

**МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**

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

ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНАЯ ЭЛЕКТРОТЕХНИКА

№ 4

Нижний Новгород 2021

УДК 621.3
ББК 31.2

Интеллектуальная электротехника / НГТУ им. Р.Е. Алексеева. – Нижний Новгород, 2021. № 4 (16). – 120 с.

Выходит 4 раза в год

Главный редактор
д.т.н., проф. А.Б. Лоскутов

зам. гл. редактора

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

отв. секретарь

Андрей Владимирович Шалухо канд. техн. наук

выпускающий редактор

Иван Алексеевич Липужин канд. техн. наук

ЧЛЕНЫ РЕДКОЛЛЕГИИ:

Геннадий Яковлевич Вагин	д-р техн. наук, профессор
Николай Иванович Воропай	член-корр. РАН, д-р техн. наук, профессор
Леонид Абрамович Герман	д-р техн. наук, профессор
Валерий Геннадьевич Гольдштейн	д-р техн. наук, профессор
Игорь Васильевич Гуляев	д-р техн. наук, профессор
Павел Владимирович Илюшин	д-р техн. наук
Анатолий Викторович Кузнецов	д-р техн. наук, профессор
Александр Леонидович Куликов	д-р техн. наук, профессор
Виктор Николаевич Мещеряков	д-р техн. наук, профессор
Георгий Борисович Онищенко	д-р техн. наук, профессор
Александр Сергеевич Плехов	канд. техн. наук, доцент
Александр Юрьевич Смирнов	д-р техн. наук, доцент
Vitezslav Styskala	Dr. Ing., Ph. D., профессор (Чехия)
Владимир Георгиевич Титов	д-р техн. наук, профессор
Олег Станиславович Хватов	д-р техн. наук, профессор
Юрий Иванович Хохлов	д-р техн. наук, профессор
Александр Иванович Чивенков	д-р техн. наук, профессор
Roustiam Chakirov	Dr. Ing., Prof. Dr., профессор (Германия)

Учредитель:

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

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

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

*Свидетельство о регистрации
периодического печатного издания
ПИ № ФС77-81688 от 06 августа 2021 г.*

ISSN 2658-6754

УДК 621.3

© Нижегородский государственный технический
университет им. Р.Е. Алексеева, 2021

СОДЕРЖАНИЕ

ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ КОМПЛЕКСЫ И СИСТЕМЫ.....	4
Куликов А.Л., Лоскутов А.А., Лоскутов А.Б. Метод автоматизированного синтеза логической части для повышения чувствительности устройств релейной защиты.....	4
Олейников А.М., Канов Л.Н. Математическое моделирование режимов работы волновой электростанции.....	17
Меньшов Е.Н. Представление вектора Пойтинга через электрические характеристики электротехнических систем.....	36
Бедретдинов Р.Ш. Экономическая оценка эффективности применения гибридного энергетического комплекса на основе водорода.....	47
Муртазин Т.Э., Титов В.Г., Мотина О.А. Векторное управление гребным асинхронным электроприводом.....	59
Бабенко В.В., Крысанов В.Н. Блок коммутации конденсаторов, повышающий эффективность установок компенсации реактивной мощности.....	68
Ахметшин Р.С., Анчугова А.Ф. Адресная сигнализация прогнозирования остаточной деформации перегруженного элемента электротехнического силового агрегата.....	81
Гридин В.М. Четырехфазный вентильный двигатель переменного тока.....	90
СИЛОВАЯ ЭЛЕКТРОНИКА	101
Хлыбов А.А., Кабалдин Ю.Г., Желонкин М.В., Аносов М.С., Ша-тагин Д.А., Рябов Д.А. Разработка автоматизированной измерительной системы неразрушающего контроля для измерения параметров упругих волн в металлических материалах.....	101
ХРОНИКА.....	115
О 100-летию оперативно-диспетчерского управления в отечественной электроэнергетике.....	115

ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ КОМПЛЕКСЫ И СИСТЕМЫ

УДК 621.316.925.1

DOI 10.46960/2658-6754_2021_4_04

**МЕТОД АВТОМАТИЗИРОВАННОГО СИНТЕЗА
ЛОГИЧЕСКОЙ ЧАСТИ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ
ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ УСТРОЙСТВ
РЕЛЕЙНОЙ ЗАЩИТЫ****А.Л. Куликов**

Нижегородский государственный технический университет им. П.Е. Алексеева
Нижегород, Россия
ORCID: 0000-0003-1092-7136 e-mail: inventor61@mail.ru

А.А. Лоскутов

Нижегородский государственный технический университет им. П.Е. Алексеева
Нижегород, Россия
ORCID: 0000-0003-2228-596X e-mail: loskutov.nnov@gmail.com

А.Б. Лоскутов

Нижегородский государственный технический университет им. П.Е. Алексеева
Нижегород, Россия
ORCID: 0000-0003-1961-1728 e-mail: loskutovab@mail.ru

Представлена актуальная задача разработки новых методов цифровой релейной защиты, обладающих высокими показателями технического совершенства и полностью соответствующих требованиям стандарта МЭК 61850. Предлагается метод организации логической части многопараметрической релейной защиты, улучшающий ее чувствительность. Метод основан на критерии минимизации среднего риска принятия решения и решении задачи абстрактного синтеза теории автоматов. Рассмотрено применение предлагаемого метода на примере многомерной релейной защиты с пятью пусковыми органами и реализацией имитационного моделирования в программном комплексе *Matlab/Simulink*.

Ключевые слова: аварийные режимы, бинарные сигналы, короткое замыкание, критерий Байеса, логическая часть, моделирование, пусковой орган, релейная защита, синтез, чувствительность.

Для цитирования: Куликов А.Л., Лоскутов А.А., Лоскутов А.Б. Метод автоматизированного синтеза логической части для повышения чувствительности устройств релейной защиты // Интеллектуальная электротехника. 2021. № 4. С. 4-16. DOI: 10.46960/2658-6754_2021_4_04

THE METHOD OF AUTOMATED SYNTHESIS OF LOGICAL PART TO INCREASE THE SENSITIVITY OF RELAY PROTECTION DEVICES

A.L. Kulikov

Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev
Nizhny Novgorod, Russia
ORCID: 0000-0003-1092-7136 e-mail: inventor61@mail.ru

A.A. Loskutov

Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev
Nizhny Novgorod, Russia
ORCID: 0000-0003-2228-596X e-mail: loskutov.nnov@gmail.com

A.B. Loskutov

Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev
Nizhny Novgorod, Russia
ORCID: 0000-0003-1961-1728 e-mail: loskutovab@mail.ru

Abstract. The task of developing new methods of digital relay protection, which have high indicators of technical perfection and fully comply with the requirements of IEC 61850, is urgent. A method of organizing the logical part of multiparameter relay protection, improving its sensitivity, is proposed. The method is based on the criteria of minimizing the average risk of decision-making and solving the problem of abstract synthesis of automata theory. The application of the proposed method on the example of multidimensional relay protection with five measuring fault detector and the implementation of simulation in the *Matlab/Simulink* is considered.

Keywords: short circuit, relay protection, emergency modes, Bayes criterion, binary signals, logic part, synthesis, sensitivity, simulation, measuring fault detector.

For citation: A.L. Kulikov, A.A. Loskutov and A.B. Loskutov, "The method of automated synthesis of logical part to increase the sensitivity of relay protection devices", *Smart Electrical Engineering*, no. 4, pp. 4-16, 2021.
DOI: 10.46960/2658-6754_2021_4_04

I. Введение

В соответствии с Концепцией интеллектуальной электроэнергетической системы России с активно-адаптивной сетью [1], разработанной в 2011 г., и Концепцией цифровой трансформации электросетевого комплекса до 2030 года, утвержденной советом директоров ПАО «Россети» 21.12.2018 г. [2], требуется создание технологической, нормативной и производственной базы с целью массового внедрения в энергетическую

отрасль инновационного высокоэффективного продукта – необслуживаемых модульных самодиагностируемых электрических подстанций и станций («цифровых подстанций») [3].

Под цифровой подстанцией (ЦПС) понимается подстанция с высоким уровнем автоматизации управления технологическими процессами, оснащенная развитыми информационно-технологическими и управляющими системами и средствами (АСУТП / ССПИ, АИИС КУЭ, РЗА, ПА, РАС, ОМП и др.), в которой все процессы информационного обмена между элементами подстанции, с внешними системами, а также управление работой подстанции осуществляются в цифровом виде на основе протоколов МЭК. При этом и первичное силовое оборудование ЦПС, и компоненты информационно-технологических и управляющих систем должны быть функционально и конструктивно ориентированы на поддержку цифрового обмена данными. Предпочтительной является взаимная интеграция всех или части перечисленных ранее систем с обеспечением применения централизованных, децентрализованных и гибридных принципов построения систем защиты, управления и автоматики.

Массовый переход от электромеханической элементной базы на микропроцессорную создает предпосылки для разработки новых методов организации релейной защиты (РЗ) и повышения показателей технического совершенства. Несмотря на то, что цифровые технологии получают все большее распространение, в том числе и на подстанциях [4, 5], принципы функционирования РЗ, методы ее организации остаются в своем большинстве заимствованными от электромеханических реле.

Современные электрические сети представляют собой сложные, многоконтурные системы, в которых количество источников питания и новых активных элементов существенно увеличилось. Непрерывное развитие новых технологий (возобновляемые источники энергии, *FACTS* и другие), внедрение цифровой техники приводят к усложнению режимов энергетических систем и повышают требования к чувствительности РЗ.

II. Актуальность синтеза логической части устройств релейной защиты

Проблема распознаваемости аварийных режимов, в большинстве случаев, существует в защитах дальнего резервирования. Причинами этого являются схожесть токов короткого замыкания (*KЗ*) за резервируемыми трансформаторами с токами нагрузки, бросками намагничивающих токов, токами пуска и самозапуска мощных электродвигателей и токами коммутации батарей конденсаторов. Также на чувствительность влияет наличие переходных сопротивлений в месте повреждения и малые уровни напряжения симметричных составляющих на шинах в месте установки защит при удаленных повреждениях [6].

Известны методы повышения распознаваемости аварийных режимов, основанные на применении многомерной (многопараметрической) РЗ [7-14]. Однако достижение высокой чувствительности этими методами связано с реализацией сложных процедур сопоставления областей нормальных и аварийных режимов многомерного пространства признаков срабатывания РЗ.

Следует отметить, что подходы для организации логической части «специальных схем защиты» (*Special Protection Schemes (SPS)*) [15] и «резервируемых защит» (*Protection Redundancy*) [16] используют избыточность для обеспечения высоких показателей технического совершенства и могут быть применены для повышения чувствительности многомерной (многопараметрической) РЗ.

III. Цель исследования

Повышение чувствительности РЗ возможно за счет совместного использования более чем одного параметра (действующее значение тока, амплитуда напряжения и другие) как источника информации [7-14]. Для этого в терминале РЗ реализуется несколько одномерных пусковых органов (ПО). Однако важным является способ объединения сигналов отдельных ПО, который увеличивает распознаваемость аварийных режимов. При этом за счет сочетания сигналов на выходах отдельных ПО и эффекта многомерности может быть достигнуто увеличение чувствительности РЗ.

Таким образом, целью настоящего исследования является разработка автоматизированного метода организации логического органа (ЛО) РЗ для объединения результатов функционирования отдельных ПО в интересах повышения чувствительности многомерной РЗ.

Для реализации предлагаемого технического решения используются статистический подход, включающий формирование законов распределения признаков срабатывания РЗ, критерий минимизации среднего риска принятия решения, а также методы дискретной математики и теории автоматов.

IV. Постановка задачи

Средствами накопления статистических данных для «обучения» релейной защиты служат имитационные модели энергообъектов [17]. Для реализации нового метода цифровой РЗ, основанного на статистическом подходе, необходимо знать вероятностные характеристики каждого ПО в отдельности [7]. Для этого исследуется имитационная модель смежной воздушной линии (ВЛ 2) электропередачи 220 кВ с учетом размещения РЗ в начале ВЛ1 (рис. 1), реализованная в *Matlab/Simulink* (рис. 2).

Для получения требуемой статистики по режимам работы модели сети параметры элементов необходимо разделить на фиксированные и интервальные (табл. 1), варьируемые в заданных диапазонах. Индексами «1»

и «0» отмечены параметры прямой и нулевой последовательностей.

