гомель: Учреждение образования «Гомельский государственный технический университет имени П.О. Сухого», 2002 – 283 с., ил.

4. ГОСТ 32144-2013 Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения.

УДК 629.114.2

ПРИМЕНЕНИЕ ДАТЧИКОВ В СИСТЕМЕ
АВТОМАТИЗИРОВАННОГО УПРАВЛЕНИЯ ОСВЕЩЕНИЕМ
APPLICATION OF SENSORS IN THE AUTOMATED
LIGHTING CONTROL SYSTEM

Гаврилович О.Н., ст.преподаватель
Белорусский национальный технический университет, г.Минск, Беларусь
O. Gavrilovich, Senior Lecturer,
Belarusian National Technical University, Minsk, Belarus

Аннотация: Работа системы автоматизированного управления освещением включает в себя координацию работы, настройку и управление различными датчиками, показания которых влияют на регулирование качества и количества искусственного освещения. Такие датчики могут применяться индивидуально, но комбинированное их использование позволяет обеспечить более выгодные сценарии работы осветительных установок, расширить возможности и повысить эффективность всей системы автоматизированного управления освещением.

Abstract. The work of the automated lighting control system includes the coordination of work, configuration and control of various sensors, the readings of which affect the regulation of the quality and quantity of artificial lighting. Such sensors can be used individually, but their combined use allows you to provide more favorable scenarios for the operation of lighting installations expand the capabilities and increase the efficiency of the entire automated lighting control system.

Ключевые слова: система автоматизированного управления освещением, осветительные установки, датчики, энергосбережение.

Keywords: automated lighting control system, lighting installations, sensors, energy saving.

ВВЕДЕНИЕ

Системы автоматизированного управления освещением позволяют наиболее экономично использовать осветительные установки в каждый момент времени. Данные системы с помощью датчиков учитывают наличие и интенсивность в здании естественного освещения, поддерживают необходимый уровень искусственного освещения, также учитывают присутствие людей в помещении, время суток и день недели, что позволяет снизить расход электроэнергии на нужды освещения.

ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

Система автоматизированного управления освещением состоит из нескольких основных блоков, связанных друг с другом посредством проводной или беспроводной сети.

Нижним уровнем данной системы являются датчики освещенности, движения, присутствия, сигналы с которых идут на следующие уровни системы, которые определяют дальнейшие стратегии управления освещением.

Применение датчика освещенности позволяет регулировать мощность осветительных установок для поддержания заданного уровня освещенности в помещении, тем самым уменьшая либо увеличивая световой поток используемых ламп в зависимости от интенсивности присутствующего естественного освещения в рассматриваемом помещении. Датчик движения позволяет включать искусственное освещение независимо от существующей на тот момент освещенности, когда в поле зрения чувствительного элемента данного датчика появляются движения. Как правило, такой датчик используется совместно с таймером, отстраивающим количество времени включения после последнего зафиксированного движения. Индивидуальное его использование целесообразно в помещениях с нерегулярным пребыванием в них людей, таких как коридоры, лестничные площадки и другие. Датчик присутствия часто используется в качестве датчика движения либо вместо него, чувствительный элемент данного датчика распознает человека в зоне своего контроля и дает сигнал на включение освещения в помещении на время присутствия человека в нем. Такой датчик имеет большую чувствительность и соответственно более широкую область применения, чем датчик движения.

Комплексное использование рассмотренных датчиков, то есть последовательное подключение датчика движения (либо датчика присутствия) и датчика освещенности, позволяет применить более выгодное решение в случае такой необходимости, т. е. учесть два фактора: снижение уровня естественного освещения в помещении и наличие человека в нем. Очевидна большая эффективность и экономичность данного комплексного варианта, чем всех выше рассмотренных по отдельности, если необходимый уровень освещенности нужно обеспечивать в помещении с наличием естественного освещения и не постоянным пребыванием в нем людей.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Комбинированное применение датчиков в системе автоматизированного управления электрическим освещением позволяет более рационально управлять осветительными установками, их световым потоком, временем и продолжительностью включения, а также более эффективно решать задачи энергосбережения в сфере электрического освещения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Автоматическое управление освещением – это просто [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://elektrik-a.su/osveshhenie/obshhaya-chast/avtomaticheskoe-upravlenie-osveshheniem-385>. – Дата доступа: 10.05.2021

2. Датчики автоматического управления освещением [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://elektroshkola.ru/osveshhenie/datchiki-avtomaticheskogo-upravleniya-osveshheniem/>. – Дата доступа: 11.05.2021

УДК 621.32

ОСОБЕННОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ЛИНИЙ С ДВУСТОРОННИМ
ПИТАНИЕМ В НАРУЖНОМ ОСВЕЩЕНИИ
FEATURES OF APPLICATION OF OUTDOOR LIGHTING LINE
WITH BILATERAL SUPPLY

Калечиц В.Н. ст. преподаватель
Белорусский национальный технический университет, г. Минск, Беларусь
V. Kalechyts, Senior Lecturer
Belarusian national technical university, Minsk, Belarus

Аннотация. Двустороннее питание – это одна из мер по обеспечению оптимальных режимов работы линий наружного освещения. Оптимальность работы таких линий определяется решениями на стадии проектирования и реальными эксплуатационными условиями.

Abstract. Bilateral supply is one of the measures to provide optimal operating modes of outdoor lighting lines. Optimal operation of such lines is determined by decisions at the design stage and real operating conditions.

Ключевые слова: наружное освещение, светодиодные светильники, режим работы, линия с двусторонним питанием.

Keywords: outdoor lighting, LED luminaires, lighting quality, mode of operation, line with bilateral supply.

ВВЕДЕНИЕ

Осветительные линии магистральных улиц, кольцевых дорог относятся к категории А в соответствии с [1], их протяженность может быть около километра и более. Для таких линий целесообразно предусмотреть двустороннее питание, учитывая особенности эксплуатации.

ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

Работа линии в режиме двустороннего питания позволяет повысить надежность электроснабжения. Схему разрабатывают с расчетом устойчивой работы всех светильников при отсутствии напряжения со стороны любого из пунктов питания.

В [2], [3] рассмотрена методика расчета линии с двусторонним питанием, создана программа в среде Mathcad, которая учитывает максимально возможную исходную информацию для получения точных параметров разных режимов работы без учета высших гармоник и с их учетом. Общая информация по расчету приведена в таблице 1.

Осуществляя расчет параметров линии с двусторонним питанием, важно правильно выбрать площадь сечения жил проводников. Расчетное отклонение напряжения осветительной линии для наиболее удаленного светильника не более 5 % от номинального напряжения сети, для наименее удаленных – 2,5 %; по допустимому нагреву [1].

При двустороннем питании напряжение на зажимах светильника, расположенного посередине линии, должно быть не менее $0,95 \cdot 230 = 218,5$ В; на ближайшем к пункту питания светильнике не менее $0,975 \cdot 230 = 224,2$ В.

Таблица 1 – Задаваемая исходная информация и получаемые результаты расчетов линий с двусторонним питанием

Исходная информация	Результаты расчетов без и с учетом высших гармоник
<p>Расстояние от трансформаторных подстанций 10/0,4 кВ до пунктов питания</p> <p>Полная мощность светильников (на основании зависимостей тока и активной мощности от величины напряжения)</p> <p>Удаленность пункта питания до ближайшей опоры, расстояние между опорами</p> <p>Количество светильников на опоре, схема подключения светильников</p> <p>Удельные активное и индуктивное сопротивление проводников в зависимости от площади сечения жилы</p> <p>Уровни напряжения в фазах пунктов питания в зависимости от варианта работы линии (вечерний и ночной режимы, возможные изменения в работе линии при диммировании и т. д.)</p>	<p>Напряжение в узлах схемы</p> <p>Токи, потеря активной и реактивной мощностей на участках линии</p> <p>Активная, реактивная и полная мощности в начале n-го участка, а также для каждого светильника</p> <p>Падения напряжения на участках линии</p> <p>Расход электроэнергии в зависимости от режима работы</p>

В общем случае линия с двусторонним питанием имеет меньшую площадь сечения жил (по сравнению с линией с односторонним питанием). При использовании светильников с газоразрядными лампами ДНаТ и ДРИ в случае возможного включения такой линии при одностороннем питании существует вероятность частичного зажигания ламп (гарантированное включение таких светильников обеспечивается при отрицательном отклонении напряжение не более 10 %). Применяя светодиодные источники света, такая проблема отсутствует.

К недостаткам линий с двусторонним питанием следует отнести усложнение управления и реализации защиты, исключение режимов работы с перетоками мощностей.

Согласованность в управлении заключается в одновременности включения и отключения пунктов питания. Также при потере питания на одном из пунктов должен быть произведен переход на режим одностороннего питания, исключающий возможные перетоки мощностей.

Это можно реализовать с помощью автоматизированных систем управления наружным освещением, где имеется возможность сбора информации по осветительным сетям с последующим корректированием режимов работы линий. Получать данные о состоянии линий и управлять их параметрами можно на уровне пунктов питания. Анализируя полученную информацию, можно выявлять отклонение параметров качества электроэнергии от допустимых норм с последующим принятием мер по улучшению работы осветительной сети

(задействование фильтров высших гармоник, вольтодобавочных трансформаторов).

При двустороннем питании перетоки мощностей могут появиться по причине разности напряжений в пунктах питания, что следует учитывать при проектировании и расчете таких линий.

Наличие перетоков мощностей приведет к увеличению тока и потерь мощностей в линии, вызывающих перегрев проводников. В случае перетоков мощностей необходимо принять меры по изменению напряжения или осуществить переход на режим одностороннего питания до устранения причин отклонения напряжения в пунктах питания.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

При оценке возможности задействования двустороннего питания линии следует производить расчеты при разных вариантах работы линии (нормальная эксплуатация; с отклонениями напряжений в пунктах питания от номинальных значений; с односторонним питанием; с наличием несимметричности параметров линии; при возможных режимах экономии электроэнергии в ночное время).

ЛИТЕРАТУРА

1. Наружное освещение городов, поселков и сельских населенных пунктов. Правила проектирования: ТКП 45-4.04-287-2013. Минск: Министерство архитектуры и строительства, 2013. – 19 с.

2. Козловская В.Б. Расчет режимных параметров линии наружного освещения линии с двусторонним питанием. Часть 1 / В.Б. Козловская, В.Н. Калечиц // Энергетика. Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ. – 2016. Т. 59. – № 6. – С. 549–562.

3. Козловская В.Б. Расчет режимных параметров линии наружного освещения с двусторонним питанием. Часть 1 / В.Б. Козловская, В.Н. Калечиц // Энергетика. Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ. – 2017. Т. 60. – № 1. – С. 30–40.

УДК 624.97

ВЕТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКАЯ УСТАНОВКА С АВТОМАТИЧЕСКИМ
РЕГУЛЯТОРОМ ВЫХОДНОГО НАПРЯЖЕНИЯ
WIND POWER PLANT WITH AUTOMATIC OUTPUT
VOLTAGE REGULATOR

Горноста́й А.В., к-т. техн. наук, доцент
Белорусский национальный технический университет, г. Минск, Беларусь
A. Gornostay, Candidate of Technical Sciences, Docent
Belarusian national technical university, Minsk, Belarus

Аннотация. Предложена схема ветроэнергетической установки с автоматическим регулятором выходного напряжения, выполненном с использованием трансформатора с регулировочной обмоткой.
Abstract. A scheme of a wind power plant with automatic output regulator, made using a transformer with adjustment winding, is proposed.

Ключевые слова: Ветроэнергетика, ветрогенератор.

Keywords: WindEnergy, WindGenerator.

ВВЕДЕНИЕ

Одной из важных проблем в ветроэнергетике является получение на выходе ветрогенератора постоянного напряжения вне зависимости от скорости ветра. Нами предложен один из возможных вариантов решения этой проблемы.

ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

Ветроэнергетическая установка содержит ветродвигатель 1, генератор 2, датчик 3 частоты вращения генератора, коммутатор нагрузок 4, нагрузку 5 и регулятор мощности 6, включающий трансформатор 7 с регулировочной обмоткой 8, блок управления 9, механический переключатель под нагрузкой 10, электропривод 11, подвижные контакты 12, 13 и неподвижные контакты I–VI переключателя, вал 14 электропривода, ограничительные сопротивления 15 и 16, коммутирующие элементы 17 и 18.

Структурная схема ветроэнергетической установки представлена на рисунке 1[1].

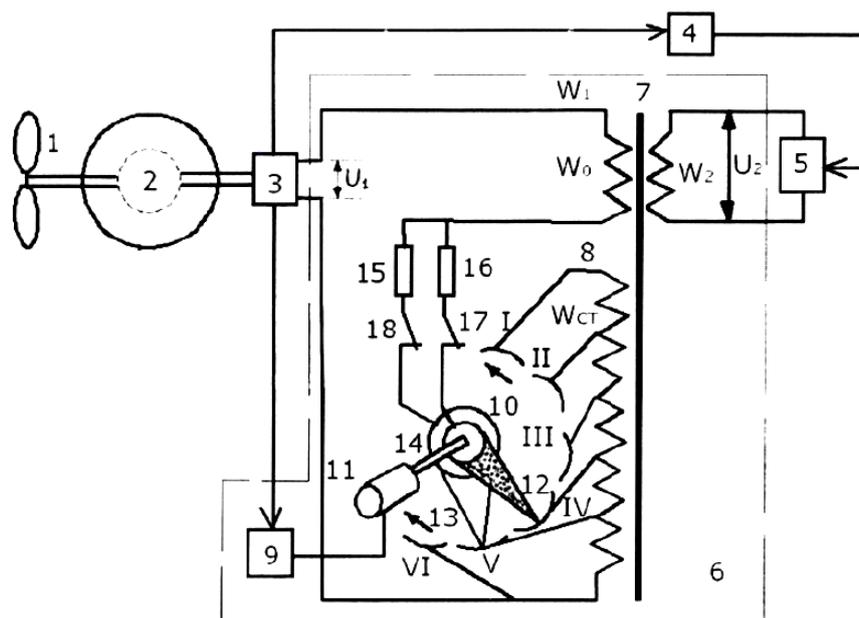


Рисунок 1 – Структурная схема ветроэнергетической установки

Датчик 3 частоты вращения генератора своими выходами подключен к входам регулятора мощности 6 и через коммутатор нагрузок 4 – к нагрузке 5. Выходы регулятора мощности 6 подключены к нагрузке 5. Регулятор мощности 6 выполнен на регулируемом трансформаторе 7 с изменяемым коэффициентом трансформации.

При малой скорости ветра, когда напряжение U_1 небольшое, датчик 3 выдает сигнала блок управления 9, пропорциональный производимой ветроэнергетической установкой малой мощности. При этом блок управления 9 вырабатывает сигнал, который, воздействуя на электропривод 11, вращает переключатель 10 против часовой стрелки. Подвижные контакты 12 и 13 с помощью вала 14 последовательно перемещаются по неподвижным контактам VI–I до такого положения, когда выходное напряжение U_2 трансформатора 7 не станет соответствовать вырабатываемой генератором 2 в данный момент времени мощности. При этом напряжение U_2 уменьшается и, когда оно достигнет вышеуказанного значения, блок управления 9 выдает сигнал на останов электропривода 11.

С ростом скорости ветра повышается напряжение и на выходе генератора 2, датчик 3 выдает сигнал в блок управления 9, пропорциональный возросшей мощности ветроэнергетической установки. При этом блок управления 9 вырабатывает сигнал, который, воздействуя на электропривод 11, вращает переключатель 10 по часовой стрелке. Подвижные контакты 12 и 13 с помощью вала 14 последовательно перемещаются по неподвижным контактам I–VI до такого положения, когда выходное напряжение U_2 трансформатора 7 не станет соответствовать вырабатываемой генератором 2 в данный момент времени возросшей мощности. При этом напряжение U_2 увеличивается и, когда оно достигнет вышеуказанного значения, блок управления 9 выдает сигнал на останов электропривода 11.

Указанный процесс периодически повторяется по закону изменения скорости ветра. Выходное напряжение U_2 при этом изменяется в соответствии с вырабатываемой ветроэнергетической установкой мощностью. Постоянство частоты вращения ветродвигателя 1 и генератора 2 в процессе такого управления обеспечивается изменением величины подключаемой электрической нагрузки 5 с помощью коммутатора нагрузок 4.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, благодаря использованию трансформатора с изменяемым коэффициентом трансформации в процессе регулирования мощности удается обеспечить плавность регулирования и хорошую форму кривой выходного напряжения ветроэнергетической установки, чем достигается повышение эффективности преобразования энергии в ветроэнергетической установке.

ЛИТЕРАТУРА

1. Горноста́й А.В., Ролик Ю.А., Гончар А.А. Патент на полезную модель РФ 6550, опубл. 30.08.2010.

УДК 621.315

НЕДОСТАТКИ ИЗОЛЯЦИИ ИЗ СПЭ И МЕТОДЫ ИХ ПРЕОДОЛЕНИЯ
ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ КАБЕЛЕЙ
DISADVANTAGES OF XLPE INSULATION AND METHODS OF THEIR
OVERCOMING WHEN USING CABLES

Протасеня М.Л., ст. преподаватель
Белорусский национальный технический университет, г. Минск, Беларусь
M. Protasenya, Senior Lecturer
Belarusian national technical university, Minsk, Belarus

Аннотация. на основе анализа эксплуатации кабельной продукции в различных условиях приведены недостатки изоляции из СПЭ и предложены методы их минимизации.

Abstract. based on the analysis of the operation of cable products in various conditions, the disadvantages of XLPE insulation are given and methods for their minimization are proposed.

Ключевые слова: изоляция, кабели; сшитый полиэтилен.

Keywords: insulation, cables; cross-linked polyethylene.

ВВЕДЕНИЕ

Уникальные свойства сшитого полиэтилена (РЕХ или СПЭ), такие как прочность, устойчивость к термическим, физическим и механическим нагрузкам водонепроницаемость, стали причиной того, что сшитый полиэтилен является одним из самых применяемых материалов при изготовлении изоляции силового и связного кабеля. Везде приводятся его преимущества, такие как:

- высокие диэлектрические показатели и,одновременно, минимальные диэлектрические потери;
- стойкость к быстрому повышению температуры с рабочей до максимальной величины;
- водонепроницаемость РЕХ-изоляции;
- устойчивость к механическим повреждениям;
- эластичность;
- стойкость к отрицательной температуре.

ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

Сшитый полиэтилен – это с химической точки зрения полимер углеводорода этилена, который на молекулярном уровне модифицирован до выстраивания абсолютно новой структуры. Его уникальные свойства получают методом вулканизации полимерных макромолекул. В результате чего образуются межмолекулярные химические связи, которые образуют эту монолитную структуру всего материала (Рисунок 1).

В зависимости от технологии производства можно получить сшитый полиэтилен с несколько отличающимися свойствами – РЕХb и РЕХа.

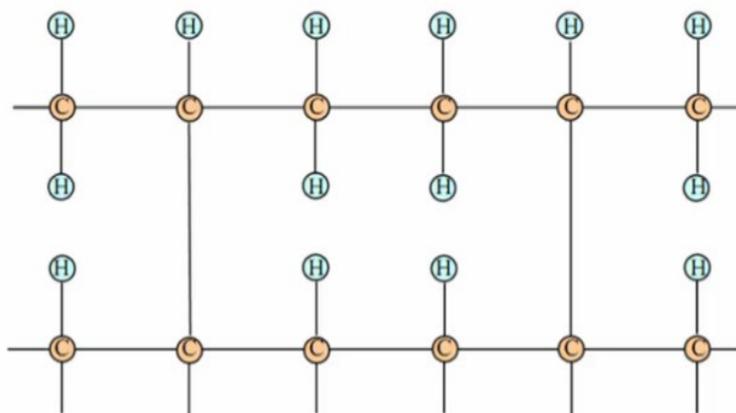


Рисунок 1 – Структура сшитого полиэтилена

Применение РЕХ-изоляции для силовых кабелей позволило расширить эксплуатационные свойства электропроводки и улучшить условия ее монтажа, а также уменьшило нагрузку на опорные конструкции из-за снижения массы кабеля.

Однако, слабая устойчивость изоляции из сшитого полиэтилена к длительному воздействию ультрафиолетового излучения, ограничивает ее использование на открытых местах. Также свободный кислород воздуха оказывает разрушающее воздействие на РЕХ-материалы, проникая в их структуру, это требует применения защитных оболочек из других материалов.

Например, кабель АПвП 10 (Рисунок 2) в своей конструкции кроме непосредственно основной изоляции проводника содержит два полупроводящих слоя, содержащих до 40 % сажи, для выравнивания электромагнитного поля токопроводящей жилы и несколько защитных слоев, таких как подложка из нетканого материала с полупроводящими свойствами, экран из медной проволоки, слой медной фольги, который наматывается в противовращение к проволокам экрана и служит для выравнивания его токов, далее следует слой нетканого материала для фиксации экрана и верхняя оболочка кабеля из обычного полиэтилена с добавлением элементов, обеспечивающих его светостабилизацию и высокую механическую прочность [1].



Рисунок 2 – Конструкция кабеля АПвП 10

При прокладке по сложным трассам с большим количеством пересечений и при прокладке в трубах из различных материалов используются кабели с усиленной оболочкой, например АПвПуг 10, где буква *г* указывает на наличие герметизирующего слоя от распространения воды по кабелю при разрушении защитной оболочки. Герметизирующий слой работает по принципу памперса – впитывает жидкость и, расширяясь, не позволяет попадать вглубь.

При прокладке кабелей по открытым эстакадам при широте меньше 62° , согласно ПУЭ, применяются солнцезащитные козырьки, поэтому для Беларуси, которая лежит на широте $54\text{--}58^\circ$ они обязательны (Рисунок 3) [2].

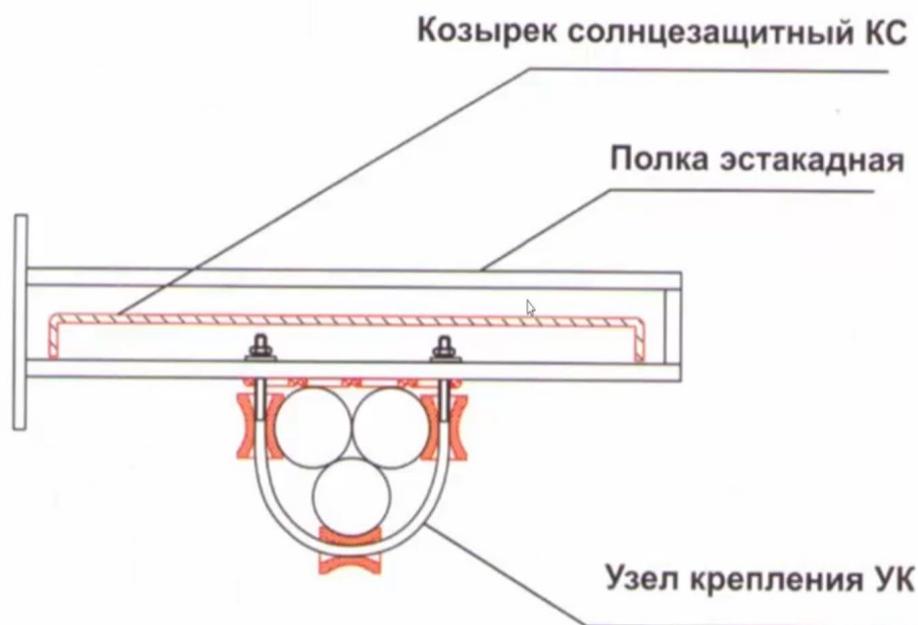


Рисунок 3 – Крепление кабеля на открытых эстакадах

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

С учетом идеальных изоляционных свойств СПЭ в защищенных зонах и того, что при его использовании в открытых местах уменьшается срок службы, эти материалы используют для изготовления изоляции, которая непосредственно соприкасается с токопроводящей металлической жилой, а внешние оболочки кабеля делают из других материалов.

ЛИТЕРАТУРА

1. «ЭЛЕКТРОЭНЕРГИЯ. Передача и распределение» № 1(64), январь-февраль 2021 г. [Электронный ресурс] / О возможности использования силовых кабелей с изоляцией из СПЭ в сети напряжением 6–35 кВ с изолированной нейтралью ООО ПО «Энергокомплект».
2. Энергокомплект [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://vikab.by/about/>. – Дата доступа 11.05.2025.

УДК 621.316

КОНТРОЛЬ КАЧЕСТВА ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ В СИСТЕМАХ АСКУЭ
ПРОМЫШЛЕННЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ
POWER QUALITY CONTROL IN ASCAPC SYSTEMS
INDUSTRIAL ENTERPRISES

Козловская В.Б., к-т. техн. наук., доцент
Белорусский национальный технический университет, г. Минск, Беларусь,
Шинкович А.А., инженер-электроник
РУП «Минскэнерго», филиал «Энергосбыт»
V.Kozlovskaya, candidate of technical sciences, assistant professor,
Belarusian National Technical University, Minsk, Belarus,
A.Shinkovich, electronic engineer,
Republican Unitary Enterprise Minskenergo, filial agency Power Supply

Аннотация. В статье описаны влияние качества электроэнергии на работу электроустановок, способы осуществления контроля его показателей.
Annotation. The article describes the influence of the quality of electricity on the operation of electrical installations, methods of monitoring its indicators.

Ключевые слова: качество электроэнергии, АСКУЭ, промышленные предприятия
Key words: power quality, ASCAPC, industrial enterprises

ВВЕДЕНИЕ

Качество электроэнергии оценивается рядом показателей [1], в т. ч. показателями, связанными с колебаниями, несимметрией и несинусоидальностью напряжения. Большую проблему для электросетей представляет в т. ч. несинусоидальность, которая обусловлена, как правило, нелинейными нагрузками потребителей электроэнергии. В последние десятилетия подобного оборудования, как на промышленных предприятиях, так и у административных, коммунально-бытовых потребителей становится все больше.

ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

Низкое качество электроэнергии приводит к увеличению времени простоя оборудования, проблемам с надежностью оборудования и снижению экономичности. Поэтому остро стоит вопрос организации комплексного контроля качества электроэнергии.

Например, срок службы силовых трансформаторов [2] существенно зависит от качества электроэнергии. Снижение качества электроэнергии вызывает дополнительный нагрев изоляции обмоток, что приводит к потерям активной мощности, вызванными протекающими в них токами обратной последовательности и высших гармоник.

Срок службы и экономичность асинхронных двигателей также снижается при несинусоидальности, несимметрии и отклонениях напряжения. Это вызвано

тепловым старением изоляции из-за перегрева в результате дополнительных потерь активной мощности в обмотках статора, ротора и стали.

В кабельных линиях также происходят процессы разрушения изоляции вследствие более интенсивного нагрева и усиления ионизационных процессов, вызванных высокими уровнями высших гармоник.

Низкое качество электроэнергии нарушает нормальную работу источников света [3], вызывает отклонение от номинальных значений основных характеристик источников света, а также мигание, погасание ламп.

Возникает также проблема достоверности расчетного и технического учета электропотребления. Алгоритм работы электронных счетчиков электроэнергии, применяемых в АСКУЭ, не учитывает гармонические искажения, и приборы учета не фиксируют реальные погрешности. Для обеспечения достоверности результата измерений при значительных коэффициентах искажения синусоидальности счетчики должны учитывать дополнительную погрешность.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящее время разработана технология построения мониторинга контроля качества энергии с интеграцией в существующие и вновь создаваемые системы учета для крупных промышленных объектов [4]. В этом случае используются приборы, которые совмещают функции счетчика и анализатора качества электроэнергии и позволяют измерять индивидуальные гармоники высших порядков, получать осциллограммы.

Указанное устройство контроля параметров качества электрической энергии является высокочастотным измерительным прибором, который, используя современные цифровые технологии осуществляет сбор, обработку и хранение информации о параметрах качества электрической энергии. Данное устройство интегрируется в систему АСКУЭ с возможностью передачи данных на верхний уровень к центрам сбора и обработки информации [5].

Функционирование АСКУЭ происходит в реальном масштабе времени в рамках самостоятельных структур, в связи с чем интеграция функции контроля показателей качества электроэнергии позволит и персоналу энергосистемы, и самому потребителю владеть оперативной информацией о качестве работы сети.

ЛИТЕРАТУРА

1. ГОСТ 32144-2013 Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. – М.: Стандартинформ, 2014. – 16 с.
2. И.В. Жежеленко, Ю.Л. Саенко, Т.К. Бараненко, А.В. Горпинич, В.В. Нестерович Избранные вопросы несинусоидальных режимов в электрических сетях предприятий. – М: Энергоатомиздат, 2007. – 296 с.
3. Козловская В.Б., Радкевич В.Н., Сацукевич В.Н. Электрическое освещение: учебник – Минск: Техноперспектива, 2011. – 543 с.
4. Безносова М., Новое в построении АСКУЭ с мониторингом контроля качества электрической энергии – газета «Энергетика Беларуси», 2019.
5. Петрушко И., ОАО «АГАТ–системы управления» – признанный лидер на рынке белорусской энергетики – журнал «Электроника Инфо» № 9, сентябрь 2013.

УДК 624.97

ВЕТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКАЯ УСТАНОВКА С АВТОМАТИЧЕСКИМ
ОГРАНИЧИТЕЛЕМ ВРАЩАЮЩЕГО МОМЕНТА
WIND POWER PLANT WITH AUTOMATIC TORQUE LIMITER

Горноста́й А.В., к-т. техн. наук

Белорусский национальный технический университет, г. Минск, Беларусь

A. Gornostay, Candidate of Technical Sciences, Docent

Belarusian national technical university, Minsk, Belarus

Аннотация: Предложена схема ветроэнергетической установки с автоматическим ограничением вращающего момента при сильных порывах ветра.

Abstract: A scheme of a wind power plant with automatic torque limitation in case of strong wind gusts is proposed.

Ключевые слова: Ветроэнергетика, ветрогенератор.

Keywords: Wind Energy, Wind Generator.

ВВЕДЕНИЕ

Одной из важных проблем в ветроэнергетике является получение на выходе ветрогенератора при резком увеличении скорости ветра. Нами предложен один из возможных вариантов решения этой проблемы.

ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

Функциональная схема ветроэнергетической установки показана на рисунке 1 [1].

Установка содержит ветродвигатель 1, генератор 2 и блок управления 3. Блок управления 3 включен между генератором 2, аккумуляторной батареей 4, балластной нагрузкой 5 и содержит выпрямитель 6, ключ 7 и логическое устройство 8. Балластная нагрузка 5 включена параллельно аккумуляторной батарее 4 через ключ 7, управляющий вход которого подключен к выходу логического устройства 8. Логическое устройство 8 подключено своими входами к выходу выпрямителя 6.

Ветроэнергетическая установка дополнительно содержит устройство ограничения вращающего момента 9, состоящее из датчика управляющего тока 10, датчика Холла 11, порогового усилителя 12, блока питания 13, блока сигнализации 14, исполнительного органа 15 и тормозной муфты 16. Датчик Холла 11 включен в цепь на выходе выпрямителя 6.

Выход датчика управляющего тока 10 подключен к управляющим входам датчика Холла 11, который помещен в магнитное поле N-S, создаваемое генератором 2. На фигуре знаками (+) и (×) обозначено направление силовых линий в магнитном поле генератора 2 между полюсами N и S. Выходы датчика Холла 11 через пороговый усилитель 12 подключены к логическому устройству 8. Выходы логического устройства 8 подключены к входам блока сигнализации 14 и

исполнительного органа 15. Выход исполнительного органа 15 подключен к тормозной муфте 16, которая расположена на валу между ветродвигателем 1 и генератором 2.

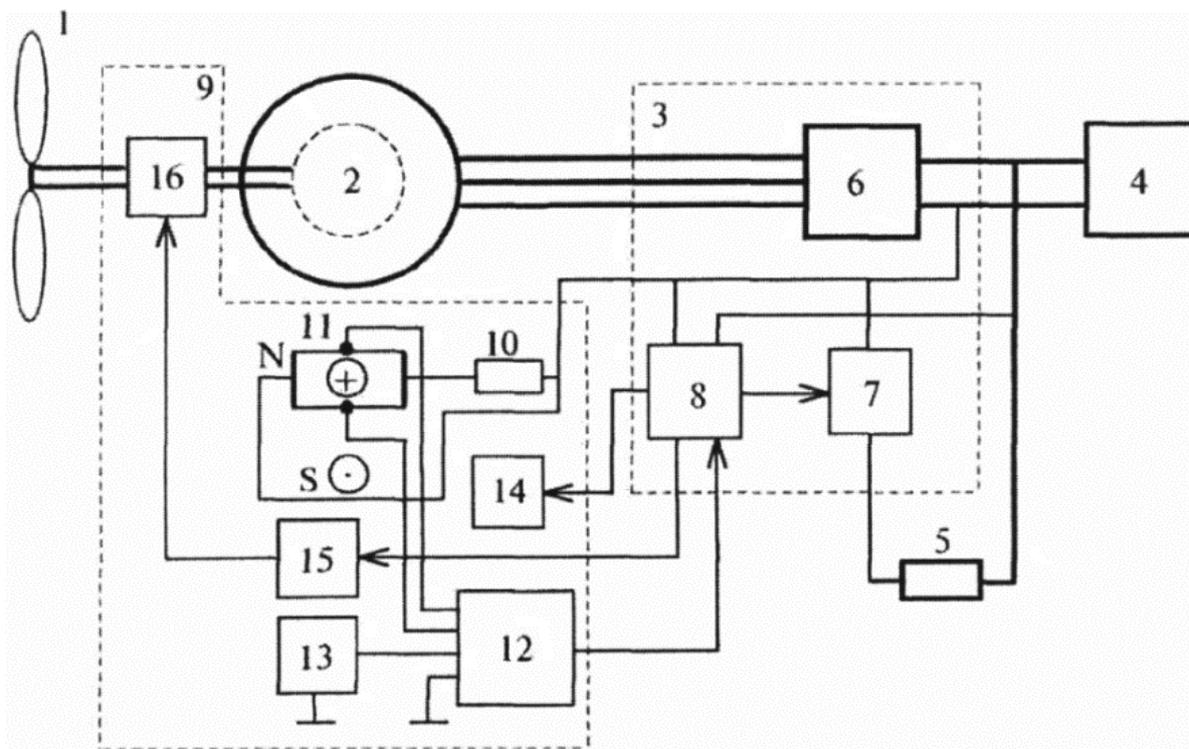


Рисунок 1 – Функциональная схема ветроэнергетической установки

При малой скорости ветра устройство ограничения вращающего момента 9 выполняет свои функции не полностью – только до исполнительного органа 15. При этом напряжение, пропорциональное вращающему моменту M и снимаемое с датчика 10, поступает на вход датчика Холла 11. С выхода датчика Холла 11 напряжение U_y поступает к пороговому усилителю 12 с коэффициентом усиления A . После усиления часть напряжения AU_y , соответствующая определенному значению вращающего момента M , устанавливается с помощью порогового элемента усилителя и компенсируется напряжением U_0 блока 13.

При увеличении скорости ветра возрастает частота вращения генератора 2. При этом возрастает и текущее значение вращающего момента M на его валу. В какой-то момент времени это значение превысит допустимый уровень. В случае изменения величины вращающего момента M относительно установленного значения в усилителе 12 появляется разность между напряжениями AU_y и U_0 , которая приводит к появлению сигнала рассогласования на его выходе. Этот сигнал подается на вход логического устройства 8, которое в этом случае выдает сигналы в блок 14 для оповещения обслуживающего персонала о превышении величины момента M допустимого значения и на исполнительный орган 15.

Исполнительный орган 15 включает тормозную муфту 16, которая начинает тормозить вал генератора 2, ограничивая тем самым имеющийся вращающий момент. Это будет происходить до тех пор, пока текущее значение вращающего

момента не станет равным допустимому. Как только это произойдет, сигнал с выхода усилителя 12 снова станет равным нулю, по которому исполнительный орган отключит тормозную муфту 16.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

При изменении скорости ветра процесс управления величиной вращающего момента повторяется. При этом исполнительный орган 15 будет периодически включать и отключать муфту 16, тормозя или освобождая вал генератора 2, обеспечивая тем самым эффективное регулирование величины вращающего момента.

ЛИТЕРАТУРА

1. Горноста́й А.В., Ролик Ю.А., Гончар А.А. Патент на полезную модель РФ 6551, опубл. 30.08.2010.

УДК 629.114.2

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ГАЗОРАЗРЯДНЫХ И СВЕТОДИОДНЫХ
ИСТОЧНИКОВ СВЕТА В НАРУЖНОМ ОСВЕЩЕНИИ
COMPARATIVE ANALYSIS OF GAS-DISCHARGE AND LED LIGHT SOURCES
IN OUTDOOR LIGHTING

Смоловская Д.М., магистр техн. наук, ассистент
Белорусский национальный технический университет, г. Минск, Беларусь
D. Smolovskaya, master of technical Sciences, Assistant
Belarusian national technical university, Minsk, Belarus

Аннотация. На основе анализа характеристик газоразрядных и светодиодных источников света определили преимущества одного типа светильников над другими в наружном освещении.
Abstract. Based on the analysis of the characteristics of gas-discharge and LED light sources, the advantages of one type of luminaires over others in outdoor lighting were determined.

Ключевые слова: газоразрядные лампы, светодиоды, наружное освещение.
Key words: gas-discharge lamps, LEDs, outdoor lighting.

ВВЕДЕНИЕ

Использование светодиодов, которые обладают хорошими светотехническими характеристиками, являются безопасными, экологически чистыми, удобными для применения, не требующие значительных затрат на эксплуатацию [1], в настоящее время достаточно распространено. Эффективность применения светодиодных источников света в наружном освещении оценивается рядом критериев.

ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

Для наружного освещения используются светильники с люминесцентными, металлогалогенными, ртутными и натриевыми лампами.

Высокой светоотдачей обладают люминесцентные лампы низкого давления. Однако светящееся тело имеет большие размеры, и сфокусировать поток света в необходимом направлении затруднительно. Стандартные люминесцентные лампы предусматривают работу при температуре окружающего воздуха от 15 до 40 °С. При температурах от 20 до 25 °С лампа имеет максимальное значение световой отдачи, а при низкой температуре светоотдача ламп снижается, что является недостатком для наружного освещения. К тому же при пониженной температуре окружающего воздуха могут возникнуть проблемы с запуском лампы. Из трубки лампы откачен воздух, и она заполнена аргоном или смесью инертных газов с добавлением капельки ртути, которая при нагревании превращается в ртутные пары [1]. При снижении температуры окружающей среды ртуть замедляет свое превращение в пары, число атомов ртути в газе недостаточно для возникновения электрического разряда в газовой среде, следовательно, необходима установка

дополнительных источников свободных электрических зарядов или возникает потребность подводить на электроды более высокое напряжение.

Ртутные лампы типа ДРЛ представляет собой стеклянную колбу, внутренняя поверхность которой покрыта тонким слоем люминофора, способного преобразовывать ультрафиолетовое излучение, сопровождающее дуговой разряд в кварцевой трубке (горелке), в видимый свет, пригодный для освещения [1]. Ртутные лампы наиболее часто встречаются в наружном освещении, так как они обеспечивают относительно высокую световую отдачу на протяжении всего эксплуатационного периода, многообразие вариантов мощностей, приемлемое качество спектра, морозостойкость, корректная работа при низких температурах наружного воздуха, компактность. Недостатком является долгий розжиг лампы (от 2 до 10 минут), однако в уличном освещении это большого значения не имеет. Содержание в лампе ртути представляет опасность при нарушении целостности колбы, изделие подлежит утилизации в соответствии с требуемыми нормами.

Металлогалогенные лампы типа ДРИ являются усовершенствованными лампами типа ДРЛ. Лампы обладают высокими коэффициентом цветопередачи и световой отдачей (в горелку дополнительно вводятся галогениды некоторых металлов), меньшими пульсацией светового потока (40 %) и временем разгорания лампы (от 2 до 5 мин) по сравнению с лампами типа ДРЛ.

Натриевые лампы типа ДНаТ представляют собой горелку, размещенную в цилиндрической или эллиптической колбе, из светопропускающей поликристаллической керамики, полость которой заполнена ксеноном с добавками натрия [1]. Натриевые лампы высокого давления практически нечувствительны к перепадам температуры окружающего воздуха и сохраняют свою работоспособность при изменении температуры от -60 до $+40$ °С. Недостатком является влияние на светотехнические и электрические параметры лампы колебания напряжения электрической сети. Лампы типа ДНаТ имеют низкую цветопередачу из-за монохроматичного излучения и свет с желтым оттенком по причине прохождения газового разряда через пары натрия. Однако в условиях тумана желтое излучение выступает в качестве преимущества наружного освещения лампами ДНаТ.

Преимуществом светодиодных источников света является высокая световая отдача по сравнению с газоразрядными лампами. Газоразрядные лампы излучают световой поток во все стороны, поэтому в наружном освещении потребуется дополнительная оптическая система с отражателем, которая снизит световой поток на 35 %. Светодиоды светят в одну сторону, следовательно, чтобы перераспределить световой поток потребуется установка дополнительной линзы и защитного плафона. Потери в оптической системе в этом случае составят 25 %, что значительно меньше, чем в газоразрядных лампах. Достоинством светодиодных источников света является возможность эффективного управления светом – уменьшать освещенность, тем самым экономить электричество. Диммирование для светодиодов допускается до нулевого уровня. Для газоразрядных ламп диммирование возможно только до 50 %, и на практике для уменьшения освещенности отключают через одну лампу. Светодиодные

источники света имеют высокую механическую прочность, экологически безопасны, просты в использовании.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Сравнительный анализ газоразрядных и светодиодных источников света в наружном освещении приведен в таблице 1.

Таблица 1 – Сравнительный анализ газоразрядных и светодиодных источников света в наружном освещении

Тип источника света	Световая отдача, лм/Вт	Срок службы, ч	Коэффициент цветопередачи	Диммируемость
ЛЛ	50..100	8 000..20 000	70..85	До 10 %
ДРЛ	50..60	8 000..10 000	60..80	Не применяется
ДРИ	70..85	10 000..12 000	75..99	До 50 %
ДНаТ	80..150	10 000..25 000	20..30	До 50 %
Светодиоды	100..150	50 000..100 000	65..90	До 0 %

ЛИТЕРАТУРА

1. Козловская, В.Б. Электрическое освещение: учебник / В.Б. Козловская, В.Н. Радкевич, В.Н. Сацукевич. – Минск: Техноперспектива, 2011. – 543 с.

УДК 621.3

К ВОПРОСУ ВЫБОРА УСТАНОВОК РАСПРЕДЕЛЕННОЙ
ГЕНЕРАЦИИ ЭНЕРГИИ
TO THE QUESTION OF SELECTING DISTRIBUTED POWER
GENERATION INSTALLATIONS

Константинова С.В., к-т. техн. наук, доцент
Белорусский национальный технический университет, г. Минск, Беларусь
S. Konstantinova, Candidate of Technical Sciences, Docent
Belarusian national technical university, Minsk, Belarus

Аннотация. При выборе наиболее эффективных установок распределенной генерации энергии необходимо учитывать множество различных факторов и условий.

Abstract. When choosing the most efficient distributed power generation installations, many different factors and conditions must be considered

Ключевые слова: установки распределенной генерация энергии (РГЭ).

Keywords: renewable energy sources, distributed power generation plants.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время во всем мире принципиальное внимание уделяется вовлечению возобновляемых источников энергии в энергетический баланс. Что, в мировом масштабе, в значительной мере, призвано решить не только энергетическую проблему, связанную с неизбежной исчерпаемостью традиционных энергоносителей (уголь, нефть, газ), но и сдержать глобальное потепление на Земле, ухудшение общей экологической обстановки, связанное с выбросом в атмосферу парниковых газов и других вредных веществ.

ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

Применяя современные технологии в энергетике, максимально используя нетрадиционные источники энергии, возможно сокращение вредных выбросов в атмосферу. Особенно актуальной эта проблема является для потребителей малой мощности (до 50 кВт), таких как объекты придорожного сервиса, агро-усадыбы, и другие объекты, отличительной чертой которых является удаленность от уже существующих электрических и тепловых сетей, которые нецелесообразно прокладывать на большие расстояния из-за высоких потерь.

Для принятия решения при выборе и синтезе генерирующей установки для определенного потребителя, требуется анализ и учет большого количества факторов, решение большого количества инженерных и экономических вопросов. Наиболее существенными, в первую очередь, являются вопросы выбора наиболее целесообразного источника РГЭ для использования в данных условиях, его мощности, архитектуры миниэнергокомплекса, расчет эффективности применения данного типа генерирующей установки, определение возможных режимов работы данного миниэнергокомплекса, обеспечение надежности работы установки.

Практика показывает, что автономные установки из-за сложностей системы управления не всегда надежны, что требует решения различных проблем технического и теоретического характера, так же достаточно высокие стоимостные показатели являются сдерживающим фактором их широкого внедрения.

Сегодня полностью невозможно отказаться от традиционных источников энергии, но возможно снизить их долю в энергетическом балансе мира.

Как было отмечено, при проектировании и расчете систем электроснабжения с установками РГЭ, необходим учет многих факторов, зависящих от места расположения потребителя, возможного использования вида ВИЭ, условий эксплуатации потребителей, что является сложной задачей. В настоящее время существуют программные продукты, предназначенные для облегчения процесса моделирования, анализа, проектирования различных, в том числе и гибридных систем энергообеспечения (как автономных, так и работающих параллельно с сетью). Как пример, можно привести программное обеспечение HOMER Energy Modeling Software [2], (регистрацию можно пройти на сайте NASA в соответствующем разделе). Данное программное обеспечение представляет собой инструмент для проектирования и анализа систем энергообеспечения, Программа автоматически загружает исходные данные на основании представленных сведений и местонахождения планируемого миниэнергокомплекса, его мощности, характеристик установок РГЭ и т. д.

С помощью данного программного обеспечения возможно моделирование различных вариантов системы электроснабжения с различными установками РГЭ.

График нагрузки автономного объекта, с учетом различных факторов, задается в программной среде. Данное программное обеспечение позволяет моделировать системы электро- и теплоснабжения, в состав которых входят генераторы различных типов, ветряные турбины, солнечные модули, аккумуляторы, топливные элементы, гидрогенераторы, биогазовые установки т. д. Информация о параметрах для заданной местности ВИЭ загружается с электронных баз данных.

Местоположение моделируемой установки РГЭ, отмечено на рисунке 1.

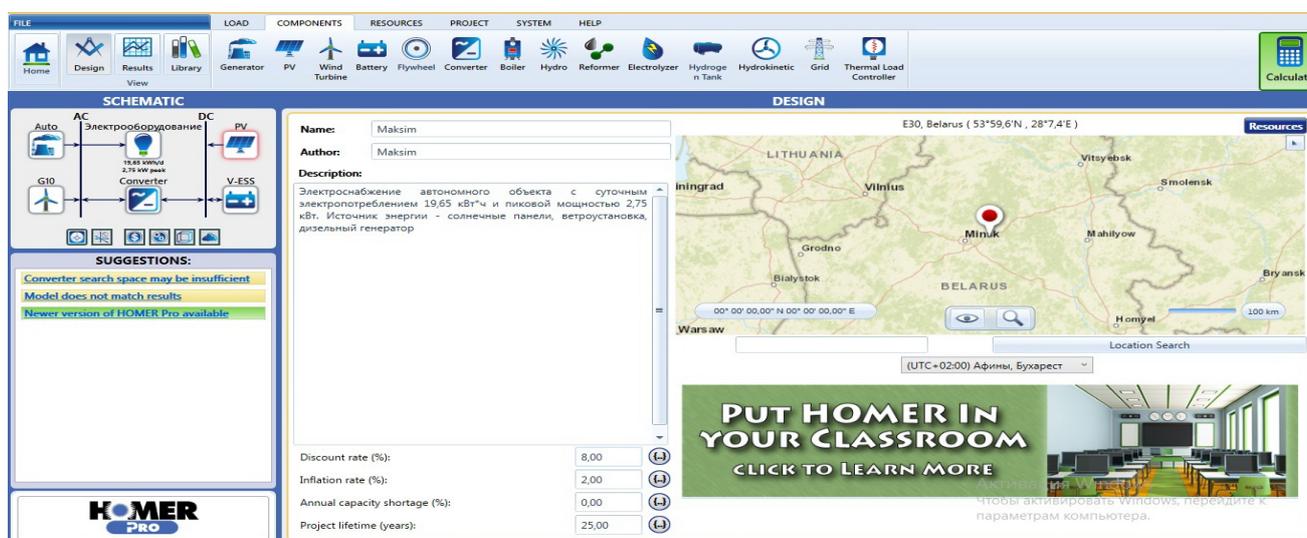


Рисунок 1 – Гибридная генерирующая установка (солнечные панели, ветроустановка, дизель-генератор)

Данные по солнечной радиации, в данной местности, приведены на рисунке 2, средняя скорость ветра, в данной местности, приведена на рисунке 3. Некоторые результаты проведенных расчетов для автономной гибридной генерирующей установки, включающей солнечные панели, ветроустановку и дизель-генератор представлены на рисунке 4 и 5.

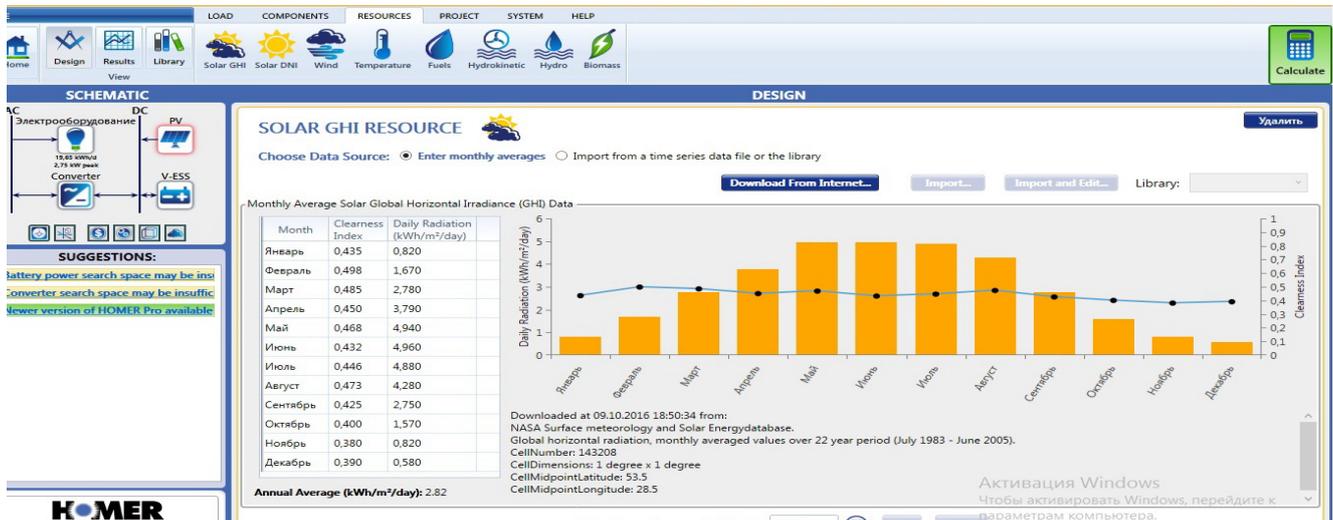


Рисунок 2 – Данные по солнечной радиации для заданной местности

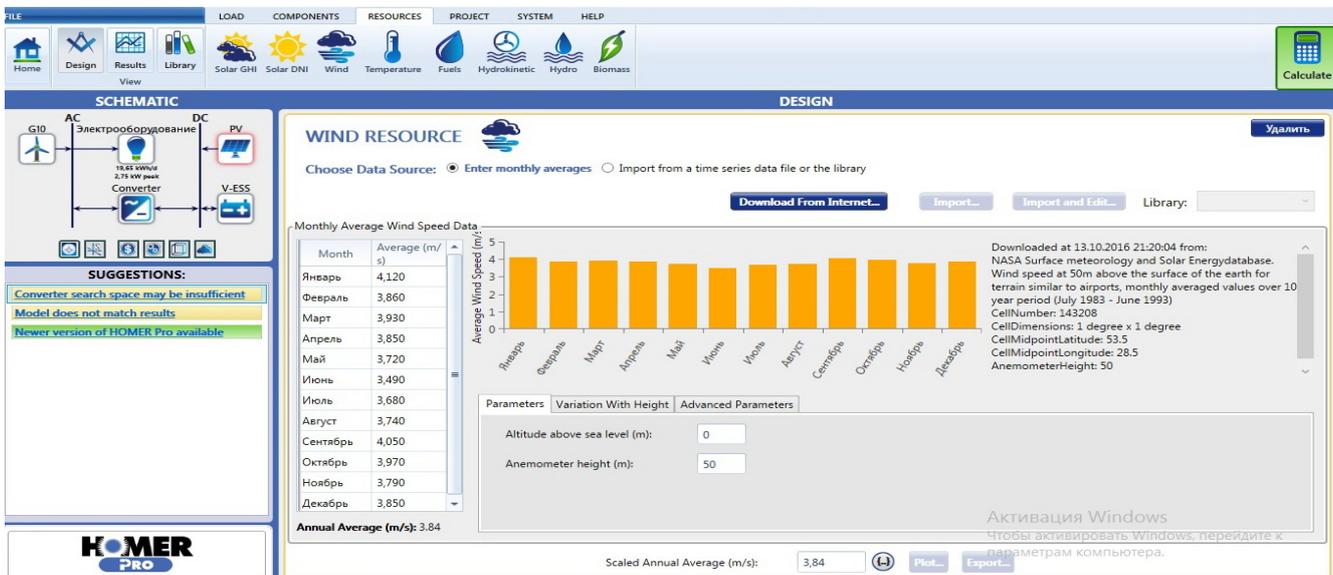


Рисунок 3 – Средняя скорость ветра для заданной местности



а)



б)

Рисунок 4 – Среднемесячное производство электроэнергии:

а – солнечная панель и ветроустановка; б – солнечная панель, ветроустановка, дизель генератор

The screenshot shows the HOMER Pro software interface. The top menu bar includes FILE, LOAD, COMPONENTS, RESOURCES, PROJECT, SYSTEM, and HELP. Below the menu is a toolbar with icons for Home, Design, Results, Library, Generator, PV, Wind Turbine, Battery, Flywheel, Converter, Boiler, Hydro, Reformer, Electrolyzer, Hydrogen Tank, Hydrokinetic, Grid, Thermal Load Controller, and Calculate. The main window displays the 'RESULTS' tab with two tables: 'Sensitivity Cases' and 'Optimization Cases'. Both tables have columns for Architecture, Cost, System, Auto, and PV. The 'Sensitivity Cases' table shows a single row of data. The 'Optimization Cases' table shows four rows of data. A Windows activation watermark is visible in the bottom right corner of the screenshot.

Sensitivity Cases: Left Click on sensitivity case to see optimization cases.												System		Auto		PV	
Architecture	Cost	System	Auto	PV	Architecture	Cost	System	Auto	PV	Architecture	Cost	System	Auto	PV			
PV (kW)	G10	Auto (kW)	V-ESS (kW)	V-ESS (kWh)	Converter (kW)	Dispatch	COE (p.)	NPC (p.)	Operating cost (p.)	Initial capital (p.)	Elec Prod (kWh/yr)	Hours	Production	Fuel (L)	Capital Cost	Production	Cap
15,0		3,10	17,5	35,0	5,00	CC	1,52 p.	141 240 p.	2 683 p.	106 550 p.	16716,74	473	1 396	438	9 000	15 321	
30,0			17,5	122	5,00	CC	1,70 p.	157 059 p.	1 977 p.	131 500 p.	30641,87				18 000	30 642	
5,00	1	3,10	17,5	17,5	5,00	CC	2,09 p.	193 576 p.	3 599 p.	147 050 p.	13100,09	346	982	311	3 000	5 107	50 0
10,0	1		17,5	70,0	5,00	CC	2,15 p.	199 355 p.	3 122 p.	159 000 p.	17224,85				6 000	10 214	50 0

Рисунок 5 – Компонновка миниэнергокомплекса по результатам расчетов

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Анализ результатов расчетов, как информация технического характера: требуемой мощности установок, количества и вида генерирующих установок, выработки электроэнергии в различное время года, возможная корректировка графика нагрузки потребления и выработки электроэнергии и т. д. позволяет выявить наиболее приемлемый вариант генерирующей установки для заданной местности.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ветрогенераторы [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://energy-ds.ru/catalog/generating/vetrogenerator.html>. – Дата доступа 20.10.2016.
2. HOMER Pro [Электронный ресурс] – Режим доступа: http://www.homere-energy.com/HOMER_pro.html – Дата доступа 23.10.2020.

УДК 620.9

ОСОБЕННОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ МИКРОПРОЦЕССОРНЫХ
И ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ РАСЦЕПИТЕЛЕЙ
ELCESTRONIC AND SEMICONDUCTOR CIRCUIT BREAKERS' TRIP
UNITS APPLICATION FEATURES

Капустинский А.Ю., ассистент
Белорусский национальный технический университет, г. Минск, Беларусь
A. Kapustsinski, professorassistant
Belarusian national technical university, Minsk, Belarus

Аннотация. Данная статья посвящена теме повышения эффективности функционирования сетей до 1 кВ путем применения выключателей с микропроцессорными и полупроводниковыми расцепителями, Abstracts. The article is dedicated to low voltage grid effectiveness's incensement by the use of elcestronic and semiconductor circuit breakers' trip units.

Ключевые слова: автоматический выключатель, чувствительность, защита от перегрузки, защита от коротких замыканий, расцепитель, микропроцессорный расцепитель.

Key words: circuit breaker, sensitiveness, overload protection, short circuit protection, trip unit, electronic circuit protection.

ВВЕДЕНИЕ

При построении схем электроснабжения напряжением до 1 кВ, в случае невозможности организации групповых щитов с большим числом подключений, расчетная нагрузка небольшой группы потребителей может оказаться равной или меньше номинального тока потребителя наиболее мощного присоединения. Ввиду того, что в сетях до 1 кВ селективность аппаратов защиты с обратозависимой времятоковой характеристикой обеспечивается увеличением тока срабатывания, ток срабатывания аппаратов защиты может оказаться настолько завышен, что осуществить защиту сети от коротких замыканий согласно действующим ТНПА не представится возможным.

ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

Селективным считается защитный аппарат, ток срабатывания которого на один-два порядка из стандартного ряда больше, чем у нижестоящего, если физический принцип анализа тока в последовательной цепи защитного аппарата основан на преобразовании электрической энергии в тепловую (предохранитель или автоматический выключатель с тепловым расцепителем).

Точную информацию о том, являются ли защитные аппараты селективными, можно получить только от производителя оборудования. Данная информация обычно предоставляется в табличной форме и имеет вид, представленный на рисунке 1 [1]. Условная схема электроснабжения с селективными, согласно данным производителя, автоматическими выключателями приведена на рисунке 2.

Вышестоящий аппарат		iC60N/H/L													
		Кривая С													
In (A)		1	2	3	4	6	10	13	16	20	25	32	40	50	63
Нижестоящий аппарат		1P, 1P+N 2P (380-415 В) двухфазная сеть 3P, 3P+N 4P													
Предельный ток селективности (А)															
iC60N/H/L	0.5	8	60	T	T	T	T	T	T	T	T	T	T	T	T
Кривая В	1		16	24	32	70	180	210	370	590	1100	2400	7000	T	T
	2			24	32	48	140	160	220	310	460	780	1200	2000	2000
	3				5	48	120	104	190	280	380	580	820	1400	1400
	4					14	80	104	130	240	300	430	590	1000	1100
	6						80	104	130	160	200	380	480	770	850
	10							104	130	160	200	260	320	680	500
	13									160	200	260	320	600	500
	16										200	260	320	600	500
	20											260	320	400	500
	25												320	400	500
	32													400	500
	40														500
	50														500
Предельный ток селективности (А)															
iC60N/H/L	0.5	8	50	T	T	T	T	T	T	T	T	T	T	T	T
Кривая С	1		16	24	32	70	180	210	370	590	1100	2400	7900	T	T
	2			24	32	48	120	160	220	310	460	780	1200	2000	2000
	3					16	80	104	190	280	380	480	820	1400	1400
	4					14	80	104	130	160	300	430	590	1000	1100
	6						80	104	130	160	200	380	480	770	850
	10								130	160	200	260	320	680	500
	13									55	200	260	320	600	500
	16										71	260	320	400	500
	20											260	320	400	500
	25												127	400	500
	32													168	500
	40														500
	50														
Предельный ток селективности (А)															
iC60N/H/L	0.5		50	T	T	T	T	T	T	T	T	T	T	T	T
Кривая D	1			24	32	70	180	210	370	590	1100	2400	7900	T	T
	2				25	48	120	160	220	310	460	680	1200	2000	2000
	3					15	80	104	130	240	380	480	710	1400	1400
	4						28	100	130	160	300	430	590	1000	910
	6								130	160	200	260	480	770	760
	10									73	200	260	320	600	500
	13										79	260	320	600	500
	16										71	194	320	400	500
	20												135	400	500
	25													174	500
	32														277
	40														

Рисунок 1 – Таблица селективности автоматических выключателей SchneiderElectricActi9 iC60, предоставляемая производителем:

T – абсолютная селективность; пустая ячейка – селективность отсутствует; заполненная цифрой ячейка – предельный ток селективности

Подтверждение о селективности между двумя аппаратами защиты различных производителей невозможно получить от завода-изготовителя, так как производитель не может нести ответственности за оборудование конкурентов.

В большинстве случаев принято считать селективными два защитных аппарата, принцип работы которых основан на преобразовании электрической энергии в тепловую, если ток срабатывания вышестоящего аппарата в 1,6 раз больше, чем ток срабатывания нижестоящего аппарата. Число 1,6 является типовым множителем для получения стандартного ряда токов и мощностей

оборудования. Данная зависимость подтверждается опытными данными (рисунок 1) и указана в действующих технических нормативных правовых актах Республики Беларусь (ПУЭ 6, гл. 3.1.11[2]). Для автоматических выключателей и предохранителей данная зависимость может быть записана в следующем виде:

$$\frac{I_{\text{расц.в}}}{I_{\text{расц.н}}} \geq 1,6; \quad (1)$$

$$\frac{I_{\text{пл.в}}}{I_{\text{пл.н}}} \geq 1,6, \quad (2)$$

где $I_{\text{расц.в}}$ – номинальный ток теплового расцепителя вышестоящего автоматического выключателя, А;

$I_{\text{расц.н}}$ – номинальный ток теплового расцепителя нижестоящего автоматического выключателя, А;

$I_{\text{пл.в}}$ – номинальный ток плавкой вставки вышестоящего предохранителя, А;

$I_{\text{пл.н}}$ – номинальный ток плавкой вставки нижестоящего предохранителя, А.

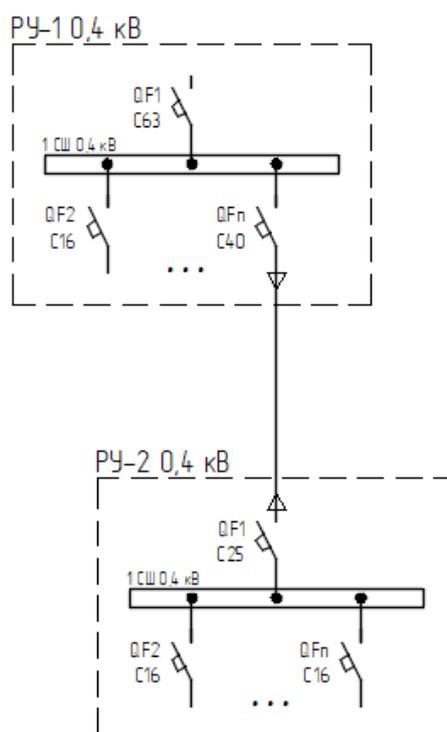


Рисунок 2 – Условная схема электроснабжения, обладающая селективностью

Однако при этом добиться абсолютной селективности автоматических выключателей с тепловыми расцепителями или предохранителями невозможно, ввиду физических аспектов работы данных аппаратов. Большой разброс времени срабатывания при одном и том же токе срабатывания приводит к тому, что даже автоматические выключатели, обладающие селективностью согласно выражениям 1 и 2, а также согласно таблице селективности производителя (рисунок 1), не являются абсолютно селективными по картам селективности (рисунок 3).

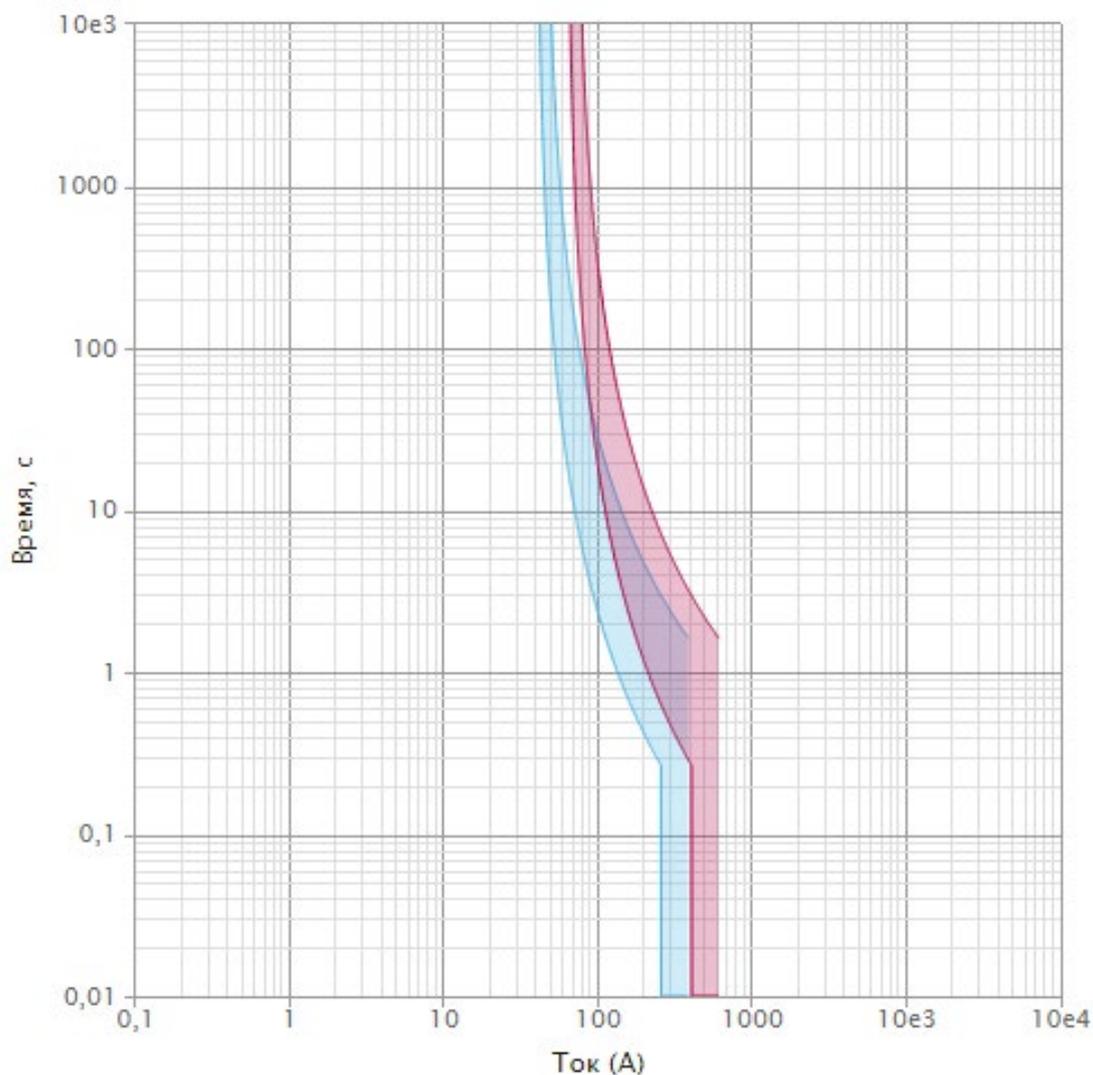


Рисунок 3 – Карта селективности между трехполюсными автоматическими выключателями с тепловым расцепителем SchneiderElectriciC60NC40 (синяя область) и C63 (красная область)

Для аппарата защиты, установленного в начале линии электропередачи, питающей группу потребителей, параметры окружающей среды могут значительно отличаться от параметров окружающей среды вводного защитного аппарата данной группы потребителей. На стадии проектирования определить это зачастую не представляется возможным, что приводит к необходимости замены оборудования при опытной эксплуатации и, как следствие, дополнительным капитальным затратам. Помимо этого, очевидно прослеживание тенденции значительного увеличения, искусственного завышения номинальных токов применяемых аппаратов защиты в цепочке от потребителя к все более крупным распределительным устройствам ввиду условия селективности.

Данный негативный эффект проявляется не так выражено при применении автоматических выключателей с расцепителями на базе микроконтроллеров или полупроводников. Ввиду иных физических процессов, на которых основано действие расцепителя максимального тока с обратозависимой характеристикой данного типа выключателей, для микропроцессорных и полупроводниковых

расцепителей имеет место гораздо меньший разброс значений тока и времени срабатывания, что в свою очередь приводит к меньшему завышению тока срабатывания защиты при обеспечении полной селективности между автоматическими выключателями.

На рисунке 4 представлены времятоковые характеристики автоматических выключателей с полупроводниковым расцепителем, обладающие абсолютной селективностью.

Исходя из рисунков 3 и 5 очевидно, что селективность выключателей с микропроцессорными расцепителями абсолютна при одинаковом значении номинального тока расцепителя (100 А). При этом ток срабатывания защиты вышестоящего аппарата защиты ниже при применении микропроцессорных расцепителей, то есть завышение тока срабатывания защиты не происходит, негативные последствия данного технического решения отсутствуют.

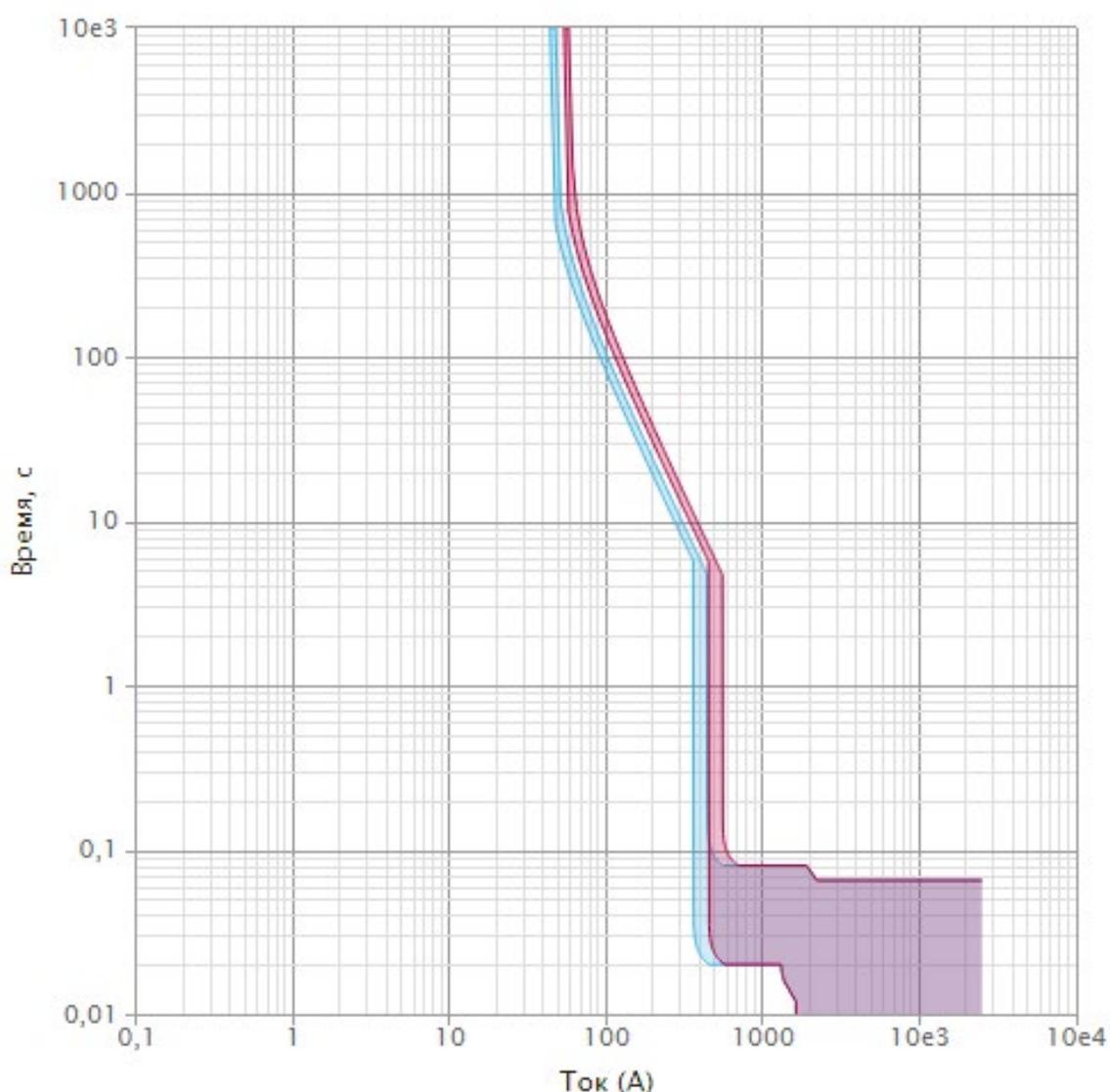


Рисунок 4 – Карта селективности между двумя трехполюсными автоматическими выключателями SchneiderElectricCompactNSX100B с микропроцессорными расцепителями Micrologic 2.2 (синяя область – нижестоящий выключатель, красная область – вышестоящий)

Несмотря на огромное количество достоинств, высокая стоимость данных устройств ограничивает их применение. Помимо этого, они обладают такими недостатками, как хрупкость и подверженность воздействию электромагнитных полей.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Применение автоматических выключателей с полупроводниковыми и микропроцессорными расцепителями позволяет увеличить чувствительность защит в сети до 1 кВ.

ЛИТЕРАТУРА

1. Acti 9. Эффективность, достойная Вас, 2019 : Технический каталог / SchneiderElectric, 2019/ – 480 с.
2. Правила устройства электроустановок. Шестое издание, переработанное и дополненное, с изменениями – Москва :Энергоатомиз-дат, 1986. – 648 с.
3. Радкевич, В.Н. Электроснабжение промышленных предприятий: учеб. пособие / В.Н. Радкевич, В.Б. Козловская, И.В. Колосова. – Минск : ИВЦ Минфина, 2017. – 589 с.
4. Выключатели автоматические низковольтные. Общие технические условия: ГОСТ 9098-93. – Введ. 01.07.1996. – Минск :Межгос. совет по стандартизации, метрологии и сертификации : АО "Электрические низковольтные аппараты и системы" (ЭНАС) 1993. – 20 с.

УДК 621.315.176

РАСЧЕТ СОСТАВЛЯЮЩИХ УСИЛИЙ ОТ ОТПАЙКИ
НА ОШИНОВКУ РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНОГО УСТРОЙСТВА
CALCULATION OF THE COMPONENT FORCES FROM THE TAP
ON SUBSTATION BUSBARS

Бладыко Ю.В., к-т. техн. наук, доцент
Белорусский национальный технический университет, г. Минск, Беларусь
Y. Vladyko, Candidate of Technical Sciences, Docent,
Belarusian National Technical University, Minsk, Belarus

Аннотация. Даны формулы расчета составляющих усилий на ошиновку от отпайки к электрическому аппарату, расположенной в середине пролета, для разных вариантов ориентации отпайки. Знание значений составляющих сосредоточенных сил от отпайки позволяет повысить точность расчета стрел провеса и тяжений токопроводов.

Abstract. Formulas for calculating the components of the efforts on the busbar from the tap to the electrical apparatus located in the middle of the span are given for different variants of the orientation of the tap. Knowledge of the values of the components of concentrated forces from the tap allows to increase the accuracy of calculating the sag and tensions of the conductors.

Ключевые слова: стрела провеса, тяжение, гирлянды изоляторов, пролет, отпайка.

Keywords: sag, tension, insulator strings, span, tap.

ВВЕДЕНИЕ

В [1] рассматривается наличие сосредоточенных нагрузок, равномерно размещенных в пролете. Показано, что самые большие погрешности от их замены на распределенные нагрузки вдоль пролета имеют место при одной сосредоточенной силе. Большое внимание уделяется горизонтальным составляющим усилий от ветра на конструктивные элементы РУ [2]. Там же было рекомендовано принимать в проектной практике направление ветра в сторону действия горизонтальных сосредоточенных сил, так как в этом случае получаются наибольшие горизонтальные отклонения и коэффициенты нагрузки. Напротив, снижение коэффициентов горизонтальной нагрузки происходит при разгрузке токопровода от встречных направлений действия ветра и горизонтальных сосредоточенных сил [2].

Сложность при механическом расчете гибкой ошиновки распределительных устройств (РУ) заключается в том, что неизвестны составляющие усилий от отпайки P_y и P_z , зависящие от реального расположения отпайки, его натяжения, которое, в свою очередь, зависит от координат точки крепления.

ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

Ниже приводятся формулы для оценки усилий от отпайки в середине пролета (рис. 1).

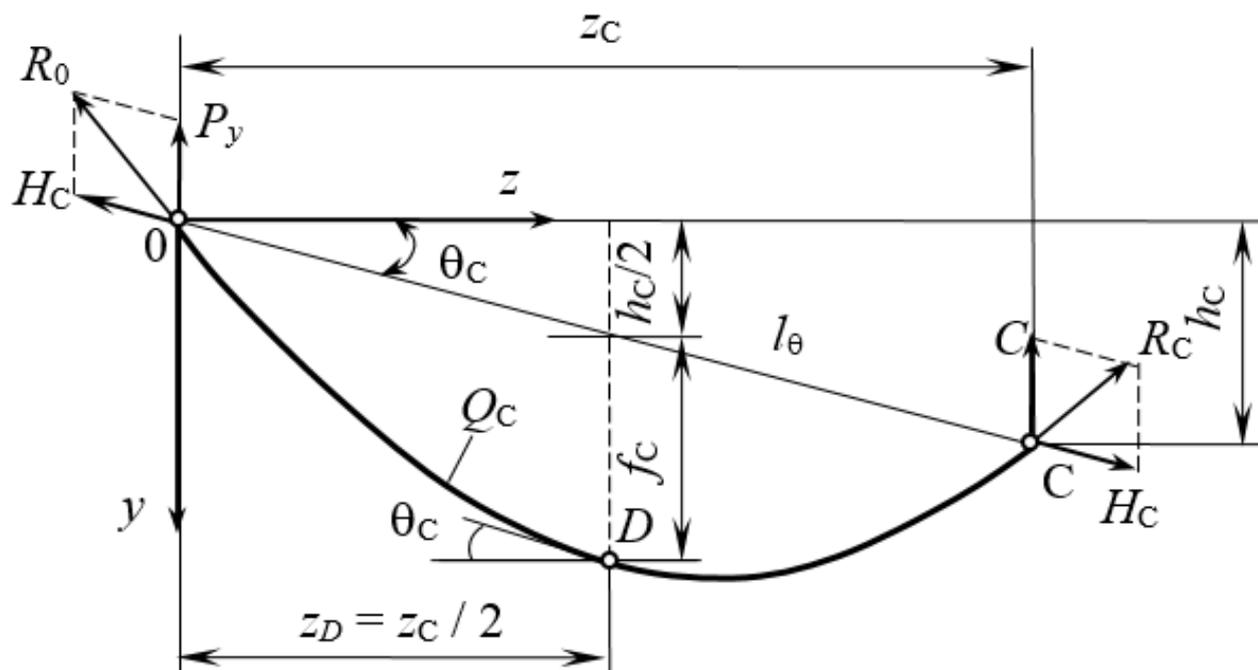


Рисунок 1 – Расчетная схема отпайки к электрическому аппарату: 0 – точка крепления отпайки к токопроводу, С – точка крепления отпайки к аппарату

Допускается, что отпайка к электрическому аппарату выполнена тем же проводом, что и токопровод РУ, и на нее действуют те же распределенные нагрузки от веса, гололеда и ветра. Отпайку можно рассматривать как гибкую нить с малой стрелой провеса [3]. Тогда усилия на ошиновку и аппарат можно приравнять к реакциям балочной модели на точки крепления. Для первого приближения предлагается использовать выражения:

$$P_y = q_y \cdot \sqrt{z_C^2 + \left(\frac{H_A + H_B}{2} - H_{\text{ап}} \right)^2}; \quad (1)$$

$$P_z = q_z \cdot \sqrt{z_C^2 + \left(\frac{H_A + H_B}{2} - H_{\text{ап}} \right)^2}, \quad (2)$$

где z_C – горизонтальное расстояние от оси пролета до электрического аппарата (со знаком «плюс» при направлении отпайки по оси z , со знаком «минус» – в противоположном направлении);

q_y – погонный вес провода;

q_z – погонная нагрузка от ветра на провод;

H_A, H_B – высоты подвеса провода на опорах А и В;

$H_{\text{ап}}$ – высота электрического аппарата.

После предварительного расчета по формулам (1) составляющие можно уточнить

$$P_y = q_y \cdot \sqrt{(z_C - z_0)^2 + \left(\frac{H_A + H_B}{2} - H_{\text{ап}} - y_0 \right)^2}; \quad (3)$$

$$P_z = q_z \cdot \sqrt{(z_C - z_0)^2 + \left(\frac{H_A + H_B}{2} - H_{\text{ап}} - y_0 \right)^2}, \quad (4)$$

либо по [3]:

$$P_y = \frac{q_y |z_C - z_0|}{2} \cdot \left[1 + \frac{0,5(H_A + H_B) - H_{\text{ап}} - y_0}{4f_C} \right]; \quad (5)$$

$$P_z = \frac{q_z [0,5(H_A + H_B) - H_{\text{ап}} - y_0]}{2} \cdot \left[1 + \frac{(z_C - z_0) \cdot \text{sign}(q_z)}{4f_C} \right], \quad (6)$$

где f_C – стрела провеса отпайки;

y_0, z_0 – отклонения точки крепления отпайки;

$\text{sign}(q_z)$ – знак погонной нагрузки q_z .

Формулами (5) и (6) можно воспользоваться, если известна стрела провеса отпайки.

Так как отпайки монтируют практически без натяжения, определение стрелы провеса затруднительно. При изменении климатического режима меняется положение отпайки и ее натяжение.

Длину отпайки ориентировочно можно определить по формуле [3]

$$L_C = \frac{|z_C - z_0|}{\cos \theta_C} + \frac{8}{3} \frac{f_C^2}{|z_C - z_0|} \cos^3 \theta_C, \quad (7)$$

где

$$\cos \theta_C = \frac{|z_C - z_0|}{l_\theta} = \frac{|z_C - z_0|}{\sqrt{(z_C - z_0)^2 + [0,5(H_A + H_B) - H_{\text{ап}} - y_0]^2}}.$$

При больших углах наклона пролета отпайки θ_C (см. рис. 1) и килевом расположении отпайек формулы (5–7) дают большую погрешность или даже ими нельзя воспользоваться.

При вертикальном расположении отпайки ($z_C = 0$):

$$P_y = q_y \cdot \left(\frac{H_A + H_B}{2} - H_{\text{ап}} - y_0 \right); \quad (8)$$

$$P_z = 0,5 \cdot q_z \cdot \left(\frac{H_A + H_B}{2} - H_{\text{ап}} - y_0 \right). \quad (9)$$

Коэффициент 0,5 в формуле (9) связан с практическим равенством усилий на провод и электрический аппарат при воздействии ветра на отпайку.

Если провода отпайки отличаются от токопровода, например, числом расщепленных проводов или маркой, то в формулы (1–9) подставляются погонные нагрузки, действующие на отпайку в рассчитываемом климатическом режиме.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Даны формулы расчета составляющих усилий на ошиновку от отпайки для разных вариантов ориентации отпайки. Знание значений составляющих сосредоточенных сил от отпайки позволяет повысить точность расчета стрел провеса и тяжений токопроводов. Эти составляющие сил от отпайки дают уточненные коэффициенты увеличения стрелы провеса и нагрузки, что позволяет их использоваться в уравнениях состояния для определения тяжений в других климатических режимах. Даются примеры применения расчетных формул для различных вариантов расположения отпайек: по ветру, против ветра и при вертикальном расположении.

ЛИТЕРАТУРА

1. Бладыко, Ю.В. Механический расчет гибких токопроводов при замене сосредоточенных сил распределенной нагрузкой / Ю.В. Бладыко // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2018. Т. 61, № 2. С. 97–107.
2. Бладыко, Ю.В. Механический расчет гибких токопроводов при наличии горизонтальных сосредоточенных нагрузок / Ю.В. Бладыко // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2020. Т. 63, № 6. С. 500–514.
3. Качурин, В.К. Гибкие нити с малыми стрелками / В.К. Качурин. М.: Гостехиздат, 1956. 224 с.

УДК 621.315.176

РЕЗУЛЬТАТЫ МЕХАНИЧЕСКОГО РАСЧЕТА ОШИНОВКИ
С ОТПАЙКОЙ В СЕРЕДИНЕ ПРОЛЕТА
RESULTS OF A MECHANICAL CALCULATION OF A BUSBAR
WITH A TAP IN THE MID-SPAN

Бладыко Ю.В., к-т. техн. наук, доцент
Белорусский национальный технический университет, г. Минск, Беларусь
Y. Vladyko, Candidate of Technical Sciences, Docent,
Belarusian National Technical University, Minsk, Belarus

Аннотация. Приведены формулы для расчета коэффициентов увеличения стрелы провеса с учетом составляющих сил от отпайки. Даются примеры применения расчетных формул для разных вариантов пролетов распределительных устройств.

Abstract. Formulas are given for calculating the coefficients of increasing the sag, taking into account the components of the forces from the tap. Examples of application of calculation formulas for different variants of spans of subspans are given.

Ключевые слова: стрела провеса, тяжение, гирлянды изоляторов, пролет, отпайка.

Keywords: sag, tension, insulator strings, span, tap.

ВВЕДЕНИЕ

Расчеты выполнялись для следующих исходных данных: длина пролета РУ $l = 30$ м, провод 264/34 АCSR с погонным весом $q_v = 0,98$ даН/м, площадью поперечного сечения $F = 297,8$ мм², модулем упругости $E = 7400$ даН/мм², тяжение в исходном режиме $H = 490$ даН, погонный вес гирлянд изоляторов $q_{гв} = 30$ даН/м, длина каждой натяжной гирлянды изоляторов $l_r = 2$ м. Высоты подвеса провода к порталам $H_A = H_B = 15$ м. Отпайка к электрическому аппарату крепится в середине пролета сборных шин на расстоянии z_C от оси пролета. Высота электрического аппарата $H_{ап} = 2$ м. Исходный климатический режим – без ветра и гололеда, температура $t = -5$ °С. В режиме максимального скоростного напора ветра принимается его скорость $V = 30$ м/с. В гололедном режиме $V = 15$ м/с, толщина стенки гололеда $b = 20$ мм.

ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

В таблице 1 приведены результаты расчета по предложенной методике [1] в сравнении с результатами, полученными по компьютерной программе MR21 [2, 3]. При расчете стрел провеса подставлялись составляющие сил от отпайки P_v и P_z , рассчитанные с учетом их реального расположения по программе MR21. Тяжение в различных климатических режимах определялось решением уравнения состояния. Значения, стоящие в скобках, используются при отсутствии ветровых нагрузок [1]. Максимальные стрелы провеса и горизонтальные отклонения определяются в точке крепления отпайки, расположенной в середине пролета.

Таблица 1 – Результаты расчетов

№ пп	Конфигурация отпайки	Климатические условия	Нагрузка на провод q_y / q_z , даН/м	Нагрузка на гирлянду $q_{гy} / q_{гz}$, даН/м	Сила от отпайки по MR21 P_y / P_z , даН	Коэффициент увеличения стрелы провеса K_{fy} / K_{fz} ($q_z K_{fz}$)	Тяже-ние H , даН	Макс. стрелы провеса y_0 / z_0 , м
1	$z_c = 10$ м	$V = 0$ м/с, $b = 0$ мм, $t = -5^\circ\text{C}$	0,98/0	30/0	15/4	2,547/(0,267)	490	0,57/0,06
2		$V = 15$ м/с, $b = 20$ мм, $t = -5^\circ\text{C}$	2,43/1,51	45/4,66	39/25	2,380/2,142	1059	0,62/0,34
3		$V = 30$ м/с, $b = 0$ мм, $t = -5^\circ\text{C}$	0,98/1,22	30/16,31	17/19	2,683/2,263	672	0,44/0,46
4		$V = 0$ м/с, $b = 0$ мм, $t = 50^\circ\text{C}$	0,98/0	30/0	15/4	2,547/(0,267)	368	0,76/0,08
5	$z_c = -10$ м	$V = 0$ м/с, $b = 0$ мм, $t = -5^\circ\text{C}$	0,98/0	30/0	16/-4	2,615/ (-0,267)	490	0,59/-0,06
6		$V = 15$ м/с, $b = 20$ мм, $t = -5^\circ\text{C}$	2,43/1,51	45/4,66	45/-5	2,544/0,816	1012	0,69/0,14
7		$V = 30$ м/с, $b = 0$ мм, $t = -5^\circ\text{C}$	0,98/1,22	30/16,31	22/-1	3,023/1,166	603	0,55/0,26
8		$V = 0$ м/с, $b = 0$ мм, $t = 50^\circ\text{C}$	0,98/0	30/0	15/-4	2,547/ (-0,267)	364	0,77/-0,08
9	$z_c = 0$	$V = 0$ м/с, $b = 0$ мм, $t = -5^\circ\text{C}$	0,98/0	30/0	12/0	2,343/1	490	0,53/0
10		$V = 15$ м/с, $b = 20$ мм, $t = -5^\circ\text{C}$	2,43/1,51	45/4,66	35/13	2,270/1,612	1034	0,60/0,26
11		$V = 30$ м/с, $b = 0$ мм, $t = -5^\circ\text{C}$	0,98/1,22	30/16,31	18/9	2,751/1,715	656	0,46/0,36
12		$V = 0$ м/с, $b = 0$ мм, $t = 50^\circ\text{C}$	0,98/0	30/0	12/0	2,343/1	359	0,72/0

Пример расчета отклонений токопровода для гололедного режима с ветром, совпадающим с направлением отпайки (по данным п. 2 табл. 1).

Первое приближение составляющих усилий от отпаяк

$$P_y = q_y \cdot \sqrt{z_c^2 + \left(\frac{H_A + H_B}{2} - H_{\text{ан}} \right)^2} = 2,43 \cdot \sqrt{10^2 + \left(\frac{15+15}{2} - 2 \right)^2} = 39,8 \text{ даН};$$

$$P_z = q_z \cdot \sqrt{z_c^2 + \left(\frac{H_A + H_B}{2} - H_{\text{ан}} \right)^2} = 1,51 \cdot \sqrt{10^2 + \left(\frac{15+15}{2} - 2 \right)^2} = 24,8 \text{ даН}.$$

Коэффициенты увеличения стрелы провеса

$$K_{fy} = 1 + 4 \left(\frac{q_{гy}}{q_y} - 1 \right) \left(\frac{l_r}{l} \right)^2 + \frac{2P_y}{q_y l} = 1 + 4 \left(\frac{45}{2,43} - 1 \right) \left(\frac{2}{30} \right)^2 + \frac{2 \cdot 39,8}{2,43 \cdot 30} = 2,40;$$

$$K_{fz} = 1 + 4 \left(\frac{q_{гz}}{q_z} - 1 \right) \left(\frac{l_r}{l} \right)^2 + \frac{2P_z}{q_z l} = 1 + 4 \left(\frac{4,66}{1,51} - 1 \right) \left(\frac{2}{30} \right)^2 + \frac{2 \cdot 24,8}{1,51 \cdot 30} = 2,13.$$

Отклонения точки крепления отпайки

$$y_0 = \frac{q_y l^2 K_{fy}}{8H} = \frac{2,43 \cdot 30^2 \cdot 2,40}{8 \cdot 1059} = 0,62 \text{ м};$$

$$z_0 = \frac{q_z l^2 K_{fz}}{8H} = \frac{1,51 \cdot 30^2 \cdot 2,13}{8 \cdot 1059} = 0,34 \text{ м}.$$

Проведем уточнение сил от отпайки, задаваясь ее стрелой провеса $f_C = 1,33$ м:

$$P_y = \frac{q_y |z_C - z_0|}{2} \cdot \left[1 + \frac{0,5(H_A + H_B) - H_{ан} - y_0}{4f_C} \right] =$$

$$= \frac{2,43 \cdot |10 - 0,34|}{2} \cdot \left[1 + \frac{0,5 \cdot (15 + 15) - 2 - 0,62}{4 \cdot 1,33} \right] = 39,0 \text{ даН};$$

$$P_z = \frac{q_z [0,5(H_A + H_B) - H_{ан} - y_0]}{2} \cdot \left[1 + \frac{(z_C - z_0) \cdot \text{sign}(q_z)}{4f_C} \right] =$$

$$= \frac{1,51 \cdot [0,5 \cdot (15 + 15) - 2 - 0,62]}{2} \cdot \left[1 + \frac{(10 - 0,34) \cdot 1}{4 \cdot 1,33} \right] = 26,3 \text{ даН}.$$

Пример расчета отклонений токопровода для режима наибольшего скоростного напора ветра, совпадающего с направлением отпайки (по данным п. 3 табл. 1).

Составляющие усилий от отпайк

$$P_y = q_y \cdot \sqrt{z_C^2 + \left(\frac{H_A + H_B}{2} - H_{ан} \right)^2} = 0,98 \cdot \sqrt{10^2 + \left(\frac{15 + 15}{2} - 2 \right)^2} = 16,1 \text{ даН};$$

$$P_z = q_z \cdot \sqrt{z_C^2 + \left(\frac{H_A + H_B}{2} - H_{ан} \right)^2} = 1,22 \cdot \sqrt{10^2 + \left(\frac{15 + 15}{2} - 2 \right)^2} = 20,0 \text{ даН}.$$

Коэффициенты увеличения стрелы провеса

$$K_{fy} = 1 + 4 \left(\frac{q_{fy}}{q_y} - 1 \right) \left(\frac{l_r}{l} \right)^2 + \frac{2P_y}{q_y l} = 1 + 4 \left(\frac{30}{0,98} - 1 \right) \left(\frac{2}{30} \right)^2 + \frac{2 \cdot 16,1}{0,98 \cdot 30} = 2,62;$$

$$K_{fz} = 1 + 4 \left(\frac{q_{fz}}{q_z} - 1 \right) \left(\frac{l_r}{l} \right)^2 + \frac{2P_z}{q_z l} = 1 + 4 \left(\frac{16,31}{1,22} - 1 \right) \left(\frac{2}{30} \right)^2 + \frac{2 \cdot 20,0}{1,22 \cdot 30} = 2,29.$$

Отклонения точки крепления отпайки

$$y_0 = \frac{q_y l^2 K_{fy}}{8H} = \frac{0,98 \cdot 30^2 \cdot 2,62}{8 \cdot 672} = 0,43 \text{ м}; \quad z_0 = \frac{q_z l^2 K_{fz}}{8H} = \frac{1,22 \cdot 30^2 \cdot 2,29}{8 \cdot 672} = 0,47 \text{ м}.$$

Пример расчета отклонений токопровода для климатического режима без ветра (по данным п. 1 табл. 1).

Составляющие усилий от отпаяк

$$P_y = q_y \cdot \sqrt{z_C^2 + \left(\frac{H_A + H_B}{2} - H_{\text{ан}} \right)^2} = 0,98 \cdot \sqrt{10^2 + \left(\frac{15+15}{2} - 2 \right)^2} = 16,1 \text{ даН};$$

$$P_z = q_z \cdot \sqrt{z_C^2 + \left(\frac{H_A + H_B}{2} - H_{\text{ан}} \right)^2} = 0 \cdot \sqrt{10^2 + \left(\frac{15+15}{2} - 2 \right)^2} = 0 \text{ даН}.$$

Коэффициенты увеличения стрелы провеса определяем при $P_z \approx H_C = 4$ даН, где H_C – тяжеие в отпайке. При отсутствии ветра пользуемся формулами расчета горизонтальных отклонений и нагрузки после нахождения произведений коэффициента увеличения горизонтальных отклонений и горизонтальной составляющей коэффициента нагрузки на погонную нагрузку:

$$K_{fy} = 1 + 4 \left(\frac{q_{ry}}{q_y} - 1 \right) \left(\frac{l_r}{l} \right)^2 + \frac{2P_y}{q_y l} = 1 + 4 \left(\frac{30}{0,98} - 1 \right) \left(\frac{2}{30} \right)^2 + \frac{2 \cdot 16,1}{0,98 \cdot 30} = 2,62;$$

$$q_z K_{fz} = q_z + 4(q_{rz} - q_z) \left(\frac{l_r}{l} \right)^2 + \frac{2P_z}{l} = 0 + 4(0 - 0) \left(\frac{2}{30} \right)^2 + \frac{2 \cdot 4,0}{30} = 0,27.$$

Отклонения точки крепления отпайки

$$y_0 = \frac{q_y l^2 K_{fy}}{8H} = \frac{0,98 \cdot 30^2 \cdot 2,62}{8 \cdot 490} = 0,59 \text{ м}; \quad z_0 = \frac{(q_z K_{fz}) l^2}{8H} = \frac{0,27 \cdot 30^2}{8 \cdot 490} = 0,06 \text{ м}.$$

Пример расчета отклонений токопровода для гололедного режима с ветром, не совпадающим с направлением отпайки (по данным п. 6 табл. 1).

Первое приближение составляющих усилий от отпаяк

$$P_y = q_y \cdot \sqrt{z_C^2 + \left(\frac{H_A + H_B}{2} - H_{\text{ан}} \right)^2} = 2,43 \cdot \sqrt{(-10)^2 + \left(\frac{15+15}{2} - 2 \right)^2} = 39,8 \text{ даН};$$

$$\begin{aligned} P_z &= \frac{q_z [0,5(H_A + H_B) - H_{\text{ан}}]}{2} \cdot \left[1 + \frac{z_C \cdot \text{sign}(q_z)}{4f_C} \right] = \\ &= \frac{1,51 \cdot [0,5 \cdot (15+15) - 2]}{2} \cdot \left[1 + \frac{-10 \cdot 1}{4 \cdot 1,33} \right] = -8,6 \text{ даН}. \end{aligned}$$

Коэффициенты увеличения стрелы провеса

$$K_{fy} = 1 + 4 \left(\frac{q_{ry}}{q_y} - 1 \right) \left(\frac{l_r}{l} \right)^2 + \frac{2P_y}{q_y l} = 1 + 4 \left(\frac{45}{2,43} - 1 \right) \left(\frac{2}{30} \right)^2 + \frac{2 \cdot 39,8}{2,43 \cdot 30} = 2,40;$$

$$K_{fz} = 1 + 4 \left(\frac{q_{rz}}{q_z} - 1 \right) \left(\frac{l_r}{l} \right)^2 + \frac{2P_z}{q_z l} = 1 + 4 \left(\frac{4,66}{1,51} - 1 \right) \left(\frac{2}{30} \right)^2 + \frac{2 \cdot (-8,2)}{1,51 \cdot 30} = 0,66;$$

Отклонения точки крепления отпайки

$$y_0 = \frac{q_y l^2 K_{fy}}{8H} = \frac{2,43 \cdot 30^2 \cdot 2,40}{8 \cdot 1012} = 0,65 \text{ м};$$

$$z_0 = \frac{q_z l^2 K_{fz}}{8H} = \frac{1,51 \cdot 30^2 \cdot 0,66}{8 \cdot 1012} = 0,11 \text{ м}.$$

Проведем уточнение сил от отпайки, задаваясь ее стрелой провеса $f_C = 1,33 \text{ м}$:

$$P_y = \frac{q_y |z_C - z_0|}{2} \cdot \left[1 + \frac{0,5(H_A + H_B) - H_{ан} - y_0}{4f_C} \right] =$$

$$= \frac{2,43 \cdot |-10 - 0,11|}{2} \cdot \left[1 + \frac{0,5 \cdot (15 + 15) - 2 - 0,65}{4 \cdot 1,33} \right] = 40,8 \text{ даН};$$

$$P_z = \frac{q_z [0,5(H_A + H_B) - H_{ан} - y_0]}{2} \cdot \left[1 + \frac{(z_C - z_0) \cdot \text{sign}(q_z)}{4f_C} \right] =$$

$$= \frac{1,51 \cdot [0,5 \cdot (15 + 15) - 2 - 0,65]}{2} \cdot \left[1 + \frac{(-10 - 0,11) \cdot 1}{4 \cdot 1,33} \right] = -8,4 \text{ даН}.$$

Пример расчета отклонений токопровода для случая вертикального расположения отпайки (по данным п. 10 табл. 1).

Составляющие усилий от отпайки

$$P_y = q_y \cdot \left(\frac{H_A + H_B}{2} - H_{ан} \right) = 2,43 \cdot \left(\frac{15 + 15}{2} - 2 \right) = 31,6 \text{ даН};$$

$$P_z = 0,5 \cdot q_z \cdot \left(\frac{H_A + H_B}{2} - H_{ан} \right) = 0,5 \cdot 1,51 \cdot \left(\frac{15 + 15}{2} - 2 \right) = 9,8 \text{ даН}.$$

Коэффициенты увеличения стрелы провеса

$$K_{fy} = 1 + 4 \left(\frac{q_{ry}}{q_y} - 1 \right) \left(\frac{l_r}{l} \right)^2 + \frac{2P_y}{q_y l} = 1 + 4 \left(\frac{45}{2,43} - 1 \right) \left(\frac{2}{30} \right)^2 + \frac{2 \cdot 31,6}{2,43 \cdot 30} = 2,18;$$

$$K_{fz} = 1 + 4 \left(\frac{q_{rz}}{q_z} - 1 \right) \left(\frac{l_r}{l} \right)^2 + \frac{2P_z}{q_z l} = 1 + 4 \left(\frac{4,66}{1,51} - 1 \right) \left(\frac{2}{30} \right)^2 + \frac{2 \cdot 9,8}{1,51 \cdot 30} = 1,47.$$

Отклонения точки крепления отпайки

$$y_0 = \frac{q_y l^2 K_{fy}}{8H} = \frac{2,43 \cdot 30^2 \cdot 2,18}{8 \cdot 1034} = 0,58 \text{ м};$$

$$z_0 = \frac{q_z l^2 K_{fz}}{8H} = \frac{1,51 \cdot 30^2 \cdot 1,47}{8 \cdot 1034} = 0,24 \text{ м}.$$

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Приведенные результаты расчетов хорошо совпадают с результатами, полученными по компьютерной программе, что свидетельствует об возможном применении формул расчета составляющих сил от отпаяк в проектной практике.

ЛИТЕРАТУРА

1. Бладыко, Ю.В. Механический расчет гибких токопроводов при наличии горизонтальных сосредоточенных нагрузок / Ю.В. Бладыко // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2020. Т. 63, № 6. С. 500–514.
2. Стрелюк, М.И. Численный метод расчета статики гибкой ошиновки ОРУ в различных режимах климатических воздействий / М.И. Стрелюк, И.И. Сергей, Ю.В. Бладыко // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений. 1983. № 8. С. 8–14.
3. Сергей, И.И. Пакет компьютерных программ для механического и электродинамического расчета гибких токоведущих конструкций / И.И. Сергей, Е.Г. Пономаренко, Ю.В. Бладыко, П.И. Климович // Методические вопросы исследования надежности больших систем энергетики. Материалы Международного семинара имени Ю.Н. Руденко. Минск, БНТУ, 2015. С. 308–310.

УДК 621.313.333

ЧАСТОТНЫЙ МЕТОД ДИАГНОСТИКИ ОБМОТОК СТАТОРОВ
АСИНХРОННЫХ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ
FREQUENCY METHOD FOR DIAGNOSTICS OF STATOR WINDINGS
OF ASYNCHRONOUS ELECTRIC MOTORS

Зеленко В.В., ст. преподаватель, Суходолов Ю.В., к-т. техн. наук, доцент,
Сизиков С.В., к-т. техн. наук, доцент
Белорусский национальный технический университет, г. Минск, Беларусь
V. Zelenko, Senior Lecturer, Yu. Suchodolov, Candidate of Technical Sciences,
S. Sizikov, Candidate of Technical Sciences
Belarusian National Technical University, Minsk, Belarus

*Аннотация. Рассматривается частотный метод диагностики, позволяющий
увеличить чувствительность при контроле обмоток асинхронных
электродвигателей на витковые замыкания.*

*Abstract. A frequency diagnostic method is considered that allows
increasing the sensitivity when monitoring the windings of asynchronous
electric motors for turn-based short circuits.*

*Ключевые слова: асинхронные электродвигатели, частотная диагностика,
гармонические составляющие спектра, чувствительность контроля.*

*Keywords: asynchronous electric motors, frequency diagnostics, harmonic components
of spectrum, control sensitivity.*

ВВЕДЕНИЕ

Повышение чувствительности при испытании обмоток статоров асинхронных электродвигателей на витковые замыкания можно осуществить путем замены малочувствительной регистрации временных изменений параметров сигналов, снимаемых с поврежденной обмотки, регистрацией изменений амплитуды одной или нескольких гармонических составляющих, обладающих максимальной чувствительностью к отклонениям контролируемого параметра обмотки.

При контроле обмоток асинхронных электродвигателей применяются радиоимпульсы, высокочастотные импульсы, затухающие импульсы. Эффективность контроля можно повысить путем согласования спектрального состава испытательного сигнала с частотной характеристикой контролируемого объекта. Создание испытательных сигналов с амплитудой и несущей частотой, которые соответствуют резонансной области частот контролируемой обмотки, позволяет создать между витками контролируемой обмотки максимальные испытательные напряжения при равномерном распределении вдоль обмотки.

ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

Увеличить чувствительность контроля на витковые замыкания в обмотках электродвигателей возможно путем выбора временных параметров испытательных сигналов и замены регистрации изменения параметров сигнала во

временной области на регистрацию изменения амплитуды одной или нескольких спектральных составляющих выходного сигнала, обладающих максимальной чувствительностью к отклонениям контролируемого параметра обмотки.

Испытательный сигнал можно представить рядом Фурье [1]:

$$u(t) = \sum_{n=1}^{\infty} \underline{A}_n \exp(-j2\pi n f_0 t),$$

где \underline{A}_n – амплитуда гармоники с номером n ;

f_0 – частота следования импульсов испытательного сигнала.

После прохождения через обмотку сигнал можно записать в виде выражения:

$$u(t) = \sum_{n=1}^{\infty} \hat{E}(f_n / f_0) \underline{A}_n \exp(-j2\pi n f_0 t),$$

где $\hat{E}(f_n / f_0)$ – коэффициент передачи обмотки на частоте регистрируемой гармоники с номером

n : $n = f_n / f_0$ – номер регистрируемой гармоники.

Чувствительность метода контроля можно определить как отношение относительного увеличения регистрируемого параметра при замыкании к относительному изменению этого же параметра при максимально допустимых отклонениях параметров обмотки:

$$C = \frac{\Delta \underline{A}_{\hat{a}} / \underline{A}_{\hat{e}}}{\Delta \underline{A}_{\hat{e}} / \underline{A}_{\hat{e}}} = \frac{\sum_{n=1}^{\infty} [\hat{E}_{\hat{a}}(f_n / f_0) - \hat{E}_{\hat{e}}(f_n / f_0)] \cdot \underline{U}_n \exp(-j2\pi n f_0 t)}{\sum_{n=1}^{\infty} \Delta \hat{E}_{\hat{e}}(f_n / f_0) \cdot \underline{U}_n \exp(-j2\pi n f_0 t)}, \quad (1)$$

где $\hat{E}_{\hat{e}}(f_n / f_0)$, $\hat{E}'_{\hat{e}}(f_n / f_0)$ – коэффициенты передачи исправной обмотки с номером n , который соответствует частоте $f_n = n f_0$ при максимальном и минимальном отклонениях параметров обмотки от образцовой;

$$\Delta \hat{E}_{\hat{e}}(f_n / f_0) = \hat{E}_{\hat{e}}(f_n / f_0) - \hat{E}'_{\hat{e}}(f_n / f_0),$$

где $\hat{E}_{\hat{a}}(f_n / f_0)$ – коэффициент передачи обмотки с витковым замыканием для гармоники с номером n ;

\underline{U}_n – амплитуда гармоники входного сигнала с номером n ;

$\underline{A}_{\hat{e}}$ – комплексная величина выходного сигнала для исправной обмотки при максимальном отклонении параметров обмотки;

$\Delta \underline{A}_{\hat{a}}$ – абсолютное увеличение контролируемого параметра выходного сигнала при замыкании одного витка;

$A_{\dot{e}}'$ – комплексная величина выходного сигнала при минимальном отклонении обмотки, $\Delta A_{\dot{e}} = A_{\dot{e}} - A_{\dot{e}}'$.

Выражение (1) показывает, что максимальную чувствительность можно получить, если о состоянии обмотки судить по одной, или нескольким составляющим сигнала, подвергаемым наибольшему изменению при возникновении дефекта. Наибольшим изменениям подвергаются составляющие выходного сигнала, частота которых соответствует резонансной области контролируемой обмотки.

В общем случае условие превышения относительного увеличения параметра регистрируемого сигнала при замыкании одного витка обмотки над относительным увеличением этого же параметра для исправной обмотки и при одновременном воздействии дестабилизирующих факторов будет иметь вид:

$$C_{\dot{e}} = \frac{(\Delta A_{\dot{n}} - \Delta A_{\dot{a}\dot{a}}) / A_{\dot{e}}}{(\Delta A_{\dot{e}} + \Delta A_{\dot{e}\dot{a}}) / A_{\dot{e}}} > 1. \quad (2)$$

где $\Delta A_{\dot{e}\dot{a}}$, $\Delta A_{\dot{a}\dot{a}}$ – комплексные приращения величин $A_{\dot{e}}$ и $A_{\dot{a}}$, являющиеся абсолютной погрешностью и образующиеся за счет воздействия дестабилизирующих факторов;

$A_{\dot{a}}$ – комплексная величина выходного сигнала при наличии виткового замыкания.

С целью создания необходимого уровня и стабильных параметров подаваемого испытательного напряжения целесообразно применять сигналы в виде периодических последовательностей радиоимпульсов. Для определения спектрального состава последовательностей радиоимпульсов, можно представить их в виде суммы из m , задержанных во времени на T_c относительно друг друга, полных периодов синусоиды, которую можно как сумму положительной и отрицательной полуволны. Комплексная амплитуда полуволны n -й гармоники, согласно [2], определяется выражением:

$$U_{n1/2} = \frac{2U_m \dot{O}_{\dot{n}}}{\pi \dot{O}_{\dot{n}} (1 - n^2 T_c^2 / T_o^2)} \left| \cos \frac{\pi n T_c}{2 T_o} \right| \exp[-j \pi n T_c / (2 T_o)],$$

где T_c – период следования импульсов;

T_o – период синусоидального заполнения.

Сложив положительную и задержанную во времени на $t_{\dot{c}} = T / 2$ отрицательную полуволны, в соответствии с теоремой о смещении, получим комплексную амплитуду n -й гармоники суммарного сигнала:

$$\underline{U}_{n\Sigma 1/2} = \underline{U}_{n1/2} - \underline{U}_{n1/2} \exp - j \pi n T_c / T_o,$$

Складывая сигналы, представляющие собой последовательность одного периода синусоиды с временной задержкой каждой относительно координат $t_c = (m - 1)T_c$ получим выражение комплексной амплитуды \underline{U}_n .

Определив положение характерных точек (нули) огибающей амплитудного спектра последовательностей радиоимпульсов

$n_0 = lf_c / (f_0 m)$, где $l = 1, 2, \dots$, далее можно получить выражение для нахождения наибольшего максимума огибающей амплитудного спектра сигналов в виде последовательностей радиоимпульсов:

$$U_{nm} = mU_m f_0 / f_c.$$

где $f_0 = 1/T_0$; $f_c = 1/T_c$.

Поэтому для обнаружения дефектов целесообразнее использовать спектральные составляющие с номерами, близкими к f_c / f_0 .

Экспериментальные исследования показывают, что наличие виткового замыкания приводит к изменению угла наклона амплитудно-частотной характеристики (АЧХ) измерительной системы с дефектом в обмотке.

Это изменение с высокой точностью можно зафиксировать, выделяя из огибающей амплитудного спектра выходного сигнала, сразу две близлежащие гармоники, соответствующие по частоте самому крутому участку АЧХ измерительной системы с дефектом в обмотке. Суммой близлежащих гармоник будут биения, по форме которых можно судить о равенстве амплитуд гармоник и о состоянии обмотки. При наличии дефекта будет наблюдаться неравенство амплитуд выделяемых гармоник. При отсутствии дефекта также будет наблюдаться незначительное неравенство гармоник, но оно может быть скомпенсировано наклоном соответствующего участка огибающей амплитудного спектра подаваемого сигнала. Этот участок следует определять таким образом, чтобы в его пределах касательная к огибающей амплитудного спектра имела нулевой или близкий к нему угол наклона, что соответствует гармонике $n = f_c / f_0$. Тогда частота заполнения радиоимпульса:

$$f_c = (f_1 + f_2) / 2 + \Delta f,$$

где f_1 и f_2 – частоты, соответствующие началу и концу падающего участка АЧХ измерительной системы;

Δf – приращение частоты, необходимое для компенсации неравенства амплитуд выделяемых гармоник.

Увеличение частоты на Δf скомпенсирует наклон частотной характеристики для исправной обмотки, т. е. будет выполняться равенство

$$|U_{mn1}| = |U_{mn2}|$$

где $|U_{mn1}|$, $|U_{mn2}|$ – амплитуды гармоник выходного сигнала для исправной обмотки с номерами n_1 и n_2 , близкими к значению f_c / f_0 .

При выборе частоты следования радиоимпульсов необходимо выполнить условие, чтобы $n_1 f_0 \geq f_1$ и $n_2 f_0 \leq f_2$. Амплитуда радиоимпульсов и количество периодов синусоиды радиоимпульсов выбирается так, чтобы был создан необходимый уровень испытательного межвиткового напряжения.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Частотное совмещение выделяемых гармоник с областью АЧХ контролируемой обмотки, подвергающейся наибольшему изменению при возникновении виткового замыкания, позволяет получить превышение относительного увеличения регистрируемого сигнала от замыкания одного витка над относительным изменением этого же параметра для исправной обмотки с учетом разброса ее параметров и одновременном воздействии дестабилизирующих факторов на сигнал.

Увеличить чувствительность контроля можно используя в качестве информативного параметра наклон АЧХ обмотки.

ЛИТЕРАТУРА

1. Гоноровский, И.С. Радиотехнические цепи и сигналы / И.С. Гоноровский. М.: Радио и связь, 1986. – 512 с.
2. Радиотехнические цепи и сигналы / Под ред. К.А. Самойло. М.: Радио и связь, 1982. – 528 с.

УДК 004.3

МОДЕЛИРОВАНИЕ СХЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕМ
С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МИКРОКОНТРОЛЛЕРА
SIMULATION OF THE ELECTRIC MOTOR CONTROL SCHEME USING
A MICROCONTROLLER

Матвеевко И.П., кандидат технических наук, доцент
УО «Белорусский государственный аграрный технический университет»,
г. Минск, Беларусь

I. Matveenko, Ph.D., Associate Professor
Belarusian State Agricultural Technical University, Minsk, Belarus

Аннотация. В работе рассмотрены вопросы моделирования на компьютере схемы управления двумя электродвигателями постоянного тока с использованием микроконтроллера, позволяющие виртуально проверить работоспособность таких устройств.

Annotation. The work considers the issues of modeling on the computer scheme of control of two electric motors of DC using a microcontroller, allowing to virtually check the health of such devices.

Ключевые слова: моделирование, электродвигатель, микроконтроллер.

Keywords: modeling, electric motor, microcontroller.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время уровень развития материально-технической базы производства позволяет перейти от наращивания энергетических мощностей к качественно новому этапу – совершенствованию структуры материально-технической базы, повышению ее технического уровня на основе использования автоматизированных систем.

Автоматизация технологических процессов требует, как правило, использования разнообразного и сложного дополнительного оборудования, в первую очередь, микроконтроллеров и различных типов исполнительных устройств, к которым, в первую очередь, относятся электродвигатели.

ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

Системы автоматизированного управления электродвигателями, как правило, включают электронные схемы с использованием микроконтроллеров различных типов. Но отладка работы реальных микроконтроллеров оказывается трудоемкой задачей, так как необходимо написать программу, с помощью программатора занести ее в процессор, подключить к выходу контроллера электродвигатели и только тогда увидеть результат. Поэтому отладку работы микроконтроллера осуществляют с помощью моделирования на компьютере.

Для проведения компьютерного моделирования была использована программа Proteus v8. Proteus – представляет собой симулятор принципиальных электронных схем, который основывается на моделях электронных элементов,

содержит большую библиотеку таких компонентов, а также основные типы микроконтроллеров: AVR, ARM, PIC. Микроконтроллеры Atmel megaAVR имеют память программ и данных большого объема при высоком быстродействии и, поэтому, часто используются при создании различных схем управления.

В работе приводится проект схемы для управления двумя двигателями постоянного тока с использованием микроконтроллера, в котором предусматривается возможность регулирования скорости и направления вращения электродвигателей M1 и M2 (рис.1).

Для создания проекта необходимо собрать виртуальную электронную схему, выбрав необходимые элементы, и разместить их на выделенном пространстве [1]. В работе используется микроконтроллер AVR фирмы ATMEL типа ATMEGA 328P, к выходным портам которого подключается микросхема L298.

Микросхема L298 представляет собой двоянный мостовой драйвер двигателей и предназначена для управления двигателями постоянного тока, а также шаговыми двигателями. Данная микросхема находит очень широкое применение в робототехнике. Одна микросхема L298 способна управлять двумя двигателями и обеспечивает максимальную нагрузку до 2А на каждый двигатель. Двигатели постоянного тока (M1 и M2) подключаются уже к выходам микросхемы L298 (OUT1 и OUT2 – для M1, OUT3 и OUT4 – для M2) вместе со светодиодами, которые подают световой сигнал при достижении максимальной скорости вращения.

Контроллер управляет работой электродвигателей постоянного тока, используя широтно-импульсную модуляцию (ШИМ). Скважность импульсов, которые подаются на входы ENA и ENB микросхемы L298, при этом может задаваться с пульта управления.

Особенностью данной схемы является использование электронного конструктора Arduino, с помощью которого можно создавать различные электронные устройства. По сути, это аппаратная вычислительная платформа универсального назначения. Она может использоваться как для построения простых схем, так и для реализации довольно сложных проектов.

Плата Ардуино является простым микроконтроллером AVR (в данном случае ATmega 328P), который был прошит бутлоадером. Базируется конструктор на своей аппаратной части, которая представляет собой плату ввода-вывода. Для программирования платы используются языки, которые основаны на C/C++[2].

Ардуино не требуется программатор, а написанный код можно загрузить в микроконтроллер посредством USB-шнура с помощью специальной прошивки – бутлоадером (специальная программа, которая запускается сразу после подключения и ждет прошивки кристалла).

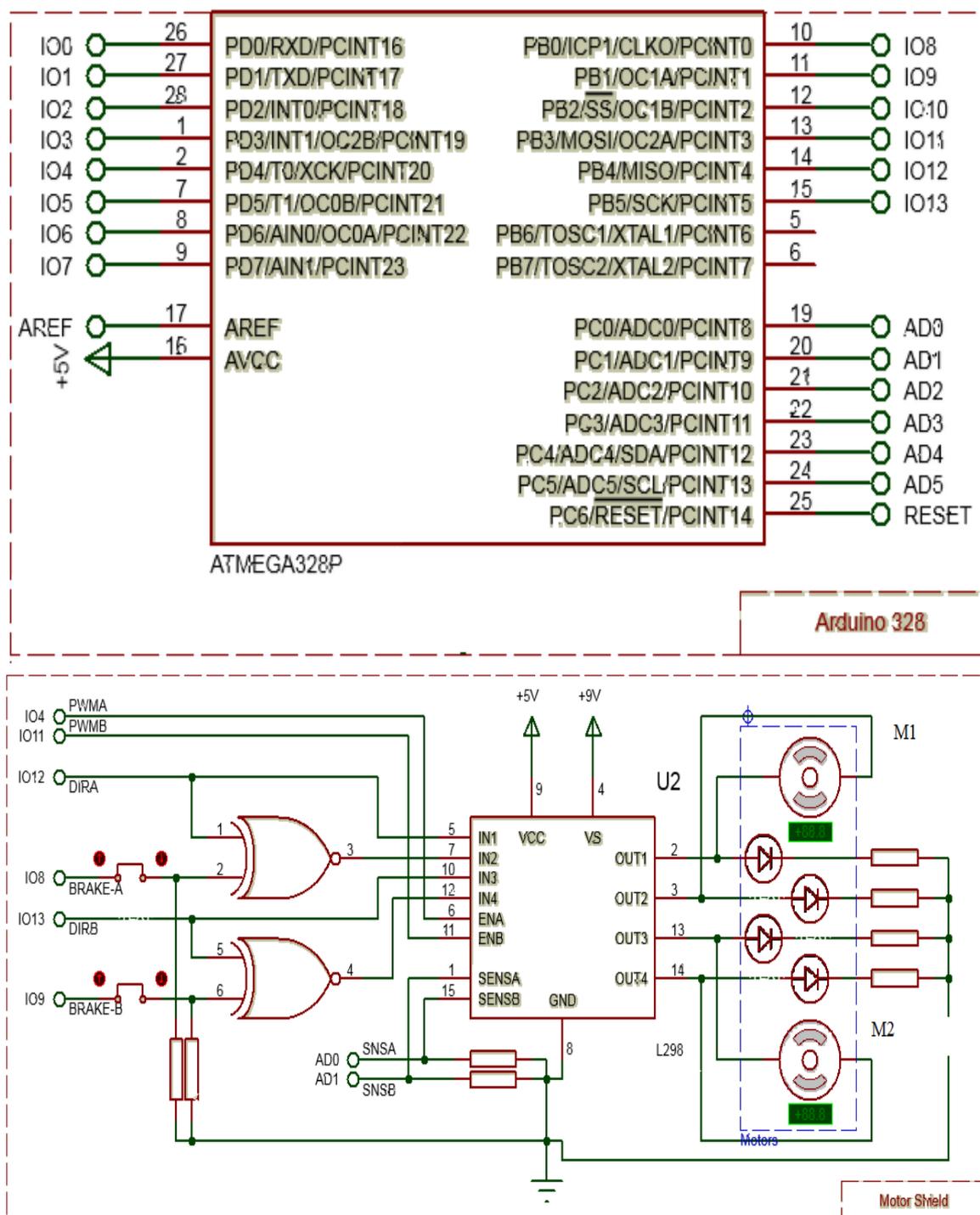


Рисунок 1 – Разработанный макет проекта

Далее проверяется работа созданной схемы в соответствии с разработанной программой. Запускается эмуляция программы, и можно наблюдать работу схемы в соответствии с написанной программой [3] для микроконтроллера. В нашем случае, в процессе эмуляции визуально наблюдаем вращение электродвигателей M1 и M2 и управление скоростью и направлением вращения в соответствии скважностью импульсов, задаваемых микроконтроллером.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, используя программу Proteus, можно достаточно легко смоделировать электронную схему управления электродвигателями с помощью микроконтроллера AVR и провести ее отладку. И уже потом создавать реальную схему, зная, что она будет выполнять свои функции.

ЛИТЕРАТУРА

1. Матвеевко И.П. Методика изучения микроконтроллеров AVR. «Информатизация образования», № 2. 2013. – С. 86–95.
2. Электронный ресурс: <http://fb.ru/article/206826/arduino-dlya-nachinayuschih-poshagovye-instruktsii-programirovanie-i-proektyi-arduino-s-chego-nachat>.
3. Программирование в AVR Studio 5 с самого начала: <http://datagor.ru/microcontrollers/1787-programirovanie-v-avrstudio-5-s-nulya.html>.

УДК 621.313

АКТИВНЫЙ СИЛОВОЙ ФИЛЬТР НА ОСНОВЕ АДАПТИВНОЙ ФИЛЬТРАЦИИ
ACTIVE POWER FILTER BASED ON ADAPTIVE FILTRATION

Первенёнок Р.Е., к-т. техн. наук, доцент, Сицко А.Л.
Военная академия Республики Беларусь, г. Минск, Беларусь
R. Pervenonok, Cand. tech. Sciences, Associate Professor, A. Sitsko,
Military Academy of the Republic of Belarus, Minsk, Belarus

Аннотация. Рассмотрен алгоритм адаптивной фильтрации, который позволил улучшить характеристики активного силового фильтра.

Проведено имитационное моделирование трехфазного параллельного активного силового фильтра.

Annotation. An adaptive filtering algorithm is considered, which made it possible to improve the characteristics of the active power filter. Simulation modeling of a three-phase parallel active power filter is carried out.

Ключевые слова: система автономного электроснабжения, автономный образец вооружения, активный фильтр.

Key words: autonomous power supply system, autonomous weapon model, active filter.

ВВЕДЕНИЕ

Система автономного электроснабжения (САЭС) является неотъемлемой частью автономных образцов вооружения (АОВ). Ее задачей как функциональной системы образца вооружения является бесперебойное обеспечение потребителей электрической энергией с требуемым качеством во всех режимах работы.

В состав функционального оборудования АОВ входят электрические нагрузки (ЭН) с нелинейной вольтамперной характеристикой. Главная особенность таких ЭН – потребление несинусоидального тока. Доля нелинейных нагрузок в составе функционального оборудования современных АОВ достигает 80 %. При сравнимых мощностях СЭС переменного тока и импульсной (нелинейной) нагрузки неизбежно искажается форма синусоидального напряжения [1]. Данные искажения оказывают отрицательное влияние на оборудование АОВ, которое выражается в сокращении срока службы изоляции электрических машин и аппаратов электрооборудования, в увеличении потерь на гистерезис и вихревые токи в магнитопроводе и обмотках трансформаторов, в снижении коэффициента мощности и электромагнитного момента на валу асинхронных двигателей, в ложном срабатывании ответственной управляющей и защитной аппаратуры, в нарушении работы специальной вычислительной техники, в повышении вероятности возникновения резонансных явлений в СЭС [1–3].

Достижения силовой электроники позволяют создавать системы коррекции качества питающего напряжения на основе параллельных активных фильтров (АФ) [4]. Принцип действия АФ основан на анализе гармоник тока или напряжения нелинейной нагрузки и генерации в систему электроснабжения СЭС таких же гармоник тока или напряжения, но с противоположной фазой. Основное

отличие разрабатываемых систем заключается в применяемых алгоритмах определения параметров тока компенсации, которые зачастую имеют высокую стоимость технической реализации и сложную систему управления. Качество компенсации зависит от применяемого метода формирования задающих воздействий на силовую часть.

ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

Методы управления характеристиками силовых активных фильтров основанные на применении алгоритмов цифровой обработки сигналов, начали интенсивно развиваться в последние годы, поэтому многие вопросы применения этих методов остаются нерешенными.

Силовая часть АФ представлена инвертором, получающий сигналы управления от системы формирования управляющих сигналов АФ. Характеристики АФ в основном зависят от системы формирования управляющих сигналов. Основные исследования АФ направлены на получение качественных и быстрых алгоритмов выделения опорных токов и напряжений в системе формирования управляющих сигналов.

Формируемый системой управления АФ спектральный состав сигнала, должен совпадать с гармоническим составом несинусоидального тока, генерируемого нелинейной нагрузкой, кроме основной гармоники. В компенсирующем токе она должна отсутствовать.

Для получения сигнала компенсации можно использовать аналоговый режекторный фильтр, настроенный на частоту основной гармоники [4]. Использование аналогового режекторного фильтра имеет недостатки, связанные с тем, что такой фильтр является статическим устройством, и его характеристики не изменяются при изменении частоты и амплитуды основной гармоники. Для формирования управляющего сигнала АФ необходимо адаптивное устройство, характеристики которого изменяются при изменении спектрального состава несинусоидальных токов или напряжений.

Структурная схема адаптивного фильтра, компенсирующего гармонику основной частоты, показана на рисунке 1.

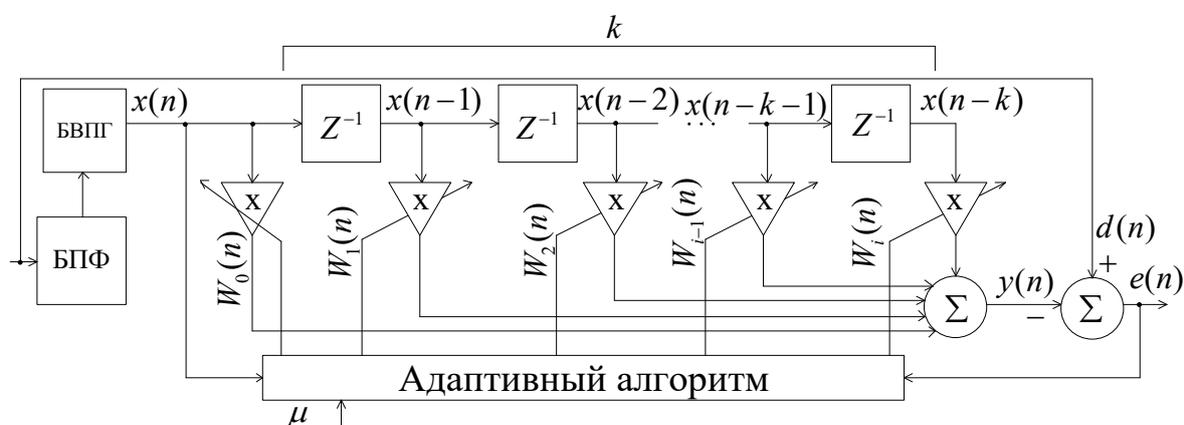


Рисунок 1 – Структура адаптивного фильтра

Сигнал основного входа $d(n)$ пропорциональный несинусоидальному току или напряжению сети. Сигнал $x(n)$, поступающий на вход адаптивного фильтра, формируется из основного сигнала с помощью блоков быстрого преобразования Фурье (БПФ) и блока выделения первой гармоники БВПГ. На выходе адаптивного фильтра формируются отсчеты компенсирующего сигнала $e(n)$. Функциональными узлами цифрового фильтра являются умножители (\times), сумматоры (Σ), элементы задержки (Z^{-1}), весовые коэффициенты фильтра $W_i(n)$, формируются адаптивным алгоритмом, и коэффициент оптимизации μ , в качестве адаптивного алгоритма выбран упрощенный алгоритм Ньютона.

Исследование алгоритма адаптивной фильтрации было проведено в программном комплексе Matlab [7]. В качестве примера рассмотрим результаты компенсации высших гармоник в спектре тока трехфазного мостового выпрямителя.