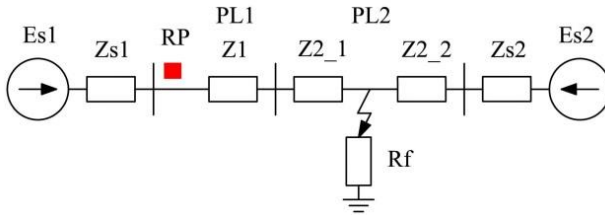


Рис. 1. Схема замещения моделируемого участка сети
Fig. 1. Equivalent circuit of the simulated network section

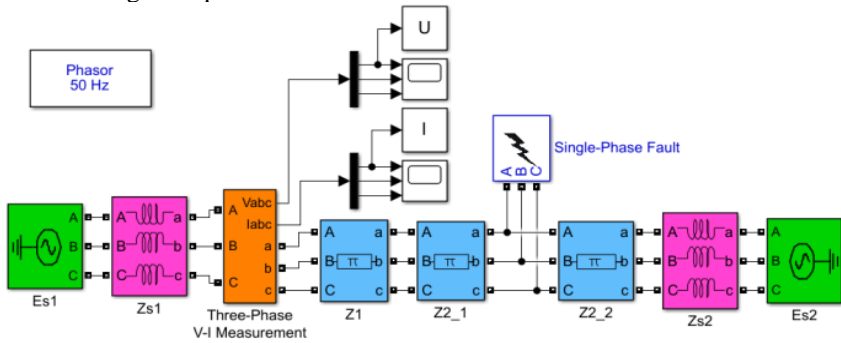


Рис. 2. Имитационная модель участка сети в Matlab/Simulink
Fig. 2. Simulation model of a network section in Matlab / Simulink

Таблица 1.
Параметры элементов модели

Table 1.
Parameters of model elements

Фиксированные		Интервальные		Интервальные		Интервальные	
Параметр	Значение	Параметр	Значение	Параметр	Значение	Параметр	Значение
$U_{\text{ном}}$, кВ	220	$R_1^{1,2}$, Ом/км	0,13 ($\pm 0,1$)	X_1^{s1} , Ом	37,1 (± 2)	δ , °	-20°... 20°
L_1 , км	100	$R_0^{1,2}$, Ом/км	0,28 ($\pm 0,1$)	X_0^{s1} , Ом	35 (± 2)	K_1	0,95...1,05
L_2 , км	80	$X_1^{1,2}$, Ом/км	0,43 ($\pm 0,2$)	R_1^{s2} , Ом	8,37 (± 1)	K_2	0,95...1,05
$b_1^{1,2}$, См/км	$j2,58 \cdot 10^{-6}$	$X_0^{1,2}$, Ом/км	0,1328 ($\pm 0,2$)	R_0^{s2} , Ом	5,13 (± 1)	R_f , Ом	0,1...40
$b_0^{1,2}$, См/км	$j1,78 \cdot 10^{-6}$	R_f^{sl} , Ом	9,3 (± 1)	X_1^{s2} , Ом	33,48 (± 2)	I_{line}	0,0001...0,9999
$U_{\text{ном}}$, кВ	220	R_0^{sl} , Ом	5,7 (± 1)	X_0^{s2} , Ом	31,5 (± 2)		

В табл. 1 вошли следующие коэффициенты, задающие диапазон изменения напряжения энергосистем и угла фазового сдвига между ними:

$$k_1 = \frac{E_{s1}}{U_{ном}}; k_2 = \frac{E_{s2}}{U_{ном}}; \delta = \arg \frac{E_{s1}}{E_{s2}}. \quad (1)$$

При моделировании проводилось 10 000 итераций однофазных коротких замыканий вдоль смежной линии электропередачи (ВЛ2).

Защита РЗ должна быть чувствительна при однофазных КЗ в резервной зоне (зона ВЛ2). Моделирование проведено с учетом пяти одномерных пусковых органов исследуемой РЗ: ПО1 – по абсолютному значению тока; ПО2 – по абсолютному значению напряжения; ПО3 – по фазе между током и напряжением; ПО4 – по реактивной мощности; ПО5 – по активной мощности. Для отображения измерений РЗ по каждому ПО были построены графики плотности вероятности распределения параметров режимов (рис. 3). На этих графиках горизонтальные оси представляют собой измерения наблюдаемых параметров ПО в допустимых и аварийных режимах в резервной зоне (смежной линии ВЛ2). В зависимости от чувствительности ПО большей или меньшей будет степень пересечения плотностей вероятности допустимых и аварийных режимов. Это определяет возможности по распознаванию текущего режима РЗ.

V. Предлагаемый метод

Для объединения сигналов от различных ПО предполагается сведение задачи распознавания аварийных режимов каждого ПО к бинарной (двухгипотезной) статистической задаче [11-14]. При этом осуществляется проверка двух гипотез: H_0 – означает, что на вход ПО поступил измеряемый сигнал, характерный для нормального режима (на выходе выдается логический 0); H_1 – означает, что на вход ПО поступил измеряемый сигнал, характерный для аварийного режима (на выходе выдается логическая 1).

VI. Определение параметров срабатывания РЗ для областей допустимых и аварийных режимов

Правильное решение бинарной задачи может обеспечить соответствующее задание уставочных значений, разделяющих области допустимых и аварийных режимов. Главным требованием при определении уставок является недопущение срабатывания защиты во всех возможных нормальных режимах (рис. 3) [11-14]. Байесовский критерий принятия решений позволяет обеспечить полную отстройку от всех допустимых режимов [18]. Для каждого ПО были определены и проверены гипотезы: если измерение попадает в область допустимых режимов, то принимается гипотеза H_0 ; если измерение попадает в область аварийных режимов (факт наличия КЗ), то принимается гипотеза H_1 .

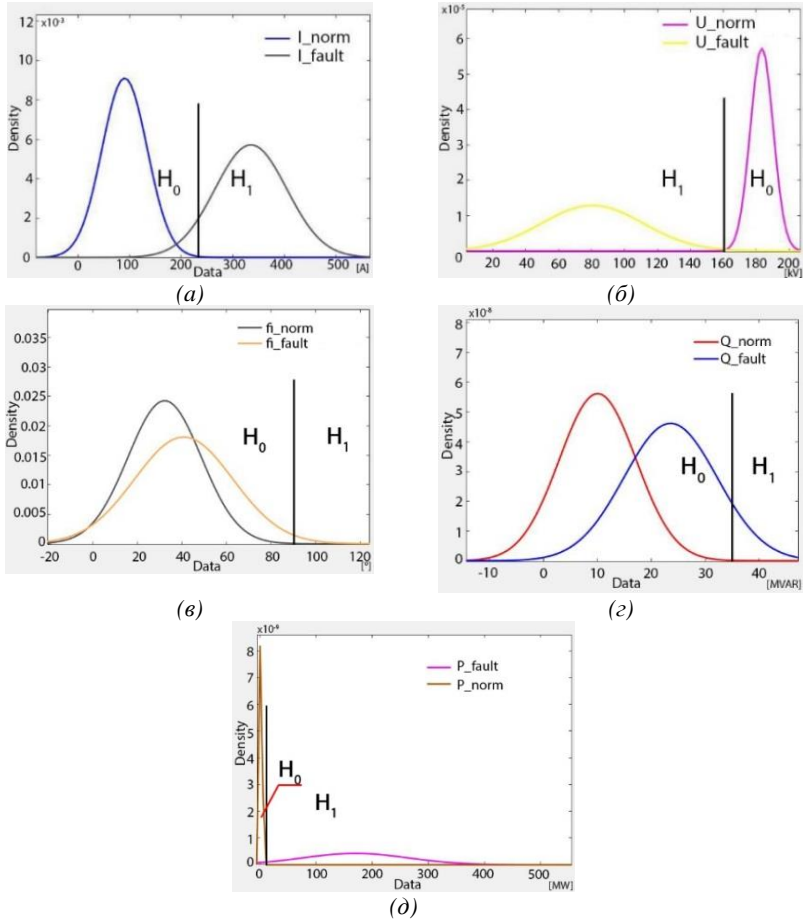


Рис. 3. Определение уставочных значений при Байесовском критерии принятия решений:

ПО1 – по абсолютному значению тока (а), ПО2 – по абсолютному значению напряжения (б), ПО3 – по фазе между током и напряжением (в), ПО4 – по реактивной мощности (г), ПО5 – по активной мощности (д)

Fig. 3. Determination of setpoints with Bayesian decision criterion:

PO1 – by the absolute value of the current (a), PO2 – by absolute voltage value (б), PO3 – by phase between current and voltage (в), PO4 – by reactive power (г), PO5 – by active power (д)

Выбор параметров срабатывания позволяет оценить уровень чувствительности каждого ПО. При этом p_1 – это вероятность срабатывания РЗ

при КЗ. Вероятность того, что РЗ не сработает при КЗ, равна $q_1 = 1 - p_1$. Согласно основному требованию при выборе уставок (недопущение срабатывания защиты в нормальных режимах) вероятность срабатывания РЗ при гипотезе H_0 равна $p_0 = 0$, а вероятность несрабатывания при гипотезе H_0 равна $q_0 = 1$. Вероятности распознавания каждым ПО при заданных уставочных значениях сведены в табл. 2.

Таблица 2.
Вероятности чувствительности пусковых органов

Table 2.
Probabilities of the sensitivity of the measuring fault detectors

Пусковой орган	Параметр	p_1 (о.е.)	p_1 (%)	q_1 (о.е.)	q_1 (%)
ПО1 – по абсол. значению тока	I_m	0,8801	88,01	0,1199	11,99
ПО2 – по абсол. значению напряжения	U_m	0,9893	98,93	0,0107	1,07
ПО3 – по фазе между током и напряжением	φ	0,02	2	0,98	98
ПО4 – по реактивной мощности	Q	0,0799	7,99	0,9201	92,01
ПО5 – по активной мощности	P	0,7358	73,58	0,2642	26,42

VII. Метод объединения сигналов ПО для повышения чувствительности РЗ

Предложенный метод организации ЛО основан на применении теории автоматов и включает решение задачи абстрактного синтеза конечного дискретного автомата [19]. Целесообразно организовать ЛО из двух сегментов. К первому относятся $2^p - 1$ логических элементов (p – количество ПО). Второй сегмент представлен одним логическим элементом «ИЛИ». В состав операций элементов первого сегмента входит логическое отрицание («НЕ») и логическое умножение («И»). Каждый логический элемент первого сегмента включает совокупность прямых и инверсных входов. Для пяти ПО их число составляет $2^5 - 1 = 31$, вместо $2^5 = 32$, потому что отсутствует логический элемент «И» со всеми инверсными входами. Входная комбинация из одних нулей от ПО1-ПО5 существует только в нормальных режимах, поэтому соответствующий логический элемент в схеме на рис. 4 отсутствует.

Число возможных сочетаний бинарных сигналов ПО равно 2^p . Для случая использования пяти ПО число комбинаций равно 32. Комбинации могут иметь произвольное число нулей и единиц. Например, первая комбинация – это комбинация всех нулей, последняя – всех единиц, а остальные все возможные комбинации – нули и единицы (табл. 3).

Предположим, что $X_i = (X_1^i, X_2^i, \dots, X_k^i, \dots, X_p^i)$ – это вектор, представляющий собой совокупность бинарных случайных величин (0 или 1) с выхода каждого ПО. В зависимости от логического элемента в первом сегменте соответствующие сигналы из выборки вектора X_i сначала будут преобразованы (инвертированы), а потом объединены (операция «И»). Выходные сигналы логических элементов первого сегмента объединяются внутри второго сегмента по правилу «ИЛИ». Вектор выходных сигналов автоматов первого сегмента отображается как $Y_i = (y_1, y_2, \dots, y_k, \dots, y_m)$, где $i = 1 \dots n$, $k = 1..m$, n – количество наблюдаемых режимов (итераций), $m = 2^P - 1$ – количество логических элементов первого сегмента. Выход автомата второго сегмента дает ожидаемый сигнал, необходимый для принятия решения – «1» или «0» (срабатывание или не срабатывание РЗ). Структурная схема логической части объединения сигналов, реализующая алгоритм, изображена на рис. 4.

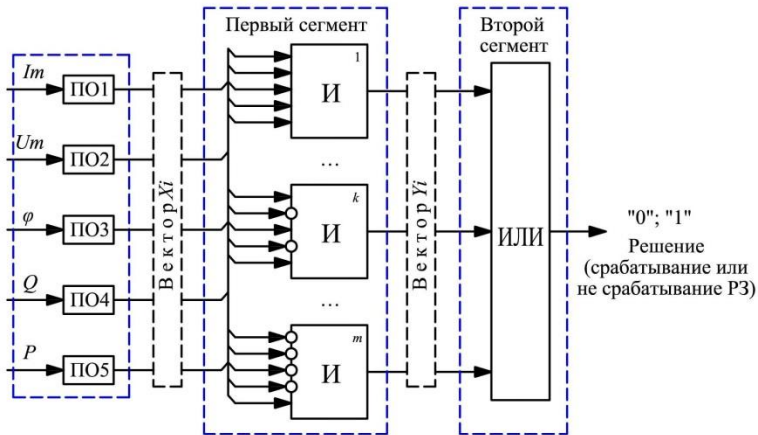


Рис. 4. Структурная схема логической части объединения сигналов ПО
Fig. 4. Block diagram of the logical part of combining the signals of measuring fault detectors

Анализ работы логической части (рис. 4) показал, что при такой организации логики РЗ срабатывание хотя бы одного пускового органа, который отстроен от нормального режима, приводит к срабатыванию устройств РЗ. При этом чувствительность устройства РЗ будет определяться наибольшей чувствительностью из набора ПО1 - ПО5. Дополнительно возможно повышение надежности. Варьируя условия срабатывания ПО, можно добиться требуемых эксплуатационных показателей и адаптировать функционирование устройств РЗ к схемно-режимной ситуации.

Таблица 3.
Возможные сочетания бинарных сигналов от ПО

Table 3.
Possible combinations of binary signals from measuring fault detectors

№ комбинации	ПО1 – по абсолютному значению тока	ПО2 – по абсолютному значению напряжения	ПО3 – по фазе между током и напряжением	ПО4 – по реактивной мощности	ПО5 – по активной мощности
1	0	0	0	0	0
2	0	0	0	0	1
3	0	0	0	1	0
4	0	0	0	1	1
...
31	1	1	1	1	0
32	1	1	1	1	1

VIII. Выводы

Предложен метод организации логического органа многопараметрической релейной защиты с целью улучшения чувствительности. Метод основан на результатах имитационного моделирования, критерии Байеса и теории автоматов.

Рассмотренный пример многомерной РЗ с пятью ПО показал, что при применении разработанного метода объединения бинарных сигналов вероятность распознавания КЗ с переходным сопротивлением в резервной зоне РЗ увеличилась с 98,93 % (по ПО2 табл. 2) до 99,99 % по сравнению с самым чувствительным пусковым органом.

Предложенный метод обеспечил увеличение распознаваемости КЗ в резервной зоне защиты с 2 % до 99,99 % по сравнению с традиционным объединением бинарных сигналов логической операцией «И».

Модельные эксперименты обосновали использование многомерности с целью улучшения чувствительности РЗ и подтвердили положительный эффект от нового подхода к организации логической части многомерной РЗ.

© Куликов А.Л., 2021

© Лоскутов А.А., 2021

© Лоскутов А.Б., 2021

Поступила в редакцию 27.08.2021

Received 27.08.2021

Библиографический список

- [1] Фортов В.Е., Макаров А.А. Концепция интеллектуальной энергетической системы России с активно-адаптивной сетью. М.: НТЦ ФСК ЕЭС, 2012. – 235 с.

- [2] Концепция «Цифровая трансформация 2030». [Электронный ресурс]. URL: https://www.rosseti.ru/investment/Kontseptsiya_Tsifrovaya_transformatsiya_2030.pdf (дата обращения 05.07.2021).
- [3] Зинин В.М., Подлесный А.М., Карантаев В.Г. Цифровая подстанция – объект критической инфраструктуры // Автоматизация и IT в энергетике. 2017. № 4 (93). С. 28-32.
- [4] Лоскутов А.Б. Проблемы перехода электроэнергетики на цифровые технологии // Интеллектуальная электротехника. 2018. № 1 (1). С. 9-27. DOI: 10.46960/2658-6754_2018_1_9
- [5] Куликов А.Л., Лоскутов А.А., Пелевин П.С. Алгоритм идентификации поврежденного участка на кабельно-воздушных линиях электропередачи на основе распознавания волновых портретов // Электричество. 2018. № 3. С. 11-17. DOI: 10.24160/0013-5380-2018-3-11-17
- [6] Нагай И.В., Нагай В.И. Построение многопараметрических резервных защит электрических распределительных сетей 6–110 кВ // Энергетик. 2013. № 2. С. 18-21.
- [7] Лямец Ю.Я., Нудельман Г.С., Зиновьев Д.В., Кержаев Д.В., Романов Ю.В. Многомерная релейная защита. Ч. 1. Теоретические предпосылки // Электричество. 2009. № 10. С. 17-25.
- [8] Лямец Ю.Я., Нудельман Г.С., Подшивалина И.С., Романов Ю.В. Эффекты многомерности в релейной защите // Электричество. 2011. № 9. С. 48а-54.
- [9] Лямец Ю.Я., Мартынов М.В., Нудельман Г.С., Романов Ю.В., Воронов П.И. Обучаемая релейная защита. Ч. 2. Информационный портрет многомодульной распознающей структуры // Электричество. 2012. № 3. С. 12-18.
- [10] Иванов С.В., Лямец Ю.Я. Метод информационного анализа. Ч. 2. Распознавание замыканий в заданной зоне двухцепной электропередачи // Известия Российской Академии Наук. Энергетика. 2016. № 1. С. 47-57.
- [11] Шарьгин М.В., Куликов А.Л. Объединение сигналов совокупности отдельных пусковых органов релейной защиты // Электрические станции. 2018. № 9 (1046). С. 42-49.
- [12] Куликов А.Л., Шарьгин М.В. Применение статистических критериев распознавания режима релейной защиты сетей электроснабжения // Электротехника. 2019. № 2. С. 58-64.
- [13] Sharygin M.V., Kulikov A.L. Statistical methods of mode recognition in relay protection and automation of power supply networks // Power Technology and Engineering. 2018. Vol. 52. No. 2. P. 235-241. DOI: 10.1007/s10749-018-0938-9
- [14] Лоскутов А.А., Пелевин П.С., Митрович М. Разработка логической части интеллектуальной многопараметрической релейной защиты // Электричество. 2020. № 5. С. 12-18. DOI: 10.24160/0013-5380-2020-5-12-18
- [15] McCalley J., Oluwaseyi O., Krishnan V., Dai R., Singh C., Jiang K. System protection schemes: limitations, risks, and management. Final project report. PSERC project S-35. PSERC, 2010. – 136 p. DOI: 10.13140/RG.2.1.1946.3842
- [16] Protection System Reliability. Redundancy of Protection System Elements. North American electric reliability corporation. A Technical Paper. 2008. – 59 p.
- [17] Kulikov A.L., Loskutov A.A., Mitrovic M. Method of automated synthesis of the logic part of relay protection device which increases its sensitivity // IOP Conference

Series: Materials Science and Engineering. 2019. Vol. 643, 012124. DOI: 10.1088/1757-899X/643/1/012124

- [18] Ван Трис Г. Теория обнаружения, оценок и модуляции. Т.1. Теория обнаружения, оценок и линейной модуляции. Пер. с англ., под ред. проф. В.И. Тихонова. М.: Советское радио, 1972. – 744 с.
- [19] Гуренко В.В. Введение в теорию автоматов. М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2013. – 63 с.

References

- [1] V.E. Fortov and A.A. Makarov, *Koncepciya intellektual'noj energeticheskoy sistemy Rossii s aktivno-adaptivnoy set'yu [The concept of an intelligent energy system in Russia with an active-adaptive grid]*. Moscow: JSC FGC UES, 2012 (in Russian).
- [2] *Koncepciya «Cifrovaya transformatsiya 2030» [Concept “Digital Transformation 2030”]*. [Electronic resource]. [Online]. Available at: https://www.rosseti.ru/investment/Kontseptsiya_Tsifrovaya_transformatsiya_2030.pdf. [Accessed: May 5, 2021] (in Russian).
- [3] V.M. Zinin, A.M. Podlesny, V.G. Karantaev. “Digital substation - object of critical infrastructure”, *Avtomatizatsiya i IT v Energetike [Automation and IT in the energy sector]*, no. 4 (93), pp. 28-32, 2017 (in Russian).
- [4] Loskutov A.B. “Solving problems in transition of electrical industry to digital technologies”, *Smart Electrical Engineering*, no. 1 (1), pp. 9–27, 2018. DOI: 10.46960/2658-6754_2018_1_9
- [5] A.L. Kulikov, A.A. Loskutov and P.S. Pelevin, “Algorithm for identifying the faulty section in combined cable and overhead power lines based on surge portrait recognition”, *Elektrichestvo*, no. 3, pp. 11–17, 2018. DOI: 10.24160/0013-5380-2018-3-11-17
- [6] I.V. Nagay and V.I. Nagay, “Postroyeniye mnogoparametricheskikh rezervnykh zashchit elektricheskikh raspredelitel'nykh setey 6–110 kV [Construction of multi-parameter backup protections for electrical distribution networks 6-110 kV]”, *Energetik*, no. 2, pp 18-21, 2013 (in Russian)
- [7] Yu.Ya. Lyamets, G.S. Nudel'man, D.V. Zinov'yev, D.V. Kerzhayev and Yu.V. Romanov, “Mnogomernaya reley'naya zashchita. Ch.1. Teoreticheskiye predposylki [Multidimensional relay protection. Part 1. Theoretical background]”, *Elektrichestvo*, no. 10, pp. 17-25, 2009 (in Russian).
- [8] Yu.Ya. Lyamets, G.S. Nudel'man, I.S. Podshivalina and Yu.V. Romanov, “Effekty mnogomernosti v reley'noy zashchite [Effects of multidimensionality in relay protection]”, *Elektrichestvo*, no. 9, pp. 48a-54, 2011 (in Russian)
- [9] Yu.Ya. Lyamets, M.V. Martynov, G.S. Nudel'man, Yu.V. Romanov and P.I. Voronov, “Obuchayemaya reley'naya zashchita. Ch. 2. Informatsionnyy portret mnogo-modul'noy raspoznayushchey struktury [Teachable relay protection. Part 2. Information portrait of a multi-module recognizing structure]”, *Elektrichestvo*, no. 3, pp. 12–18, 2012 (in Russian)
- [10] S.V. Ivanov and Y.Y. Lyamets, “Informational analysis method. P. 2. Fault identification in a given zone of double-circuit power line”, *Proceedings of the Russian Academy of Sciences. Power Engineering*, no. 1, pp. 47–57, 2016.
- [11] M.V. Sharygin and A.L. Kulikov, “Combining the signals of a set of separate relay protection starters”, *Electrical stations*, no. 9, pp. 42–49, 2018.

- [12] A.L. Kulikov and M.V. Sharygin, "Using of statistical criteria for recognition of regimes of relay protection of power supply systems", *Elektrotehnika*, no. 2, pp. 58–64, 2019.
- [13] M.V. Sharygin and A.L. Kulikov, "Statistical methods of mode recognition in relay protection and automation of power supply networks", *Power Technology and Engineering*, vol. 52, no. 2, pp. 235-241, 2018. DOI: 10.1007/s10749-018-0938-9
- [14] A.A. Loskutov, P.S. Pelevin and M. Mitrovich, "Development of the logic part for intelligent multiparametric relay protection", *Elektrichestvo*, no. 5. pp. 12–18, 2020. DOI: 10.24160/0013-5380-2020-5-12-18
- [15] J. McCalley, O. Oluwaseyi, V. Krishnan, R. Dai, C. Singh and K. Jiang, "System protection schemes: limitations, risks, and management", PSERC, USA, Final project report. PSERC project S-35, 2010. DOI: 10.13140/RG.2.1.1946.3842
- [16] "Protection System Reliability. Redundancy of Protection System Elements", North American electric reliability corporation. Technical Paper, 2008.
- [17] A.L. Kulikov, A.A. Loskutov and M. Mitrovic, "Method of automated synthesis of the logic part of relay protection device which increases its sensitivity", *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, vol. 643, paper no. 012124, 2019. DOI: 10.1088/1757-899X/643/1/012124
- [18] H. Van Trees, *Teoriya obnaruzheniya, otsenok i modulyatsii. Tom 1. Teoriya obnaruzheniya, otsenok i lineynoy modulyatsii [The theory of detection, estimation and modulation. Vol. 1. Detection, Estimation and Linear Modulation Theory]*. Moscow: Sovetskoye radio, 1972 (in Russian).
- [19] V.V. Gurenko, *Vvedeniye v teoriyu avtomatov [Introduction to automata theory]*. Moscow: MGТУ n.a. N.E. Bauman, 2013 (in Russian).