Спектр сигнала, поступающего на основной вход фильтра, показан на рисунке 2. Коэффициент гармоник сигнала, поступающего на основной вход $\text{THD}_1 = 24,36 \%$.

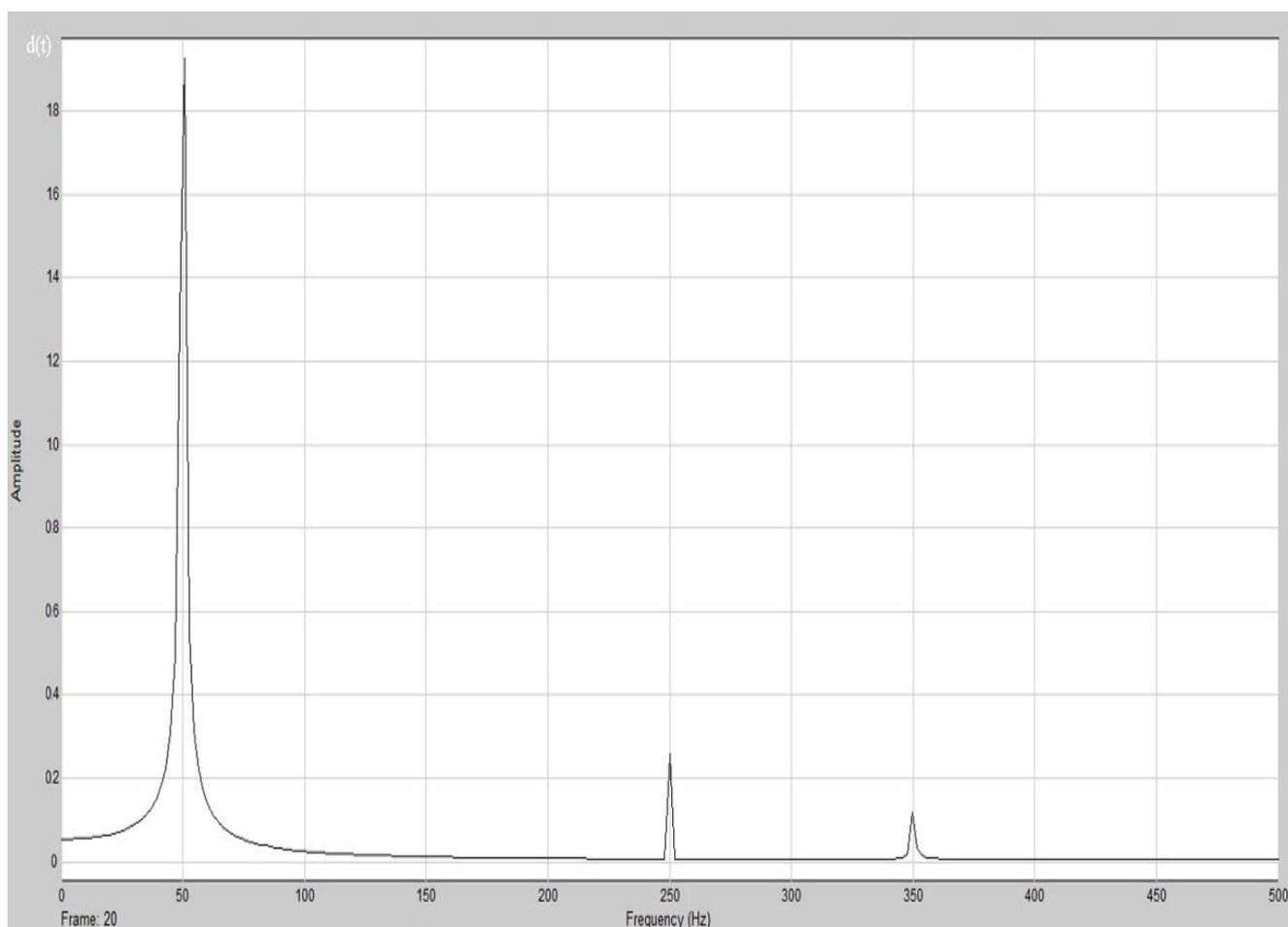


Рисунок 2 – Спектр сигнал на основном входе адаптивного фильтра

Спектр восстановленного сигнала показан на рисунке 3. Коэффициент гармоник восстановленного сигнала $\text{THD}_1 = 5,18 \%$

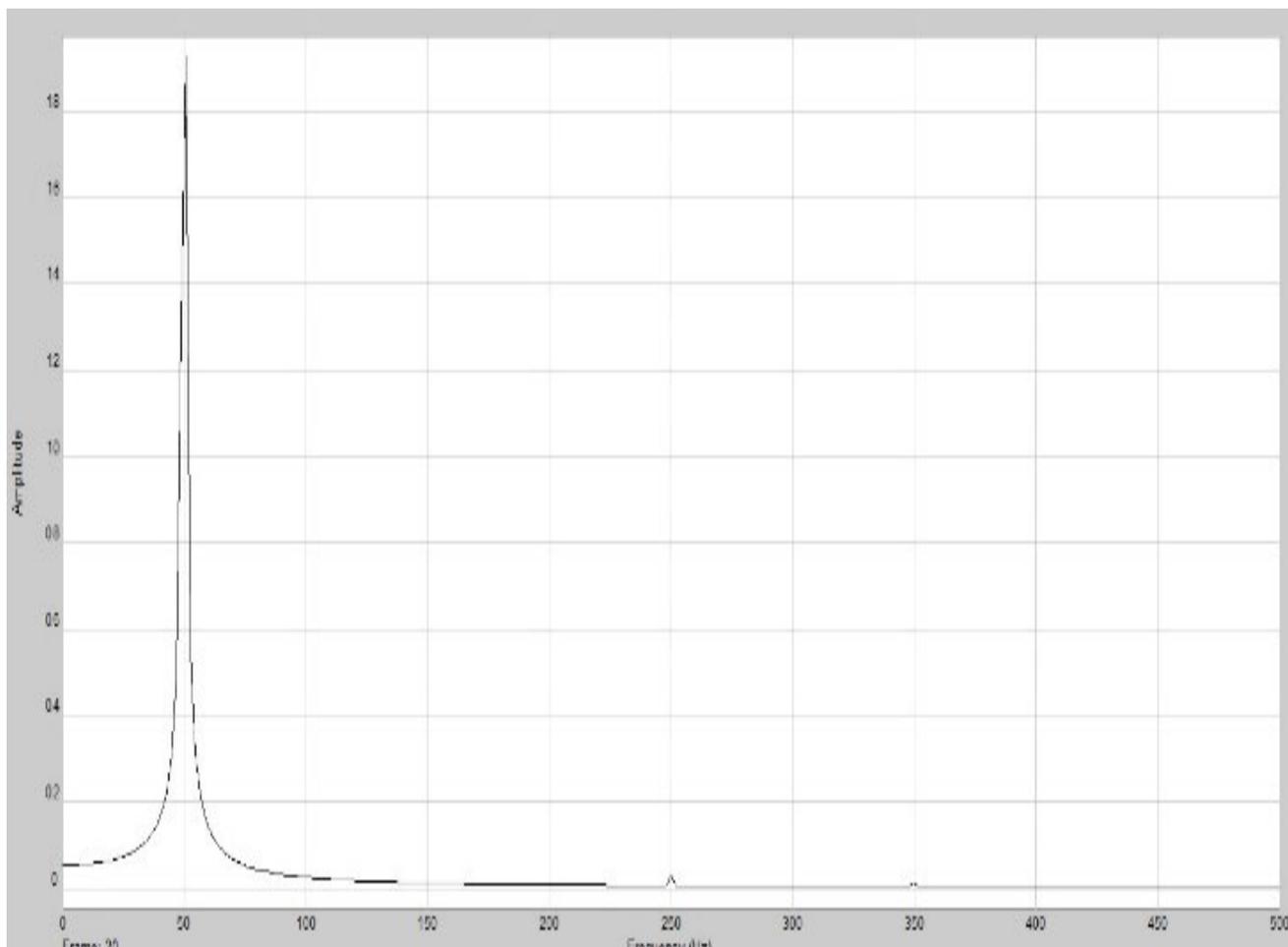


Рисунок 3 – Спектр восстановленного сигнала адаптивного фильтра

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Рассмотрен метод формирования управляющих сигналов для активных фильтрокомпенсирующих устройств, основанный на использовании методов цифровой обработки сигналов.

Основой системы формирования управляющих сигналов является адаптивный цифровой фильтр в форме линии задержки с отводами, настраиваемый с помощью упрощенного алгоритма Ньютона.

Результаты имитационного моделирования предложенного метода показали, что метод эффективно подавляет высшие гармоники несинусоидальных напряжений и токов, а также компенсирует реактивную составляющую первой гармоники тока.

ЛИТЕРАТУРА

1. Аррилага, Дж. Гармоники в электрических системах / Дж. Аррилага, Д. Брэдли, П. Боджер.: пер.с англ. – М.: Энергоатомиздат, 1990.
2. Розанов, Ю.К. Силовая электроника: учебник для вузов/ Ю.К. Розанов, М.В. Рябчицкий, А.А. Кваснюк. Изд. 2-е. – М.: Издательский дом МЭИ, 2009. – 632 с.

3. Жежеленко, И.В. Электромагнитная совместимость потребителей / И.В. Жежеленко, А.К. Шидловский, Г.Г. Пивняк и др. – Машиностроение, 2012. – 351 с.
4. Уидроу Б., Стирнз С. Адаптивная обработка сигналов: Пер. с англ. – М.: Радио и связь, 2006. – 856 с.: ил.
5. Джиган В.И. Адаптивная фильтрация сигналов: теория и алгоритмы. М.: Техносфера, 2013. – 528 с.
6. Адаптивные фильтры: Пер. с англ. / Под ред. К.Ф.Н. Коуэна, П.М. Гранта. – М.: Мир, 1988. – 392 с.: ил.
7. Дьяконов В. MATLAB. Обработка сигналов и изображений [Текст] / В. Дьяконов. – СПб.: Питер, 2002. – 608 с.
8. Боярская, Н.П. Адаптивная система формирования управляющих сигналов для активных фильтров гармоник / Н.П. Боярская, А.М. Дербенев, В.П. Довгун // Ползуновский вестник – № 2/1 – 2011 – с. 25–29.
9. Сицко А.Л., Первенёнок Р.Е. Система управления силового активного фильтрокомпенсирующего устройства с адаптивной фильтрацией // Энергетическая стратегия – № 2 – 2021 – с. 43–47.

УДК 621.311.153

АДРЕСНО-РЕГУЛИРУЕМОЕ ПОТОКОРАСПРЕДЕЛЕНИЕ
В ВЫСОКОВОЛЬТНОЙ СЕТИ БЕЛОРУССКОЙ ЭНЕРГОСИСТЕМЫ
ADDRESS-CONTROLLED FLOW DISTRIBUTION IN THE HIGH-VOLTAGE
NETWORK OF THE BELARUSIAN POWER SYSTEM

Александров О.И., к-т техн. наук, доцент

Белорусский государственный технологический университет, г. Минск, Беларусь

Пекарчик О.А., ст. преподаватель

Белорусский национальный технический университет, г. Минск, Беларусь

O. Alexandrov, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor,

Belarusian State Technological University, Minsk, Belarus;

V. Piakarchyk, Senior Lecturer

Belarusian National Technical University, Minsk, Belarus

Аннотация. В настоящее время важной проблемой является определение рациональных режимов работы электроэнергетической системы (ЭЭС), т. е. определение наиболее целесообразных значений внутри- и межсистемных потоков мощности и энергии в энергообъединении, которая подразумевает комплекс оптимальных условий существования режима при соблюдении ряда ограничений. В условиях конъюнктурных и политических взаимоотношений между соседними энергосистемами важным звеном является адресно-регулируемое распределение потоков электроэнергии (ЭЭ) по конкретной договорно-рыночной стратегии.

Abstract. Currently, an important problem is to determine the rational modes of operation of the electric power system (EPS), i.e., the efficiency of the electric power system determination of the most appropriate values of intra-and inter-system power and energy flows in the power connection, which implies a set of optimal conditions for the existence of the regime, subject to a number of restrictions. In the context of conjunctural and political relations between neighboring power systems, an important link is the targeted and regulated distribution of electric power flows (EP) according to a specific contractual-market strategy.

Ключевые слова: потокораспределение, электрическая сеть, транспорт электроэнергии, энергосистемы.

Keywords: flow distribution, electric grid, electric power transport, power systems.

ВВЕДЕНИЕ

В реализации транзитного потенциала Республика Беларусь исходит из положений и принципов Европейской Энергетической Хартии, целью которой является создание общего недискриминационного рынка электроэнергии на евразийском континенте посредством организации параллельной работы крупных энергетических объединений – UCTE, CENTREL, NORDEL и объединения энергосистем стран СНГ и ОЭС Балтии.

Этому способствует участие Беларуси в разработке крупных международных проектов «Восток – Запад в условиях функционирования Балтийского кольца», «Параллельная работа стран СНГ с ОЭС Европы».

Объединенная энергосистема (ОЭС) Республики Беларусь граничит с энергосистемами пяти сопредельных государств (Россия, Литва, Латвия, Украина, Польша), имея с ними межгосударственные перетоки электроэнергии (ЭЭ) по 38 линиям. Потому взаимодействие энергосистем с учетом высоковольтных межсистемных транзитов (МТ) определяет надежность электроснабжения дефицитных регионов и приобретает не только режимный, но и экономический смысл.

Поскольку современные питающие и межсистемные линии электропередачи (МЛЭП) представляют собой многоконтурную и сложно-замкнутую сетевую структуру, выбор рациональных режимов эксплуатации энергосистем с учетом МТ представляет довольно трудную задачу, которая имеет ряд принципиальных особенностей, вызывающих определенные сложности. Ведение оптимального режима в ЭЭС подразумевает решение комплекса задач, обеспечивающих минимальные издержки. В число этих задач входят такие, как выбор состава работающего оборудования, распределение нагрузок между станциями с минимизацией расхода топлива и с наименьшими потерями в электрических сетях, а также рациональная работа всего объединения с учетом межсистемных линий электропередачи. Формулировка данной проблемы была рассмотрена ранее [1]. Задача представлена многокритериальной целевой функцией, которая включает в себя минимум отклонения значений перетоков от запланированных значений, минимум суммарного расхода топлива, минимум потерь мощности и энергии, как в энергосистеме, так и в межсистемных линиях электропередачи.

ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

Основные показатели, необходимые для принятия оптимальных решений, были разработаны авторами ранее на основе системного анализа с охватом всех определяющих факторов, т. е. были сформированы документы для их оперативного использования диспетчерским персоналом смежных энергосистем. В нашем случае речь идет о многолетнем оперативно-диспетчерском взаимодействии Системного Оператора Единой энергетической системы РФ (СО ЕЭС) и Объединенного диспетчерского управления Республики Беларусь ОДУ Белэнерго.

Важным элементом такого управления является адресно-регулируемое распределение мощностей для межсистемных перетоков в энергообъединении (ЭО), т. е. оптимизация текущего режима за отрезок времени, в течение усредненного часового (получасового) интервала, когда параметры сети можно считать условно постоянными. При таком допущении каждый интервал рассматривается как независимый, а осуществление баланса между производством и потреблением ЭЭ необходимого качества считается гарантированным. В этом случае задача управления ЭО в течение определенного интервала (например, суток) распадается на ряд последовательных задач, результаты решения которых в агрегированном виде дают искомый суточный график для ведения режима всего

ЭО. Если при этом были выполнены ограничивающие условия по изменяющимся параметрам и, достигнут минимум затратных средств, то режим ЭО будет оптимальным. Для разных часовых интервалов (особенно во время сезона пиковых нагрузок) выполняется перераспределение энергоперетоков с соседними энергосистемами. Экономически целесообразные величины продаваемой ЭЭ определяются на основе технико-экономических и режимных расчетов с учетом технических, режимных, директивных и ценовых ограничений. Для расчетного уровня транзитной мощности определяется оптимальная загрузка электростанций энергосистемы для различных часовых интервалов. Получаемое при этом рациональное значение мощности для разных нагрузок энергосистемы позволяет определить оптимальное количество экспортируемой электроэнергии на планируемый расчетный период в соответствии с договорными условиями. Исходными данными для анализа режимов являются расчетные балансы мощности по областным энергосистемам, принимаемые на основе прогнозов электропотребления и электрических нагрузок на рассматриваемый перспективный период. Эти балансы разрабатываются для основного планируемого режима, а также для заданных режимов, которые могут иметь место при неблагоприятных сочетаниях, в частности, плановых ремонтов энергетического оборудования, а также аварийных режимов, включая потерю устойчивости и отказ элементов системной автоматики. Однако, учитывая множество целей у субъектов и противоречивость их интересов, взаимодействие межгосударственных перетоков влечет за собой нивелирование нормативов в рамках общесистемной надежности во всем Таможенном пространстве (Беларусь-Россия-Казахстан), что на сегодняшний день юридически пока не определено и требует, по-видимому, создания системы механизмов координации на международном уровне. На первом этапе решения задачи коррекции режима ЭЭС можно ограничиться возможностью регулирования перетоков ЛЭП с помощью средств генерации активной и реактивной мощности (электростанции системы и источники реактивной мощности). В этом случае критерием оптимальности считаются минимальные изменения узловых мощностей (по сравнению с исходным режимом), затем подключаются узлы с источниками регулирования активной и реактивной мощности, соответствующие ветвям, имеющим трансформаторы с РПН.

Одной из важных проблем взаимодействия смежных энергосистем является разработка рациональных принципов тарифообразования по перетокам электроэнергии внутри каждой энергосистемы в составе энергообъединения, а также покупки электроэнергии от локальных источников и источников на возобновляемых энергоносителях. В настоящее время важной *проблемой* является определение рациональных режимов работы электроэнергетической системы в жестких условиях взаимодействия с энергосистемами Российской Федерации, Украины и Прибалтики. Кроме того, выполняется экспорт для ряда режимов в Литву и Украину на основании заключаемых контрактов, в которых оговаривается цена. Причем принципы формирования договорной цены не устанавливаются (цена договорная) и она является коммерческой тайной, однако в реальных условиях поставок оговариваются правила корректировки договорной цены в зависимости от различных режимных, директивных и конъюнктурных условий.

Экономическая заинтересованность потребителей в использовании позонных тарифов обеспечивается за счет снижения затрат на покупаемую электроэнергию вследствие перемещения электропотребления из пиковой зоны в базовую

$$\Delta C_{\pi} = (t_{\pi} - t_{б})\Delta Э \text{ руб/период,} \quad (1)$$

где $t_{\pi}, t_{б}$ – ставки за 1 кВт/ч соответственно в пиковой и базовой временных зонах суточного графика электрической нагрузки;

$\Delta Э$ – величина электроэнергии, перемещаемой из пиковой зоны в базовую.

Если выравнивание режима электропотребления происходит за счет осуществления каких-либо мероприятий, требующих капитальных вложений, то эффективность их использования оценивается с помощью показателя эффективности $E = \frac{\Delta C_{\pi}}{K}$, который должен сравниваться с некоторым нормативным показателем E_H . Если финансирование будет осуществляться за счет собственных средств предприятия, то оно будет выгодно для него в том случае, если приведет к повышению уровня рентабельности ($E > K_{рен}$). Если же источником финансирования являются заемные средства в виде кредита банка, то мероприятие выгодно; когда за счет годовой экономии, определяемой с помощью формулы (1), обеспечивается возврат этих средств вместе с процентами за установленный срок кредитования.

Но снижение платы за потребленную электроэнергию приводит к сокращению денежных поступлений в энергосистему, и в результате ухудшаются экономические показатели ее работы. Однако выравнивание режима сопровождается снижением расхода топлива на электростанциях, их необходимой суммарной установленной мощности и количества остановов и пусков основного оборудования в период ночного провала нагрузки.

Экономия топлива обуславливается тем, что в период пика к покрытию нагрузки подключаются наименее экономичные агрегаты энергосистемы (конденсационные агрегаты на докритических параметрах пара, конденсационные мощности ТЭЦ). В базовой же зоне работают более экономичные агрегаты (оборудование на закритических параметрах пара). Эту слагаемую экономии можно представить в виде

$$\Delta C_{зс} = (C_{т}^{\pi} b_{у}^{\pi} - C_{т}^{б} b_{у}^{б}) \Delta Э \text{ руб/период,} \quad (2)$$

где $C_{т}^{\pi}, C_{т}^{б}$ – цена топлива, используемого на пиковых и базовых агрегатах;

$b_{у}^{\pi}, b_{у}^{б}$ – удельные расходы топлива на указанных агрегатах.

Доля энергии, проходящей через электрические сети ОЭС РБ, определяется пропускной способностью сети. В определенном количестве транзит ЭЭ через ОЭС РБ может быть уменьшен по взаимной договоренности с помощью отключения некоторых ЛЭП, т. е. благодаря изменению схемы сети.

Для ОЭС РБ транзит бывает:

– коммерческий (результат торговли между странами электрического кольца БРЭЛЛ);

– физический (существует постоянно из-за исторически сложившейся в период существования СССР конфигурации электрических сетей).

Существуют 2 подхода к определению фактического перетока ЭЭ:

– С помощью счетчика отдающей стороны. В данном случае потери ЭЭ в межгосударственных ЛЭП относятся на сторону, принимающую ЭЭ;

– С помощью формулы, которая приводит переток ЭЭ к государственной границе. Тогда потери ЭЭ делятся пропорционально протяженности ЛЭП, проходящей по их территории.

Количество переданной ЭЭ стороной, отдающей ЭЭ (Сторона 1), определяется по показанию счетчика передающей стороны и величине потерь на участке межсистемных ЛЭП, приходящейся на ее территорию:

$$W_{\text{Сторона 1}} - W_{\text{Сторона 2}} = W_{O1} - (W_{O1} - W_{П2}) \cdot K_{\text{пот1}},$$

где W_{O1} – показание счетчика передающей стороны, кВт·ч;

$W_{П2}$ – показание счетчика принимающей стороны, кВт·ч;

$K_{\text{пот1}}$ – коэффициент потерь в межсистемных ЛЭП для передающей стороны, который равен:

$$K_{\text{пот1}} = L_1 / L,$$

где L – длина межсистемной ЛЭП;

L_1 – длина участка межсистемной ЛЭП по территории передающей стороны.

Основным недостатком является отсутствие на сегодняшний день единого подхода к определению потерь электрической энергии в межгосударственных ЛЭП.

Экономия, обусловливаемая облегчением прохождения агрегатами электростанций ночного минимума электрической нагрузки, выражается снижением затрат топлива на пуски и остановки оборудования и повышением надежности его работы. Количественная оценка этой экономии затруднительна, может быть дана лишь экспертная оценка ее на основе анализа статистики пусков и остановов по станциям конкретной энергосистемы.

Оценка риска деятельности субъектов энергетического рынка. Модель объекта исследования. Рассматривается ОЭС состоящее из n и M связей (дуг) между узлами. Расчетная схема ОЭС представляется в виде связного графа. Заданы \bar{x}_i, \bar{y}_j – располагаемая генерирующая мощность и нагрузки (потребность) энергоузлов, в тоже время $\bar{y}_i(\omega)$, и при планировании необходимо учитывать, что требуемая нагрузка в ОЭС – случайная величина; \bar{z}_{ij} – максимально допустимая ПС ЛЭП из узла i в узел j . Все параметры $\bar{x}_i, \bar{y}_j, \bar{z}_{ij}$ неотрицательны. Величины x_i, y_i – используемая мощность и покрываемая нагрузка в узлах $i = 1, \dots, n$; z_{ij} – перетоки из узла i в узел j .

При планировании величины экспортируемой мощности необходимо учитывать основные требования к надежности режима ОЭС:

– наличие в ОЭС резерва мощности на уровне, определяемом существующими нормативами:

$$0,12P_{\max} \leq \sum_{i=1}^n \Delta x_i \leq 0,18P_{\max}, \quad (3)$$

где P_{\max} – максимум нагрузки по энергообъединению;

– вероятность не покрытия нагрузки не должна превышать нормативную

$$P\{\tilde{y}_i(\omega) - y_i < 0\} \leq \alpha_i, \quad (4)$$

где $\tilde{y}_i(\omega)$ – требуемая величина потребляемой мощности (случайная величина;

α_i – вероятность не покрытия нагрузки – нормативный показатель для i -й ЭЭС, входящей в ОЭС;

– аналогично вероятность перегрузки по ПС:

$$P\{\bar{z}_{ij} - z_{ij}(\omega) > 0\} \leq \beta, \quad (5)$$

где $z_{ij}(\omega)$ – величина передаваемой мощности по связи z_{ij} , зависящая от случайной величины потребления мощности;

β – вероятность перегрузки ЛЭП.

Необходимо соблюдение баланса активной мощности по ЭЭС в целом (с учетом квадратичных потерь):

$$x_i - y_i + \sum_{j=1}^n (1 - \alpha_{ji} z_{ji}) z_{ji} - \sum_{j=1}^n z_{ij} = 0, \quad i = 1, \dots, n, \quad i \neq j,$$

где α_{ji} – заданные положительные коэффициенты. Величина $\alpha_{ij}(z_{ij})^2$ – потери мощности при передаче из узла i в объеме z_{ij} в узел j .

Задача анализа избыточности (дефицитности) ОЭС первоначально формулируется следующим образом: найти такие значения переменных x_i , y_i , z_{ij} , удовлетворяющее условиям, при которых достигается минимальное значение суммарного дефицита мощности [2]:

$$\sum_{i=1}^n (\bar{y}_i - y_i) \rightarrow \min.$$

Если ввести дополнительные переменные

$$d_i = \bar{y}_i - y_i, i = 1, \dots, n,$$

характеризующие дефицит мощности по узлам, то задача приобретает вид

$$\sum d_i \rightarrow \min.$$

Результатом данной задачи является величина потребляемой мощности, при существующих генерирующих мощностях и ПС ЛЭП, соответствующей минимуму суммарного дефицита по ОЭС. Далее рассмотрена постановка, обладающая свойством распределения суммарного дефицита мощности по дефицитным узлам. Задача формулируется следующим образом: найти значения x_i , y_i , z_{ij} , удовлетворяющие технологическим требованиям и минимизирующие следующий критерий:

$$f(y) = \sum_{i \in I} \frac{(\bar{y}_i(\omega) - y_i)^2}{\bar{y}_i(\omega)} + \lambda \sum_{i=1}^M (\bar{y}_i(\omega) - y_i),$$

где I – множество узлов с дефицитом генерирующих мощностей.

Решением данной задачи является вектор переменных, соответствующий минимуму суммарного дефицита и обладающий свойством распределения дефицита пропорционально нагрузкам. данный критерий распределения нагрузок по узлам обеспечивает однозначность в распределении по узлам дефицитов мощности d_i и, соответственно однозначность в выборе покрываемых нагрузок y_i . Необходимая степень однозначности решений и исключений явных несуразностей (типа перетоков по замкнутому контуру) достигается за счет введения второго этапа вычисления: с зафиксированными нагрузками y_i решаем задачу:

$$\sum_{i=1}^n B_i x_i + \sum_i \sum_j \lambda_{ij} z_{ij} \rightarrow \min$$

при условиях (3)–(5). Здесь $B_i > 0$, $\lambda_{ij} > 0$ – заданные коэффициенты, отражающие представление о приоритетности вовлечения мощности отдельных узлов и межузловых связей. Параметры B_i , λ_{ij} могут иметь следующий физический смысл затрат на генерацию и передачу. В результате получается значение генерирующих мощностей и перетоков, соответствующих минимальным затратам; величины, обратные показателям надежности (вероятности отказов), в результате будут задействованы наиболее надежные мощности; величины. Обратные экспертным оценкам приоритетности тех или иных энергообъектов могут быть получены, например, методом парных сравнений.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработаны основные методологические принципы взаимодействия смежных энергосистем по межсистемным высоковольтным линиям электропередачи. Выполнен количественный анализ межсистемных перетоков электроэнергии для различных нагрузочных режимов работы высоковольтной сети белорусской энергосистемы при взаимодействии ее с соседними энергосистемами. Проведены экспериментальные расчеты по определению наиболее выгодных режимов эксплуатации межсистемных связей Белорусской энергосистемы по различным межгосударственным сечениям с РФ, Украиной и Прибалтикой.

ЛИТЕРАТУРА

1. Александров О.И. Оптимизация распределения межсистемных перетоков электроэнергии в условиях взаимодействия смежных энергосистем. Сборник докладов МНК «Устойчивое развитие энергетики Республики Беларусь: состояние и перспективы», Минск, «Беларуская навука», 2020, С. 131–138.

2. В.П. Мартынюк. Таможенные аспекты энергетической интеграции: отечественная практика и проблемы. «Интеграция в энергетике и экономическая безопасность государства», Сборник трудов, Киев, «Знания Украины», 2005.

УДК 621

АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ СОПРОТИВЛЕНИЯ ЗАМКНУТОГО КОНТУРА
ОБМОТКИ ТРАНСФОРМАТОРА
ANALYSIS OF THE INFLUENCE OF THE CLOSED LOOP RESISTANCE
OF THE TRANSFORMER WINDING

Исаев А.В., ст. преподаватель, Суходолов Ю.В., к-т. техн. наук, доцент,
Сизиков С.В., к-т. техн. наук, доцент

Белорусский национальный технический университет, г.Минск, Беларусь
A. Isaev, Senior Lecturer, Yu. Sukhodolov, Associate Professor, Ph.D., S. Sizikov,
Associate Professor, Ph.D.,
Belarusian National Technical University, Minsk, Belarus

Аннотация. Статья посвящена исследованию возможностей оценки, и выявление образующих дефектов как можно на ранних стадиях. Представлены результаты испытаний обмоток трансформатора при различных значениях межвиткового сопротивления и проведен анализ осциллограмм для возможности выявления дефектов в обмотках электрических машин.

Abstract. The article is devoted to the study of the possibilities of assessment, and the identification of forming defects as early as possible. The results of tests of the transformer windings at various values of the turn-to-turn resistance are presented and the analysis of oscillograms for the possibility of identifying defects in the windings of electrical machines is carried out.

Ключевые слова: диагностика обмоток электрических машин, межвиткового сопротивление, спектральный анализ.

Keywords: diagnostics of windings of electrical machines, turn-to-turn resistance, spectral analysis.

ВВЕДЕНИЕ

Развития техники и электроники в современном мире не исключает проблему качественной и оперативной диагностики электрических машин. И эта проблема решается достаточно тяжело. Как можно увидеть из статистических данных, до 90 % всех неисправностей такого оборудования, связано с межвитковыми замыканиями. А эта неисправность, как правило, есть конечный результат достаточно длительного процесса по уменьшению сопротивления между ветками обмоток, которые при определенных условиях, можно вовремя купировать и исправить, а, следовательно, не довести оборудование до дорогостоящего ремонта. Поэтому, основной задачей современной электротехники, является современная диагностика такого оборудования с максимально точным отслеживанием процессов происходящих в трансформаторах.

ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

Сегодня диагностика обмоток электрических машин является дорогостоящим и длительным процессом, который, чаще всего, заключается в изъятии трансформатора из оборудования, установка его на специальном стенде и проведения соответствующих мероприятий. Однако, такой подход не всегда является оптимальным по двум причинам: 1-осуществляется длительная остановка оборудования и 2-ограничены возможности по изъятию ЭМ из рабочего цикла. По этому, сегодня все больше работ ведется по поиску методик диагностики ЭМ, которые позволили бы избежать этих недостатков. И наиболее из перспективных из этих методов считаются выявления изменения амплитудно-частотных и фазо-частотных характеристик работающих ЭМ по сравнению с эталонными.

Элементом исследования был выбран трансформатор с одной входной и одной выходной обмотками. Обобщенная схема испытания представлена на рисунке 1.

Результаты проведения испытания при различных значениях сопротивления иммитатора межвитковых сопротивлений представлены на рисунке 2

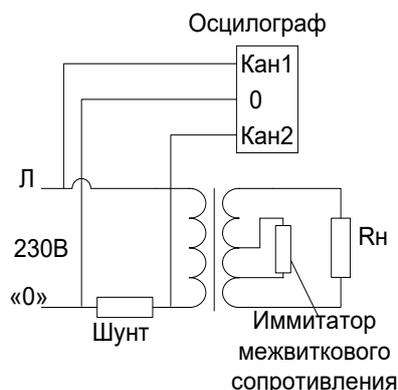


Рисунок 1 – Схема снятия характеристик трансформатора

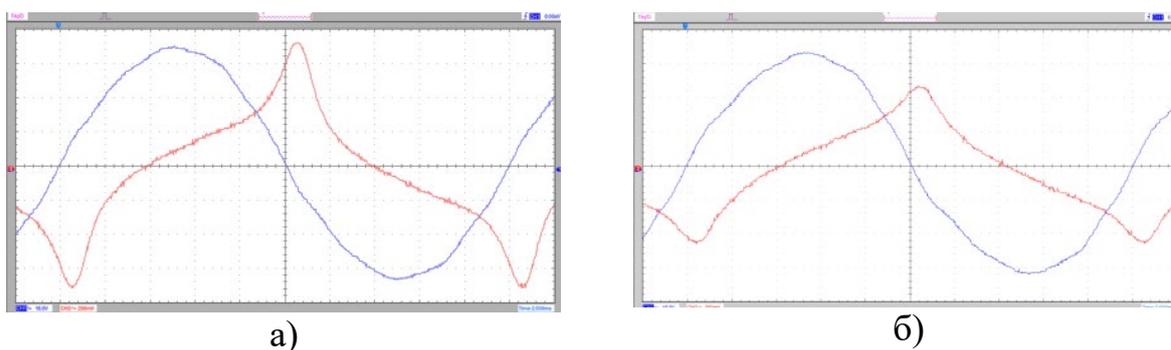
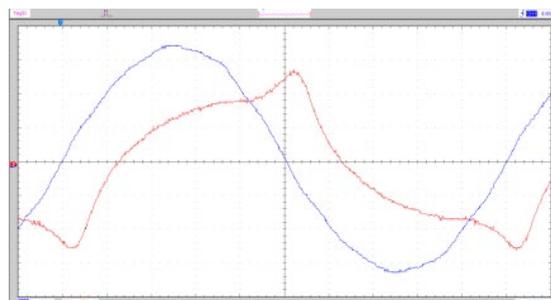


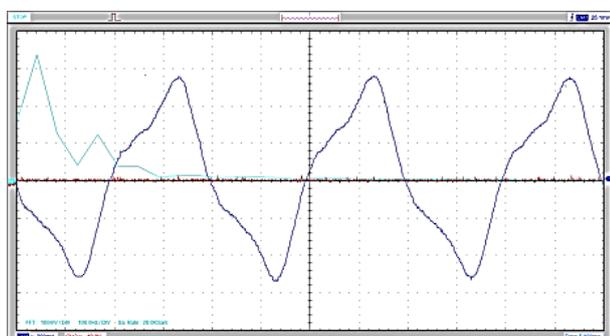
Рисунок 2 – Осциллограммы тока и напряжения при различных значениях межвиткового сопротивления: а) $R \rightarrow \infty$; б) $R = 25 \text{ Ом}$;



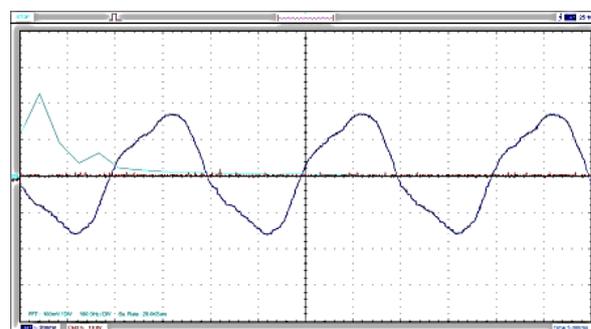
в)

Рисунок 2 – Осциллограммы тока и напряжения при различных значениях межвиткового сопротивления: в) $R = 10 \text{ Ом}$;

Проведя анализ осциллограмм можно сделать вывод, что уменьшение межвиткового сопротивления существенно влияет на характеристики первой гармоники, но мало влияет на характеристики последующих гармоник. Это так же доказано использованием БПФ, которые представлены на рисунке 3



а)



б)

Рисунок 3 – Осциллограммы тока и их кривые БПФ при различных значениях межвиткового сопротивления: а) $R = 25 \text{ Ом}$ (коэф. $Y = 5 \text{ В/дел}$);
б) $R = 10 \text{ Ом}$ (коэф. $Y = 10 \text{ В/дел}$);

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Из экспериментов можно сделать вывод, что анализируя сдвиг фаз первой гармоники можно судить о минимальном уровне межвитковых сопротивлений в обмотках трансформатора.

ЛИТЕРАТУРА

1. Гольдберг О.Д. Испытания электрических машин. Учеб для вузов по спец. «Электромеханика». – М.:Высш. шк., 1990. – 255 с.:ил.
2. Гемке Р.Г. Неисправности электрических машин / Под ред. Р.Б. Уманцева. – 9-е изд., перераб. и доп. – Л.: Энергоатомиздат. Ленингр. отд-ние, 1989. – 336 с.:ил
3. Патент на изобретение № 16628. Способ контроля витковой изоляции обмотки якоря электрической машины. Выданный национальным центром интеллектуальной собственности в соответствии с Законом Республики Беларусь. Заявка № 20101783 от 2010.12.10

УДК 621.313

КЛАССИФИКАЦИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ГЕНЕРАТОРОВ ВОЗВРАТНО-ПОСТУПАТЕЛЬНОГО ДВИЖЕНИЯ С ПОСТОЯННЫМИ МАГНИТАМИ
CLASSIFICATION OF ELECTRIC RECIPROCATING GENERATORS
WITH PERMANENT MAGNETS

Менжинский А.Б., к-т. техн. наук, Малашин А.Н., к-т. техн. наук, доцент
Военная академия Республики Беларусь, г. Минск, Беларусь,
Сизиков С. В., к-т. техн. наук, доцент

Белорусский национальный технический университет, г. Минск, Беларусь
A. Menzhinsky, Candidate of Technical Sciences, A. Malashin, Candidate of Technical
Sciences, Associate Professor,
Military Academy of the Republic of Belarus, Minsk, Belarus
S. Sizikov, Candidate of Technical Sciences
Belarusian National Technical University, Minsk, Belarus

Аннотация. В последнее время наблюдается активный рост научных разработок в области электрических генераторов возвратно-поступательного движения с постоянными магнитами, нашедших широкое применение в системах «свободнопоршневой двигатель – электрическая машина». Анализ научных разработок показал, что в настоящее время существует широкий спектр различных конструкций электрических генераторов возвратно-поступательного движения и ряд работ в которых уже проведена их классификация. Однако в связи с разработкой новых конструкций (структур) электрических генераторов возвратно-поступательного движения возникает необходимость в дополнении существующей классификации. В связи с этим была проведена совместная классификация существующих и вновь предложенных электрических генераторов возвратно-поступательного движения с постоянными магнитами с целью их дальнейших исследований.

Annotation. Recently, there has been an active growth of scientific developments in the field of electric reciprocating generators with permanent magnets, which have found wide application in the "free-piston engine-electric machine" systems. The analysis of scientific developments has shown that at present there is a wide range of different designs of electric generators of reciprocating motion and a number of works in which their classification has already been carried out. However, in connection with the development of new designs (structures) of electric reciprocating generators, there is a need to supplement the existing classification. In this regard, a joint classification of existing and newly proposed electric reciprocating generators with permanent magnets was carried out for the purpose of their further research.

Ключевые слова: электромеханический преобразователь энергии, классификация, постоянный магнит, электрический генератор, магнитный поток.

Key words: electromechanical energy converter, classification, permanent magnet, electric generator, magnetic flux.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время в качестве перспективных электромеханических преобразователей энергии рассматриваются электрические генераторы возвратно-поступательного движения (ЭГВПД) с постоянными магнитами [1]. Нашедшие широкое применение в системах «свободнопоршневой двигатель (СПД) – ЭГВПД» [2, 3]. В отечественных научных изданиях отмечено, что на среднесрочную перспективу в Республике Беларусь также необходимо осуществить переход с дизель-генераторных силовых установок вращательного действия на свободнопоршневые установки [2]. Это в свою очередь требует развития теории электромеханики в области ЭГВПД с целью повышения эффективности работы системы «СПД – ЭГВПД».

Интерес к исследованию системы «СПД – ЭГВПД» обусловлен рядом ее преимуществ по сравнению с электроагрегатами на базе двигателя внутреннего сгорания с кривошипно-шатунным механизмом [2, 3]:

- относительно простая конструкция – на 40 % меньше элементов;
- отсутствие вращающихся частей, что позволяет уменьшить потери на трение;
- относительно высокий коэффициент полезного действия и ресурс работы до капитального ремонта до 50 тыс. ч;
- сниженный до 30 % расход топлива;
- относительно малая длительность пуска при низких температурах;
- многотопливность;
- относительно высокая экологичность;
- сравнительно легкое модульное исполнение.

Из представленных в [4] структур ЭГВПД видно, что возможен широкий спектр новых структур ЭГВПД с продольным и комбинированным (поперечно-продольным) изменением магнитного потока, проходящего через рабочую обмотку.

Существует ряд работ в которых уже проведена классификация ЭГВПД с поперечным изменением магнитного потока [5–8]. Однако в связи со множеством предлагаемых вариантов новых структур ЭГВПД продольного и комбинированного типов [4], а также существующих ЭГВПД поперечного типа [1, 5–9] возникает необходимость проведения их совместной классификации. Поэтому классификация такого вида ЭГВПД с целью их дальнейших исследований представляет особую актуальность.

ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

Классификация ЭГВПД с постоянными магнитами проведена по следующим основным отличительным признакам:

- способу изменения магнитного потока;
- направлению магнитного потока в магнитопроводе (МПр) относительно направления движения подвижной части [5];
- полярности магнитного потока через рабочую обмотку;
- особенностям конструктивного исполнения.

Классификация ЭГВПД с постоянными магнитами представлена на рисунке 1.