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Куликов Александр Леонидович, доктор технических наук, профессор Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексева, г. Нижний Новгород, Российская Федерация.

Лоскутов Антон Алексеевич, кандидат технических наук, доцент Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексева, г. Нижний Новгород, Российская Федерация.

Лоскутов Алексей Борисович, доктор технических наук, профессор Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексева, г. Нижний Новгород, Российская Федерация.

Aleksandr L. Kulikov, D. Sci. (Eng.), professor of the Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev, Nizhny Novgorod, Russian Federation.

Anton A. Loskutov, Cand. Sci. (Eng.), associate professor of the Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev, Nizhny Novgorod, Russian Federation.

Aleksey B. Loskutov, D. Sci. (Eng.), professor of the Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev, Nizhny Novgorod, Russian Federation.

УДК 620.92

DOI 10.46960/2658-6754_2021_4_17

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РЕЖИМОВ РАБОТЫ ВОЛНОВОЙ ЭЛЕКТРОСТАНЦИИ

А.М. Олейников

Институт природно-технических систем
Севастополь, Россия
e-mail: oma091041@gmail.com

Л.Н. Канов

Севастопольский государственный университет
Севастополь, Россия
e-mail: lnkanov48@mail.ru

Рассмотрены физические взаимодействия и математическая модель волновой электростанции, содержащей ряд гидроустановок с однотипными генераторами с возбуждением от постоянных магнитов, а в качестве резервного источника использована аккумуляторная батарея, при этом все источники работают на общую шину постоянного тока с подсоединенной к ней нагрузкой, которая, в свою очередь, включает параллельно соединенные полезную переменную и балластную нагрузку для сброса излишков мощности. Математическая модель волновой установки включает уравнения для вертикальной гидротурбины барабанного типа с анализом действующих на лопасть составляющих сил и моментов, а также соотношения для оценки динамических параметров волны. Синхронные генераторы описаны уравнениями Парка-Горева во вращающихся ортогональных координатах, при этом не учитываются действия демпфирующих контуров и насыщение магнитной цепи. Упрощенная модель АБ представляет последовательное соединение внутреннего сопротивления и источника напряжения, а уравнения механического равновесия установки в целом учитывают вращающий момент гидротурбины и тормозные электромагнитные моменты генераторов ВЭУ. Результаты моделирования, реализованного в среде *MathCad*, построены на совместной работе нескольких таких установок, работающих в различных условиях волнения водной поверхности, и показывают, что модель в целом вполне адекватно отражает физические взаимодействия основных элементов при изменении основных параметров волнения, а их снижение до определенного уровня приводит к заметному снижению эффективности преобразования энергии. В то же время результаты моделирования показывают возможность и целесообразность конструирования и построения подобных волновых электростанций и эксплуатации их в реальных условиях волнения водной среды.

Ключевые слова: аккумуляторная батарея, возбуждение, волновая установка, волновая электростанция, математическое моделирование, постоянные магниты, синхронные генераторы, уравнения равновесия.

Для цитирования: Олейников А.М., Канов Л.Н. Математическое моделирование режимов работы волновой электростанции // Интеллектуальная электротехника. 2021. № 4. С. 17-35. DOI: 10.46960/2658-6754_2021_4_17

MATHEMATICAL MODELING OF WAVE POWER PLANT OPERATING MODES

A.M. Oleynikov

Institute of Natural and Technical Systems
Sevastopol, Russia
e-mail: oma091041@gmail.com

L.N. Kanov

Sevastopol State University
Sevastopol, Russia
e-mail: lnkanov@mail.ru

Abstract. Physical interactions and a mathematical model of a wave power plant containing a number of hydraulic installations with the same type of generators with excitation from permanent magnets are considered, and a battery is used as a backup source, while all sources work on a common DC bus with a load connected to it, which, in turn, includes parallel connected payload variable and ballast load to reset excess power. The mathematical model of the wave setting includes equations for a vertical drum-type hydraulic turbine with an analysis of the forces and moments acting on the blade, as well as relations for estimating the dynamic parameters of the wave. Synchronous generators are described by the Park-Gorev equations in rotating orthogonal coordinates, while not taking into account the actions of damping circuits and the saturation of the magnetic circuit. The simplified AB model represents a serial connection of the internal resistance and the voltage source, and the mechanical equilibrium equations of the installation generally take into account the torque of the hydraulic turbine and the braking electromagnetic moments of the wind turbine generators. The results of the simulation implemented in the MathCad environment are based on the joint work of several such installations operating in different conditions of water surface waves and show that the model as a whole adequately reflects the physical interactions of the main elements when changing the main parameters of the wave, and their reduction to a certain level leads to a noticeable decrease in the efficiency of energy conversion. At the same time, the simulation results show the possibility and feasibility of designing and building such wave power plants and operating them in real conditions of water disturbance.

Keywords: battery, equilibrium equations, excitation, mathematical modeling, permanent magnets, synchronous generators, wave power plant, wave setting.

For citation: A.M. Oleynikov and L.N. Kanov, "Mathematical modeling of wave power plant operating modes", *Smart Electrical Engineering*, no. 4, pp. 17-35, 2021. DOI: 10.46960/2658-6754_2021_4_17

1. Введение

Проблеме практической реализации волновой энергетики, потенциал которой обусловлен глобальными планетарно-космическими взаимодействиями и, по сути, неисчерпаем, посвящено множество работ [1-6]. При этом сохраняется актуальность математического описания всевозможных схем такого преобразования, моделирования физических процессов в различных режимах работы.

В данном случае рассматривается прибрежная волновая электростанция для электроснабжения локальной нагрузки, которая содержит сеть волновых генераторных электроустановок (ВЭУ) и аккумуляторную батарею (АБ), работающие на общую шину постоянного напряжения с присоединенной к ней нагрузкой, при этом АБ задает на шине опорное напряжение U . В нагрузку входит полезная динамическая переменная нагрузка $R_n(t)$ и некая балластная нагрузка $R_b(t)$ для возможности сброса излишков мощности. Общая подключенная нагрузка имеет вид [7]:

$$R(t) = \frac{R_n(t) \cdot R_b(t)}{R_n(t) + R_b(t)}. \quad (1)$$

Генераторы волновых электроустановок подключены к общей шине постоянного напряжения через выпрямители (рис. 1).

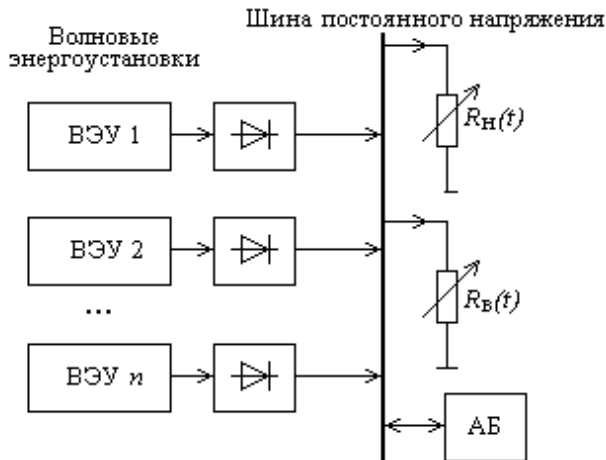


Рис. 1. Упрощенная блок-схема волновой электростанции, работающей на шину постоянного тока

Fig. 1. Simplified block diagram of a wave power plant operating on a DC bus

Целью работы является математическое описание и анализ режимов работы волновой электростанции в условиях резко переменного волнения моря и соответствующего изменения динамической и балластной нагрузок.

II. Математическое описание режима волновой электроэнергетической установки

Волновая генераторная электроэнергетическая установка преобразует энергию волнового прибоя в электроэнергию с заданными параметрами, в данном случае она представлена электрогенератором с вертикальной турбиной барабанного типа 1 (рис. 2) [8], которая устанавливается на бетонном основании 9 в воде. Рабочее колесо гидротурбины содержит четыре лопасти, установленные на вертикальном валу с взаимно противоположной выпуклостью. Лопасти выполнены из листового материала в виде полуцилиндров с радиусом R , прикрепленных к центральному валу 2, к которому через редуктор присоединен электрический генератор 11.

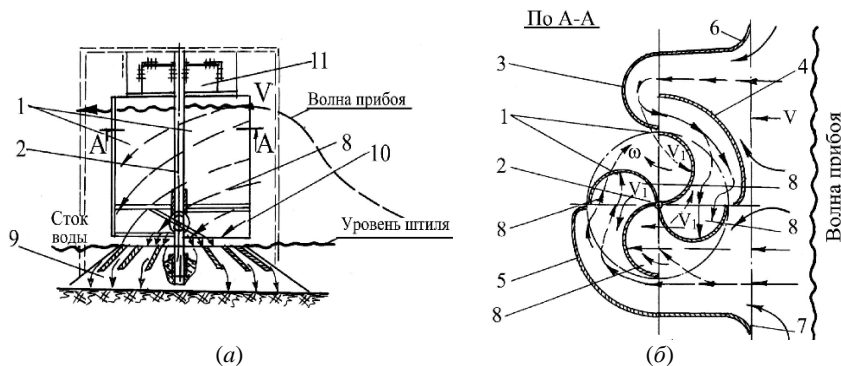


Рис. 2. Волновая электроэнергетическая установка: продольный разрез (а); поперечное сечение по А-А (б)

Fig. 2. Wave electric power plant: longitudinal section (a); cross-section along A-A (b)

Обозначения на рис. 2: 1 – гидротурбина; 2 – вал; 3 – 7 – направляющие пластины; 8 – направление потока; 9 – основание; 10 – корпус; 11 – генератор; V – скорость воды.

На основании с внешней стороны турбины установлены направляющие пластины (НП) 3 – 7. НП5 выполнена в виде полуцилиндра, обращенного вогнутой частью к текущей воде. НП4 представляет собой криволинейный экран, охватывающий рабочее колесо на четвертую часть окружности. Одним своим концом НП4 расположена внутри НП3 в ее средней части,

а вторым – на входе фронта воды в колесо. Выпуклой частью НП4 ориентирована к текущей воде. НП5 имеет такую же форму, как и НП4, но расположена на противоположной стороне платформы.

Текущая вода волны прибора с помощью НП направляется на лопасти. Суммарное воздействие воды на лопасти, как в типичной гидротурбине, создает относительно вертикальной оси момент вращения генератора. Получим уравнение этого момента на примере расположения турбины, показанного на рис. 3.

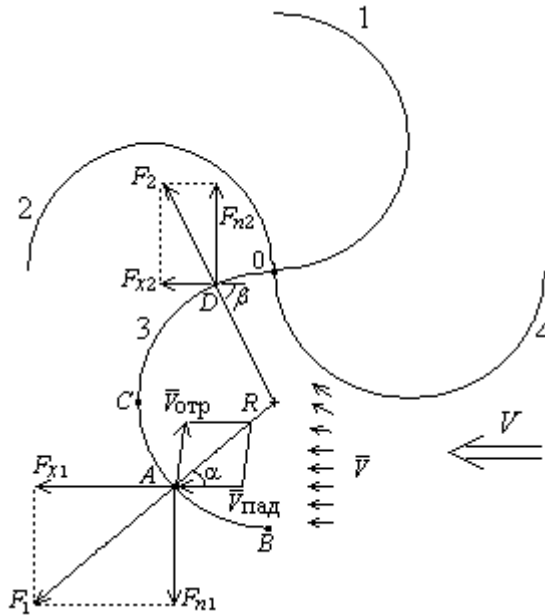


Рис. 3. Силы, действующие на лопасть колеса гидротурбины
Fig. 3. Forces acting on the blade of the wheel of the hydraulic turbine

Частицы воды со скоростью v попадают на элемент A площадки с размерами $dl \times dy$ поверхности лопасти 3 на высоте y от основания, где dl – длина элемента площадки по окружности лопасти; dy – высота элемента площадки. Скорость v частиц воды в точке установки турбины зависит от глубины погружения лопасти в воду y и от времени. Угол падения струи воды относительно радиуса лопасти обозначим α . Отражение происходит под тем же углом. Масса падающей и отраженной воды в единицу времени определяется произведением $\rho \cdot dl \cdot dy \cdot v$, где ρ – плотность воды. Удельная

сила, действующая на элемент площадки, определяется как изменение количества движения струи воды после отражения от лопасти [9]. Часть этой силы, связанная с изменением направления скорости после отражения в точке A на участке BC , определяется как:

$$F = \rho \cdot |v| \cdot dl \cdot dy \cdot (\bar{v}_{\text{над}} - \bar{v}_{\text{отр}}). \quad (2)$$

Учитывая, что $dl = R \cdot d\alpha$, из рис. 3 получаем:

$$F_1 = \rho \cdot v^2 \cdot R \cdot d\alpha \cdot dy \cdot 2 \cos \alpha. \quad (3)$$

Проекция этой силы на горизонтальную ось x направления течения воды записывается в виде:

$$F_{x1} = 2\rho \cdot v^2 \cdot R \cdot (\cos \alpha)^2 \cdot d\alpha \cdot dy, \quad (4)$$

а ее проекция на вертикальную ось в виде:

$$F_{n1} = 2\rho \cdot v^2 \cdot R \cdot \cos \alpha \cdot d\alpha \cdot dy \cdot \sin \alpha. \quad (5)$$

Полагаем далее, что вследствие искривления течения струи воды на участке CO вода попадает перпендикулярно на поверхность лопасти (по направлению радиуса), тогда сила в любой точке на этом участке равна:

$$F_2 = 2\rho \cdot v^2 \cdot R \cdot d\beta \cdot dy, \quad (6)$$

при этом проекция такой силы на горизонтальную ось x приобретает вид:

$$F_{x2} = 2\rho \cdot v^2 \cdot R \cdot \cos \beta \cdot d\beta \cdot dy, \quad (7)$$

а на вертикальную ось:

$$F_{n2} = 2\rho \cdot v^2 \cdot R \cdot \sin \beta \cdot d\beta \cdot dy. \quad (8)$$

Удельные вращающие моменты относительно оси турбины, действующие на лопасть от сил F_{x1} , F_{x2} , F_{n1} , F_{n2} , составляют:

– в произвольной точке A на участке BC :

$$M_{x_1} = F_{x_1} \cdot (R + R \sin \alpha) = 2\rho \cdot v^2 \cdot R^2 \cdot (\cos \alpha)^2 \cdot (1 + \sin \alpha) \cdot d\alpha \cdot dy; \quad (9)$$

$$M_{n_1} = -F_{n_1} \cdot R \cos \alpha = -2\rho \cdot v^2 \cdot R^2 \cdot (\cos \alpha)^2 \cdot \sin \alpha \cdot d\alpha \cdot dy; \quad (10)$$

– в точках на участке CO (на примере точки D) они равны:

$$M_{x_2} = F_{x_2} \cdot (R - R \sin \beta) = 2\rho \cdot v^2 \cdot R^2 \cdot \cos \beta \cdot (1 - \sin \beta) \cdot d\beta \cdot dy; \quad (11)$$

$$M_{n_2} = F_{n_2} \cdot R \cos \beta = 2\rho \cdot v^2 \cdot R^2 \cdot \cos \beta \cdot \sin \beta \cdot d\beta \cdot dy. \quad (12)$$

Удельные вращающие моменты, действующие по всей длине окружности лопасти на высоте y , равны:

$$M_1 = 2\rho R^2 \int_{-\frac{\pi}{2}}^0 v^2 \cdot (\cos \alpha)^2 \cdot dy \cdot d\alpha = \rho R^2 v^2 \frac{\pi}{2} dy; \quad (13)$$

$$M_2 = 2\rho R^2 \int_0^{\frac{\pi}{2}} v^2 \cdot \cos \alpha \cdot dy \cdot d\alpha = 2\rho R^2 v^2 dy. \quad (14)$$

Другая часть удельной силы, действующей на элемент поверхности лопасти, зависит от изменения модуля скорости воды, т.е. от ускорения $a = dv / dt$ [10], которое также зависит от глубины u и от времени:

$$F_a = \rho \cdot a \cdot dl \cdot dy = \rho \cdot a \cdot R \cdot d\alpha \cdot dy. \quad (15)$$

Удельный вращающий момент, действующий на лопасть от силы F_a , составляет:

$$M_a = \rho R \int_{-\frac{\pi}{2}}^{\frac{\pi}{2}} a \cdot dy \cdot d\alpha = \rho \cdot R \cdot a \cdot \pi \cdot dy. \quad (16)$$

Таким образом суммарный вращающий момент, действующий на три лопасти турбины, представляется уравнением:

$$\begin{aligned}
 M(t) &= 3 \int_{y_{\min}}^{y_{\max}} \left[\rho R^2 v^2 \frac{\pi}{2} + 2\rho R^2 v^2 + \rho R a \pi \right] dy = \\
 &= 3\rho R \int_{y_{\min}}^{y_{\max}} \left[Rv(t, y)^2 \left(\frac{\pi}{2} + 2 \right) + a(t, y)\pi \right] dy
 \end{aligned} \tag{17}$$

III. Оценка параметров динамики волны

Оценим далее глубину погружения лопасти в воду при волнении, а также величины скорости $v(t, y)$ и ускорения частиц воды $a(t, y)$. Глубина погружения лопасти в воду определяется рельефом волны, который рассчитывается по принятой высоте волны H , длине волны λ и глубине воды h (рис. 4).

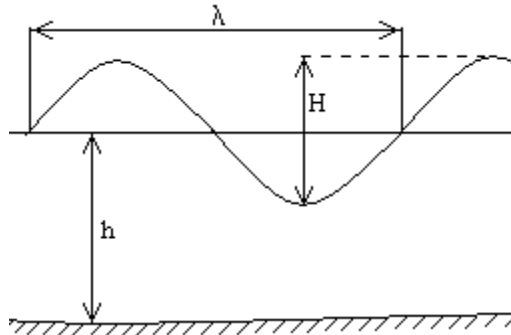


Рис. 4. Основные параметры волны
Fig. 4. Basic parameters of the wave

По времени волна имеет период T и волновое число $k = 2\pi / \lambda$, а ее профиль согласно [4] представляется в виде:

$$\eta(x, t) = \frac{1}{k} \sum_{n=1}^5 F_n \cdot \cos n(kx - \omega t), \tag{18}$$

где $\omega = 2\pi / T$ – частота.

Амплитуды слагаемых определяются соотношениями:

$$F_1 = b; F_2 = b^2 \cdot (F_{22} + b^2 F_{24}); F_3 = b^3 \cdot (F_{33} + b^2 F_{35}); F_4 = b^4 F_{44}; F_5 = b^4 F_{55}. \tag{19}$$

Кроме того, имеет место уравнение:

$$kH = 2(b + b^3 F_{33} + b^5 (F_{35} + F_{55})), \quad (20)$$

из которого определяется коэффициент b . Коэффициенты F_{ij} находим в зависимости от отношения h / λ из табл. 3.5 [10].

Далее с целью предметных численных расчетов полагаем следующие типичные параметры волнения в прибрежной зоне: $h = 2,5$ м; $H = 3$ м; $\lambda = 12,5$ м; $\omega = 2,63$ с⁻¹. Тогда $h / \lambda = 0,2$; $k = 0,503$; $kH / 2 = 0,754$; $b = 0,488$. Из табл. 3.5 [10] получаем:

$$F_{33} = 0,996; F_{35} = 3,679; F_{55} = 1,734; F_{22} = 0,927; F_{24} = 1,938; F_{44} = 1,259,$$

и

$$F_1 = 0,488; F_2 = 0,30; F_3 = 0,218; F_4 = 0,071; F_5 = 0,048.$$

Профиль волны имеет вид (в точке расположения волновой установки полагаем $x = 0$):

$$\eta(t) = 1,992 \left(\begin{aligned} &0,488 \cos 2,63t + 0,30 \cos 5,26t + 0,218 \cos 7,89t + \dots \\ &\dots + 0,071 \cos 10,52t + 0,048 \cos 13,15t \end{aligned} \right). \quad (21)$$

График профиля волны представлен на рис. 5.

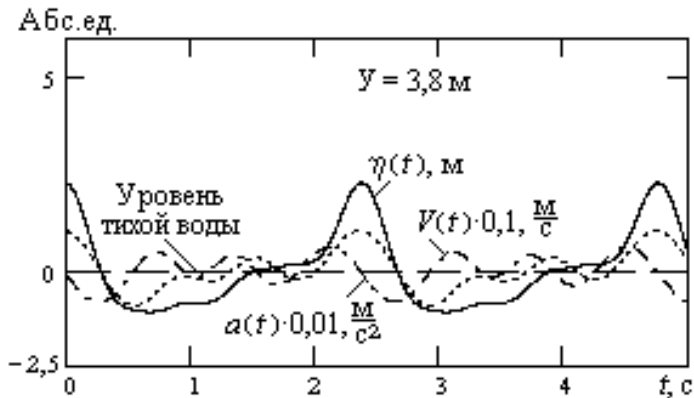


Рис. 5. Параметры динамики волны на высоте 3,8 м от поверхности
Fig. 5. Parameters of wave dynamics at a height of 3.8 m from the surface

Оценим скорость $v(t, y)$ движения частиц воды в волне. Горизонтальная составляющая скорости, обуславливающая вращающий момент, определяется из выражения [10]:

$$v_x(y, t) = \frac{\omega}{k} \cdot \sum_{n=1}^5 G_n \cdot \frac{\operatorname{ch}(nky)}{\operatorname{sh}(nkh)} \cdot \cos n(kx - \omega t), \quad (22)$$

где $G_1 = bG_{11} + b^3G_{13} + b^5G_{15}$; $G_2 = 2(b^2G_{22} + b^4G_{24})$; $G_3 = 3(b^3G_{33} + b^5G_{35})$;

$$G_4 = 4b^4G_{44}; G_5 = 5b^5G_{55}.$$

Коэффициенты G_{ij} находим из табл. 3.6 [10], для принятой величины $h/\lambda = 0,2$, получаем значения: $G_{11} = 1$; $G_{13} = -1,263$; $G_{15} = -2,266$; $G_{22} = 0,326$; $G_{24} = 0,688$; $G_{33} = -0,017$; $G_{35} = 1,093$; $G_{44} = -0,044$; $G_{55} = 0,006$.

Отсюда находятся коэффициенты $G_1 = 0,278$; $G_2 = 0,231$; $G_3 = 0,085$; $G_4 = -0,01$; $G_5 = 0,00083$. Характер изменения горизонтальной составляющей скорости волны показан на рис. 5 (для наглядности масштаб кривой уменьшен в 10 раз).

Скорость распространения волны c находим по формуле:

$$c = \sqrt{\frac{g}{k} (1 + b^2C_1 + b^4C_2) \operatorname{th}(kh)}, \quad (23)$$

где коэффициенты $C_1 = 1,549$; $C_2 = 5,044$ находятся из табл. 3.7 [4] для $h/\lambda = 0,2$. Тогда горизонтальная составляющая ускорения определяется выражением:

$$a = \frac{kc^2}{2} \cdot \sum_{n=1}^5 R_n \sin n(kx - \omega t), \quad (24)$$

а коэффициенты R_n подсчитываются по формулам:

$$R_1 = 2U_1 - U_1U_2 - U_2U_3 - V_1V_2 - V_2V_3; \quad (25)$$

$$R_2 = 4U_2 - U_1^2 + V_1^2 - 2U_1U_3 - 2V_1V_3; \quad (26)$$

$$R_3 = 6U_3 - 3U_1U_2 + 3V_1V_2 - 3U_1U_4 - 3V_1V_4; \quad (27)$$

$$R_4 = 8U_4 - 2U_2^2 + 2V_2^2 - 4U_1U_3 + 4V_1V_3; \quad (28)$$

$$R_5 = 10U_5 - 5U_1U_4 - 5U_2U_3 + 5V_1V_4 + 5V_2V_3. \quad (29)$$

В этих соотношениях для упрощения обозначены:

$$U_n = G_n \cdot \frac{\text{ch}(nky)}{\text{sh}(nkh)}; V_n = G_n \cdot \frac{\text{sh}(nky)}{\text{sh}(nkh)}. \quad (30)$$

Кривые горизонтальной составляющей ускорения частиц воды $a(t)$ показаны на рис. 5, а вращающего момента $M(t)$ при принятых ранее параметрах волнения – на рис. 6. При расчетах полагаем $y_{\min} = h$; $y_{\max} = \max(\eta(t) + h, h_{\min})$.