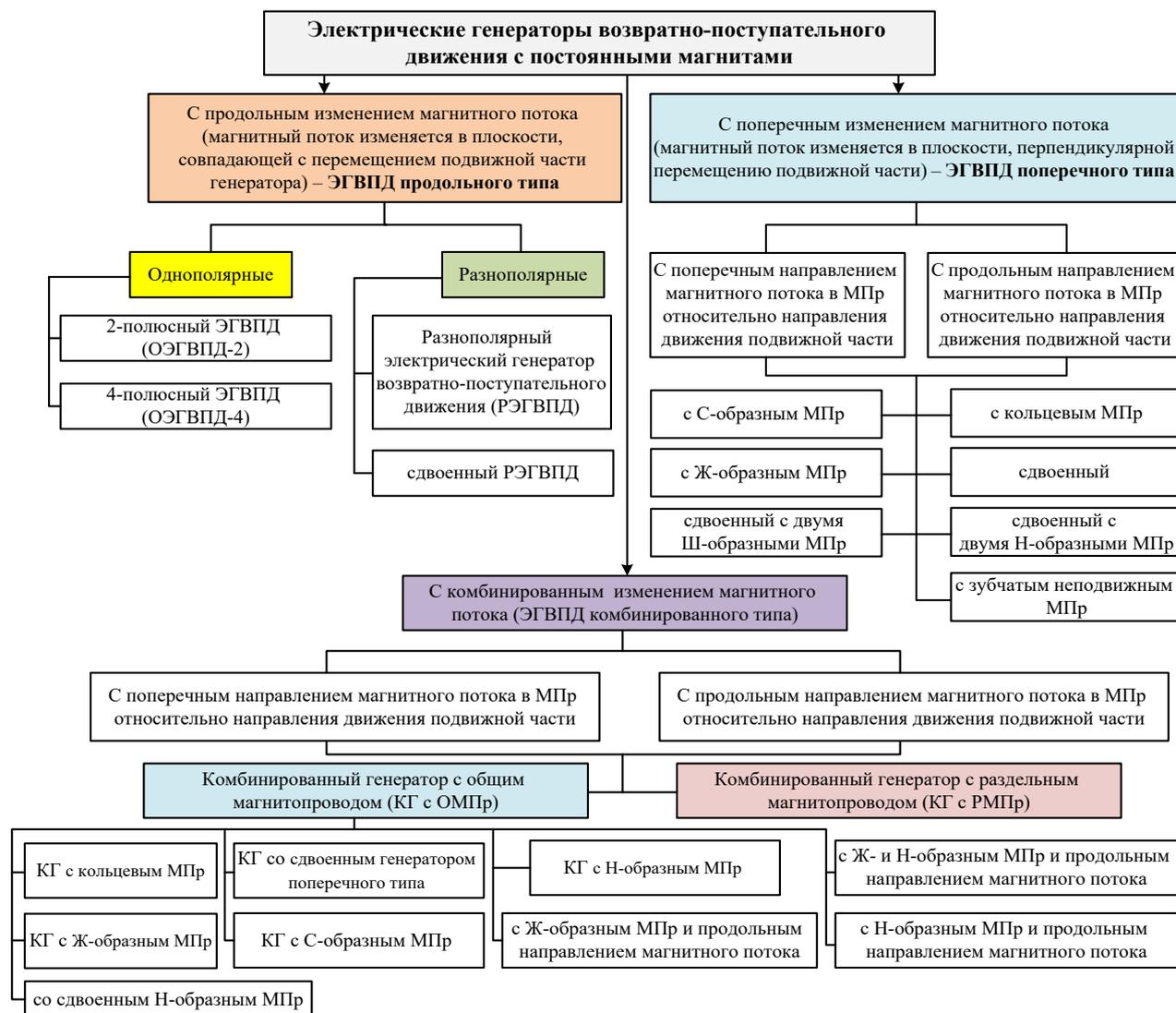


Рисунок 1 – Классификация ЭГВПД с постоянными магнитами

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведена совместная классификация существующих и вновь предложенных ЭГВПД с постоянными магнитами. Отличительным признаком которой является учет особенностей изменения магнитного потока, проходящего через рабочую обмотку. Классификация ЭГВПД проведена с целью их дальнейших исследований. Научная значимость представленных результатов (классификация ЭГВПД) заключается в развитии теории электромеханики применительно к ЭГВПД.

ЛИТЕРАТУРА.

1. Хитерер, М.Я. Синхронные электрические машины возвратно-поступательного движения : учеб. пособие / М.Я. Хитерер, И.Е. Овчинников. – СПб. : Корона принт, 2013. – 357 с.
2. Тракторы XXI века: состояние и перспективы / С.Н. Поддубно [и др.]. – Минск : Беларуская наука, 2019. – 207 с. – ISBN 978-985-08-2399-1.

3. Темнов, Э.С. Разработка теоретических основ расчета и конструирования малоразмерных двигатель-генераторных установок как единой динамической системы : дис. ... канд. техн. наук : 05.04.02 / Э.С. Темнов. – Тула, 2005. – 134 л.

4. Менжинский, А.Б. Универсальная методика электромагнитного расчета возвратно-поступательных электрических генераторов с поперечным и продольным нелинейным изменением магнитного потока / А.Б. Менжинский, А.Н. Малашин, Ю.Г. Коваль // Изобретатель. – 2019. – № 5–6 (233-234). – С. 38–48.

5. Силиции, А.П. Совершенствование линейных генераторов с постоянными магнитами для автономных объектов : дис. ... канд. техн. наук : 05.09.01 / А.П. Синицин. – Самара, 2013. – 124 л.

6. Бабилова, Н.Л. К вопросу о классификации линейных электрических генераторов / Н.Л. Бабилова, Р.Р. Саттаров, Е.А. Полихач // Вести. Уфим. гос. авиац. техн. ун-та. – 2009. – Т. 12, № 2. – С. 144–149.

7. Сергеенкова, Е.В. Синхронная электрическая машина возвратно-поступательного движения (генератор) : дис. ... канд. техн. наук : 05.09.01 / Е.В. Сергеенкова. – М2011. – 118л.

8. Бабилова, Н.Л. Генератор-возвратно поступательного движения в автономной системе электроснабжения маломощных потребителей : дис. ... канд. техн. наук : 05.09.03 / Н.Л. Бабилова. – Уфа, 2009. – 147 л.

9. Менжинский, А.Б. Анализ структур электрических генераторов возвратно-поступательного движения [Электронный ресурс] / А.Б. Менжинский, А.Н. Малашин, П.Б. Менжинский // Изобретатель Международный научно-технический журнал. – Режим доступа: <https://izobretatel.by/nauchnye-publikacii/analiz-struktur-elektricheskikh-generatorov/>. – Дата доступа: 27.03.2020.

УДК 621.313

ПОДХОД К КОМБИНИРОВАННОМУ ПРИМЕНЕНИЮ МЕТОДОВ
ТЕОРИИ ПОЛЯ И МАГНИТНЫХ ЦЕПЕЙ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ
ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ ЭНЕРГИИ
ВОЗВРАТНО-ПОСТУПАТЕЛЬНОГО ДВИЖЕНИЯ
AN APPROACH TO THE COMBINED APPLICATION OF FIELD THEORY
AND MAGNETIC CIRCUIT METHODS FOR THE STUDY OF
ELECTROMECHANICAL RECIPROCATING ENERGY CONVERTERS

Менжинский А.Б., к-т. техн. наук, Малашин А.Н., к-т. техн. наук, доцент
Военная академия Республики Беларусь, г. Минск, Беларусь,
Сизиков С. В., к-т. техн. наук, доцент

Белорусский национальный технический университет, г. Минск, Беларусь
A. Menzhinsky, Candidate of Technical Sciences, A. Malashin, Candidate of Technical
Sciences, Associate Professor,
Military Academy of the Republic of Belarus, Minsk, Belarus
S. Sizikov, Candidate of Technical Sciences
Belarusian National Technical University, Minsk, Belarus

Аннотация. В своем большинстве применяемые в настоящее время математические модели электромеханических преобразователей энергии возвратно-поступательного движения основываются на теории магнитных цепей. Такие математические модели базируются на упрощенном представлении о магнитной системе и магнитном поле. Однако в отличие от традиционных электрических машин вращательного типа, электромеханические преобразователи энергии возвратно-поступательного движения обладают рядом особенностей, учет которых имеет важное значение при их исследовании и проектировании. Поэтому на начальных этапах электромагнитного расчета и при решении задач оптимизации требуется применение адекватных математических моделей для повышения точности расчетов параметров указанных электромеханических преобразователей энергии. С этой целью может использоваться математическая модель, основанная на теории поля, однако основным ее недостатком является сложность применения для решения задач оптимизации. Поэтому, при разработке и исследовании электромеханических преобразователей энергии возвратно-поступательного движения, целесообразней всего использовать подход к комбинированному применению методов теории поля и магнитных цепей.

Annotation. Most of the currently used mathematical models of electromechanical reciprocating energy converters are based on the theory of magnetic circuits. Such mathematical models are based on a simplified view of the magnetic system and the magnetic field. However, unlike traditional electric machines of the rotary type, electromechanical energy converters of reciprocating motion have a number of features that are important to take into account when studying and designing them. Therefore, at the initial stages of electromagnetic calculation and when solving optimization

problems, it is necessary to use adequate mathematical models to improve the accuracy of calculations of the parameters of these electromechanical energy converters. For this purpose, a mathematical model based on field theory can be used, but its main drawback is the complexity of its application for solving optimization problems. Therefore, in the development and research of electromechanical energy converters of reciprocating motion, it is most appropriate to use an approach to the combined application of the methods of field theory and magnetic circuits.

Ключевые слова: электромеханический преобразователь энергии, электромагнитное поле, метод конечных элементов, теория поля, магнитные цепи.

Key words: electromechanical energy converter, electromagnetic field, finite element method, field theory, magnetic circuits.

ВВЕДЕНИЕ

В исследовании электромеханических преобразователей энергии (ЭМПЭ) важную роль играют методы математического моделирования. Математическому моделированию различных типов ЭМПЭ посвящены научные работы ряда зарубежных ученых: А.И. Вольдека, А.Д. Подольцева, Г. Уайта, Д. Вудсона, И.Е. Овчинникова, М.Я. Хитерера, В.А. Балагурова, И.П. Копылова, А.В. Иванова-Смоленского, И.Г. Ефимова, Д.А. Бута, А.П. Синицина, С.А. Тарашева, Н.Л. Бабиковой, Р.Р. Саттарова, Е.В. Сергеенковой, I. Voldea, H. Polinder, M.A. Mueller, В.Е. Высоцкий, Д.Э. Брускина и многих других [1–5].

Анализ научных работ [6–12] показал, что в настоящее время выделяют два основных подхода к расчету электромагнитных полей в ЭМПЭ. Это подходы, основанные на теории магнитных цепей и теории поля.

Теория поля развивается на основе уравнений Максвелла, а теория цепей – на основе уравнений Кирхгофа. Также можно выделить, наиболее прогрессивный подход – комбинированный, сочетающий в себе теорию поля и теорию магнитных цепей [5].

В отличие от традиционных ЭМПЭ вращательного типа, ЭМПЭ возвратно-поступательного движения (ЭМПЭ ВПД) обладают рядом особенностей (неравномерность распределения магнитного потока в воздушном зазоре магнитной системы, переменный характер воздушного зазора между подвижной и неподвижной частями [1]), учет которых имеет важное значение при их исследовании и проектировании. Поэтому целью работы является обоснование необходимости использования подхода к комбинированному применению методов теории поля и магнитных цепей для исследования и расчета ЭМПЭ ВПД.

ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

Подходы, основанные на теории магнитных цепей, широко применяются для получения инженерных расчетов, с помощью которых определяются основные характеристики ЭМПЭ на начальных этапах электромагнитного расчета [2]. Преимуществом цепных методов является то, что построенные на их базе математические модели (ММ) ЭМПЭ удобно применять при решении задач оптимизации. Методы теории магнитных цепей базируются на упрощенном

представлении о магнитной системе и магнитном поле в виде магнитной цепи с соответствующими магнитными проводимостями [4].

Основные недостатки этого метода заключаются в следующем: не в полной мере учитываются особенности распределения магнитного поля в магнитной системе; теория магнитных цепей позволяет получить лишь приблизительные значения параметров магнитной системы; ММ ЭМПЭ не учитывают особенности конфигурации магнитной системы, нелинейность кривой намагничивания ферромагнитных материалов, неравномерность распределения магнитного потока в воздушном зазоре.

Это не позволяет получить достоверные результаты при расчете характеристик ЭМПЭ. Поэтому, метод на основе теории магнитных цепей целесообразно применять на этапе предварительного оценочного электромагнитного расчета ЭМПЭ. Для повышения адекватности ММ ЭМПЭ ВПД необходимо уточнение полученных магнитных проводимостей воздушных зазоров ЭМПЭ посредством метода на основе теории поля [5].

Математические модели на основе теории поля, использующие численные методы, универсальны [5]. Они позволяют учесть конфигурацию магнитной системы ЭМПЭ ВПД, насыщение участков магнитопровода, различие магнитных свойств среды на границах рабочей и торцевой зоны, неравномерность воздушного зазора и другие особенности распределения магнитного поля [7].

Среди численных методов наиболее распространенным следует признать метод конечных элементов (МКЭ) [7]. Достаточно простое и универсальное математическое описание МКЭ инициировало появление большого количества прикладных математических компьютерных программ, позволяющих решать задачи расчета физических полей. Среди положительно зарекомендовавших себя программ можно выделить Ansoft Maxwell, Ansys, Elcut [3].

Достоинства метода на основе теории поля заключаются в следующем [13]: возможность учета нелинейных свойств материалов и насыщений, что делает результаты расчета максимально точными; расчет характеристик ЭМПЭ производится по реальной геометрии магнитной системы, созданной в системе автоматизированного проектирования, что максимально приближает результаты расчета к действительности.

Основными недостатками метода на основе теории поля являются [13]: высокая трудоемкость подготовки задачи к расчету и длительное время получения результатов; результаты расчета являются массивами численных данных.

Поэтому, метод на основе теории поля целесообразно использовать на завершающих этапах электромагнитного расчета ЭМПЭ ВПД для уточнения полученных характеристик.

Комбинированный подход (сочетание методов теории поля и магнитных цепей) к расчету ЭМПЭ. Комбинированный подход к расчету ЭМПЭ следует считать двухэтапным.

Первый этап позволяет определить исходные данные для последующего, что существенно уменьшает затраты на втором этапе выполнения расчетов [13]. Первый этап является приближенный расчет, не требующий больших затрат усилий и времени, но дающий возможность с определенной точностью оценить

энергетические и массогабаритные характеристики ЭМПЭ, а также выполнить оптимизацию. На первом этапе расчета ЭМПЭ целесообразно использовать ММ на основе теории магнитных цепей.

Второй этап основан на более точных ММ, часто включает в себя поверочный расчет по исходным данным, полученным на первом этапе, с последующим их уточнением. Обычно этот этап основан на значительно меньшем количестве допущений и дает более достоверные результаты, но требует больших ресурсов и вычислительных затрат. На втором этапе расчета ЭМПЭ целесообразно использовать ММ на основе теории поля.

Такой подход является комбинированным. Комбинированному применению методов теории поля и магнитных цепей для расчета электромагнитных полей посвящено много работ [8, 10, 14, 15]. Общей целью применения такого подхода является объединение преимуществ и исключение недостатков, характерных для отдельно взятых методов на основе теории поля и магнитных цепей [16].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Так как, ЭМПЭ ВПД обладают рядом особенностей, учет которых имеет важное значение при их исследовании и проектировании. В связи с этим, необходимо использовать подход к комбинированному применению методов теории поля и магнитных цепей для исследования и расчета ЭМПЭ ВПД. Метод на основе теории поля целесообразно использовать для уточнения параметров ЭМПЭ на завершающих этапах электромагнитного расчета, а для начального оценочного расчета и при решении задач оптимизации целесообразно использовать ММ, построенные на основе цепных методов.

Использование подхода к комбинированному применению методов теории поля и магнитных цепей при исследовании и расчете ЭМПЭ ВПД позволит сократить затраты на их создание (за счет уменьшения продолжительности проектирования и экспериментальной доработки).

ЛИТЕРАТУРА

1. Хитерер, М.Я. Синхронные электрические машины возвратно-поступательного движения : учеб. пособие / М.Я. Хитерер, И.Е. Овчинников. – СПб. : Корона принт, 2013. – 357 с.
2. Сергеенкова, Е.В. Синхронная электрическая машина возвратно-поступательного движения (генератор) : дис. ... канд. техн. наук : 05.09.01 / Е.В. Сергеенкова. – М., 2011. – 118 л.
3. Сеницин, А.П. Совершенствование линейных генераторов с постоянными магнитами для автономных объектов : дис. ... канд. техн. наук : 05.09.01 / А.П. Сеницин. – Самара, 2013. – 124 л.
4. Бабилова, Н.Л. Генератор-возвратно поступательного движения в автономной системе электроснабжения маломощных потребителей : дис. ... канд. техн. наук : 05.09.03 / Н.Л. Бабилова. – Уфа, 2009. – 147 л.
5. Копылов, И.П. Математическое моделирование электрических машин : учебник / И.П. Копылов. – 3-е изд., перераб. и доп. – М. : Высш. шк., 2001. – 327 с.

6. Афанасьев, А.А. Метод сопряжения конформных отображений в задачах электромеханики / А.А. Афанасьев. – Чебоксары : Изд-во Чуваш. ун-та, 2011. – 390 с.
7. Буль, О.Б. Методы расчета магнитных систем электрических аппаратов: магнитные цепи, поля и программа FEMM : учеб. пособие / О.Б. Буль. – М. : Академия, 2005. – 336 с.
8. Горбатенко, Н.И. Комбинированный метод магнитных цепей и граничных элементов для определения магнитных характеристик материалов изделий / Н.И. Горбатенко, В.В. Гричихин // Изв. вузов. Электромеханика. – 2000. – № 1. – С. 15–20.
9. Демирчян, К.С. Машинные расчеты электромагнитных полей : учеб. пособие / К.С. Демирчян, В.П. Чечурин. – М. : Высш. шк., 1986. – 240 с.
10. Иванов-Смоленский, А.В. Универсальный численный метод моделирования электромеханических преобразователей и систем / А.В. Иванов-Смоленский, В.А. Кузнецов // Электричество. – 2000. – № 7. – С. 24–33.
11. Курбатов, П.А. Численный расчет электромагнитных полей / П.А. Курбатов, С.А. Аринчин. – М. : Энергоатомиздат, 1984. – 167 с.
12. Шоффа, В.Н. Методы расчета магнитных систем постоянного тока : метод. рук. для практ. занятий / В.Н. Шоффа. – М. : Изд-во Моск. энергет. ин-та, 1998. – 40 с.
13. Бормотов, А.В. Модульная электрическая машина и мехатронная система на ее основе : дис. ... канд. техн. наук : 05.09.03 / А.В. Бормотов. – СПб, 2016. – 204 л.
14. Демирчян, К.С. Моделирование магнитных полей / К.С. Демирчян. – Л. : Энергия, 1974. – 285 с.
15. Тихонов, Д.Ю. Комбинированный метод расчета нестационарных плоскопараллельных электромагнитных полей / Д.Ю. Тихонов, А.Н. Ткачев, Й. Центнер // Изв. вузов. Электромеханика. – 2002. – № 4. – С. 39–48.
16. Менжинский, А.Б. Анализ современных методов исследования электромеханических преобразователей энергии [Электронный ресурс] / А.Б. Менжинский, А.Н. Малашин, П.Б. Менжинский // Изобретатель Международный научно-технический журнал. – Режим доступа: www.izobretatel.by/nauchnye-publikacii/issledovaniya-elektromehnicheskih-preobrazovateley-energii/. – Дата доступа: 21.02.2020.

УДК 621.313

СПОСОБ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ИНДУКТИВНЫХ ПАРАМЕТРОВ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ
МАШИНЫ С МНОГОФАЗНОЙ ДРОБНОЙ ЗУБЦОВОЙ ОБМОТКОЙ
METHOD FOR DETERMINING INDUCTIVE PARAMETERS OF ELECTRIC
MACHINE WITH MULTI-PHASE FRACTIONAL TOOTH WINDING

Пантелеев С.В., Малашин А.Н., к-т. техн. наук, доцент
Военная академия Республики Беларусь, г. Минск, Беларусь,
Сизиков С.В., к-т. техн. наук, доцент,
Белорусский национальный технический университет, г. Минск, Беларусь
S. Panteleev, A. Malashin, Cand. tech. Sciences, Associate Professor,
Military Academy of the Republic of Belarus, Minsk, Belarus
S. Sizikov, Candidate of Technikal Sciences
Belarusian National Technical University, Minsk, Belarus

Аннотация. Разработан способ расчета индуктивных параметров синхронной электрической машины с многофазной дробной зубцовой обмоткой, который позволяет с высокой достоверностью определить влияние схемы и параметров обмотки, несинусоидальный закон изменения пространственных обмоточных функций, и высшие гармоники индукции магнитного поля в воздушном зазоре на индуктивные параметры электрической машины при наименьших временных затратах.

Abstract. A method for calculating the inductive parameters of a synchronous electric machine with a multiphase fractional toothed winding has been developed, which makes it possible to determine with high reliability the influence of the circuit and winding parameters, the non-sinusoidal law of variation of the spatial winding functions, and the higher harmonics of the magnetic field induction in the air gap on the inductive parameters of the electric machine at the smallest time costs.

Ключевые слова: индуктивность, многофазная, дробная зубцовая, обмотка, электрическая машина.

Key words: inductance, multiphase, fractional slot, winding, electric machine.

ВВЕДЕНИЕ

Существующими методами определения индуктивных параметров электрических машин, которые учитывают высшие пространственные гармоники магнитного поля в воздушном зазоре, геометрические параметры магнитной системы, распределение фазных обмоток независимо от числа фаз, являются: метод гармонических проводимостей, метод проводимостей зубцовых контуров, метод интегральных уравнений. Но использование таких подходов в процессе оптимизации синхронных электрических машин с дробными зубцовыми обмотками (СЭМ с ДЗО) с различными соотношениями чисел зубцов на полюс и фазу является слишком трудоемким.

Наличие корректной информации об индуктивных параметрах электрической машины необходимо как для разработки адекватной математической модели

СЭМ с ДЗО, так и для решения задач синтеза систем управления. Поэтому разработка удобного для процесса оптимизации электрической машины способа определения собственных и взаимных индуктивностей многофазных СЭМ с ДЗО, который учитывает несинусоидальное распределение фазных обмоток в пазах магнитопровода статора и спектр пространственных гармоник магнитного поля в воздушном зазоре, является актуальной задачей.

ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

Для моделирования влияния схемы и параметров обмотки на вращающееся магнитное поле в воздушном зазоре электрической машины используется пространственная обмоточная функция (ПОФ) $Q_n(\phi_s)$. Гармонический состав ПОФ определяет: характер распределения МДС обмотки вдоль воздушного зазора; фильтрующие свойства обмотки как источника ЭДС по отношению к высшим пространственным гармоникам магнитного поля; индуктивные параметры электрической машины.

Производная пространственной обмоточной функции определяет функцию распределения обмотки (ФРО) $D_n(\phi_s)$.

Функция распределения обмотки непрерывна, однако с учетом того, что при увеличении числа фаз m увеличивается число пазов магнитопровода статора z_1 , можно принять допущение о дискретном характере функции распределения и использовать дискретную модель многофазной обмотки электрической машины. Основой для разработки дискретной модели обмотки электрической машины в матричном виде является введение двух матриц: матрицы функции распределения обмотки и матрицы пространственной обмоточной функции [1]:

$$[D] = (d_{kn}) = (\bar{d}_0 \quad \dots \quad \bar{d}_n \quad \dots \quad \bar{d}_{m-1}), \quad k \in [0, z_1 - 1], \quad n \in [0, m - 1], \quad (1)$$

$$[W] = (w_{kn}) = (\bar{w}_0 \quad \dots \quad \bar{w}_n \quad \dots \quad \bar{w}_{m-1}), \quad k \in [0, z_1 - 1], \quad n \in [0, m - 1], \quad (2)$$

где d_{kn} – доля проводников пазы статора k , которая принадлежит фазе n ;

\bar{d}_n – вектор распределения обмотки фазы n ;

w_{kn} – дискретное значение ПОФ фазы n справа от пазы статора с номером k ;

\bar{w}_n – вектор-столбец дискретных значений ПОФ фазы n .

В матрице ФРО (1) компонент k вектора n соответствует дискретному значению функции распределения в пазу статора с номером k . При условии протекания постоянного тока в фазных обмотках, проводники в пазу статора с положительным направлением тока являются прямыми, а с отрицательным направлением тока – обратными. С учетом этого d_{kn} могут принимать следующие значения: $d_{kn} \in (0, 1]$, если это доля прямых проводников; $d_{kn} \in [-1, 0)$, если это доля обратных проводников.

Выражение дискретного интегрирования (3) позволяет определить компоненты матрицы пространственной обмоточной функции из матрицы функции распределения обмотки:

$$w_{k,n} = \sum_{g=0}^k d_{g,n} - \frac{1}{z_1} \sum_{j=0}^{z_1-1} \sum_{h=0}^j d_{h,n}, \quad k \in [0 \dots z_1 - 1], n \in [0 \dots m - 1], \quad (3)$$

где $g, j, h \in Z$ – переменные.

На основе известных значений компонентов матриц ФРО и ПОФ можно представить функцию распределения обмотки $D_n(\phi_s)$ и пространственную обмоточную функцию $Q_n(\phi_s)$ для фазы n в дискретной форме:

$$D_n(\phi_s) = \frac{W_{z_1}}{R_s \sigma_s} \sum_{k=0}^{z_1-1} d_{kn} S_{\sigma_s} \left(\phi_s - \frac{\pi}{z_1} - k \frac{2\pi}{z_1} \right), \quad (4)$$

$$Q_n(\phi_s) \approx W_{z_1} \sum_{k=0}^{z_1-1} w_{kn} S_{\tau} \left(\phi_s - k \frac{2\pi}{z_1} \right), \quad (5)$$

где W_{z_1} – количество проводников внутри паза статора (принято равным для всех пазов статора);

σ_s – величина открытия паза магнитопровода статора;

S_{σ_s} – функция открытия паза магнитопровода статора;

$\tau = 2\pi/z_1$ – величина зубцового (пазового) деления статора;

S_{τ} – функция зубцового (пазового) деления статора;

ϕ_s – угол между началом отсчета и рассматриваемой точкой на статоре;

R_s – радиус магнитопровода статора у воздушного зазора.

Выражения (4) и (5) представляют собой аналитическую модель многофазной зубцовой обмотки, которая позволяет с высокой достоверностью определить влияние схемы и параметров обмотки на индуктивные параметры электрической машины при наименьших временных затратах.

С использованием данной модели разработан способ определения индуктивных параметров синхронной электрической машины с многофазной дробной зубцовой обмоткой, который позволяет учесть высшие гармоники индукции магнитного поля в воздушном зазоре и несинусоидальный закон изменения пространственных обмоточных функций.

Проверку адекватности аналитических выражений для определения индуктивных параметров электрической машины корректно проводить в сравнении с результатами расчета посредством магнитостатической векторной модели магнитного поля электрической машины. Расчет значений собственных и взаимных индуктивностей статора рассмотрен на примере девятифазной синхронной электрической машины с двухслойной дробной зубцовой обмоткой с числом пазов на полюс и фазу $q = 2/17$ [2].

В таблице 1 приведены результаты расчета собственных и взаимных индуктивностей статора электрической машины посредством аналитического метода и численного метода конечных элементов.

Таблица 1 – Результаты расчета индуктивностей статора СЭМ с ДЗО

Метод	L_0 , мГн	M_1 , мГн	M_2 , мГн	M_3 , мГн	M_4 , мГн
Аналитический	0,408	0	0	0	0,027
Численный	0,419	0	0	0	0,029

Из таблицы 1 видно, что расхождение результатов, полученных посредством аналитического и численного методов, не превышает 10 %. Это подтверждает адекватность разработанных аналитических выражений для определения индуктивных параметров электрической машины.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Значимость разработанного способа определения индуктивных параметров заключается в возможности с высокой достоверностью определить влияние схемы и параметров обмотки на индуктивные параметры электрической машины при наименьших временных затратах. Поэтому разработанный способ может быть использован в процессе оптимизации СЭМ с ДЗО.

ЛИТЕРАТУРА

1. F. Sculler, E. Semail, J.F. Charpentier, General modeling of the windings for multi-phase ac machines, Eur. Phys. J. -Appl. Phys., vol. 50, no. 3, pp. 1–15, 2010.
2. Пантелеев, С.В. Повышение энергетических показателей электрической машины путем применения многофазной зубцовой обмотки / С.В. Пантелеев, А.Н. Малашин // Вестник Воен. акад. Респ. Беларусь. – Минск. – 2017 – № 3. – С. 80–86.

УДК 621.314

СПОСОБ ВЕКТОРНОГО УПРАВЛЕНИЯ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫМ
ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕМ ДЛЯ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ПОЛИГАРМОНИЧЕСКОГО
РЕЖИМА РАБОТЫ МНОГОФАЗНОЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ МАШИНЫ
METHOD FOR VECTOR CONTROL OF A SEMICONDUCTOR CONVERTER
FOR PROVIDING A POLYHARMONIC OPERATING MODE
OF A MULTI-PHASE ELECTRIC MACHINE

Пантелеев С.В., Малашин А.Н., к-т. техн. наук, доцент
Военная академия Республики Беларусь, г. Минск, Беларусь,
Сизиков С.В., к-т. техн. наук, доцент,
Белорусский национальный технический университет, г. Минск, Беларусь
S. Panteleev, A. Malashin, Cand. tech. Sciences, Associate Professor,
Military Academy of the Republic of Belarus, Minsk, Belarus
S. Sizikov, Candidate of Technical Sciences
Belarusian National Technical University, Minsk, Belarus

Аннотация. На основе проведенного анализа электромагнитных процессов в многофазном полупроводниковом преобразователе электрической энергии создана его дискретная математическая модель, которая учитывает перераспределение электромагнитной энергии по отдельным пространственным гармоническим составляющим в зависимости от числа фаз. С использованием данной математической модели и схемы инжекции высших гармоник тока, которая обеспечивает полигармонический режим работы полупроводникового преобразователя, разработан способ независимого управления пространственными гармоническими составляющими входного тока преобразователя.

Abstract. Based on the analysis of electromagnetic processes in a multiphase semiconductor converter of electrical energy, its discrete mathematical model was created, which takes into account the redistribution of electromagnetic energy by individual spatial harmonic components, depending on the number of phases. Using this mathematical model and the scheme of injection of higher current harmonics, which provides a polyharmonic mode of operation of a semiconductor converter, a method for independent control of the spatial harmonic components of the input current of the converter has been developed.

Ключевые слова: векторное, управление, полупроводниковый, полигармонический режим, инжекция гармоник.

Key words: vector, control, semiconductor, polyharmonic mode, harmonic injection.

ВВЕДЕНИЕ

Возможность работы многофазной электрической машины в полигармоническом режиме является одним из преимуществ перед трехфазной электрической машиной. Обеспечение функционирования электрической машины в

полигармоническом режиме работы позволит улучшить ее массогабаритные и энергетические показатели. При этом для получения максимальной активной мощности электрической машины необходимо решить задачу согласования во временной области полигармонической ЭДС и тока.

Особенности совместного функционирования многофазной электрической машины и полупроводникового преобразователя электрической энергии (ППЭЭ) обуславливают особый подход к синтезу системы управления.

ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

Разработана система векторного управления током в цепи многофазной электрической машины. Для этого на основе проведенного анализа электромагнитных процессов в многофазном ППЭЭ создана его дискретная математическая модель, которая учитывает перераспределение электромагнитной энергии по отдельным пространственным гармоническим составляющим в зависимости от числа фаз [1].

$$\bar{U}_{h_i} = \bar{U}_{ss,h} + R\bar{I}_{h_i} + L_h \frac{d\bar{I}_{h_i}}{dt}; \quad (1)$$

$$\bar{U}_{ss,h} = \bar{\Phi}_{ih} u_d; \quad (2)$$

$$\bar{\Phi}_{ih} = \frac{1}{2} T^{-1} M T \bar{S}_{ih}; \quad (3)$$

$$i_d = \frac{m}{2} \sum_{h=1}^{(m-1)/2} \bar{\Phi}_{ih} \bar{I}_{h_i}; \quad (4)$$

$$i_d = i_f + i_l. \quad (5)$$

$$i_f = C_d \frac{du_d}{dt} \quad (6)$$

где $\bar{U}_{h_i}, \bar{I}_{h_i}, \bar{U}_{ss,h}$ – векторы-столбцы мгновенных значений сетевых напряжений и токов, а также напряжений на силовом входе ПК в двухмерных ортогональных неподвижных системах координат α_h, β_h , R и L_h – матрицы (размерностью $m \times m$) активных сопротивлений и индуктивности буферных реакторов;

$\bar{\Phi}_{ih} = [\varphi_{\alpha_h} \quad \varphi_{\beta_h}]^T$ – дискретные коммутационные вектор-функции;

u_d – выходное напряжение ППЭЭ;

T^{-1} – матрица преобразования координат;

M – матричная константа размерностью $m \times m$;

\bar{S}_{ih} – комбинация состояний ключей ПК;

i_d – выходной ток ППЭЭ; m – число фаз;

i_f – ток в цепи емкостного фильтра C_d ;

i_l – ток нагрузки ППЭЭ;

$i = 0 \dots (N-1)$ – номер комбинации состояний ключей ПК;

N – общее число допустимых комбинаций состояний ключей ПК.

С использованием данной математической модели и схемы инъекции высших гармоник тока, которая обеспечивает полигармонический режим работы ППЭЭ,

разработан способ независимого управления пространственными гармоническими составляющими входного тока преобразователя.

Функциональная схема регулирования ППЭЭ представлена на рисунке 1 и выполнена на основе принципов подчиненного регулирования и векторного управления вектором входного тока \bar{i}_h ППЭЭ.

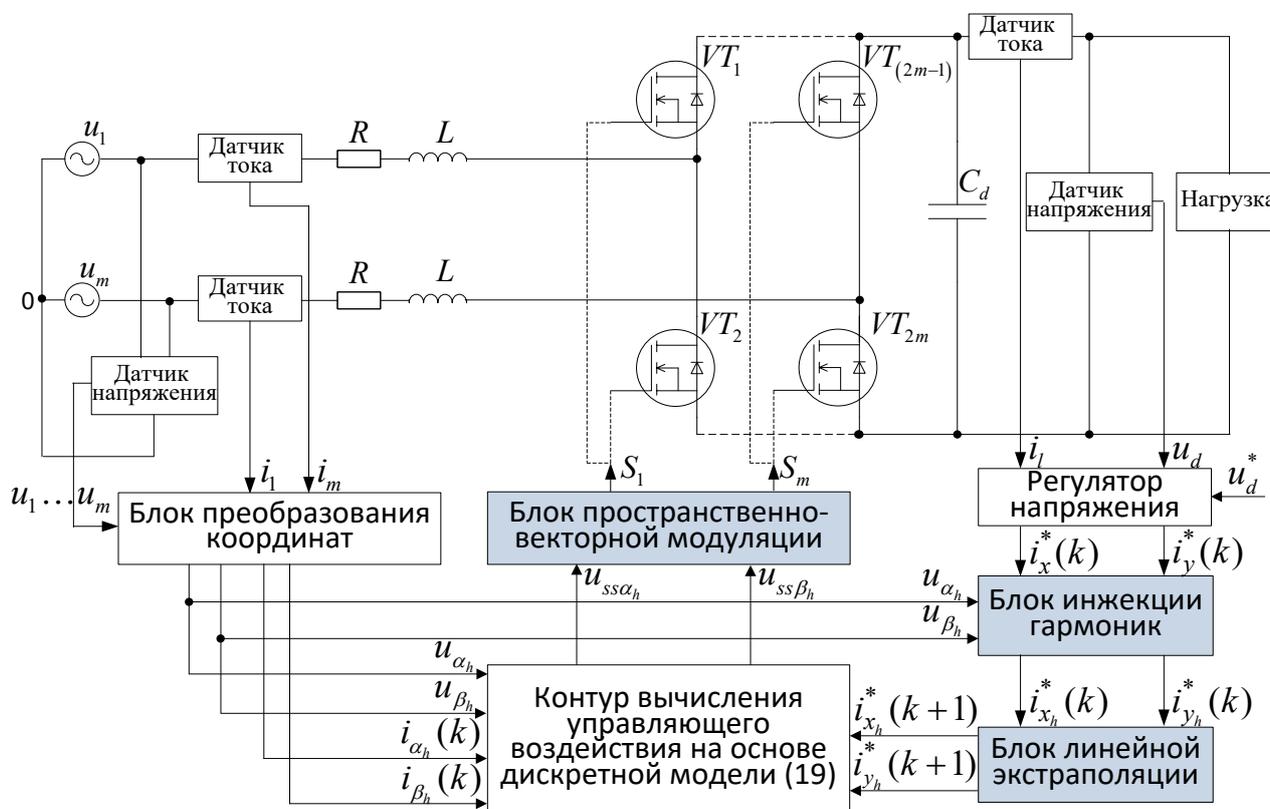


Рисунок 1 – Функциональная схема регулирования ППЭЭ

В разработанной системе управления для обеспечения полигармонического режима работы полупроводникового преобразователя электрической энергии разработана схема инъекции высших гармоник тока (7)–(9).

Заданные значения «активных» составляющих h -го вектора входного тока $i_{x_h}^*(k)$ при $h > 1$ определяются на основе «активной» составляющей вектора входного тока при $h = 1$ с использованием весовых коэффициентов C_h

$$i_{x_h}^*(k) = C_h i_{x_1}^*(k). \quad (7)$$

Весовые коэффициенты C_h рассчитываются на основе значений модулей векторов входного напряжения ППЭЭ $U_h(k)$ согласно выражению

$$C_h = U_h(k)/U_1(k). \quad (8)$$

При этом заданное значение «активной» составляющей тока $i_{x_1}^*(k)$ определяется как функция полученного регулятором напряжения постоянного тока заданного значения «активной» составляющей тока $i_x^*(k)$:

$$i_{x_1}^*(k) = i_x^*(k) / \sum_{h=1}^{(m-1)/2} C_h. \quad (9)$$

Основой разработанной системы векторного управления ППЭЭ является его дискретная математическая модель изменения мгновенных значений входного тока (1). На ее основе в начале каждого периода управления определяется управляющее воздействие в виде векторов напряжения полупроводникового преобразователя электрической энергии, позволяющих компенсировать отклонение вектора входного тока ППЭЭ в конце периода управления.

Формирование в каждой из фаз полигармонических токов, сопряженных по форме и фазе с питающим преобразователь напряжением, осуществляется посредством управляющих воздействий в виде векторов напряжения полупроводникового коммутатора, реализация которых осуществляется методом многофазной пространственно-векторной модуляции [2].

Для проверки разработанных положений создана имитационная модель девятифазного ППЭЭ с системой векторного управления.

Осциллограммы выходного тока и напряжения на рисунке 2 иллюстрируют включение преобразователя с нагрузкой $P_a = 200$ кВт.

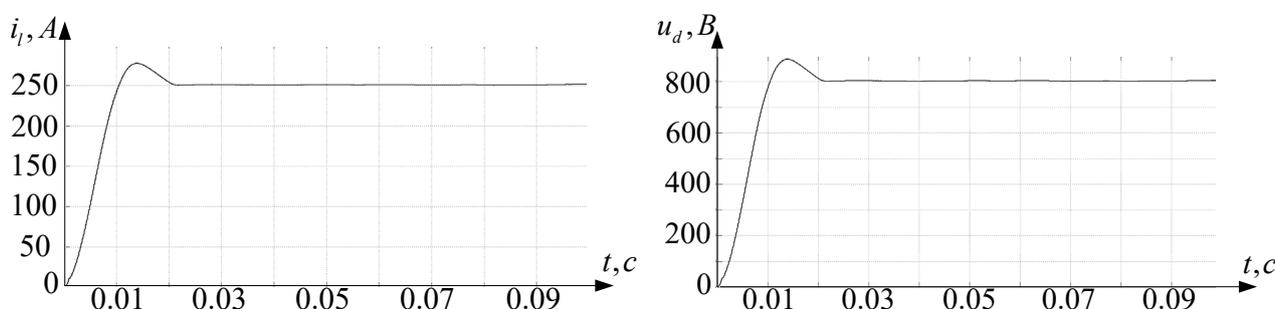


Рисунок 2 – Осциллограммы тока и напряжения на выходе полупроводникового преобразователя электрической энергии

На рисунке 3 приведены осциллограммы входного фазного напряжения и тока ППЭЭ при заданной нагрузке, а также осциллограмма фазного напряжения, которое формируется полупроводниковым коммутатором посредством разработанного алгоритма пространственно-векторной модуляции.

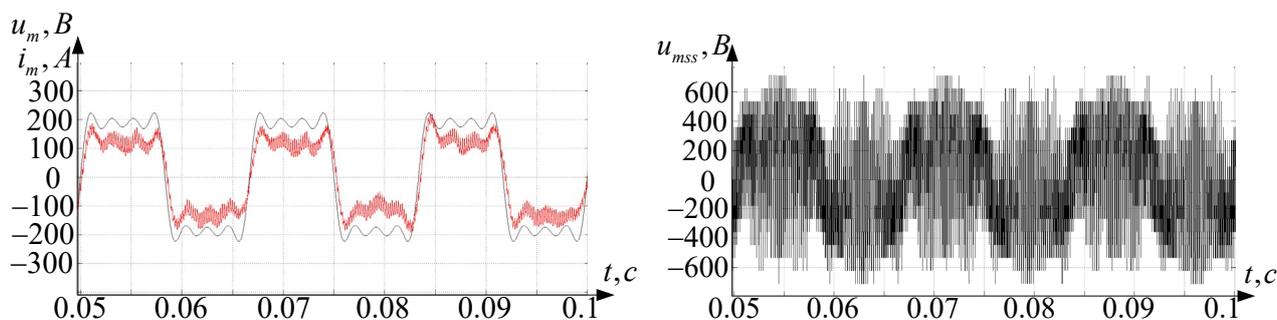


Рисунок 3 – Осциллограммы сигналов полупроводникового преобразователя электрической энергии в звене переменного тока

Из рисунка 3 видно, что разработанный способ векторного управления многофазным ППЭЭ учитывает перераспределение электромагнитной энергии по отдельным пространственным гармоническим составляющим, что позволяет обеспечить в каждой из фаз системы полигармонический ток, который по форме и фазе сопряжен с питающим напряжением. Фазные напряжения полупроводникового коммутатора представлены 17-уровневой формой сигнала $(0, \pm u_d/9, \pm 2u_d/9, \dots, \pm 8u_d/9)$.

На рисунке 4 приведены траектории движения пространственных векторов входного тока ППЭЭ \vec{I}_h в соответствующих $\alpha_h\beta_h$ системах координат.

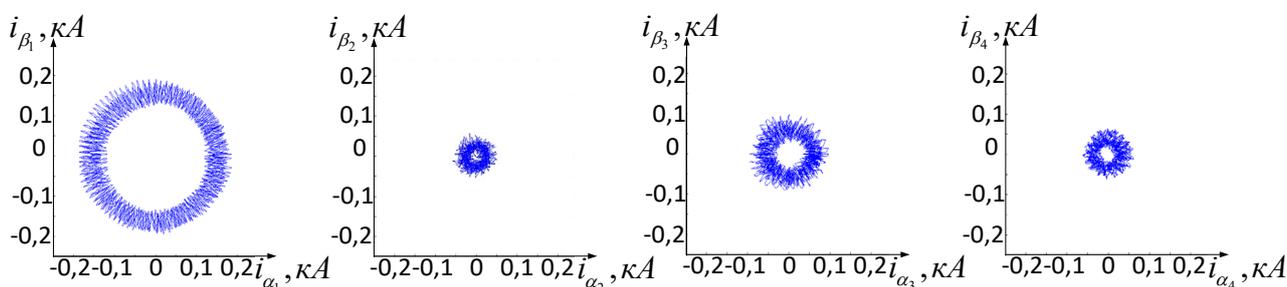


Рисунок 4 – Траектории движения пространственных векторов входного тока полупроводникового преобразователя электрической энергии в соответствующих $\alpha_h\beta_h$ системах координат

Из рисунка 4 видно, что разработанный способ векторного управления многофазным ППЭЭ позволяет обеспечить независимое управление пространственными гармоническими составляющими входного тока преобразователя в различных $\alpha_h\beta_h$ -плоскостях.

Исследование системы векторного управления на имитационной модели выявило достаточную устойчивость ППЭЭ к действию основных дестабилизирующих факторов и параметрических возмущений.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты математического моделирования показывают, что разработанный способ векторного управления позволяет решить задачу независимого управления

пространственными гармоническими составляющими тока в рабочей обмотке электрической машины и тем самым устранить основные недостатки применения электрических машин с полигармонической ЭДС в системах электроснабжения.

Следовательно, разработанная система управления многофазным полупроводниковым преобразователем электрической энергии позволит реализовать управление током в цепи электрической машины таким образом, чтобы обеспечить формирование в каждой из фаз полигармонических токов, согласованных по форме и фазе с ЭДС холостого хода электрической машины, что позволит уменьшить удельную массу системы электроснабжения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Пантелеев С.В. Разработка математической модели многофазного полупроводникового преобразователя электрической энергии с системой векторного управления. Часть 1 / С.В. Пантелеев, А.Н. Малашин // Вестник ГГТУ им. П.О. Сухого. – Гомель. – 2020 – № 2. – С. 82-90.