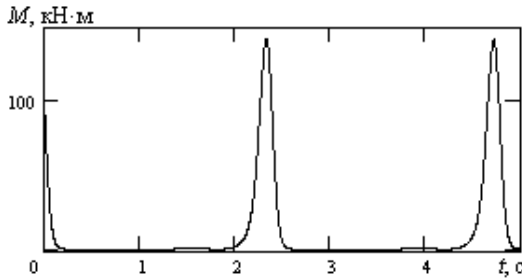


Рис. 6. Зависимость вращающего момента турбины от времени
Fig. 6. Dependence of turbine torque on time

Воздействующий на турбину вращающий момент имеет импульсный характер, при этом его максимум приходится на время прохождения гребня волны, а профиль волны ниже уровня тихой воды в формировании момента не участвует, так как нижняя граница вертикально расположенных лопастей находится на уровне тихой воды.

IV. Упрощенная схемная модель волновой электростанции

В настоящее время имеется несколько типов генераторов, пригодных для применения на волновых электроустановках: генераторы постоянного тока; синхронные генераторы с электромагнитным возбуждением [13]; асинхронные генераторы [14], синхронные генераторы с возбуждением от постоянных магнитов (СГПМ) [15]. Последние имеют ряд важных преимуществ при использовании их в условиях открытого моря – высокая надежность, простота конструкции и обслуживания, связанная с отсутствием скользящих контактов; автономность, так как не требуется постоянный ток возбуждения; более высокий КПД и меньший нагрев из-за отсутствия потерь на возбуждение. Поэтому расчет режима выполним с применением генератора на постоянных магнитах мощностью 30 кВт; с напряжением фазы 127 В и с номинальной скоростью вращения $n = 75$ об/мин, который вполне может быть применен в установке такого типа

Так как собственная динамика СГПМ по сравнению с инерционностью волновой турбины мала, для описания СГПМ применим алгебраические уравнения во вращающихся ортогональных dq -координатах с опережающим вращением поперечной оси:

$$\left. \begin{aligned} u_d + R_c i_d - L_q i_q \Omega_0 p &= 0 \\ u_q + R_c i_q + L_d i_d \Omega_0 p + M_{md} I_M \Omega_0 p &= 0 \end{aligned} \right\}. \quad (31)$$

В этих уравнениях u_d, u_q, i_d, i_q – продольные и поперечные составляющие напряжений и токов обмоток статора генератора; L_d, L_q – индуктивности обмотки статора вдоль продольной и поперечной оси; $M_{md} I_M$ – потокосцепление постоянных магнитов; p – число пар полюсов; Ω_0 – угловая скорость вращения ротора генератора. Далее полагаем $u_d = 0$.

Последнее слагаемое во втором уравнении (31) представляет ЭДС генератора $E = M_{md} \cdot I_M \cdot \Omega_0 \cdot p$, где $\Omega_0 p = k_{ред} \cdot \Omega \cdot p$ – частота напряжения генератора; $k_{ред}$ – коэффициент передачи редуктора. Из (31) следует, что если при малой скорости вращения генератора ЭДС по абсолютной величине будет меньше напряжения на шине: $|E / k_e| < U$, диоды выпрямителя будут закрыты, и ток генератора равен нулю. Если $|E / k_e| > U$, то составляющие тока генератора по (31) определяются следующим образом:

$$i_d = \frac{\left| \frac{E}{k_e} \right| - U}{R_c^2 + L_d L_q (\Omega_0 p)^2} L_q \Omega_0 p; \quad (32)$$

$$i_q = \frac{\left| \frac{E}{k_e} \right| - U}{R_c^2 + L_d L_q (\Omega_0 p)^2} \cdot R_c, \quad (33)$$

и ток, поступающий на шины постоянного напряжения, определяется по соотношению:

– при $|E / k_e| < U$ получаем $i = 0$, иначе

$$i = \frac{\left| \frac{E}{k_e} \right| - U}{R_c^2 + L_d L_q (\Omega_0 p)^2} \cdot \sqrt{R_c^2 + (L_q \Omega_0 p)^2}. \quad (33a)$$

В этих формулах R_c представляет сумму сопротивления фазы обмотки статора и сопротивления арматуры шины постоянного напряжения;

k_e – коэффициент, учитывающий влияние трехфазного двухполупериодного выпрямителя $k_e = 0,43$ [13].

Электромагнитный момент генератора оценим в номинальном режиме из выражения $P = M_{ЭМ} \cdot \Omega_{0н}$, откуда $M_{ЭМ} = 3822$ Н·м. Здесь $\Omega_{0н} = (n_{ном} \cdot 2\pi) / 60 = 7,85$ с⁻¹. Для момента на валу гидротурбины получаем $M_{ЭМ} \cdot k_{ред} = 44,7$ кН·м. Полагаем, что скорость вращения турбины соответствует номинальной скорости генератора $\Omega_{ном} = \Omega_{0н} / k_{ред} = 0,66$ с⁻¹ при $k_{ред} = 11,7$. Находим удельный момент сопротивления на валу турбины от генератора $k_G = M_{ЭМ} \cdot k_{ред} / \Omega_{ном} = 67,8$ кН·м·с. Далее, согласно [8], полагаем $R_C = 0,4$ Ом; $L_d = 6$ мГн; $L_q = 5,9$ мГн; $M_{md} \cdot I_M = 0,475$ Вб.

Упрощенная модель аккумуляторной батареи в рабочем режиме разряда-заряда представляет последовательное соединение внутреннего сопротивления r_{AB} и источника напряжения U_{AB} , пропорционального текущему значению накопленного заряда Q : $U_{AB} = k_{AB} \cdot Q$, рис. 7, а [11, 12]. Ток, протекающий через батарею, характеризует скорость изменения ее заряда:

$$i_{AB} = \frac{dQ}{dt}. \quad (34)$$

Общая упрощенная схемная модель волновой электростанции принимает вид, изображенный на рис. 7, б. Здесь $J_{\Sigma}(t)$ – источник тока, равный суммарному току, подаваемому на шины постоянного напряжения от волновых установок через выпрямители:

$$J_{\Sigma}(t) = \sqrt{I_{d1}^2 + I_{q1}^2} + \sqrt{I_{d2}^2 + I_{q2}^2} + \dots + \sqrt{I_{dn}^2 + I_{qn}^2}. \quad (35)$$

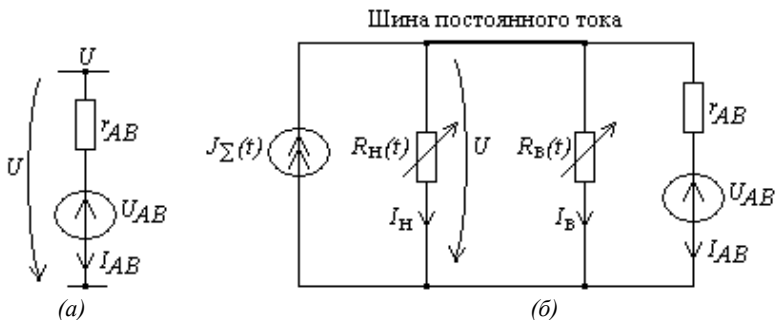


Рис. 7. Упрощенная электрическая схема волновой электростанции: схема замещения аккумуляторной батареи (а); упрощенная схема электростанции (б)

Fig. 7. Simplified electrical circuit of wave power plant: battery replacement scheme (a); simplified scheme of the power plant (b)

Из схемы понятно, что напряжение на шине постоянного тока с учетом (4) имеет вид:

$$U = \frac{R(t)}{r_{AB} + R(t)} \cdot (k_{AB}Q + r_{AB}J_{\Sigma}); \quad (36)$$

а ток аккумуляторной батареи определяется выражением $i_{AB} = (U - k_{AB}Q) / r_{AB}$. С учетом (3), (5) получаем уравнение для значения текущего заряда Q аккумуляторной батареи:

$$\frac{dQ}{dt} = \frac{U - k_{AB}Q}{r_{AB}}. \quad (37)$$

Для скорости вращательного движения турбины под действием изменяющегося момента $M(t)$ получаем:

$$J \frac{d\Omega}{dt} + k_{\Omega}\Omega + k_G\Omega = M(t), \quad (38)$$

где J – момент инерции турбины относительно оси вращения с учетом приведенного момента инерции ротора генератора; k_{Ω} – коэффициент, характеризующий момент сопротивления в зависимости от скорости вращения; $k_G\Omega$ – момент сопротивления генератора, пропорциональный скорости вращения.

Для поддержания напряжения U на шине на заданном уровне U_{zad} применяется регулирование балластного сопротивления R_B , подсоединенного параллельно сопротивлению нагрузки $R_H(t)$. Его величина уменьшается при увеличении напряжения U на шине и увеличивается в противном случае. Поэтому к вышеперечисленным (6), (7) добавляется уравнение:

$$\frac{dR_B}{dt} = -k_B(U - U_{zad}), \quad (39)$$

где U_{zad} – заданный уровень напряжения на шине постоянного тока.

Численное решение (6), (7) выполнено в среде *MathCad* при следующих принятых значениях: $J = 1,35 \cdot 10^5$ кг·м²; $k_{\Omega} = 2,32 \cdot 10^4$. Электромагнитный момент сопротивления генератора $k_G\Omega$ определяется произведением вырабатываемой мощности и скорости.

V. Расчет режима волновой электрической установки

На рис. 8 представлены полученные в результате моделирования графики ЭДС генератора, тока, мощности и энергии, передаваемых на шины постоянного напряжения.

График скорости вращения турбины для наглядности показан увеличенным в 100 раз. Как видно из рисунка, ток и мощность имеют периодический характер, при этом амплитуда тока достигает 400 А, мощности 75 кВт. В течение половины наблюдаемого времени (ниже горизонтальной пунктирной линии напряжения U) электроэнергия от генератора не поступает, так как из-за снижения скорости вращения турбины в промежутках между гребнями волн ЭДС невелика и меньше напряжения U на шинах.

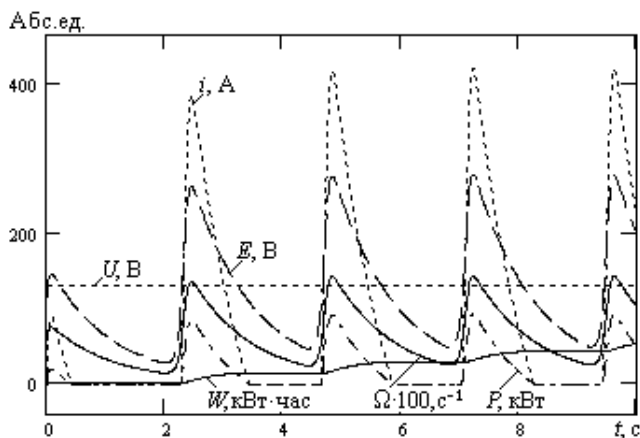


Рис. 8. Режим работы единичной волновой установки

Fig. 8. Mode of operation of a wave installation unit

Наиболее простым и одновременно эффективным способом преодоления этого обстоятельства является установка нескольких подобных волновых установок в различных точках акватории моря с устойчиво максимальными волновыми параметрами, так как мгновенная скорость волн и соответствующая скорость вращения турбин с большой вероятностью в этих точках будет различной. На рис. 9 – 10 как раз и показаны результаты моделирования работы мультиволновой электростанции, состоящей из семи установок, каждая из которых размещена в несколько отличающихся условиях волнения. В частности, кривые суммарного тока, мощности и электроэнергии, поступающих с ВЭУ на шину постоянного напряжения (рис. 9), показывают, что и ток, и мощность поступают практически непрерывно, а

их изменение определенно соответствует изменениям скорости ветра и волновой обстановки в акватории; с уменьшением скорости ветра мощность и ток ВЭУ уменьшаются, а в среднем за минуту на шины передается около полутора тысяч киловатт-часов электроэнергии.