2. Пантелеев, С.В. Моделирование m -фазного активного выпрямителя напряжения с пространственно-векторной модуляцией / С.В. Пантелеев, А.Н. Малашин, А.Е. Каледа // Вес. Нац. акад. навук Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. – 2018. – Т. 63, № 4. – С. 455–468. <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2018-63-4-455-468>

УДК 681.78

СТАНДАРТИЗАЦИЯ И ИННОВАЦИИ В ОБЛАСТИ ИЗМЕРЕНИЙ
ПАРАМЕТРОВ ОПТИЧЕСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ
STANDARDIZATION AND INNOVATION IN THE MEASUREMENT OF
OPTICAL RADIATION PARAMETERS

Савкова Е.Н. к-т. техн. наук, доцент, Баранов П.О., Чжан Ю., аспирант
Белорусский национальный технический университет, г. Минск, Беларусь
Y. Saukova, Candidate of Technical Sciences, Docent, P. Baranau, Y. Zhang,
postgraduate student,
Belarusian national technical university, Minsk, Belarus

Аннотация. На основе действующих нормативных документов выведена классификация оптических величин и свойств самосветящихся и несамосветящихся объектов, систематизированы стандартные и инновационные методы и средства измерений оптических величин.
Abstract. Based on the current regulatory documents, the classification of optical quantities and properties of self-luminous and non-self-luminous objects is derived, standard and innovative methods and means of measuring optical quantities are systematized

Ключевые слова: оптическое излучение, оптические величины, энергия, биологические воздействия.

Key words: optical radiation, optical magnitudes, energy, biological effects.

ВВЕДЕНИЕ

Последнее десятилетие характеризуется развитием и повсеместным применением источников оптического излучения во всех областях жизнедеятельности человека. Поэтому актуальной проблемой в настоящее время является управление рисками, связанными с биологическими воздействиями оптического излучения. В этой связи необходимо выполнить обзор и систематизацию знаний о полезных и негативных воздействиях оптического излучения на организм человека, животных, растений и окружающую среду и выявить перспективные направления их снижения.

ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

Стандартизация диапазонов и величин, характеризующих оптическое излучение. Оптическое излучение является электромагнитным излучением следующих поддиапазонов [1]:

– ультрафиолетовый: А: от 315 до 400 нм; В: от 280 до 315 нм; С: от 1 до 280 нм;

– видимый: от 360–380 до 766–780 нм;

– инфракрасный: А: от 0,78 до 1,4 мкм; В: от 1,4 до 3 мкм; С: от 3 мкм до 1 мм.

Источниками оптического излучения являются солнечный свет, лампы, лазеры, раскаленные тела, спектры которых могут объединять смежные поддиапазоны, как например, ультрафиолетовые светодиоды. В настоящее время

стандартизованы три системы величин, для которых предусмотрены соответствующие схемы разделения оптического диапазона [2]:

- радиометрическая (лучистая энергия, плотность лучистой энергии, облученность, интенсивность лучистой энергии, энергетическая излучательность, экспозиция излучения и др.);

- фотометрическая (количество света, плотность световой энергии, сила света, освещенность, светимость, световая экспозиция и др.);

- фотобиологическая (ретиальная освещенность, световая эффективность, доза излучения и др.).

С точки зрения фотоники интерес представляют измерения фотобиологических величин, которые предполагают применение эмпирических моделей. Такие модели исследуются в рамках фотобиохимии, фотобиологии, биофотоники. Для фотобиологических величин стандартизованы следующие поддиапазоны: УФ-С: от 100 до 280 нм; УФ-В: от 280 до 315 нм; УФ-А: от 315 до 380–400 нм; видимый: от 380–400 до 760–780 нм; ИК-А: от 760–780 до 1400 нм; ИК-В: 1,4 мк до 3 мм; ИК-С: от 3 мкм до 1 мм [2].

Инновации в области исследований оптического излучения. В последние несколько десятилетий наблюдаются тенденции изменения световой среды, в которой человек проводит большую часть времени суток. Световая среда включает факторы дальнего и ближнего окружения, параметры которых меняются во времени. Кроме того, в современном мире человек практически постоянно подвержен излучению видеотерминалов и экранов телефонов, смартфонов, компьютеров, телевизоров и т. д., которые относятся к неточечным самосветящимся объектам. Возможные накопительные нейрофизиологические эффекты негативного характера, такие как световая раздражительность, бессонница, гиперактивность, утомляемость и др., также подлежат тщательному исследованию. Кроме того, постоянно увеличивающийся парк транспортных средств, разработки новых источников света стимулирует исследования восприятия освещения фар, фонарей и световозвращателей в темное и сумеречное время суток. Например, для оценки параметров утомляемости существуют психологические эксперименты и специальные тесты. Так же при длительном воздействии эти факторы могут изменять представление расстояния до объекта. Факторами световой среды являются раздражение, яркость, зависимость от длины волны излучения, изменение яркости от времени, пороговые характеристики кривых в области пространственных частот, для немигающих изображений, а также кривые в области временных частот для изображения больших размеров. В то же время нет информации при одновременном изменении этих факторов (пространства и времени), слабо изучено влияние цветового контраста на утомление [3]. Всемирной организацией здравоохранения тщательно проработаны три вида эффектов влияния лазерного излучения на организм человека [2, 4]:

- Фотодеструктивное воздействие – тепловой, гидравлический, фотохимический эффекты света вызывают деструкцию тканей, этот вид лазерного взаимодействия используется в лазерной хирургии.

– Фотохимические и фотофизические взаимодействия, при котором поглощенный биотканями свет возбуждает в них атомы и молекулы, вызывает фотохимические и фотофизические реакции; на этом виде взаимодействия основывается применение лазерного излучения как терапевтического.

– Невозмущающее воздействие, когда биосубстанция не меняет своих свойств в процессе взаимодействия со светом (рассеивание, отражение и пропускание); этот вид используют для диагностики (например, лазерная спектроскопия) [5].

Также исследуются влияния спектральной составляющей видимого излучения на ганглиозные клетки сетчатки, стимулирующие циркадные ритмы.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Инновационным направлением является также разработка специальных шкал, основанных на субъективных восприятиях и технических измерениях, что требует соответствующего метрологического обеспечения, включающего стандартные образцы как источники метрологической прослеживаемости. Необходимо упорядочить и систематизировать знания о существующих методах и средствах измерений зрительных и фотобиологических воздействий оптического излучения.

Накопленный опыт в области светотехники позволяет создавать технические устройства, обеспечивающие благоприятную и энергоэффективную световую среду, основанную на светотехнических сценариях управления естественным и искусственным освещением. Испытательная светотехническая лаборатория в рамках требований ГОСТ ISO/IEC 17025-2019 должна в процессе своей деятельности идентифицировать риски и управлять ими. Эффективным инструментом может быть реестр рисков – специальная компьютерная программа, позволяющая оценивать значимость рисков и их последствия.

ЛИТЕРАТУРА

1. Прикладная оптика. Апенко М.И., Дубовик А.С., Дурейко Г.В., Жилкин А.М. Москва: Машиностроение. 1992. – 480 с.
2. Lasers and optical radiation. Environmental Health Criteria 23. World Health Organization. Geneva, 1982. – 110 p.
3. Кулаков А.К. АЧХ зрительного анализатора как звена кинематографической системы / Разработки и проектирование узлов кинотехнической аппаратуры. Сборник трудов Ленинградского института киноинженеров. Вып. XXXIV. – Ленинград 1979, с 133–145.
4. [Электронный ресурс] – Режим доступа : https://webznam.ru/blog/orasno_skaner_na_smartfone/2019-03-15-974 – Дата доступа : 12.04.2021
5. Буйлин В.А., Брехов Е.И., Брыков В.И. Низкоинтенсивное лазерное излучение в хирургии: успехи и перспективы // Здоровоохранение. – 2002. № 5. С. 57–60.

УДК 621.317.3

МЕТРОЛОГИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ РАСПРЕДЕЛЕНИЙ
 ВЕРОЯТНОСТЕЙ НЕПРЕРЫВНЫХ И ДИСКРЕТНЫХ ВЕЛИЧИН
 В ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ИЗМЕРЕНИЯХ
 METROLOGICAL ASPECTS OF PROBABILITY DISTRIBUTIONS
 OF CONTINUOUS AND DISCRETE QUANTITIES
 IN ELECTRICAL MEASUREMENTS

Савкова Е.Н. к-т. техн. наук, доцент, Лагунов Д.В.,
 Науменко М.В., Бороденок И.М.

Белорусский национальный технический университет, г. Минск, Беларусь

Y. Saukova, Candidate of Technical Sciences, Docent,
 D. Lagunov, M. Naumenko, I. Borodzionak

Belarusian national technical university, Minsk, Belarus

Аннотация. Сделан краткий обзор состояния вопроса в области применения распределений вероятностей величин в электрических измерениях. Приведены основные характеристики, математическое описание и свойства распределений логарифмических величин,

Эрланга и Пуассона. Рассмотрены возможности применения данных распределений для решений конкретных задач в электрических измерениях.

Abstract. A brief overview of the state of the question in the field of application of probability distributions of quantities in electrical measurements is made in the article.

The main characteristics, mathematical description, and properties of logarithmic, Erlang, and Poisson distributions are given. The possibilities of using these distributions for solving specific problems in electrical measurements are considered

Ключевые слова: функция распределения, измеряемая величина, электрические измерения, математическое ожидание, дисперсия.

Key words: distribution function, measured quantity, electrical measurements, mathematical expectation, variance.

ВВЕДЕНИЕ

Повышение точности электрофизических измерений обуславливает необходимость корректного описания результата измерения как интервала охвата с заданным уровнем достоверности. Информативными параметрами интервала охвата являются точечная оценка измеряемой величины, интервальная оценка (расширенная неопределенность), вероятностная оценка (вероятность охвата, уровень доверия, доверительная вероятность) и функция распределения значений, приписываемых измеряемой величине в пределах интервала охвата. В большинстве случаев приписывают нормальное, равновероятное и распределение Симпсона [1]. Однако в метрологической литературе [2] приводятся другие виды распределений вероятностей (например, Эрланга, Пуассона и др.) для электрических и радиотехнических измерений.

Цель данной работы – выполнить обзор данных распределений и их характеристик и определить круг измерительных задач для их применения.

ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

Согласно [2] функция распределения – функция, задающая каждому значению вероятность того, что случайная переменная величина X будет меньше или равна:

$$G(\varepsilon) = \text{Pr}(X \leq \varepsilon) \quad (1)$$

В метрологической практике чаще используют функцию плотности вероятности (ФПВ) – «первую производную, если она существует, функции распределения непрерывной случайной переменной» [2]. Приведенные результаты, в которых сигнал постоянен и шум имеет нормальную ФПВ, могут быть распространены и на другие ФПВ, например, для случая, когда колебания вокруг постоянного значения распределены равномерно [2]. Непрерывное распределение описывает вероятности возможных значений непрерывной случайной величины. Вероятность того, что непрерывная случайная величина равна некоторому значению, всегда равна нулю. Для описания непрерывных величин применяют распределения Гаусса, Симпсона, равномерное, гамма, бета, студента, экспоненциальное, двусторонне-экспоненциальное, логарифмическое, огнормальное, распределение Пуассона, Распределение Эрланга и другие. С точки зрения концепции неопределенности интерес представляют логарифмические величины - Логарифмические интервалы частоты, оптическая плотность, затухание и усиление в электросвязи, применяемые в электрофизических измерениях. В частности, если X имеет равномерное распределение на интервале $[a, b]$ в линейных единицах [т. е. сосредоточена вокруг значения $\frac{a+b}{2}$ с половиной ширины $\frac{b-a}{2}$], то его преобразование в децибелы относительно одного вольта, вычисляемое как $Y = 20 \log_{10} x$, имеет ФПВ [3]:

$$g_Y(Y) = \frac{\ln 10}{20(b-a)} 10^{\frac{Y}{20}} \quad (2)$$

в то время как ее преобразование в децибелы, вычисленное с помощью выражения $Z = 10 \log_{10} X$, имеет ФПВ [2]:

$$g_Z(Z) = \frac{\ln 10}{10(b-a)} 10^{\frac{Z}{10}} \quad (3)$$

Для обратного преобразования из равномерной ФПВ величины в децибелах в линейные единицы для полей или напряжений ФПВ будет [3, 4]:

$$g_X(X) = \frac{20}{(b-a)\ln 10} \frac{1}{X} \quad (4)$$

В электрофизических помимо распределений Гаусса, Симпсона и равномерного в особых случаях применяются, логарифмическое логнормальное и др.

Логарифмическое распределение (иногда известное как распределение логарифмических рядов) – это дискретное положительное распределение, достигающее максимума при $x = 1$, с одним параметром и длинным правым хвостом. На рисунке 1 приведены два примера логарифмического распределения [4].

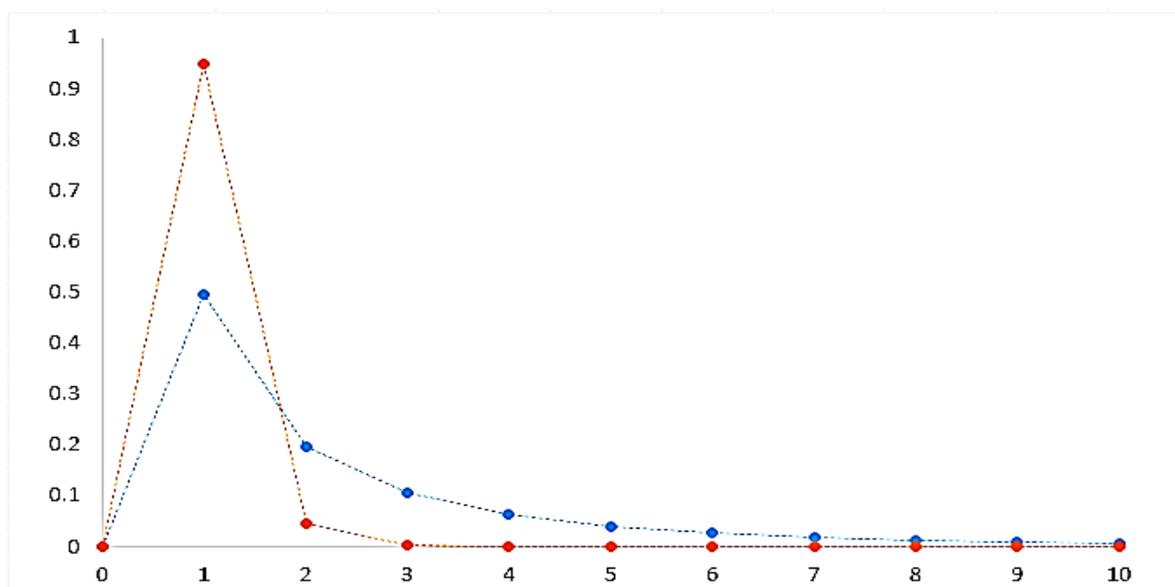


Рисунок 1 – Логарифмическое распределение вероятностей

Логарифмическое распределение довольно популярно в страховании для моделирования частоты претензий. Он используется для описания, например, количества предметов, приобретенных потребителем в определенный период. Существует некоторая теория, которая связывает последние два с наблюдением Ньюкомба (1881), что частота использования различных цифр в натуральных числах следует логарифмическому распределению [5]. В электрических измерениях данное распределение применяется для логарифмических величин – уровня электрического напряжения, уровня громкости, уровня шума и др.

Также для логарифмических величин применяют логнормальное распределение [6]. Случайная величина имеет нормальное логарифмическое распределение, если ее логарифм нормально распределен. Этому типу распределения часто подходят искаженные распределения с низкими средними значениями, большой дисперсией и полностью положительными значениями. Некоторые другие названия логнормального распределения – Гальтона, Гальтона-Макалистера, Гибрата, Кобба-Дугласа. Они позволяют определять размер частиц

серебра в фотоэмульсии, живучесть промышленных агрегатов с режимами отказов, которые характеризуются усталостным напряжением, объем газа в нефтяном запасе. ФПВ логнормального распределения описывается выражением [7]:

$$f(x) = \frac{1}{x\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{\ln(x)-\mu}{\sigma}\right)^2} \quad 0 < x < +\infty \quad (5)$$

Краткое описание других распределений вероятностей приведено в таблице 1 [6]. Распределение Пуассона применяется для описания дискретных величин, представляющих собой число некоторых событий, произошедших за фиксированное время, только при условии, что эти события происходили с некоторой фиксированной средней интенсивностью, а также независимо друг от друга [8]. Распределение Пуассона зависит только от одного параметра – λ , данный параметр зависит от вероятности успешного (редкого) события и общего числа событий.

Таблица 1 – Информация о некоторых распределениях вероятностей

Распределение	ФПВ	Параметры
для непрерывных величин		
Равномерное $[a, b]$	$\frac{1}{b-a}, \quad a \leq x \leq b$	$a, b \in R, \quad a < b$
Гамма	$\frac{x^{\alpha-1} e^{-x/\beta}}{\Gamma(\alpha)\beta^\alpha}, \quad x \in R$	$\alpha > 0, \quad \beta > 0$
Бетта	$\frac{x^{r-1}(1-x)^{s-1}}{\beta(r,s)}, \quad 0 \leq x \leq 1$	$r > 0, \quad s > 0$
Экспоненциальное	$\lambda e^{-\lambda x}, \quad x \geq 0$	$\lambda > 0$
Двусторонне-экспоненциальное	$\frac{\lambda}{2} e^{-\lambda x }, \quad x \in R$	$\lambda > 0$
Стьюдента	$\frac{\Gamma(\frac{n+1}{2})}{\sqrt{n\pi}\Gamma(\frac{n}{2})\left(1+\frac{x^2}{n}\right)^{\frac{1+n}{2}}}, \quad x \in R$	$n = 1, 2, \dots$
Коши	$\frac{\theta}{\pi(x^2 + \theta^2)}, \quad x \in R$	$\theta > 0$
для дискретных величин		
Равномерное распределение	$\frac{1}{N}, \quad k = 1, 2, \dots, N$	$N = 1, 2, \dots$
Бернулли	$p_1 = p$ $p_0 = q$	$0 \leq p \leq 1, \quad q = 1 - p$
Распределение Пуассона	$\frac{e^{-\lambda}\lambda^k}{k!}, \quad k = 0, 1, \dots$	$\lambda > 0$
Биномиальное	$C_n^k p^k q^{n-k}, \quad k = 0, 1, \dots, n$	$0 \leq p \leq 1, q = 1 - p, n = 1, 2, \dots$
Геометрическое	$q^{k-1}p, \quad k = 1, 2, \dots$	$0 \leq p \leq 1, \quad q = 1 - p$

«Успешное» событие: распределение Пуассона применяется тогда, и только тогда, когда есть разделение на результат «да» и «нет», например, лампочка перегорела: да - это успешное событие; шина прокололась: да – успешное событие и так далее. В электрических измерениях распределение Пуассона применяют при испытаниях электротехнических изделий на надежность. Параметр $\lambda = n * p$, где p – вероятность успешного события, а n – общее количество событий, для которых ведется расчет. Если количество проведенных испытаний n достаточно велико, а вероятность p появления некоторого события в отдельно взятом испытании весьма мала (0,05–0,1 и меньше), то вероятность того, что в данной серии испытаний данное событие появится ровно m раз, можно приближенно вычислить по формуле Пуассона (6) где $\lambda = np$ [8]:

$$P_m \approx \frac{\lambda^m}{m!} e^{-\lambda} \quad (6)$$

Распределение Эрланга является двухпараметрическим законом распределения, используемым для вероятностного задания любых положительных непрерывных случайных величин. Плотность вероятности некоторой величины, имеющей распределение Эрланга, определяется формулой [8]:

$$W(x) = \frac{\lambda^{k+1}}{k!} x^k e^{-\lambda x}, x \geq 0, \lambda > 0 \quad (7)$$

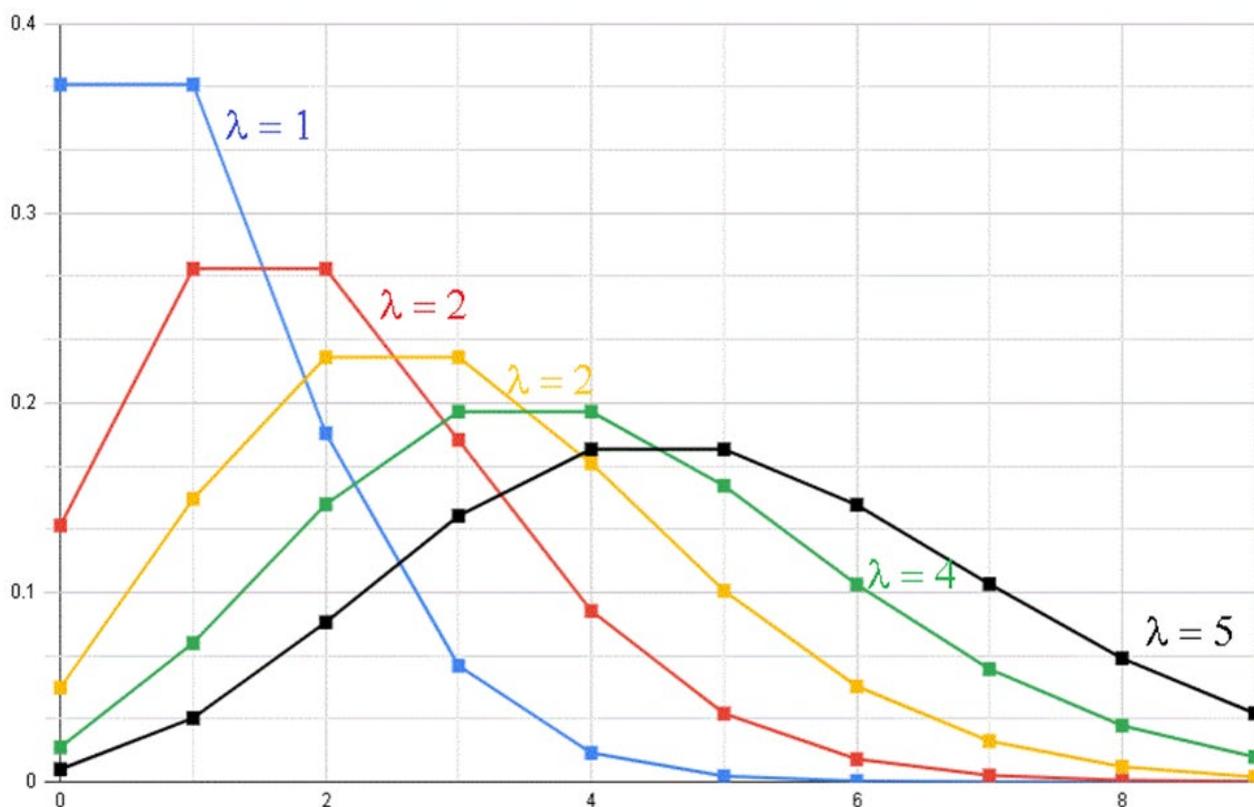


Рисунок 2 – ФПВ распределения Пуассона для различных значений λ

Как следует из формулы (7), плотность вероятности зависит от значения двух параметров – k и α . Параметр k называют порядком распределения Эрланга, и он имеет целочисленные значения $k = 0, 1, 2, m$. Для альтернативной, но эквивалентной параметризации используется параметр масштаба μ , который является обратной величиной параметра скорости ($\mu = \frac{1}{\lambda}$). Когда масштабный параметр μ равен 2, распределение Эрланга упрощается до распределения хи-квадрат с $2k$ степенями свободы. Поэтому его рассматривают как обобщенное распределение χ -квадрат для четных чисел степеней свободы. На рисунке 3 показаны распределения Эрланга для различных параметров k .

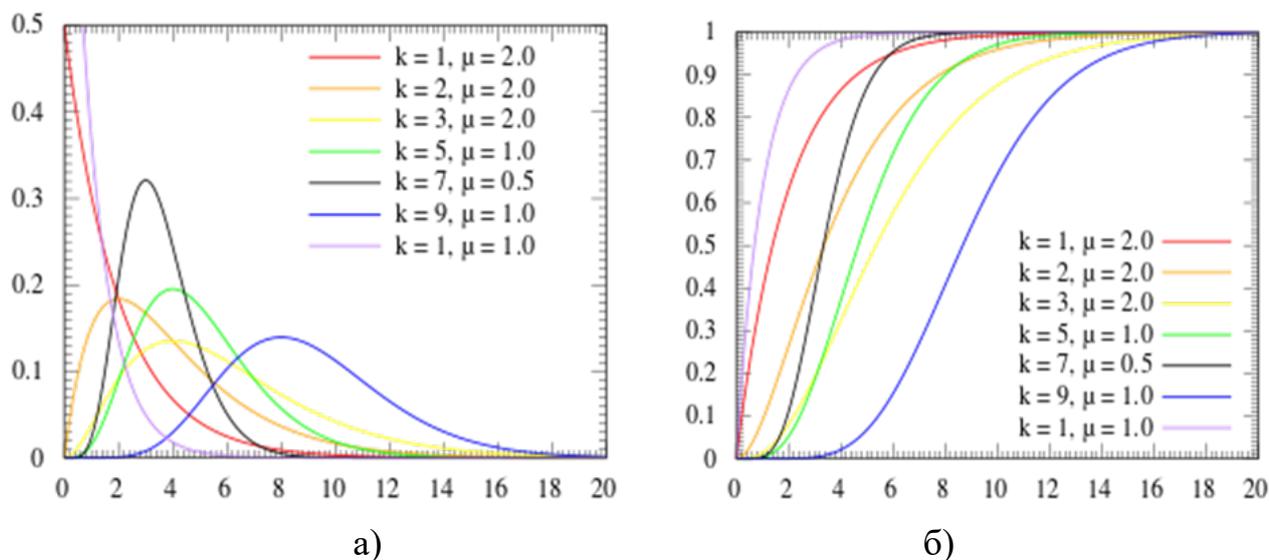


Рисунок 3 – Распределение Пуассона: а – ФПВ; б – интегральная функция распределения

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Ужесточение требований к точности и достоверности результатов измерений обуславливает исследование возможностей применения распределений вероятностей электрических величин, отличных от нормального, равномерного и Симпсона, как это было рекомендовано в нормативных документах, утвержденных более десяти лет назад. На современном этапе требуются усилия метрологического сообщества для разработки вероятностно-статистических математических моделей измеряемых величин, применяемых в конкретных измерительных ситуациях. Данные вопросы являются актуальными и находятся в стадии разработки.

ЛИТЕРАТУРА

1. Руководство ЕВРАХИМ/СИТАК СГ 4. Количественное описание неопределенности в аналитических измерениях. Третье издание. QUAM:2012.P1-RU. 2012. 165 с.
2. ГОСТ 34100.3.1-2017/ ISO/IEC Guide 98-3/Suppl 1:2008. Неопределенность измерения. Часть 3. Руководство по выражению неопределенности измерения.

Дополнение 1. Трансформирование распределений с использованием метода Монте-Карло. (ISO/IEC Guide 98-3/Suppl 1:2008, IDT). Москва. Стандартинформ. 2017. 21 с.

3. Logarithmic distribution [Электронный ресурс]. <https://www.vosesoftware.com/riskwiki/Logarithmicdistribution.php> - Дата доступа: 05.04.2021.

4. Logarithmic Scale [Электронный ресурс]. <https://www.sciencedirect.com/topics/computer-science/logarithmic-scale> – Дата доступа: 01.04.2021.

5. Probability Distributions for Measurement Uncertainty [Электронный ресурс]. <https://www.isobudgets.com/probability-distributions-for-measurement-uncertainty/>- Дата доступа: 04.04.2021

6. Математическая статистика [Электронный ресурс]. https://volpi.ru/files/vpf/vpf_library/Matematicheskaja_statistika.pdf - Дата доступа: 20.04.2021

7. Логнормальное распределение [Электронный ресурс]. <https://excel2.ru/articles/lognormalnoe-raspredelenie-nepreryvnye-raspredeleniya-v-ms-excel> - Дата доступа: 10.05.2021

8. ГОСТ Р ИСО 11843-6-2015 «Статистические методы. Способность обнаружения. Часть 6. Методология определения критического значения и минимального обнаруживаемого значения с применением аппроксимации распределения Пуассона нормальным распределением».

УДК 621.317.3

КОНЦЕПЦИЯ ГЛОБАЛЬНЫХ РИСКОВ В ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ИЗМЕРЕНИЯХ
THE CONCEPT OF GLOBAL RISKS IN ELECTRICAL MEASUREMENTS

Савкова Е.Н., к-т. техн. наук, доцент, Сипачев И.В.

Белорусский национальный технический университет, г. Минск, Беларусь

Y. Saukova, Candidate of Technical Sciences, Docent, I. Sipatchov,

Belarusian national technical University, Minsk, Belarus

Аннотация. Сформулированы основные положения концепции глобальных рисков, связанных с измерениями, возникающих в деятельности электротехнической лаборатории.

Abstract. The main provisions of the concept of global risks associated with measurements arising in the activities of the electrotechnical laboratory are formulated.

Ключевые слова: риск, электрические измерения, неопределенность, величина.

Key words: risk, electrical measurements, uncertainty, quantity.

ВВЕДЕНИЕ

Учитывая потенциальную опасность электрических измерений, с целью минимизации вероятности принятия некорректных решений по их результатам, в соответствии с требованиями ГОСТ ISO/IEC 17025-2019 [1] аккредитованная лаборатория должна планировать и осуществлять действия по управлению рисками. Мышление на основе рисков, являясь частью современной идеологии измерений, строится на комплексном рассмотрении показателей – действительном значении величины, границах допуска, неопределенности и функции плотности вероятностей. Применительно к измерениям [2] устанавливает термины частного и глобального рисков и дает общие рекомендации по их оценке, не делая акцент на какую-либо область. При этом в большинстве случаев входным и выходным величинам приписывается нормальное распределение вероятностей величин. Для электрических величин характерны и другие виды распределений вероятностей, что рассматривается в [3], однако не затрагиваются вопросы оценки рисков. Поэтому актуальным вопросом является определение понятия глобального риска в электрических измерениях.

ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ.

С точки зрения метрологии электрические измерения имеют следующие особенности:

– объекты, средства измерений и вспомогательные устройства подключены в единую электрическую цепь, и, следовательно, взаимодействуют и коррелируют друг с другом;

– наличие допущений, связанных с приписываемыми моделями средствам и объектам измерений;

– величины, вовлеченные в процесс измерения, могут иметь разное число степеней свободы;

- ограниченное количество повторных измерений в серии (чаще всего одно);
- динамический режим, предполагающий быстрое изменение измеряемой величины и проявление инерционных средств измерительной системы.

Перечисленные особенности обуславливают возникновение дополнительных погрешностей – методической, динамической и условий, расширяющих неопределенность измерения.

Если выходная величина измерительной системы при заданной априорной информации обозначается Y_m , η – некоторое значение данной величины, основанное на априорной информации, η_m – значение величины, полученное в результате эксперимента, а g – плотность функции распределения вероятностей величины Y_m , то наилучшая оценка (математическое ожидание) величины описывается выражением [2]:

$$Y_m = \eta = \int_{-\infty}^{\infty} g(\eta|\eta_m) d\eta = 1 \quad (1)$$

Погрешность измерения которая рассчитывается по формуле [2, 4]:

$$E = \eta_m - \eta. \quad (2)$$

Неопределенность рассчитывается по формуле [2, 5]:

$$u_{\eta m} = \sqrt{u_0^2 + u_m^2}. \quad (3)$$

где u_0 и u_m – стандартные неопределенности, связанные с наилучшей оценкой величины, основанные на априорной и апостериорной измерительной информации соответственно. Согласно [6]:

$$u_0 = \sqrt{\sum_{j=1}^k u_j^2}; \quad (4)$$

$$u_m = \sqrt{\frac{1}{n(n-1)} \sum_{j=1}^k (\eta_{mi} - \eta_i)}. \quad (5)$$

Одним из индикаторов корректно выбранного метода электрического измерения является показатель измерительных возможностей C_m , представляющий собой отношение допускаемой погрешности средства измерений к расширенной неопределенности калибровки на поверяемой (калибруемой) точке диапазона измерений средства измерений [2]:

$$C_m = \frac{E_m}{U}. \quad (6)$$

В электрических измерениях приемлемыми соотношениями являются $c_m \geq 4:1$ [2] для калибровки и $c_m \geq 10:1$ для проведения рутинных измерений (точный метод) [2]. Данные соотношения принимают во внимание при оценке рисков.

Спецификации рисков. Частный риск производителя – вероятность того, что конкретный забракованный объект окажется соответствующим. Риск потребителя – вероятность того, что конкретный принятый объект окажется несоответствующим. Глобальный риск производителя – вероятность того, что на основании полученного в будущем результата измерения соответствующий объект будет забракован. Глобальный риск потребителя – вероятность того, что на основании полученного в будущем результата измерения несоответствующий объект будет принят как годный [2]. Частный риск изготовителя («ложная браковка») для двустороннего поля допуска измеряемой величины с нижней границей T_L и верхней границей T_U , рассчитывается как вероятность соответствия [2, 3]:

$$p_c = \int_{T_L}^{T_U} g(\eta|\eta_m) d\eta. \quad (7)$$

Частный риск потребителя («ложная приемка») рассчитывается как вероятность несоответствия [2]:

$$\bar{p}_c = 1 - p_c. \quad (8)$$

Глобальный риск производителя вычисляется по формуле [2]:

$$R_p = \int_C \int_{\Gamma} g_0(\eta) h(\eta_m|\eta) d\eta_m d\eta. \quad (9)$$

Глобальный риск потребителя определяется из выражения:

$$R_p = \int_{\bar{c}} \int_{\Gamma} g_0(\eta) h(\eta_m|\eta) d\eta_m d\eta. \quad (10)$$

где g_0 – плотность распределения (вероятностей) измеряемой величины Y , известная перед выполнением измерения;

h – условная плотность распределения вероятностей для наблюдаемой случайной величины Y_m [2, 3].

Как видно из выражений (7–10), информативными параметрами при оценке частных рисков являются интервал допуска, функция распределения вероятностей измеряемой величины и стандартная неопределенность. Глобальные риски включают больше показателей, связанных с прогнозированием на будущие периоды, а понятия «ложной приемки» и «ложной браковки» или ошибок первого и второго рода трактуются в зависимости от вида риска. Глобальные риски в электрических измерениях можно разделить следующие виды:

- производственные, связанные с принятием решений о соответствии (несоответствии) электротехнической продукции на стадии ее проектирования и последующего изготовления; возможные последствия - материальный ущерб и внешние, связанные с возвратами и рекламациями потребителя);
- технологические, связанные с некорректной работой, повышением уровня опасностей электротехнических систем в процессе эксплуатации продукции;
- социально-биологические, связанные с опасностями для здоровья человека, вредными и опасными факторами (влияние электромагнитных полей, электрического тока и т. д.) в процессе производства и эксплуатации продукции;
- биологические, связанные с опасностями для популяций животных и растений в процессе производства и эксплуатации продукции;
- экологические, связанные с опасностями для окружающей среды, включая животных и растений и опасными факторами в процессе производства, эксплуатации и утилизации продукции.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Понятия глобальных рисков производителя и потребителя связаны с принятием ошибочных решений в будущем и зависят от производственного процесса и измерительной системы. В области электрических измерений можно сформулировать основные положения концепции глобальных рисков.

– Предпосылкой глобальных рисков являются системные ошибки, связанные с установлением соотношений целевых показателей (измерительных возможностей, неопределенностей при испытаниях и т. д.) в соответствии с выбранной стратегией.

– Перечисленные виды рисков: производственные, технологические, социально-биологические, биологические, экологические, представляют уровни интегрирования функций распределений выходных величин.

– Превентивная оценка глобального риска основана на расчете интегральной функции совместного распределения вероятностей частных рисков и глобальных рисков на всех стадиях жизненного цикла продукции с учетом временного фактора.

– Удобным прикладным инструментом управления рисками является реестр (или паспорт) риска, представляющий собой компьютерную программу с произвольным числом входных и выходных величин и высокой степенью гибкости и адаптации.

ЛИТЕРАТУРА

1. ГОСТ ISO/IEC 17025-2019 Общие требования к компетентности испытательных и калибровочных лабораторий.
2. ISO/IEC GUIDE 98-4:2012(E) Uncertainty of measurement - Part 4: Role of measurement uncertainty in conformity assessment.
3. ГОСТ IEC/TR 61000-1-6-2014 Электромагнитная совместимость (ЭМС). Часть 1–6. Общие положения. Руководство по оценке неопределенности измерений.

4. Hall B.D., A computational technique for evaluating and propagating the uncertainty of complex valued quantities, Proceedings of 60th ARFTG Washington DC, USA, Dec 5-6, 2002, 19-28.

5. ISO/IEC Guide 25:1982 Certification (approval) certification laboratories specification (approval) test laboratories specifications testing laboratories.

6. ГОСТ 34100.3.1-2017/ ISO/IEC Guide 98-3/Suppl 1:2008. Неопределенность измерения. Часть 3. Руководство по выражению неопределенности измерения. Дополнение 1. Трансформирование распределений с использованием метода Монте-Карло. (ISO/IEC Guide 98-3/Suppl 1:2008, IDT). Москва. Стандартинформ. 2017. 21 с.

УДК 621.316

ЦЕЛЕСООБРАЗНОСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ НАКОПИТЕЛЕЙ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ
В ЭНЕРГОСИСТЕМЕ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ
FUNCTIONALITY OF APPLICATION OF ELECTRIC POWER STORAGE
IN THE POWER SYSTEM OF THE REPUBLIC OF BELARUS

Гецман Е.М., магистр техн. наук, Мешкова А.Н.
Белорусский национальный технический университет, г. Минск, Беларусь
K. Hetsman, Master of Engineering Science, A. Meshkova
Belarusian national technical University, Minsk, Belarus

Аннотация: В работе рассмотрены основные показатели энергосистемы Республики Беларусь. Приведены аспекты работы энергосистемы с учетом ввода Белорусской атомной станции с выделением преимуществ внедрения систем накопления в энергосистему и их связь с интеграцией возобновляемых источников энергии в процесс производства электроэнергии.

Abstract: The paper considers the main indicators of the power system of the Republic of Belarus. Aspects of the power system operation are given, taking into account the commissioning of the Belarusian nuclear power plant, highlighting the advantages of introducing storage systems into the power system and their connection with the integration of renewable energy sources into the process of generating electricity.

Ключевые слова: мощность, возобновляемые источники энергии, накопители энергии.

Keywords: power, renewable energy sources, energy storage.

ВВЕДЕНИЕ

В течение последних лет в странах, принявших на себя ответственность по увеличению внедрения возобновляемых источников энергии (ВИЭ), реализуются стратегии управления спросом, предложения и накопления энергии. На первый план выходит задача регулирования мощности между поставщиком и потребителем в период неравномерности поставок электроэнергии от установок по использованию возобновляемых источников энергии, особенно рассматривается в контексте «умных сетей». Участие данных сетей в графике нагрузки способствует надежной и эффективной работе энергосистемы и приводит к экономии топливных ресурсов.

ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

Энергосистема Республики Беларусь (ОЭС Беларуси) представляет собой сложный комплекс, включающий в себя электростанции, котельные, электрические и тепловые сети, связанные общностью режима их работы на территории страны. Установленная мощность ОЭС Беларуси на 01.01.2021 составила порядка 8 897,31 МВт. Максимум потребляемой мощности в первом квартале 2021 года

составил – 6 272 МВт, что на 1,08 % больше относительно максимума 2017 года – 5 779 МВт [1]. Начиная с 2013 года это наибольший уровень максимальной мощности ОЭС Республики Беларусь.

Согласно приведенным показателям Белорусская энергосистема обладает достаточным количеством генерирующих мощностей для обеспечения потребляемой нагрузки. Однако согласно стратегии развития отрасли в последнее десятилетие интенсивно реализуется ряд мероприятий, повышающих эффективность удовлетворения потребителей в тепло- и электроэнергии. Безусловно, ввиду отсутствия доступных и экономически целесообразных способов хранения больших объемов электроэнергии и, соответственно, необходимости поддержания баланса между генерацией и изменяющимся потреблением особо значимым условием является ввод в баланс электрических мощностей Белорусской атомной электростанции (БелАЭС), что оказывает значительное влияние на саму энергосистему и планирование ее режимов.

После ввода в эксплуатацию БелАЭС из топливного баланса энергосистемы планируется сокращение и вытеснение доли энергоисточников на традиционных видах энергоресурсов (природный газ, реже мазут). В первом квартале 2021 года доля БелАЭС составила порядка 16 % по отношению к декабрю 2020 (в пределах 75 %) и изменялась в сторону уменьшения в рамках испытаний или до 0 % при проведении остановов для ремонтных работ / В случае вывода АЭС на полную номинальную мощность прослеживается тенденция замещения ботки конденсационными энергоблоками (КЭС) и частичное увеличение генерации теплоэлектроцентралей (ТЭЦ). При этом отмечается, что замещение выработки ТЭЦ характеризуется режимом работы АЭС в базовой части графика покрытия потребления, посредством не участия АЭС в регулировании изменения активной мощности (согласно соображениям безопасности частое регулирование мощности АЭС вообще нежелательно), что впоследствии, приводит к вынужденным и длительным разгрузкам ТЭЦ ниже теплового графика (рисунок 1).

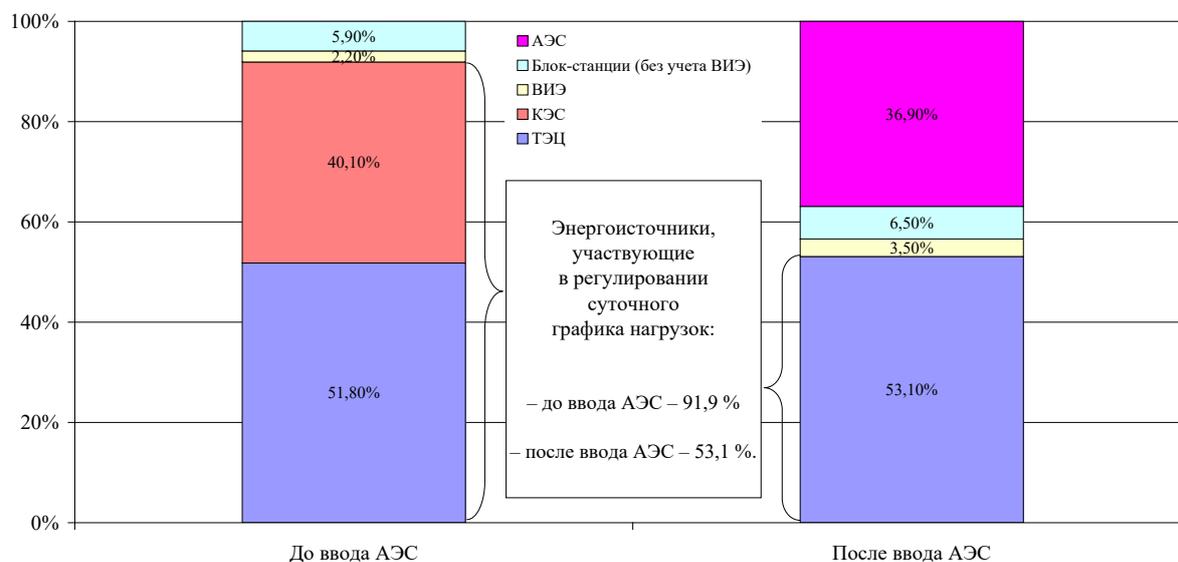


Рисунок 1 – Структура мощности в типовой зимний день

Для отопительного периода до ввода еще БелАЭС была характерна значительная доля ТЭЦ (54 %) и меньшая – КЭС (36 %), а в межотопительный – преобладание доли КЭС (63 %) за счет снижения «тепловой» нагрузки и, соответственно, снижения теплофикационной выработки ТЭЦ (25 %).

Варьирование данных показателей в сторону снижения и наоборот требует серьезных компенсационных мероприятий, особенно в периоды прохождения ночных провалов и выравнивания коэффициента неравномерности электрической нагрузки, где должно быть предусмотрено резервирование в любой момент времени энергоблока большой единичной мощности.

В мировой практике к данным мероприятиям относят следующие:

- строительство пиковых газотурбинных электростанций (пиковых ГТЭС);
- строительство гидроаккумулирующих электростанций (ГАЭС).

На первое место выходят высокоманевренные источники пиковой мощности – ГАЭС, время включения которых составляет всего 20–30 секунд, в то время как для газотурбинных электростанций этот показатель достигает порядка 6–7 минут из состояния холостого хода и могут выступать в виде аккумуляторов электрической энергии.

Учитывая разнообразие видов систем хранения энергии, доля гидроаккумулирующих мощностей в совокупной мощности систем хранения энергии составляет 96 %. При этом ГАЭС преимущественно используются в связке с гидроэлектростанцией и АЭС, и их мощность составляет порядка 15 % пиковой мощности АЭС (для РБ при строительстве ГАЭС мощность должна составить до 1000 МВт). В условиях интеграции БелАЭС альтернатива строительство нескольких ГАЭС позволило бы решить проблемы в Белорусской энергосистеме.

Отраслевая программа развития электроэнергетики на 2016–2020 годы и план развития электроэнергетической сферы на период до 2025 года, предусматривает резерв мощности для устранения небаланса электрических мощностей при аварийных остановках энергоблоков БелАЭС в энергосистеме за счет строительства пиково-резервных источников на базе газотурбинных энергоустановок, так и отдельных источников на парогазовых блоках мощностью суммарной мощностью 800 МВт [2, 3].

На второй квартал 2021 года запланирована поставка немецкой корпорации Siemens Industrial Turbomachinery первой газотурбинной установки и генератор для Новополоцкой ТЭЦ (ввод в эксплуатацию запланирован в 2022 году). Однако следует учесть, что использование пиково-резервных источников является лишь частным случаем их эксплуатации в определенные дни года для покрытия пиковых нагрузок.

В связи с предстоящим изменением топливно-энергетического баланса в энергосистеме прослеживается тенденция прироста использования возобновляемых источников энергии (ВИЭ). В данных условиях ожидается рост рынка хранения энергии и обусловлен развитием электрогенерации на основе ВИЭ, обладающих нерегулируемым режимом работы выработки и значительной возможностью мгновенно генерировать мощность в течение коротких временных интервалов (ветровые и солнечные установки). Основным барьер которых,

в дальнейшем требует интенсивной автоматизации магистральной и распределительной сетей, а также наличия значительного резерва мощностей либо накопителей энергии, которые большую часть времени остаются недозагруженными.

Однако использование технологий накопления электроэнергии предоставляет ряд преимуществ:

– Сокращение спроса на ископаемое топливо за счет замещения топливной генерации без создания новых генерирующих мощностей и углеродного следа.

– Возможность создания резерва без необходимости поддержания дорогостоящих регулирующих мощностей на балансе энергосистемы. В энергосистемах с генерацией, значительно превышающей потребление, возникает необходимость одновременного поддержания резерва на оборудовании электростанций в виду нехватки их регулировочного диапазона (только для целей регулирования суточного графика, т. к. в целом снижаются технико-экономические показатели станций).

– Внедрение установок накопителей электроэнергии для конечных потребителей связано с повышением надежности энергоснабжения и организации бесперебойности питания и созданием собственного горячего резерва на случай аварий. Хранилища могут запасать электроэнергию путем изменения ее стоимости, в частности, позволяя сглаживать суточные пики, следовательно, решат вопрос эффективного прохождения ночного минимума и малого на нее спроса и выдавать в моменты пика потребления для сглаживания (ограничения) предела потребляемой от сети мощности, что позволяет привести к снижению платы за потребляемую мощность.

Не стоит забывать, что, несмотря на дальнейший рост производства электрической энергии из ВИЭ и значительное сокращение выбросов для обеспечения надежных поставок требуются значительные инвестиции для обеспечения гибкости и устойчивости энергетических систем.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Безусловно, распространение развития гибридных проектов с ВИЭ способствует росту рынка хранения электроэнергии (опыт Китая (19 % от мира), Японии (17 %) и стран Европы (Испания, Италия, Германия и др.)), предоставляя, таким образом, спектр возможностей по интеграции солнечной и ветровой энергии в энергосистему, распределенной генерации и «умных сетей». Таким образом, накопители энергии могут стать важным элементом электроэнергетики в будущем. Динамичное развитие технологий в этом направлении может заметно изменить энергосистемы. Это в определенной степени негативно скажется на спросе на ископаемые топлива, так как накопители станут все больше замещать тепловую генерацию в роли балансирующего в электроэнергетических системах.

ЛИТЕРАТУРА

1. ГПО Белэнерго [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <https://www.energo.by/content/deyatelnost-obedineniya/osnovnye-pokazateli/>. – Дата доступа : 26.04.2021.

2. Волчек, О.В. Строительство гидроаккумулирующих электростанций как эффективные компенсационные мероприятия в белорусской энергосистеме после ввода БелАЭС / О.В. Волчек [и др.] // Энергоэффективность. – 2017. – № 9 (239). – С. 4–9.

3. Комплексный план развития электроэнергетической сферы на период до 2025 года», утвержденным Постановлением Совета министров Республики Беларусь № 169 от 01.03.2016 [Электронный ресурс]. – Режим доступа. <https://minenergo.gov.by>. – Дата доступа: 10.05.2021.

4. Концепция развития электрогенерирующих мощностей и электрических сетей на период до 2030 года [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://minenergo.gov.by>. – Дата доступа. 10.05.2021.

УДК 621.316

МОДЕЛИРОВАНИЕ РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНОЙ СЕТИ СРЕДНЕГО
НАПРЯЖЕНИЯ В MATLAB SIMULINK
MODELING MEDIUM VOLTAGE DISTRIBUTION NETWORK IN MATLAB
SIMULINK

Новаш И.В., к-т техн. наук, доцент, Мешкова А.Н.

Белорусский национальный технический университет, г. Минск, Беларусь

I. Novash, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, A. Meshkova

Belarusian national technical University, Minsk, Belarus

Аннотация: В среде динамического моделирования MatLab Simulink разработана модель распределительной сети среднего напряжения. Выполнены расчеты нормального и аварийных режимов работы сети.

Abstract: A model of the medium voltage distribution network has been developed in the dynamic modeling environment MatLab Simulink. Calculations of normal and emergency operation modes of the network have been performed.

Ключевые слова: распределительная сеть, моделирование, режимы работы.

Keywords: distribution network, modeling, operating modes.

ВВЕДЕНИЕ

Для изучения режимов работы распределительных сетей 6–35 кВ необходимо создать математическую модель, позволяющую в полном объеме рассмотреть переходные процессы при различных повреждениях в исследуемой сети. Такая модель должна быть максимально близка к реальной, учитывать состав оборудования и его номинальные параметры, физические и геометрические параметры проводов, емкостные сопротивления линий электропередачи, а также иные факторы, влияющие на процесс протекания переходного процесса.

ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

Разработаем математическую модель распределительной сети 10 кВ (рисунок 1), позволяющую исследовать переходные процессы при повреждениях в сети с изолированной нейтралью. Такая модель должна быть максимально близка к реальной, учитывать параметры проводов, емкостное сопротивление линии.

Исследуемая сеть включает в себя систему, трансформатор связи (Т) мощностью 10 МВА, воздушную линию электропередачи (ЛЭП), выполненную проводом АС-35/6,2, и нагрузку (Н) мощностью 6,5 МВт.



Рисунок 1 – Моделируемая сеть 10 кВ

Исследования режимов работы распределительной сети в нормальном и аварийных режимах будем выполнять в среде динамического моделирования MatLab Simulink [1, 2].

Для моделирования воспользуемся следующими стандартными блоками:

- энергосистема – блок Three-Phase Source;
- силовой трансформатор – блок Three-Phase Transformer;
- линия электропередачи – блок Three-Phase Series RLC Branch;
- емкостное сопротивление сети – блок «Three-phase parallel RLC branch»;
- нагрузка – блок Three-Phase Series RLC Load.

Для исследования переходного процесса необходимо иметь сведения о мгновенных величинах токов, протекающих в сети. Для этих целей моделирование датчиков тока выполним с помощью блоков Current measurement (рисунок 2), позволяющий снимать величины токов, как в каждой фазе, так и тока, протекающего через трансформатор тока нулевой последовательности.

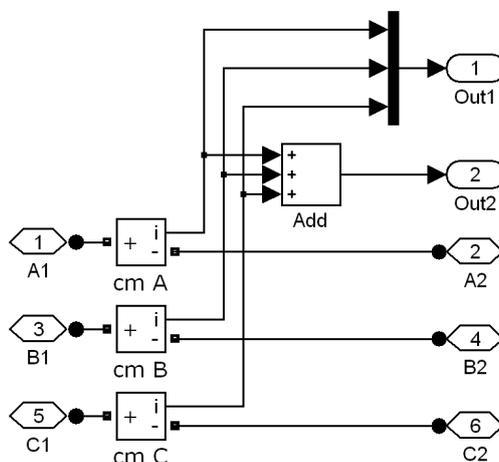


Рисунок 2 – Модель измерительного органа тока

С учетом приведенных выше сведений, построим математическую модель исследуемой распределительной сети 10 кВ в MatLab Simulink, которая будет иметь вид, представленный на рисунке 3. В разработанной модели учтены особенности переходных процессов в силовом трансформаторе, учтена емкость и индуктивность линии в зависимости от ее длины, сечения провода.

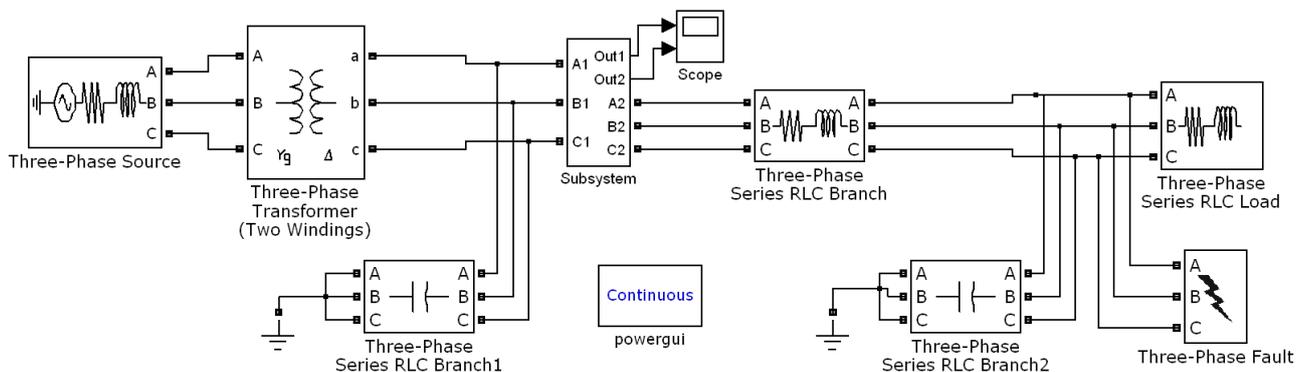


Рисунок 3 – Модель распределительной сети 10 кВ в MatLab Simulink

Приведем результаты расчетов мгновенных значений фазных токов и тока, протекающего через трансформатор тока нулевой последовательности, в нормальном режиме работы сети (рисунок 4), при двухфазном (рисунок 5) и трехфазном (рисунок 6) коротком замыкании в распределительной сети, а также при однофазном замыкании на землю (рисунок 7).

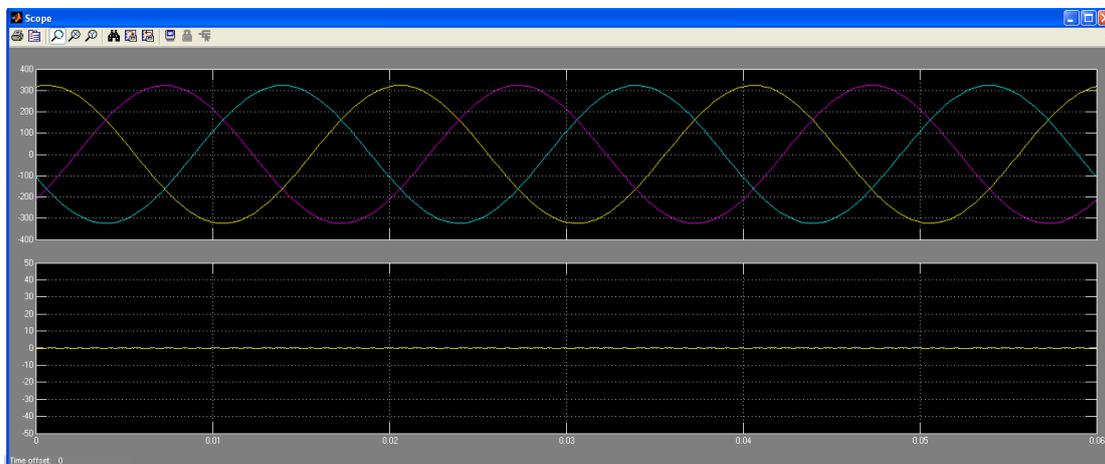


Рисунок 4 – Результаты моделирования в нормальном режиме работы сети

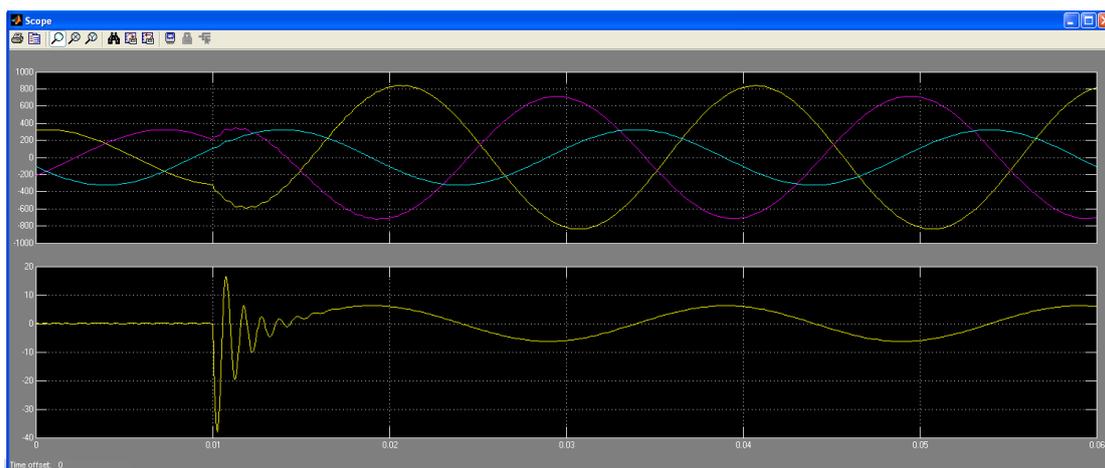


Рисунок 5 – Результаты моделирования при двухфазном КЗ между фазами *A* и *B*

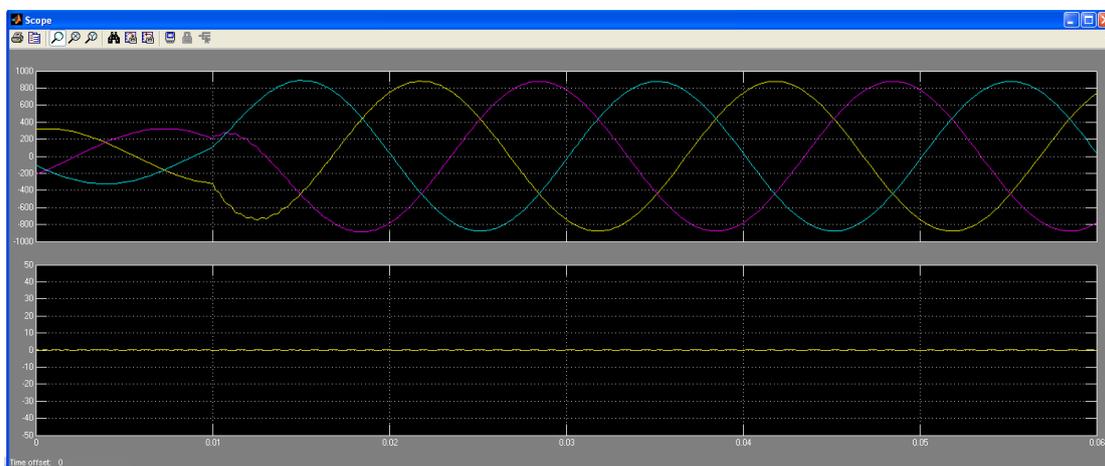


Рисунок 6 – Результаты моделирования при трехфазном КЗ

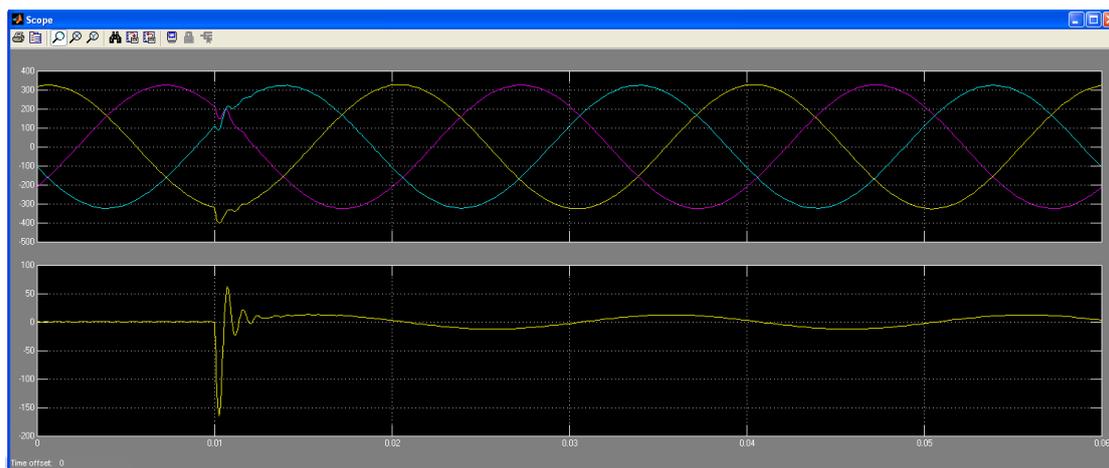


Рисунок 7 – Результаты моделирования при однофазном замыкании на землю

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В среде динамического моделирования MatLab Simulink разработана структурная модель исследования режимов работы распределительных сетей среднего напряжения, учитывающая особенности переходных процессов в силовом трансформаторе, емкость и индуктивность линии электропередачи в зависимости от сечения провода, а также иные факторы, влияющие на режим работы сети. Выполнены тестовые расчеты, позволяющие наглядно оценить протекающие процессы, как в нормальном режиме, так и аварийном. Разработанная модель может быть использована для исследования устройств релейной защиты линий сетей 6–35 кВ.

ЛИТЕРАТУРА

1. Черных, И.В. Моделирование электротехнических устройств в MatLab. SimPowerSystems и Simulink / И.В. Черных. – М. : ДМК-Пресс, 2014. – 288 с.
2. Дубкова, А.Д. Расчет параметров имитационной модели режима однофазного замыкания на землю в интерактивной среде Simulink / А.Д. Дубкова, С.Ю. Долингер // Технические науки – от теории к практике: сб. ст. по матер. LXIV междунар. науч.-практ. конф. – № 11(59). – Новосибирск : СибАК, 2016. – С. 81–86.

УДК 621.316

ИЗУЧЕНИЕ РАБОТЫ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ РЕЛЕЙНЫХ ЗАЩИТ
С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ КОМПЬЮТЕРНЫХ ПРОГРАММНЫХ КОМПЛЕКСОВ
STUDY OF THE OPERATION OF ELECTROMECHANICAL RELAY
PROTECTIONS USING COMPUTER SOFTWARE SYSTEMS

Новаш И.В., к-т техн. наук, доцент, Пузиновский В.Д., магистрант
Белорусский национальный технический университет, г. Минск, Беларусь
I. Novash, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor,
V. Puzinovsky, Masterleader
Belarusian national technical University, Minsk, Belarus

Аннотация: В работе рассмотрены вопросы создания компьютерных программных комплексов для дистанционного изучения работы и принципов действия электромеханических реле. Приведен компьютерный программный комплекс для изучения работы дифференциального реле РНТ-565.

Abstract: The paper considers the issues of creating computer software systems for remote study of the operation and principles of operation of electromechanical relays. A computer software package for studying the operation of the differential relay RNT-565 is presented.

Ключевые слова: релейная защита, электромеханическое дифференциальное реле, моделирование, компьютерные программные комплексы.

Keywords: relay protection, electromechanical differential relay, modeling, computer software systems.

ВВЕДЕНИЕ

Студенты энергетического факультета электротехнических специальностей изучают дисциплину «Релейная защита и автоматика» [1]. Выполняя лабораторные работы, студенты знакомятся с устройством и принципами действия различных типов реле и устройств автоматики. В лаборатории «Релейная защита и автоматика» кафедры «Электрические станции» представлены различные типы релейных защит, начиная от электромеханических реле и заканчивая современными микропроцессорными устройствами защиты и автоматики. Для дистанционного изучения принципа действия и работы электромеханических реле на кафедре разрабатываются на основе математического моделирования виртуальные модели релейных защит. Компьютерные программные комплексы, реализующие такие модели, позволяют выполнять лабораторные работы по изучению релейных защит на персональных компьютерах, осуществляя настройки реле в интерактивных экранных окнах, а также контролировать работу реле в ходе вычислительного эксперимента. Разработанный программный комплекс дает возможность дистанционного изучения работы дифференциального реле в составе продольной дифференциальной защиты трехфазного трансформатора при проведении учебных занятий по системе дистанционного обучения [2].

ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

На кафедре «Электрические станции» в лаборатории «Релейная защита и автоматика» студенты имеют возможность познакомиться и изучить устройство и принцип действия практически всех типов релейных защит, используемых в действующих электроэнергетических системах. На лабораторных стендах представлены различные виды электромеханических реле. Студенты при выполнении лабораторных работ вручную настраивают такие реле на соответствующие режимы защищаемого оборудования. Так при отстройке от токов небаланса в схеме продольной дифференциальной защиты трансформатора необходимо провести настройку дифференциальных реле РНТ-565 (рисунок 1).

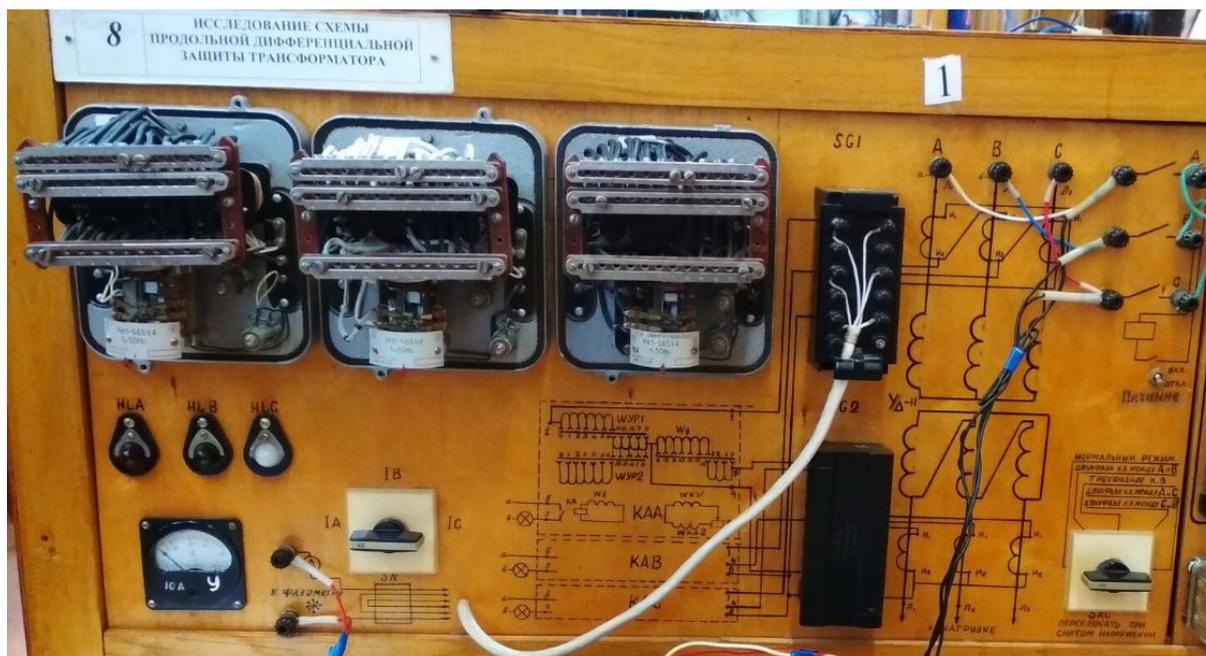


Рисунок 1 – Лабораторный стенд для исследования продольной дифференциальной защиты трансформатора

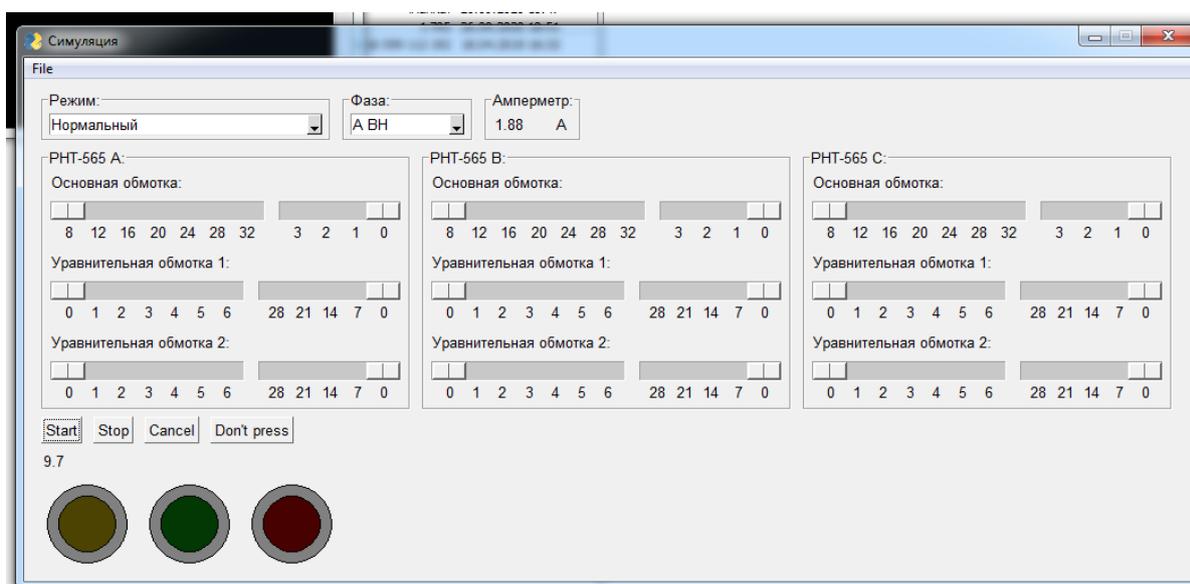


Рисунок 2 – Интерактивный экран моделей реле РНТ-565 по фазам в исходном состоянии

Для проведения данной лабораторной работы на кафедре был разработан компьютерный программный комплекс, который позволяет проводить все этапы работы на персональном компьютере. С помощью интерактивных окон, на которых представлены настроечные панели основной и уравнительных обмоток реле РНТ-565 выполняется настройка реле в каждой фазе дифференциальной защиты (рисунок 2). Срабатывание (несрабатывание) реле в каждой фазе отражается цветным индикатором внизу интерактивного экрана (рисунки 3–5).

На рисунке 2 представлено исходные состояния реле РНТ-565 по фазам. На рисунке 3 – состояния реле в каждой фазе защиты при внутреннем коротком замыкании (КЗ) двух фаз *B* и *C*. На рисунке 4 – состояния реле в каждой фазе защиты при внутреннем трехфазном КЗ. На рисунке 5 – состояния реле в каждой фазе защиты при внешнем трехфазном КЗ.

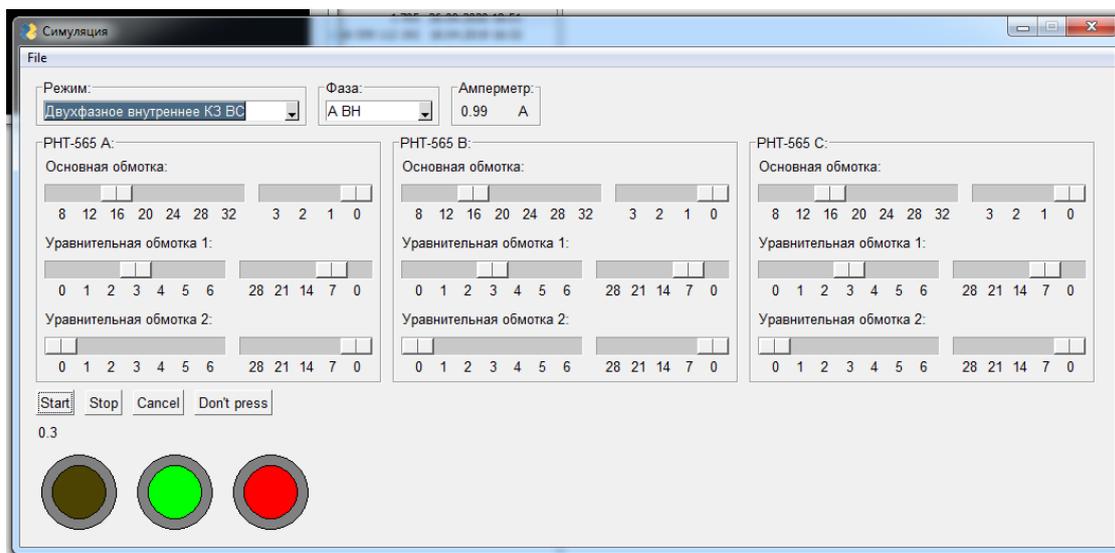


Рисунок 3 – Интерактивный экран моделей реле РНТ-565 по фазам при двухфазном внутреннем КЗ фаз *BC*

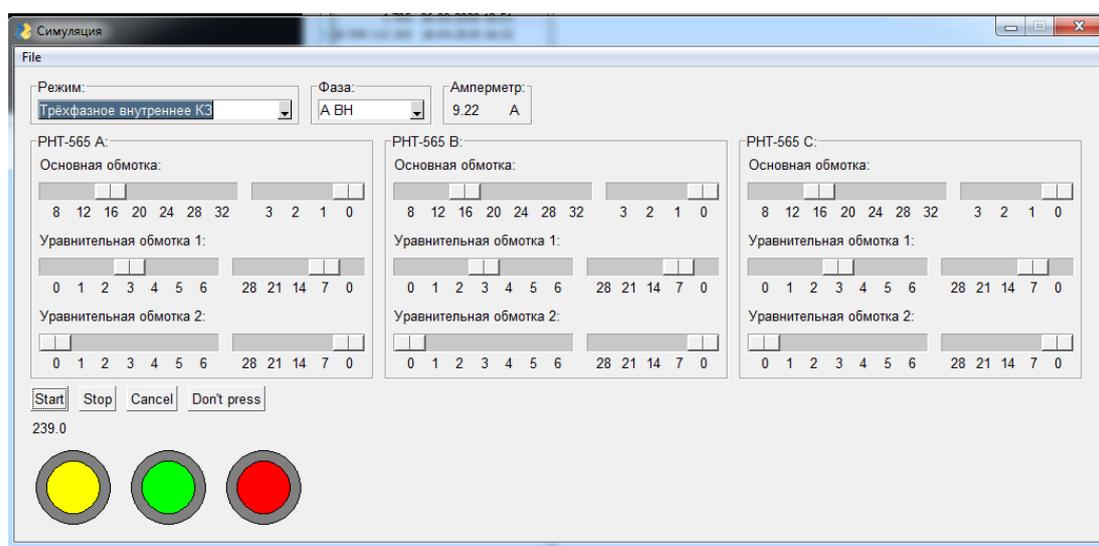


Рисунок 4 – Интерактивный экран моделей реле РНТ-565 по фазам при трехфазном внутреннем КЗ

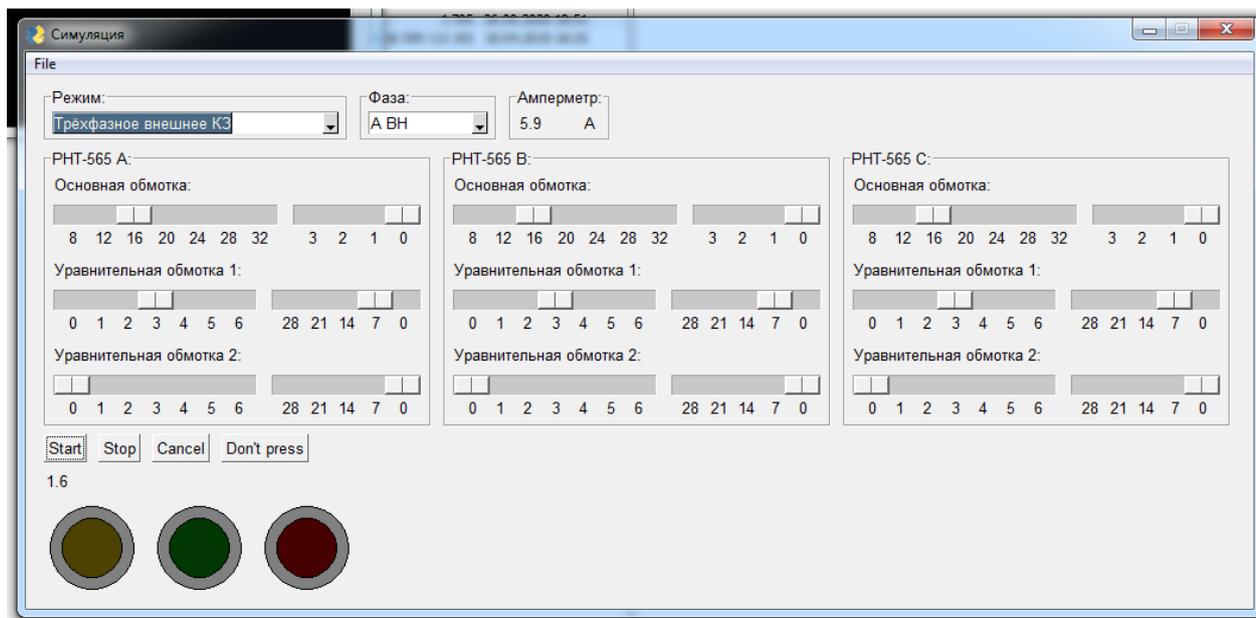


Рисунок 5 – Интерактивный экран моделей реле РНТ-565 по фазам при трехфазном внешнем КЗ

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработан учебный компьютерный программный комплекс для изучения работы продольной дифференциальной защиты трехфазного трансформатора на базе электромеханического реле РНТ-565. Программный комплекс позволяет проводить исследования работы защиты методом вычислительного эксперимента с визуальным отображением состояний реле в каждой фазе и выполнять настройки реле в каждой фазе с помощью интерактивного окна программного комплекса.

Компьютерный программный комплекс разработан на базе алгоритмического интерпретируемого языка программирования Python [3].

ЛИТЕРАТУРА

1. Федосеев, А.М. Релейная защита электроэнергетических систем : Учеб. для вузов / М.А. Федосеев. – 2-е изд., перераб. и доп. – М. : Энергоиздат, 1992. – 528 с.
2. Нудельман, Г.С. Применение технологий моделирования в развитии инновационных направлений электроэнергетики / Г.С. Нудельман, А.А. Наволочный, О.А. Онисова // Релейщик. – 2014. – № 2. – С. 16–19.
3. Лучано Рамальо. Python. К вершинам мастерства : [рус.] = Fluent Python. O'Reilly, 2015 : [пер. с англ.]. – ДМК Пресс, 2016.

Теплоэнергетика

УДК 621.438

ГЛУБОКАЯ РАЗГРУЗКА ПАРОГАЗОВЫХ УСТАНОВОК DEEP UNLOADING OF STEAM-AND-GAS POWER UNITS

Качан С.А., к-т. техн. наук, доцент

Белорусский национальный технический университет, г. Минск, Беларусь

S. Kachan, Ph.D., Associate Professor,

Belarusian national technical University, Minsk, Belarus

Аннотация. Рассматриваются возможности разгрузки парогазовых установок утилизационного типа ниже технического минимума.

Приведены значения показателей тепловой экономичности: КПД и удельного расхода условного топлива в зависимости от нагрузки.

Рассчитаны экономия (перерасходы) топлива на режимах глубокой разгрузки в сравнении с принудительной разгрузкой теплоэлектроцентралей и атомной электростанции.

Abstract. Possibilities of unloading of the steam-and-gas power units of utilization type below the technical minimum are considered.

The values of the indicators of thermal efficiency: efficiency and specific consumption of equivalent fuel, depending on the load are given. Savings (overconsumptions) of equivalent fuel are calculated for deep unloading modes in comparison with forced unloading of combined heat and power plants and nuclear power plants.

Ключевые слова: парогазовые установки, технический минимум, глубокая разгрузка, тепловая экономичность, экономия и перерасходы условного топлива.

Key words: combined cycle units, technical minimum, deep unloading, thermal efficiency, economy and excessive consumption of equivalent fuel.

ВВЕДЕНИЕ

Ввод в эксплуатацию двух энергоблоков Белорусской АЭС суммарной мощностью порядка четверти потребной выработки электроэнергии энергосистемы страны потребует перевода в полупиковую и даже пиковую зону графика нагрузок генерирующих энергоустановок, работающих на органическом топливе. В их числе – высокоэкономичные парогазовые установки (ПГУ) с трехконтурными котлами-утилизаторами и промежуточным перегревом пара.

ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

Глубина разгрузки утилизационных ПГУ ограничивается необходимостью обеспечения приемлемых показателей надежности и экономичности, а также, экологических характеристик этих установок. Компании-производители современных энергетических газотурбинных установок (ГТУ), которые являются базовым элементом ПГУ утилизационного типа, добились более низкой величины технического минимума: порядка 40...45 % номинальной мощности, чем

ГТУ прошлых поколений: около 55...70 %. Это определяет бóльшую глубину разгрузки ПГУ, достигаемую без существенного ухудшения их экологических характеристик.

Еще бóльшая разгрузка ПГУ возможна за счет специальных мероприятий по дополнительному снижению нагрузки ГТУ:

– углубление регулирования расхода воздуха с помощью поворотных лопаток входного направляющего аппарата (ВНА) компрессора;

– подогрев воздуха перед компрессором сбросом сжатого воздуха на вход компрессора или за счет использования антиобледенительной системы (АОС).

Дополнительное снижение мощности ПГУ возможно за счет разгрузки паровой турбины при помощи быстродействующих редуционно-охладительных установок (БРОУ) или ухудшения вакуума в конденсаторе.

В зависимости от температуры наружного воздуха $t_{\text{нв}}$ данные мероприятия позволяют углубить разгрузку ПГУ до 25...35 % номинальной мощности [1].

Сравним экономичность различных способов снижения нагрузки ПГУ-427 МВт Лукомльской ГРЭС, построенной на основе ГТУ типа SGT5-4000F компании Siemens. На рисунке 1 приведены показатели тепловой экономичности: КПД производства электроэнергии η_3 и удельный расход условного топлива b_3 (УРТ), в зависимости от нагрузки ПГУ-427 по данным исследований, проведенных на Лукомльской ГРЭС [2].

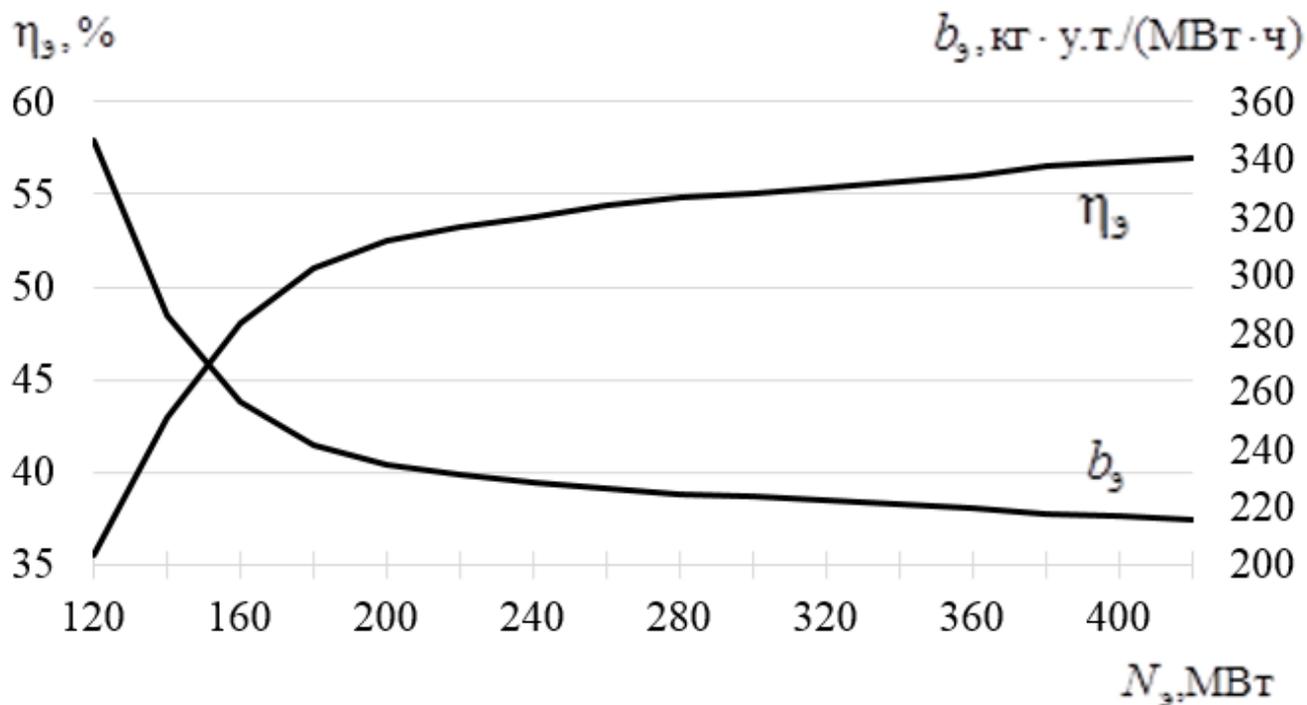


Рисунок 1 – Показатели тепловой экономичности разгрузки ПГУ-427

Как видно, разгрузка ПГУ-427 вдвое от номинальной мощности до технического минимума $N_{\text{т.м}} = 180$ МВт за счет ВНА ГТУ приводит к уменьшению КПД ПГУ примерно на 10 % с $\eta_{\text{ном}} = 57$ % до $\eta_{\text{т.м.}} = 51$ %. Разгрузка за счет АОС

позволяет снизить мощность от $N_{т.м} = 180$ МВт до $N_p = 150$ МВт на $\Delta N_p = 30$ МВт (~7 %) ценой снижения КПД с $\eta_{т.м.} = 51$ % до $\eta_p = 45$ %, то есть примерно на 10 %. При этом разгрузка на те же $\Delta N_p = 30$ МВт со 150 МВт до 120 МВт за счет разгрузки паровой турбины при помощи БРОУ приводит к более резкому снижению КПД с $\eta_p = 45$ % до $\eta_{г.р.} = 35,5$ %, то есть примерно на 20 %.