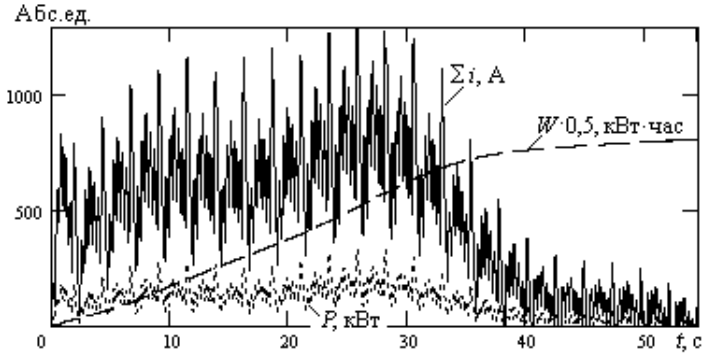


Рис. 9. Ток, мощность и энергия, поступающие с ВЭУ на шину постоянного напряжения

Fig. 9. Current, power and energy coming from wind power supply to DC bus

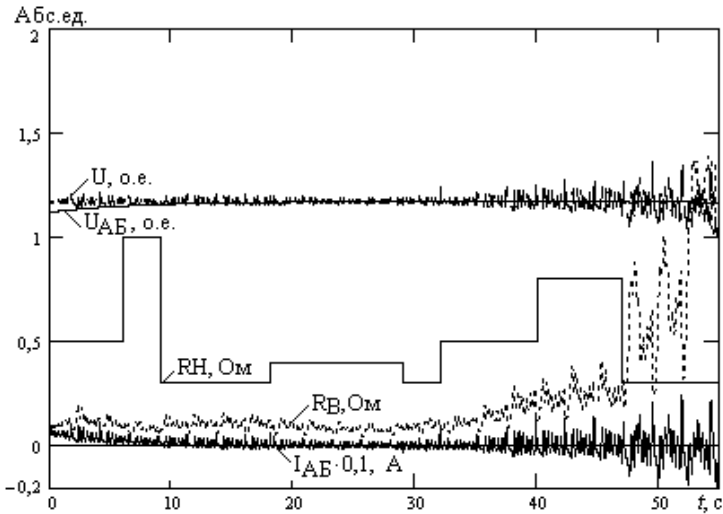


Рис. 10. Режим работы аккумулятора и балластного сопротивления

Fig. 10. Battery operation and ballast resistance mode

На рис. 10 демонстрируется случайный характер изменения сопротивления нагрузки, а также график изменения балластного сопротивления, которое в определенной мере стабилизирует напряжение на шине. Колебания этого напряжения отражают случайный характер воздействующих на турбины ВЭУ волн. При достаточном уровне волнения эти колебания незначительны; при снижении скорости ветра и снижении волнения эффективность стабилизации снижается. Ток аккумулятора испытывает увеличивающиеся колебания, что отражает интенсивный процесс заряда-разряда. Таким образом, при снижении скорости ветра и волновой нагрузки эксплуатация электростанции становится менее целесообразной.

VI. Выводы

На основе известных уравнений гидродинамики вертикальной гидротурбины, параметров волнового процесса и уравнений электрического и механического равновесия электрической части комплекса вполне возможно построить систему математического моделирования волновой электроэнергетической установки, вполне адекватно отражающую достаточно сложные процессы преобразования волновой энергии водной среды в электрическую.

Наиболее предпочтительным представляется использование в таких установках тихоходных синхронных генераторов на постоянных магнитах, не требующих систем возбуждения и отличающихся рядом важных преимуществ перед другими преобразователями при использовании в условиях открытого моря: высокой надежностью, простотой конструкции и обслуживания, автономностью и более высоким КПД.

Единичная волновая установка генерирует электроэнергию низкого качества, что объясняется предельно нестационарным, случайным характером морского волнения, а для повышения качества электроэнергии обосновано применение нескольких волновых установок в составе волновой электростанции.

© Олейников А.М., 2021

© Канов Л.Н., 2021

Поступила в редакцию 19.11.2021

Received 19.11.2021

Библиографический список

- [1] Гуц Ю.В. Волновая энергетика – перспективный сектор возобновляемых источников энергии // Строительство уникальных зданий и сооружений. 2016. № 2 (41). С. 30-44.
- [2] Князев В. Есть ли будущее у волновых электростанций? // Greenologia.ru. 2015. [Электронный ресурс]. URL: <http://greenologia.ru/ekozhizn/tehnologii/volnovyye-eklektrostancij.html> (дата обращения 20.08.2021).

- [3] Чебоксаров В.В. К вопросу о создании маятниковых волновых энергоустановок большой мощности // Энергетические установки и технологии. 2016. Т. 2. № 4. С. 69-76.
- [4] Чебоксаров В.В., Кочетов И.А. Выбор оборудования плавучих волновых энергоустановок // Энергетические установки и технологии. 2020. Т. 6. № 2. С. 58-63.
- [5] Nell S.P., Hashemi M.R. *Fundamentals of ocean renewable energy. Generating electricity from the sea.* Academic Press, 2018. – 336 p.
- [6] McDonald A., Carroll J. *Offshore wind farms. Technologies, design and operation.* Woodhead Publishing, 2016. – P. 419-440.
- [7] Олейников А.М., Канов Л.Н. Исследование режимов работы многомашинной ветроустановки с механической редукцией // Альтернативная энергетика и экология (ISJAEE). 2019. № 10-12 (294-296). С. 12-22. DOI: 10.15518/isjaee.2019.10-12.012-022
- [8] Кривцов В.С., Олейников А.М., Яковлев А.И. Неисчерпаемая энергия. Кн. 3. Альтернативная энергетика. Харьков: ХАИ; Севастополь: СевНТУ, 2006. – 625 с.
- [9] Алферьев М.Я. Гидромеханика. М.: Речной транспорт, 1961. – 327 с.
- [10] Доусон Т. Проектирование сооружений морского шельфа. Л.: Судостроение, 1986. – 288 с.
- [11] Сафонов В.А., Кузнецов П.Н., Кувшинов В.В. Специальные вопросы возобновляемой энергетики. Севастополь: Колорит, 2017. – 358 с.
- [12] Лейкин В.С. Судовые электрические станции и сети. М.: Транспорт, 1966. – 334 с.
- [13] Трещев И.И. Переходные процессы в электрических машинах переменного тока. М.: Энергия, 1980. – 342 с.
- [14] Веретенников Л.П. Переходные процессы в электроэнергетических системах кораблей. Л.: Изд-во Военно-морской академии им. Гречко А.А., 1965. – 493 с.
- [15] Балагуров В.А., Галтеев Ф.Ф. Электрические генераторы с постоянными магнитами. М.: Энергоатомиздат, 1988. – 280 с.

References

- [1] Yu.V. Gushch, “Wave energy – a promising renewable energy sector”, *Construction of Unique Buildings and Structures*, no. 2 (41), pp. 30-44, 2016.
- [2] V. Knyazev, “Estj li buduschee u vojnovykh elektrostancij? [Is there a future for wave power plants?]”, *Greenologia.ru*, 2015. [Online]. Available at: <http://greenologia.ru/ekozhizn/tehnologii/volnovye-elektrostancij.html> (Accessed: Aug. 20, 2021) (in Russian).
- [3] V.V. Cheboxarov, “On development of high capacity pendulum-type wave energy converters”, *Power Plants and Technologies*, vol. 2, no. 4, pp. 69-76, 2016.
- [4] V.V. Cheboxarov and I.A. Kochetkov, “Selection of equipment of floating wave power plants”, *Power Plants and Technologies*, vol. 6, no. 2, pp. 58-63, 2020.
- [5] S.P. Nell and M.R. Hashemi, *Fundamentals of ocean renewable energy. Generating electricity from the sea.* Academic Press, 2018.
- [6] A. McDonald and J. Carroll, *Offshore wind farms. Technologies, design and operation.* Woodhead Publishing, 2016, pp. 419-440.

- [7] A.M. Oleynikov and L.N. Kanov, "Study on the modes of operation of a multi-machine installations with mechanical reduction", *Alternative Energy and Ecology (IS-JAEE)*, no. 10-12, pp. 12-22, 2019. DOI: 10.15518/isjaee.2019.10-12.012-022
- [8] V.S. Krivtsov, A.M. Oleynikov and A.I. Yakovlev, *Neischerpaemaya energiya. Kn. 3. Alternativnaya energetika [Inexhaustible energy. Book 3. Alternative Energy]*. Kharkov: NAU "KhAI"; Sevastopol: SevNTU, 2006 (in Russian).
- [9] M.Y. Alferyev, *Gidromechanika [Hydromechanics]*. Moscow: Rechnoy transport, 1961 (in Russian).
- [10] T. Dawson, *Proektirovanie sooruzheniy morskogo shel'fa [Designing of offshore structures]*. Leningrad: Sudostroenie, 1986 (in Russian).
- [11] V.A. Safonov, P.N. Kuznetsov and V.V. Kuvshinov, *Spezialnie voprosy vobnovlyayemy energetiki [Special issues of renewable energy]*. Sevastopol: Col-omite, 2017 (in Russian).
- [12] V.S. Leykin, *Sudovie elektricheskie stantzii i set [Ship electric power stations and networks]*. Moscow: Transport, 1966 (in Russian).
- [13] I.I. Treshchev, *Perekhodnye processy v elektricheskikh mashinah peremennogo toka [Transient processes in electrical machines of alternating current]*. Moscow: Energiya, 1980 (in Russian).
- [14] L.P. Veretennikov, *Perekhodnye processy v elektroenergeticheskikh sistemah korablej [Transitional processes in the electric power systems of ships]*. Leningrad: The Naval Academy n.a. A.A. Grecko, 1965 (in Russian).
- [15] V.A. Balagurov and F.F. Galtiev, *Elektricheskie generator s postoyannimi magnitami [Electric generators with permanent magnets]*. Moscow: Energoatomizdat, 1988 (in Russian).

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Олейников Александр Михайлович, доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник Института природно-технических систем, г. Севастополь, Российская Федерация.

Alexander M. Oleynikov, D. Sci. (Eng.), professor, chief researcher of the Institute of Natural and Technical Systems, Sevastopol, Russian Federation.

Канов Лев Николаевич, кандидат технических наук, доцент Севастопольского государственного университета, г. Севастополь, Российская Федерация.

Lev N. Kanov, Cand. Sci. (Eng.), associate professor of the Sevastopol State University, Sevastopol, Russian Federation.

УДК 621.3:537.8

DOI 10.46960/2658-6754_2021_4_36

ПРЕДСТАВЛЕНИЕ ВЕКТОРА ПОЙНТИНГА ЧЕРЕЗ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Е.Н. Меньшов

Ульяновский государственный технический университет

Ульяновск, Россия

ORCID: 0000-0003-2668-9603 e-mail: raynd2@rambler.ru

Обоснована формула расчета вектора Пойнтинга через произведение приложенного напряжения и плотности эквивалентного тока. Показана полезность такой формулы на примере получения положительного решения фундаментальной задачи, в которой в рамках классической теории установлена эквивалентность между электромагнитной массой и инерционной массой электрона. Установлено граничное условие для энергии электрического поля на поверхности области объемного заряда.

Ключевые слова: напряженность электрического поля, ток смещения, электрический потенциал, электромагнитный импульс, инерционная масса, энергия электрического поля.

Для цитирования: Меньшов Е.Н. Представление вектора Пойнтинга через электрические характеристики электротехнических систем // Интеллектуальная электротехника. 2021. № 4. С. 36-46. DOI: 10.46960/2658-6754_2021_4_36

REPRESENTATION OF THE POYNTING VECTOR VIA ELECTRICAL CHARACTERISTICS OF ELECTRICAL SYSTEMS

E.N. Menshov

Ulyanovsk State Technical University

Ulyanovsk, Russia

ORCID: 0000-0003-2668-9603 e-mail: raynd2@rambler.ru

Abstract. The formula for calculating the Poynting vector through the product of the applied voltage and the equivalent current density is substantiated. The usefulness of such a formula is shown by the example of obtaining a positive solution to a fundamental problem in which, within the framework of classical theory, the equivalence between the electromagnetic mass and the inertial mass of an electron is established. The boundary condition for the electric field energy on the surface of the volume charge region is established.

Keywords: electric field strength, displacement current, electric potential, electromagnetic pulse, inertial mass, the energy of the electric field.