Экономию денежных затрат в сравнении с принудительной разгрузкой теплоэлектроцентрали (ТЭЦ) можно оценить по формуле:

$$\Delta Z_{ТЭЦ} = (\Delta N_p (b_{т.м.} - b_{тф}) - (N_{т.м.} - \Delta N_p) \Delta b_p) \tau_{раз} \Pi_{т.} \quad (1)$$

где $b_{тф} \approx 160$ кг у.т./(МВт·ч) – УРТ на теплофикационную выработку электроэнергии на ТЭЦ;

Δb_p – увеличение УРТ на ПГУ при ее разгрузке на величину ΔN_p ;

$\tau_{раз}$ – длительность режимов глубокой разгрузки блока ПГУ в течение года;

$\Pi_{т.}$ – цена органического топлива (в пересчете на условное).

Еще бóльшая экономия затрат обеспечивается, если в альтернативном варианте прохождения провалов графиков электрических нагрузок энергосистемы предусматривается снижение мощности атомной электростанции (АЭС):

$$\Delta Z_{АЭС} = (\Delta N_p (b_{т.м.} \Pi_{т.} - b_{АЭС} \Pi_{ят}) - (N_{т.м.} - \Delta N_p) \Delta b_p \Pi_{т.}) \tau_{пр} \quad (2)$$

где $b_{АЭС}$, $\Pi_{ят}$ – удельный расход условного топлива на АЭС;

$\Pi_{ят}$ – цена ядерного топлива (в пересчете на условное).

Результаты расчетов экономии (или перерасходов) топлива при работе энергоблока ПГУ в режиме глубокой разгрузки по (1) и (2) приведены в таблице. В расчетах принято $b_{АЭС} = 360$ кг у.т./(МВт·ч), $\Pi_{ят} = 20$ долл/т у.т., $\Pi_{т.} = 180$ долл/т у.т.

Таблица 1 – Экономия (перерасходы) топлива на режимах глубокой разгрузки ПГУ

Показатель, размерность	Глубина разгрузки блока $N_{ПГУ}$		
	180 МВт	150 МВт	120 МВт
КПД ПГУ, %	51	45	35,5
УРТ, кг у.т./(МВт·ч)	240	275	345
Увеличение УРТ, кг у.т./(МВт·ч)	25	35	70
$\Delta Z_{ТЭЦ}$, тыс. долл/год	2885	-415,5	-1380
$\Delta Z_{АЭС}$, тыс. долл/год	14877	840,1	25,7

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Как видно, разгрузка до $N_{т.м} = 180$ МВт за счет прикрытия ВНА компрессора ГТУ является более предпочтительной в сравнении с принудительной разгрузкой ТЭЦ. Разгрузка ПГУ ниже $N_{т.м} = 180$ МВт при полностью закрытом

ВНА компрессора ГТУ, и в особенности разгрузка паровой турбины при помощи БРОУ, приводит к резкому увеличению удельного расхода условного топлива на отпуск электроэнергии. Такая разгрузка может быть принята при исчерпании возможностей в энергосистеме по разгрузке остального оборудования. Тем не менее, глубокая разгрузка является предпочтительнее разгрузки АЭС.

ЛИТЕРАТУРА

1. Теплов Б.Д. Исследование регулировочного диапазона трехконтурных конденсационных ПГУ с котлами-утилизаторами и разработка методов его расширения: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. – Москва, 2017. – 20 с.

2. Протокол испытаний по определению глубины разгрузки ПГУ-427 МВт Лукомльской ГРЭС. – ОАО «Белэнергоремналадка». – Минск, 2016. – 23 с.

УДК 621.311

К ВОПРОСУ РЕГУЛИРОВАНИЯ СУТОЧНОГО ГРАФИКА ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ НАГРУЗОК ПОСЛЕ ВВОДА В ЭКСПЛУАТАЦИЮ БЕЛОРУССКОЙ АЭС
REGARDING THE ISSUE OF REGULATING THE DAILY SCHEDULE OF ELECTRIC LOADS AFTER COMMISSIONING OF THE BELARUSIAN NPP

Богдан Е.В., Карницкий Н.Б., д-р техн. наук., профессор
Белорусский национальный технический университет, г. Минск, Беларусь
E. Bohdan, N.Karnitskiy, Doctor of Technical Sciences, Professor
Belarusian national technical university, Minsk, Belarus

Аннотация. В статье проанализировано влияние ввода в эксплуатацию крупных атомных энергоблоков на суточные графики нагрузок белорусской энергосистемы в отопительный и межотопительный периоды. Указаны основные проблемы, возникающие вследствие изменения структуры генерирующих мощностей и изменении базовой части графика электрических нагрузок.

Abstract. The article analyzes the impact of commissioning of large nuclear power units on the daily load schedules of the Belarusian power system during the heating and inter-heating periods. It indicates the main problems that arise due to changes in the structure of generating capacities and changes in the basic part of the electrical load schedule.

Ключевые слова: энергосистема, суточный график электрических нагрузок, тепловые электрические станции, регулирование, атомная электростанция, покрытие пиковых нагрузок, резерв.

Keywords: power system, daily schedule of electrical loads, thermal power plants, regulation, nuclear power plant, peak load coverage, reserve.

ВЕДЕНИЕ

Установленная мощность энергосистемы Республики Беларусь на начало 2021 года составила 10 073,99 МВт [1]. Установленная мощность 67 генерирующих энергоисточников ГПО «Белэнерго» - 8 897,31 МВт, из них:

– 42 тепловых электрических станций электрической мощностью 8 800,19 МВт;

– 24 гидроэлектростанций установленной мощностью 88,11 МВт;

– Новогрудская ветроэлектрическая станция мощностью 9 МВт.

Вместе с тем, помимо электростанций, входящих в состав ГПО "Белэнерго", эксплуатируется 183 блок-станции, суммарная мощность которых составляет 1176 МВт. За последнее десятилетие в Республике Беларусь реализован ряд проектов реконструкции или установки новых генерирующих мощностей на основе парогазовых установок [2].

ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

Типовые суточные графики нагрузок в энергосистеме Беларуси в отопительный и межотопительный период в рабочий день 2019 года приведены на рисунках 1 и 2 соответственно.

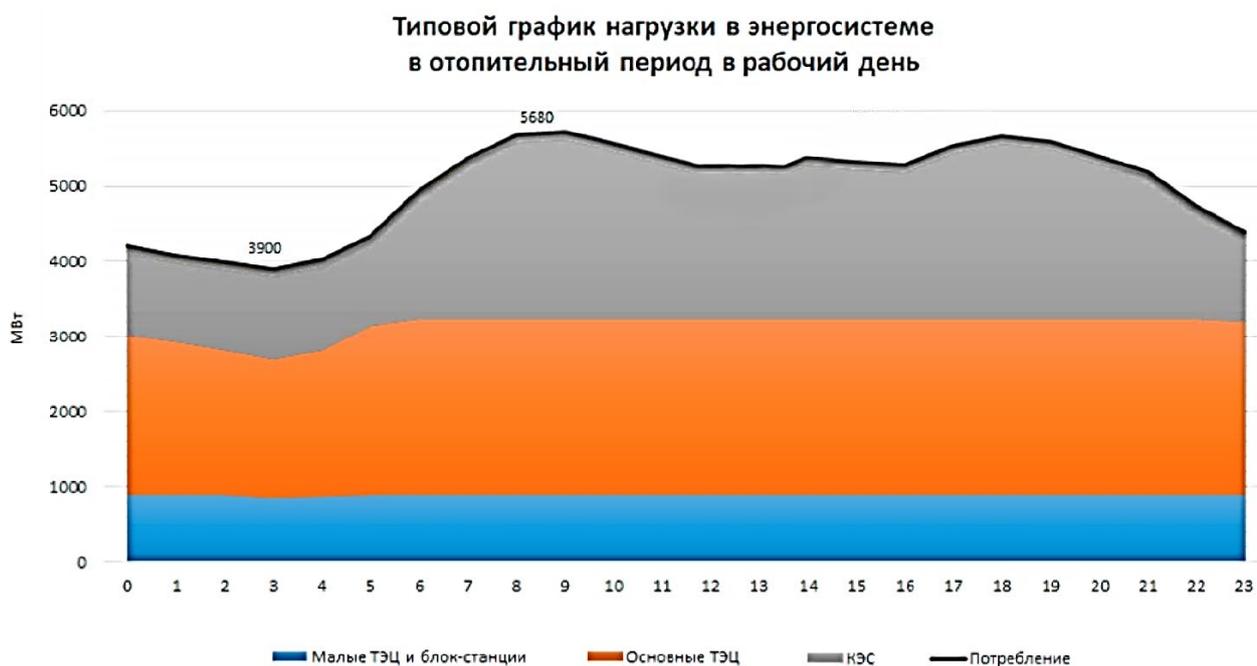


Рисунок 1 – Суточный график нагрузок (зима)

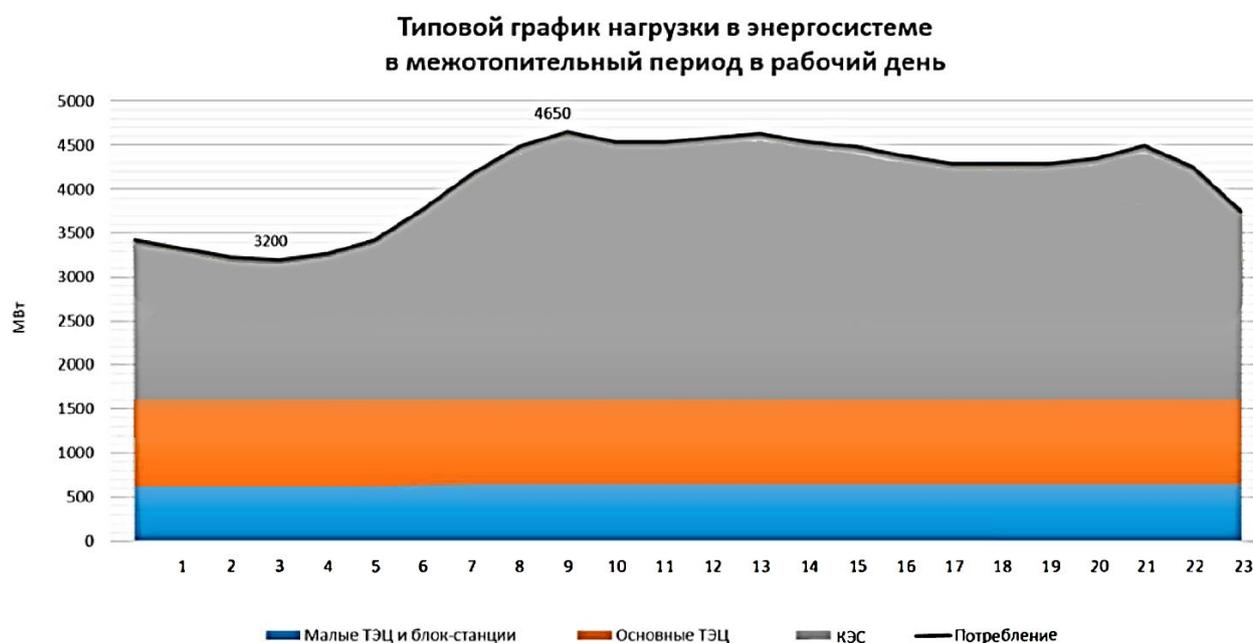


Рисунок 2 – Суточный график нагрузок (лето)

Следует отметить, что существующий суточный график позволяет задействовать самые эффективные источники – ТЭЦ, блок-станции, ПГУ – практически без ограничений (ТЭЦ задействуются без ограничений в неотапительный период и с минимальным ограничением в ночное время в отопительный период). Регулирование суточного графика обеспечивается в большей степени за счет конденсационных блоков КЭС. Резерв в размере мощности самого крупного энергоблока 427 МВт гарантированно обеспечивается за счет вращающихся мощностей недогруженных блоков в системе (горячий вращающийся первичный резерв). Таким образом, суточный график нагрузок сбалансированный, резерв – надежный.

Эффективность работы электростанций Белорусской энергосистемы определяется совокупностью показателей работы отдельного энергетического оборудования. Существенное снижение удельного расхода условного топлива на действующем оборудовании за счет проведения различных технических мероприятий не представляется возможным, поскольку технико-экономические показатели работы оборудования определены нормативными энергетическими характеристиками. Целесообразно замещать неэффективные устаревшие мощности КЭС, занимающие существенную долю в суточном графике, за счет эффективных источников энергии. Одним из ярких примеров повышения эффективности энергосистемы в целом является вывод из работы неэкономичных агрегатов Березовской ГРЭС (2 энергоблока) [3].

В соответствии с государственной программой в 2021 году вводится в промышленную эксплуатацию первый блок Белорусской АЭС мощностью 1194 МВт. БелАЭС – результат эволюционного развития наиболее распространенного и технически совершенного типа станций – АЭС с ВВЭР. Ближайший аналог – Ленинградская АЭС, строящаяся по серийному проекту [4].

Ввод АЭС первого энергоблока АЭС мощностью 1194 МВт в 2021 году и в дальнейшем второго энергоблока той же мощности - непосредственно скажется на изменении базовой части графика электрических нагрузок и ограничит ввод электрических мощностей за счет развития паротурбинных и парогазовых технологий ТЭС. Возникнет необходимость эффективного покрытия пиковой мощности и сопутствующая этому проблема рационального размещения подобных электростанций [5].

На рисунках 3, 4 приведены прогнозные суточные графики нагрузок на 2025 год с учетом ввода и выхода на проектные мощности Белорусской АЭС в отопительный и межотопительный периоды соответственно.

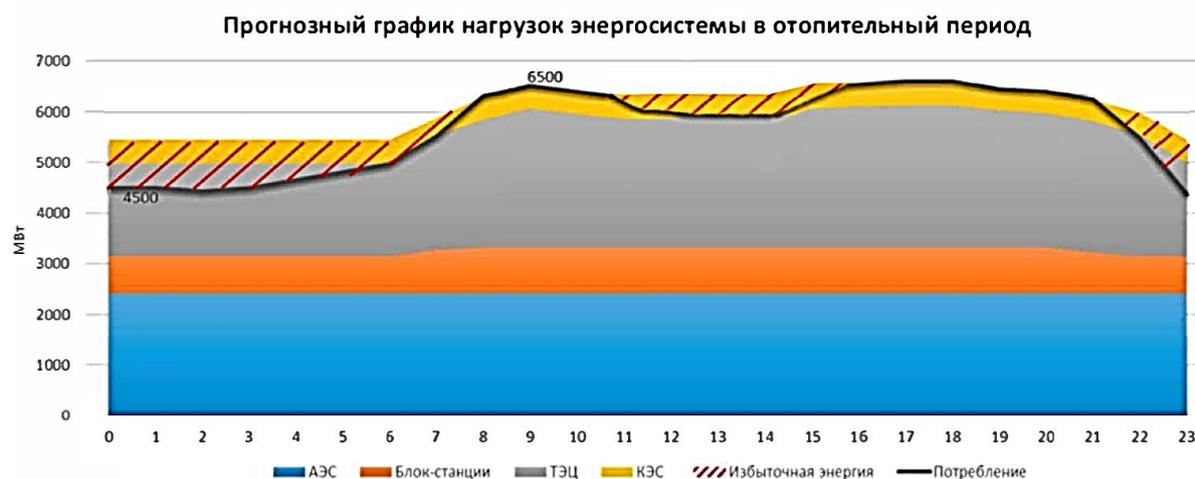


Рисунок 3 – Прогнозный суточный график нагрузок (зима)

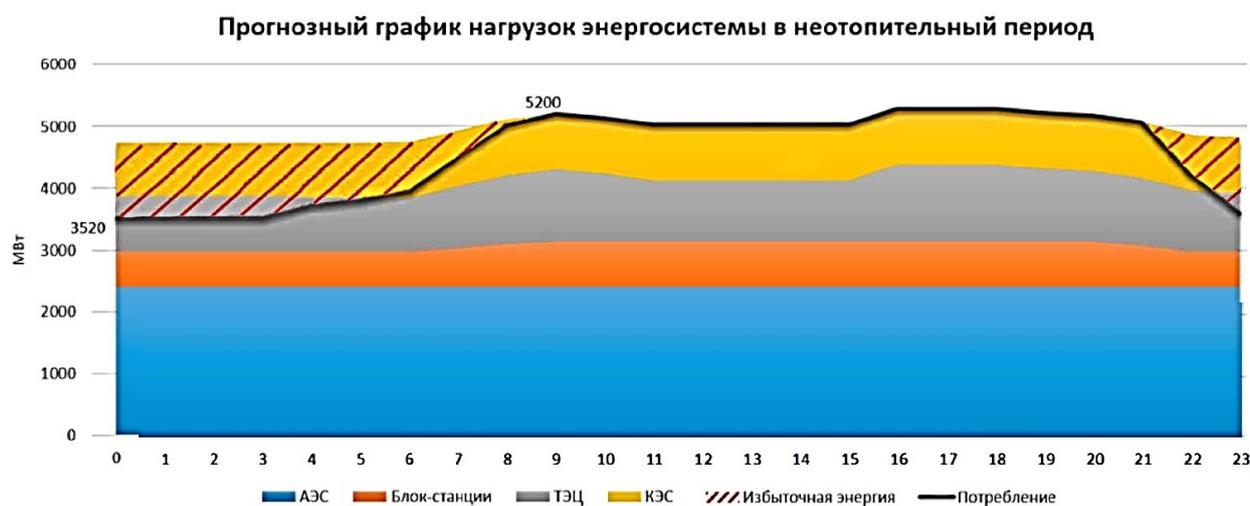


Рисунок 4 – Прогнозный суточный график нагрузок (лето)

В целях наибольшего замещения природного газа в размере около 5 млрд. кубометров в год Белорусская АЭС ориентируется на работу с полной загрузкой в базовом режиме. Со вводом ее в эксплуатацию на полную мощность в Белорусской энергосистеме сложится ситуация, когда ныне действующие традиционные КЭС и ТЭЦ, работающие на природном газе, начнут испытывать достаточно существенную недогрузку по мощности. При этом, как показывают расчеты, чисто избыточная электрическая мощность может превысить 1,5 млн. кВт.

Суточные графики построены с учетом прогнозируемого прироста максимальной нагрузки до 6500 МВт в отопительный период и до 5200 МВт в неотапливаемый. Однако, даже с учетом вышесказанного, после ввода АЭС наблюдается избыточность генерирующих активов, что приводит к нагрузке со стороны амортизации капитала на тарифы, а также задействование остальных активов рискует быть не оптимальным, что может привести к увеличению общей себестоимости в энергосистеме.

Из всей суммарной электрической мощности ТЭЦ, для которых базовый режим работы в зимний период является естественным, только половина может рассчитывать на работу в базовой части суточного графика электрической нагрузки энергосистемы, а другая половина должна быть переведена в маневренный полупиковый режим с ежесуточной разгрузкой отборов теплофикационных турбин непосредственно на котлы ТЭЦ или другие теплоисточники. Исследования, проведенные в РУП «Белнипиэнергопром», показали, что в этой ситуации для разгрузки отборов турбин наиболее эффективно в энергетическом отношении использовать электрокотлы. Образующий при этом сравнительно небольшой перерасход топлива в размере 0,4–0,8 % сопровождается получением дополнительной маневренной полупиковой мощности, спрос на которую в энергосистеме существенно возрастает. Исходя из графиков, ТЭЦ будут ограничены в отопительный и неоперительный период и замещены в части выработки тепловой энергии электрокотлами и пиковыми котлами и бойлерами.

Для остающихся в работе конденсационных энергоблоков в зимний период наиболее характерным явится пиковый режим, что потребует оценки возможности работы в подобных режимах и при необходимости соответствующей доработки их технических схем. В летний же период, когда ТЭЦ разгружаются по теплу и переводятся в стадию ремонтов, конденсационные энергоблоки частично могут загружаться и по базовому режиму. Таким образом, регулирование суточного баланса должно обеспечиваться за счет конденсационных блоков в дневное время и электрокотлов в ночное время. Суточный график не сбалансирован, требует искусственной нагрузки, предполагает пуски-остановы КЭС.

Резерв в размере мощности самого крупного блока 1200 МВт не обеспечивается за счет вращающихся мощностей недогруженных блоков в системе (горячий вращающийся резерв не обеспечен). Согласно отраслевой программе развития электроэнергетики на 2021–2025 годы запланировано строительство пиково-резервных источников суммарной мощностью до 800 МВт. ПРЭИ рискуют стать избыточным решением в условиях общей избыточности мощностей.

К настоящему времени все электростанции энергосистемы в той или иной мере принимают участие в покрытии пиковых нагрузок. Наряду с этим, ввод мощности АЭС станет причиной возникновения необходимости поиска других эффективных способов покрытия пиковых нагрузок. Для энергосистемы Беларуси с интегрированной АЭС в качестве пиковых источников наиболее рационально применять ГТУ, и в некоторых случаях ПГУ, когда нужно быстро набрать/сбросить нагрузку. К примеру, пуск из холодного состояния ПГУ мощностью 170 МВт на Минской ТЭЦ-3 занимает 12–15 минут. Высокоманевренные свойства газовых турбин обуславливают их использование для покрытия остропиковой и полупиковой частей графиков нагрузки.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Ввод АЭС в эксплуатацию приведет к существенному ухудшению показателей работы действующих электростанций, однако это является определенной платой за достигаемое при этом сокращение расхода природного газа и повышение энергетической безопасности. Облегчить положение может

более высокий прирост электрической нагрузки, по сравнению с тем, что учитывался в прогнозных расчетах в размере, не превышающем 1 % в год, за счет более интенсивного развития электрификации, установление внешних электроэнергетических связей с выдачей электроэнергии в соседние страны, и в некоторой степени систематически проводимая оптимизация загрузки всех электрогенерирующих установок.

ЛИТЕРАТУРА

1. Государственное производственное объединение электроэнергетики «Белэнерго» [Электронный ресурс] / «Белэнерго». – Минск, 2021. – Режим доступа: <http://belenergo.by/>. – Дата доступа: 29.03.2021.

2. Богдан, Е.В. Парогазовые установки. Внедрение в Белорусскую энергосистему/ Е.В. Богдан, Н.Б. Карницкий // Электроэнергетика глазами молодежи: труды VI международной молодежной научно-технической конференции. 9–13 ноября 2015, Иваново. – В 2 т. Т. 2. – Иваново: ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», 2015. – С. 299–300.

3. Савчук Е.Л. Состояние энергосистемы Республики Беларусь и краткая оценка ее эффективности // Энергоэффективность. – 2013. – № 6. – С. 14–15.

4. Богдан, Е.В. Особенности инновационного проекта Белорусской АЭС / Е.В. Богдан, Н.Б. Карницкий // Одиннадцатая международная научно-техническая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Энергия-2016»: материалы конференции. 5–7 апреля 2016, Иваново. – В 6 т. Т. 1. – Иваново: ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», 2016. – С. 7–9.

5. Богдан, Е.В. Изменение условий эксплуатации станций при вводе Белорусской АЭС / Е.В. Богдан, Н.Б. Карницкий // Десятая международная научно-техническая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Энергия-2015»: материалы конференции. 21–23 апреля 2015, Иваново. – В 7 т. Т. 1. – Иваново: ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», 2015. – С. 24–25.

УДК 621:622

ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ ЭЛЕКТРОГИДРОУДАРНОЙ
УСТАНОВКИ, ДЛЯ ДИСПЕРГИРОВАНИЯ БУРОГО УГЛЯ,
В ПРОЦЕССЕ ПРОИЗВОДСТВА ВОДОУГОЛЬНОГО ТОПЛИВА
PROSPECTS FOR THE USE OF AN ELECTROHYDROIMPACT PLANT FOR
DISPERSING BROWN COAL IN THE PRODUCTION OF WATER-COAL FUEL

Францкевич Н.В., ст. преподаватель, Францкевич А.В., ст. научный сотрудник
Белорусский национальный технический университет, г. Минск, Беларусь,
Юницкий А.Э., генеральный конструктор, Арнаут С.А. начальник
конструкторского бюро

ЗАО «Струнные технологии» г. Минск, Беларусь

Frantskevich N., Senior Lecturer, Frantskevich A., Senior Researcher

Belarusian National Technical University, Minsk, Belarus,

Yunitskiy A, General Designer, Arnaut S. Head of the design bureau of SkyWay
Technologies Co., Minsk, Belarus

Аннотация. В работе кратко рассмотрены основные причины, приводящие к необходимости разработки технологий топливо подготовки, позволяющих при сжигании углей, уменьшить экологический ущерб. Одна из возможных технологий, использование водоугольного топлива. Ключевой компонент данного вида топлива – мелкодисперсный уголь. Рассмотрена возможность применения для диспергирования угля, электрогидроударной установки, с энергией в импульсе 150 Дж.

Abstract. The paper briefly discusses the main reasons leading to the need to develop technologies for fuel preparation, allowing, when burning coal, to reduce environmental damage. One of the possible technologies is the use of coal-water fuel. The key component of this type of fuel is fine coal. The possibility of using an electrohydroimpact plant with an energy in a pulse of 150 J.

Ключевые слова: электрогидроударная установка, диспергирование угля, водоугольное топливо.

Key words: electrohydro-hammer unit, coal dispersion, water-coal fuel.

ВВЕДЕНИЕ

В последние десятилетия, несмотря на значительные успехи в развитии альтернативных или «зеленых» методов получения энергии, такой традиционный способ получения тепла и энергии, как сжигание газа, мазута, угля, не сдает своих позиций, и изменение ситуации не прогнозируется в ближайшей перспективе [1]. При сжигании указанных выше энергоносителей, всегда происходит отрицательное воздействие на экологию, которое наиболее сильно проявляется при сжигании углей [2, 3]. В связи с этим, на сегодняшний день, доля энергии полученной от сжигания угля, значительно меньше, чем доля энергии, полученная от сжигания газа и мазута [1]. И это при том, что

разведанные запасы угля (бурый уголь порядка 50 %) значительно превосходят разведанные совокупные запасы нефти и газа [1].

Основные отрицательные моменты, существующие при сжигании углей, следующие [2, 3]:

- Выбросы CO₂.
- Выбросы серы и закиси азота
- Выбросы твердых частиц (сажи), образующихся при неполном сгорании топлива

– Из-за высокой зольности бурого угля, образование значительного количества шлакоотвалов, использование которых в экономике зачастую проблематично

Поскольку бурый уголь является практически самым дешевым топливом [4], есть, что называется «экономический резерв», для решения экологических проблем возникающих при его сжигании, и достижения уровня воздействия на окружающую среду, не превышающую таковых значений, например, при сжигании газа.

В значительной степени решить некоторые из экологических проблем, возможно путем предварительной топливоподготовки, в частности - изготовления водо-угольного топлива (ВУТ).

Преимущества сжигания ВУТ следующие:

- в несколько раз снижаются выбросы закиси азота, серы [2, 3];
- достигается выгорания 99,5 % углерода, против 70 %, достижимых при сгорании кускового угля [2, 3];
- практически на треть снижается количество золы;
- позволяет задействовать в энергетике мелкодисперсный уголь, который в большинстве случаев идет в отвалы, и значительно ухудшает экологию в местах добычи, из-за своей летучести.

ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

Основной компонентой ВУТ, является мелкодисперсный уголь. Для получения возможности снижения температуры горения, и соответственно снижения выбросов закиси азота, но при этом обеспечения выгорания практически всего углерода, достаточно измельчить уголь до фракций менее 250 мкм. [7]. Применение более мелких фракций угля в ВУТ, определяется необходимостью обеспечения реологических параметров топлива [9, 10]. Измельчение угля может осуществляться сухим и мокрым способом. С точки зрения безопасности производства, а так же минимизации технологических операций, более предпочтительным способом является мокрое измельчение угля. Осуществление данной технологической операции возможно с применением, например, шаровых мельниц [10], гидроударных установок [9], электрогидроударных установок [5, 6].

Работа электрогидроударной установки, основана на возможности прямого преобразование электрической энергии, запасенной в конденсаторах, в механическое воздействие на водоугольную пульпу, при прохождении через суспензию электрогидроимпульса.

В отличие от значительного количества работ, где представлены результаты по диспергированию угля, с использованием электрогидроударной установок, с энергией в импульсе порядка 1 кДж [5, 6], в данной работе, экспериментально проверялись возможности электрогидроударной установки, при проведении диспергирования угля, с значительно меньшей энергией в импульсе, порядка 100–150 Дж.

В данной работе, при разработке и изготовлении лабораторной электрогидравлической установки, в качестве прототипа использовалась установка, представленная в работе [8].

Основными составными частями установки являются: блок питания, пульт управления, генератор импульсных токов, реактор.

Некоторые технические характеристики установки:

Питающее напряжение, В	230;
Рабочее напряжение, не более, кВ	50;
Энергия в импульсе, не более, Дж	150;
Потребляемая электрическая мощность, не более, Вт	1000;
Частота следования импульсов, Гц	1–1.2.

На данной установке, была проделана серия обработок водоугольной пульпы бурого угля, при различных соотношениях между загруженными в реактор количествами угля и воды, и выставленным межэлектродным зазором. Главная цель этих экспериментов – определение достижимой степени диспергирования угля, и распределения частиц по фракциям. В случае использования в первоначальной загрузке оптимального соотношения между углем и водой (1:2), а также оптимального межэлектродного зазора (35–45 мм), можно получить диспергирование угля до фракций 63–250 мкм, с количеством данных фракций не менее 80 %, от первоначального количества угля. При загрузке 2–3 кг. угля, время обработки, при котором достигались указанные выше значения, составляло не более 15 минут, или порядка 900 импульсов. Увеличение времени обработки, вплоть до одного часа, не приводило к существенному изменению, соотношения между фракциями.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе проведенных исследований по изучению возможностей электрогидроударной установки по диспергированию бурого угля, с энергией в импульсе 100–150 Дж, было установлено:

– Преимущественный размер фракций, получаемых при диспергировании бурого угля, составляющих не менее 80 % от его исходной загрузки, лежит в диапазоне 60–250 мкм.

– Значительное увеличение времени диспергирования (в 4 раза), приводит к увеличению количества более мелких фракций (60–125 мкм) не более чем на 50 %. При этом, количество фракций свыше 250 мкм и менее 60 мкм практически не меняется.

– Увеличение количества угля, загружаемых в реактор, ведет к практически прямо пропорциональному увеличению количества импульсов, требуемых для его диспергирования.

Полученные результаты, свидетельствуют, о возможности применения электрогидроударной установки, с низкой энергией в импульсе (150 Дж), но высоким напряжением (50 кВ), на накопительной конденсаторной батарее, для диспергирования угля, с целью получения в дальнейшем ВУТ.

ЛИТЕРАТУРА

1. World Energy Outlook 2020. International Energy Agency. – 2020. – С. 464.
2. ИТС 37-2017. – Информационно технический справочник по наилучшим доступным технологиям. – М: Бюро НДТ, 2017. – С. 294.
3. Проект ЕЭК ООН. Аналитический обзор экологически чистые угольные технологии / Г.С. Асланян. – М: Центр энергетической политики, 2004. – С. 66.
4. Потенциальная роль бурого угля в энергетическом балансе страны. / Б.Е. Собко, А.А. Шустов, А.П. Белов. – Днепр, 2018 г. С. 42.
5. Дубровский, В.А. Исследование получения водоугольного топлива из бурых углей электрогидравлическим способом / В.А. Дубровский, Ю.В. Исаков, И.И. Потапов, М.Ю. Потылицын, В.Н. Широков // Горение твердого топлива : доклады VIII Всероссийская конференция с международным участием / Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе. Новосибирск: Изд-во Института теплофизики СО РАН, 2012 – 115.
6. Ризун, А.Р. Электроразрядная технология - перспективный путь создания водоугольного топлива / А.Р. Ризун, Ю.В. Голень, Т.Д. Денисюк, И.Р. Ризун. // Научные труды: научно-методический журнал. – Вып. 151, Т. 163. Сер. Техногенная безопасность. – Николаев. Изд-во ЧГУ им. Петра Могилы. – С. 20–23.
7. Долинский, А.А., Водоугольное топливо: перспективы использования в теплоэнергетике и жилищно-коммунальном секторе / А.А. Долинский, А.А. Халатов // Промышленная теплотехника : Международный научно-прикладной журнал / Институт технической теплофизики НАН Украины. – Киев: 2007. – Т. 29, № 5. – С. 70–79.
8. Юткин, Л.А. Электрогидравлический эффект и его применение в промышленности / Л.А. Юткин. – Л: Машиностроение, Ленингр. отд-ние, 1986. – 253 с.
9. Морозов, А.Г. Гидроударные технологии для получения водоугольного топлива / А.Г. Морозов, Н.В. Коренюгина // Новости теплоснабжения. – 2010. – № 7 (119) – С. 18–21.
10. Баранова, М.П., Кулагин, В.А., Лебедев, С.В. Исследование водоугольного топлива из бурых углей / М.П. Баранова, В.А. Кулагин, С.В. Лебедев // Новости теплоснабжения. – 2010. – N 7(119). – С. 25–27.

УДК 621.311.1

ВОЗНИКНОВЕНИЕ ГИДРАВЛИЧЕСКОГО УДАРА В СИСТЕМАХ
ТЕПЛОСНАБЖЕНИЯ ПРИ ЗАКРЫТИИ ЗАДВИЖКИ
OCCURRENCE OF HYDRAULIC SHOCK IN HEAT SUPPLY SYSTEMS
WHEN THE VALVE IS CLOSED

Ракевич С.И., Назаров В.И., к-т техн. наук., доцент
Белорусский национальный технический университет, г. Минск, Беларусь
S.Rakevich, V.Nazarov, Candidate of Technical Sciences, Docent
Belarusian national technical university, Minsk, Belarus

Аннотация. В данной статье рассмотрено возникновение гидравлического удара в системах теплоснабжения при закрытии задвижки, приведены выражения Н.Е. Жуковского для определения изменения напора в сети, приведены результаты расчета роста напора в сети при гидравлическом ударе, от закрытия задвижки.

Abstract. This article discusses the occurrence of hydraulic shock in the heat supply systems when the valve is closed, the expressions of N.E. Zhukovsky for determining the change in pressure in the network are given, the results of calculating the increase in pressure in the network during hydraulic shock, from the closing of the engine are given.

Ключевые слова: гидравлический удар, фаза гидравлического удара, скачек давления, ударная волна, система теплоснабжения, трубопроводы.

Keywords: hydraulic shock, hydraulic shock phase, pressure jump, shock wave, heat supply system, pipelines.

ВВЕДЕНИЕ

Гидравлические удары в водяных системах теплоснабжения могут быть вызваны неправильной работой или отказом оборудования, что приводит к быстрому изменению скорости движения и сопровождаются скачком давления в системе трубопроводов.

ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

Причинами неправильной работы системы теплоснабжения могут быть: пуск насосов с неправильно собранной тепловой схемой, ошибочные действия персонала при маневрировании запорно-регулирующей арматурой, снижение статического давления ниже расчетного, отключение питания насосной станции с последующим ее самозапуском или включение резервных насосов с большим запаздыванием по времени.

Мероприятия, ограничивающие это повышение давления, принимаются на основании расчетов гидравлического удара с учетом условий работы системы теплоснабжения.

Согласно теории, разработанной Н.Е. Жуковского, изменения напора зависит от изменения скорости движения воды в напорном трубопроводе и выражается формулой [1]:

$$P_z = P_0 + \frac{\rho a (v_0 - v)}{g}, \quad (1)$$

где P_z – давление жидкости в трубопроводе при гидроударе, МПа;

P_0 – давление жидкости в трубопроводе до гидроудара, МПа;

a – скорость волны давления в трубопроводе, м/с;

ρ – средняя плотность жидкости, кг/м³;

$(v_0 - v)$ – падение скорости потока жидкости в момент гидроудара, м/с.

Скорость звука при отсутствии торцевого закрепления трубы определяется по формуле:

$$a = \sqrt{\frac{E_{жс}}{\rho \left(1 + \frac{C \cdot D \cdot E_{жс}}{\delta \cdot E_m} \right)}}, \quad (2)$$

где, $E_{жс}$ – модуль упругости среды, МПа;

ρ – плотность жидкости, кг/м³;

C – коэффициент учитывающий способ крепления труб в продольном направлении, для труб имеющих компенсационные устройства принимается $C = 1$;

D – диаметр трубопровода, м;

δ – толщина стенки трубы, м;

E_m – модуль упругости материала из которого изготовлены трубы, МПа.

При изменении проходного сечения задвижки или режима работы насосной установки возникают волны скоростей движения и изменения давления сетевой воды в трубопроводах систем теплоснабжения. Такие волны называются прямыми. При подходе прямых волн к местам разрыва сплошности потока возникает отражение этих волн, которые распространяются в обратном направлении движению прямых волн и достигают того места, где возникло возмущение – задвижки или насоса.

Время, в течение которого волна скачка давления возвратится к источнику возмещения, называется фазой удара:

$$t_\phi = \frac{2 \cdot l}{a} \quad (3)$$

В магистральных системах теплоснабжения в основном происходят непрямые гидравлические удары, когда отраженная волна успевает подойти к затвору до момента его полного закрытия, т. е.:

$$t_\phi < T$$

Время закрытия электропривода запорной арматуры зависит от вида арматуры и его диаметра, и рабочего проходного сечения.

При закрытии затвора, вследствие дополнительного сопротивления, его скорости течения воды в трубопроводе уменьшаются. Благодаря изменениям скоростей течения перед затвором возникают прямые волны повышения давления, распространяющиеся против течения вдоль трубопровода со скоростью a . При подходе прямых волн к местам изменения сплошности потока возникают отраженные обратные волны, которые с той же скоростью a распространяются от резервуара к затвору. Если сосредоточить все гидравлические сопротивления трубопровода в условной диафрагме, установленной перед затвором, то средняя скорость v при данной степени открытия затвора и увеличении напора на ΔP от гидравлического удара выразится так:

$$P_0 + \Delta P = (\xi_0 + \xi_s) \frac{v^2}{2g}, \quad (4)$$

где ξ_0 – безразмерный коэффициент сопротивления системы без учета регулирующего затвора;

ξ_s – коэффициент сопротивления затвора при данной степени его открытия.

В течение первой фазы гидроудара нарастание напора будет следовать закону Жуковского. Если к концу первой фазы затвор не успеет закрыться, то отраженная волна понижения давления достигнет затвора раньше, чем произойдет полное повышение напора. Обратная волна понижения давления, подойдя к затвору, уменьшит скорость течения в трубопроводе перед затвором и давление прямой волны: эта новая прямая волна, в свою очередь, будет распространяться по трубопроводу и вновь вызовет отраженную обратную волну. Вследствие этого, изменение напора в сечении у затвора в течение второй и всех последующих k -х фаз будет определяться взаимодействием прямых и обратных волн по формуле [2]:

$$\Delta P_k = 2P_0 \left\{ \left[\rho - \frac{1}{P_0} \sum_{i=1}^{k-1} \Delta P_i + \left(\rho \frac{\varphi_k}{\varphi_0} \right)^2 \right] - \rho \frac{\varphi_k}{\varphi_0} \sqrt{1 + 2 \left(\rho - \frac{1}{P_0} \sum_{i=1}^{k-1} \Delta P_i \right) + \left(\rho \frac{\varphi_k}{\varphi_0} \right)^2} \right\}, \quad (5)$$

где φ_0 – коэффициент скорости в начальный момент времени определяется из выражения

$$\varphi_0 = \frac{1}{\sqrt{\xi_0 + \xi_s}} \quad (6)$$

Зависимость изменения нарастания давления по фазам при закрытии задвижки, рассчитанная по формуле 5, приведена на рисунке 1. Примем длину участка тепловой сети равной 2000 м, скорость звука равной составляет 1000 м/с, давление сетевой воды в месте возникновения возмущения – 0,85 МПа. До

степени закрытия затвора равной $h / d = 0,65$, при котором сопротивление затвора составляет примерно 8 % от начального сопротивления трубопровода, повышение напора считаем как для первой фазы. При этом закрытие задвижки до 0,65 происходит за 52 с.

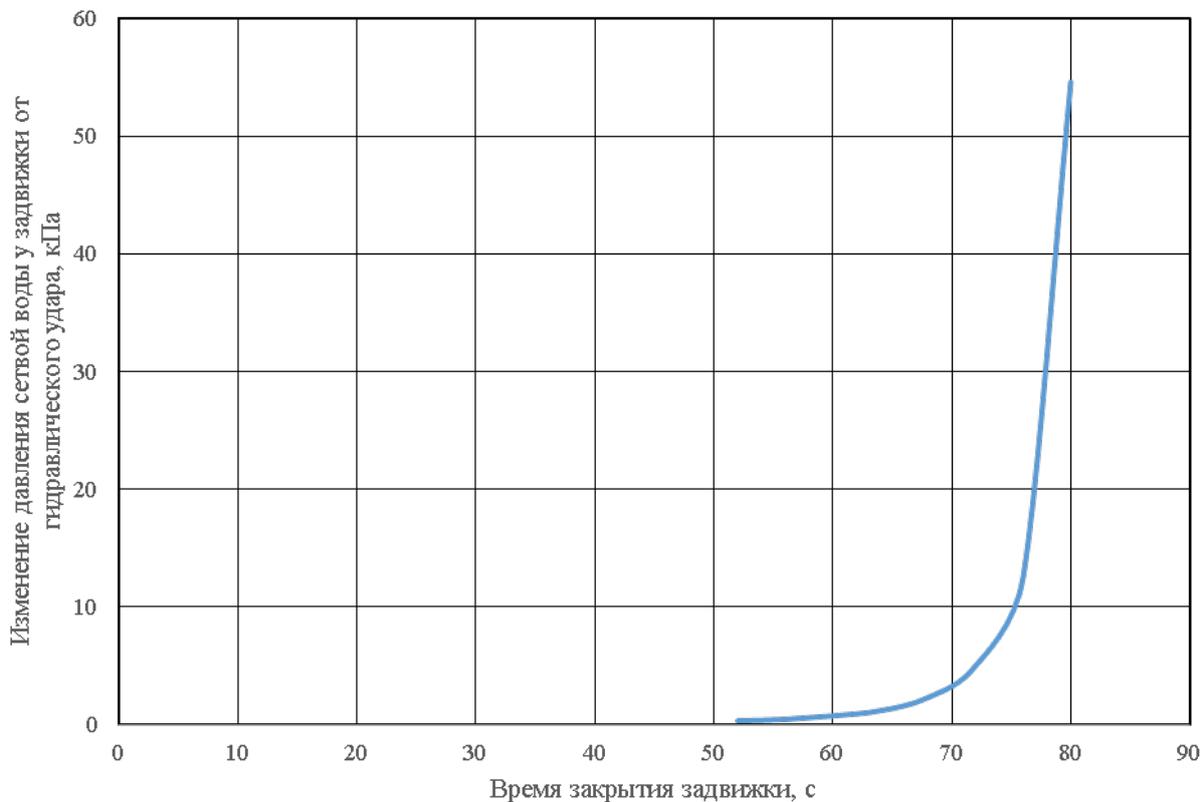


Рисунок 1 – Изменения давления сетевой воды у задвижки от времени закрытия задвижки при гидравлическом ударе

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Из рисунка видно, что понижение давления через фазу после закрытия задвижки, по формуле (5) составит 55 кПа и не превышает расчетного максимально допустимого давление в тепловой сети.

ЛИТЕРАТУРА

1. Указания по защите водоводов от гидравлического удара. / Жуковский Н.Е. О гидравлическом ударе в водопроводных трубах / Н.Е. Жуковский. – М: ГИТТЛ, 1949. – 117 с.
2. Курганов, А.М. Гидравлические расчеты сетей водоснабжения и водоотведения: Справочник / Под общ. ред. А.М. Курганова 3-е изд., перераб. и доп. – Л.: Стройиздат. Ленингр. отд-ние, 1986. – 440 с.: ил.