For citation: E.N. Menshov, “Representation of the Poynting vector through electrical characteristics of electrical systems”, *Smart Electrical Engineering*, no. 4, pp. 36-46, 2021. DOI: 10.46960/2658-6754_2021_4_36

I. Введение

При анализе и математическом моделировании электротехнических систем с распределенными параметрами при повышенных требованиях к точности и адекватности приходится обращаться к полевым задачам [1-4]. В частности, при исследовании трансформаторов, электрических машин, линий электропередач основной внутренней характеристикой процессов передачи электромагнитной энергии выступает вектор Пойнтинга – плотность мощности, переносимой через нормальное плоское сечение единичной площади $\vec{\Pi}$, Вт/м²:

$$\vec{\Pi} = \vec{E} \times \vec{H}, \quad (1)$$

где \vec{E} – напряженность электрического поля, В/м; \vec{H} – напряженность магнитного поля, А/м.

С помощью вектора Пойнтинга можно рассчитывать активную и реактивную мощности, исследовать их распределения в любом месте электротехнических систем, в том числе, в движущихся элементах электрических машин, также можно выявлять характер проникновения электромагнитной энергии сквозь экранирующие элементы при различных режимах работы системы. В [2-4] вектор Пойнтинга выступает инструментом уточнения физического механизма функционирования электротехнических систем.

Однако обращаться непосредственно к характеристикам электромагнитного поля \vec{E} , \vec{H} не всегда удобно.

Целью настоящей работы является обоснование формулы расчета модуля вектора Пойнтинга через интегральные величины, характеризующие электрическое состояние электротехнической системы с распределенными параметрами и демонстрация ее методологической роли.

II. Определение вектора Пойнтинга через приложенное к системе напряжение

Единицу измерения вектора Пойнтинга представим в виде произведения единиц измерения напряжения и плотности тока:

$$[\vec{\Pi}] = \left[\frac{B \cdot A}{M^2} \right] = [B] \cdot \left[\frac{A}{M^2} \right]. \quad (2)$$

Таким образом, на основе (2) формально можно выразить вектор Пойнтинга через произведение некоторого напряжения U и некоторого вектора плотности тока \vec{J} :

$$\vec{\Pi} = U \cdot \vec{J}. \quad (3)$$

При этом направление плотности тока должно совпадать с направлением вектора Пойнтинга.

Для установления физического смысла электрических величин в (3) обратимся к характерным примерам вычисления прохождения электромагнитной энергии от источника к потребителю через линию коаксиальной конструкции (рис. 1). Электромагнитная энергия, передаваемая от источника к потребителю, канализируется по диэлектрику. Детальный расчет вектора $\vec{\Pi}$ и передаваемой мощности потребителю в приближении идеальных проводников приведен в учебной литературе [5-6].

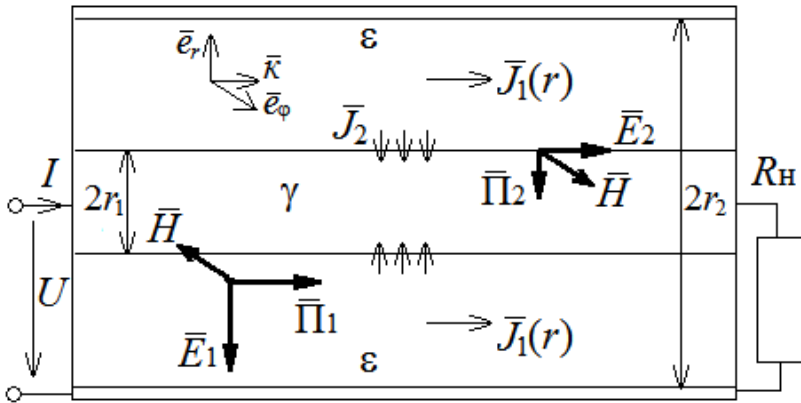


Рис. 1. Линия передачи электроэнергии коаксиальной конструкции
Fig. 1. Electric power transmission line of coaxial design

Воспользуемся готовыми выражениями напряженностей магнитного и электрического полей в диэлектрике:

$$\vec{H} = \frac{I \cdot \vec{e}_\varphi}{2\pi \cdot r}; \quad \vec{E} = \frac{U \cdot \vec{e}_r}{r \cdot \ln \frac{r_2}{r_1}},$$

где I – сила тока в линии, U – приложенное к линии напряжение, r – текущее радиальное расстояние от оси симметрии, r_2 и r_1 – наружный и внутренний радиусы цилиндрического слоя диэлектрика, \vec{e}_φ и \vec{e}_r – азимутальный и радиальный орты цилиндрической системы координат.

Выразим продольный вектор Пойнтинга (1) в форме (3) и получим:

$$\left[\vec{\Pi}_1 \right] = U \cdot \frac{I \cdot \vec{k}}{2\pi \cdot r^2 \cdot \ln \frac{r_2}{r_1}}; \vec{J}_1(r) = \frac{I \cdot \vec{k}}{2\pi \cdot r^2 \cdot \ln \frac{r_2}{r_1}}; \int_{S_{12}} \vec{J}_1(r) \cdot d\vec{s} = I,$$

где $\vec{J}_1(r)$ – вектор плотности эквивалентного тока в области $r_1 \leq r \leq r_2$, \vec{k} – аксиальный орт цилиндрической системы координат, S_{12} – площадь сечения области диэлектрика.

В случае, если жила обладает конечной проводимостью γ , то часть электромагнитной энергии будет входить из диэлектрика в жилу через её боковую поверхность для покрытия потерь энергии, обусловленных прохождением тока I через жилу.

Используя готовое выражение поперечного вектора Пойнтинга, приведем его к форме (3):

$$\left[\vec{\Pi}_2 \right] = \frac{-I^2 \cdot \vec{e}_r}{2\pi \cdot r_1 \cdot \pi \cdot r_1^2 \cdot \gamma} = U_{\text{пр}} \cdot \vec{J}_2,$$

где $U_{\text{пр}} = R_{\text{пр}} \cdot I$ – падение напряжения на жиле, $R_{\text{пр}} = l / \gamma \cdot \pi \cdot r_1^2$ – активное сопротивление жилы длиной l , $\vec{J}_2 = -\vec{e}_r \cdot I / 2 \cdot \pi \cdot R_1 \cdot l$ – плотность эквивалентного тока, входящего в проводник через боковую поверхность жилы. Очевидно, $(-\vec{e}_r \cdot 2 \cdot \pi \cdot R_1 \cdot l \cdot \vec{J}_2) = I$.

Утверждение 1. Вектор Пойнтинга можно выразить через произведение приложенного напряжения к системе (или к её участку) на вектор плотности эквивалентного тока, совпадающего по направлению с вектором Пойнтинга и удовлетворяющего условию, что полный поток вектора плотности эквивалентного тока должен быть равен исходному физическому току.

III. Методологическое значение метода расчета вектора Пойнтинга через электротехнические величины

Раскрытый метод расчета вектора Пойнтинга может быть использован для снятия трудностей в задачах теоретической электротехники, физической электротехники и классической теории электромагнитного поля.

В классической теории поля введено понятие классического радиуса электрона r_0 из допущения, что вся масса электрона обусловлена массой создаваемого им поля, которая вычисляется из эквивалентности полной энергии электрона $m\epsilon^2$ и энергии электростатического поля [7-8]:

$$W_0 = q \cdot \varphi(r_0). \quad (4)$$

В приближении точечного заряда электрона q , Кл его потенциал на расстоянии r_0 определяется выражением:

$$\varphi(r_0) = \frac{q}{4 \cdot \pi \cdot \varepsilon_0 \cdot r_0}. \quad (5)$$

В результате формула расчета r_0 имеет следующий вид:

$$r_0 = \frac{q \cdot q}{4 \cdot \pi \cdot \varepsilon_0 \cdot m_{\text{э}} \cdot c^2}, \quad (6)$$

где ε_0 – электрическая постоянная, Ф/м; $m_{\text{э}}$ – масса покоящегося электрона; c – скорость света, м/с.

В современной физике поля этот радиус играет фундаментальную роль и понимается как минимальный размер области пространства, в котором можно пользоваться соотношениями классической теории поля – являясь пределом применимости её понятий.

Однако для оценки импульса движущегося конечно размерного электрона при малых скоростях ($v/c \ll 1$) на основе расчета импульса электромагнитного поля через вектор Пойнтинга по (1) с учетом ограничения (6) оказалось, что необходимо используется только часть массы электрона, названной электромагнитной массой [8]:

$$m_{\text{эм}} = \frac{2}{3} m_{\text{э}}.$$

Это обусловлено тем, что в (1) учитывается только часть полной электромагнитной энергии конечно размерного электрона.

Действительно, на основе классического (7) для расчета электрической энергии поля [5-8], где ρ – объемная плотность электрического заряда, Кл/м³:

$$W = \varepsilon_0 \cdot \int_V \frac{E^2}{2} dV = \int_V \frac{\rho\varphi}{2} dV, \quad (7)$$

следует, что в левой части представлена энергия, рассредоточенная по всему объему пространства. Правая часть дает одинаковый численный результат, но по смыслу энергия должна быть сосредоточена в ограниченной области – в области распределенного заряда.

Если электрон занимает конечный объем V_3 , то объем интегрирования разделим на две части $V = V_3 + V_{\Pi}$ и (7) примет следующий вид:

$$W = \varepsilon_0 \cdot \int_{V_3} \frac{E_1^2}{2} dV + \varepsilon_0 \cdot \int_{V_{\Pi}} \frac{E_2^2}{2} dV = \int_{V_3} \frac{\rho\varphi}{2} dV, \quad (8)$$

где V_{Π} – внешний по отношению к электрону объем, который занят полем с напряженностью \vec{E}_2 , а \vec{E}_1 есть напряженность электрического поля в области распределенного заряда, сосредоточенного в объеме V_3 .

Выделяя из (8) энергию поля во внешней области, получим следующее уравнение:

$$W_2 \equiv \varepsilon_0 \cdot \int_{V_{\Pi}} \frac{E_2^2}{2} dV = \int_{V_3} \frac{\rho\varphi}{2} dV - \varepsilon_0 \cdot \int_{V_3} \frac{E_1^2}{2} dV \equiv W - \varepsilon_0 \cdot \int_{V_3} \frac{E_1^2}{2} dV, \quad (9)$$

в котором правая часть по смыслу учитывает только энергию взаимодействия между элементами заряда, находящимися во внутренней области.

Утверждение 2. Из физического смысла (9) следует, что оно представляет собой граничное условие для энергии электростатического поля, которое гласит: на поверхности раздела областей сосредоточения заряда и поля энергия поля, рассредоточенная вне области заряда равна собственной энергии взаимодействия между элементами заряда.

Заметим, что утверждение 2 согласуется с граничным условием для электростатического потенциала.

Используя теорему Гаусса, например, при равномерном распределении ρ энергия внешнего поля принимает значение:

$$W_2 = \varepsilon_0 \cdot \int_{V_{\Pi}} \frac{E_2^2}{2} dV = \frac{q^2}{8\pi \cdot \varepsilon_0 \cdot r_0}, \quad (10)$$

а собственная энергия зарядов W_3 , в соответствии с (6) принимает следующее значение:

$$W_3 = \frac{q^2}{8\pi \cdot \varepsilon_0 \cdot r_0} = \frac{\varphi(r_0) \cdot q}{2}. \quad (11)$$

В (10), (11) использовалось следующее выражение:

$$q = \int_V \rho dV.$$

Чтобы удовлетворить условию (5), результирующая энергия должна учитывать энергию внешнего электрического поля и собственную энергию заряда:

$$W_{\Sigma} = W_2 + W_3 = \varphi(r_0) \cdot q. \quad (12)$$

И если электрон рассматривать как электромагнитную структуру, то при составлении вектора Пойнтинга необходимо учитывать мощность потока и этой структуры $\vec{\Pi}_3$, тогда результирующий вектор Пойнтинга примет следующий вид:

$$\vec{\Pi}_{\Sigma} = \vec{E}_2 \times \vec{H}_2 + \vec{\Pi}_3.$$

Вектор Пойнтинга $\vec{\Pi}_3$ электромагнитной структуры электрона неизвестен, поэтому используем (3) и получим:

$$\vec{\Pi}_3 = \vec{J} \cdot (\varphi(r_0) - \varphi(\infty)) = \vec{J} \cdot \varphi(r_0), \quad (13)$$

так как $\varphi(\infty) = 0$, а $\varphi(r_0)$ потенциал на поверхности конечно размерного электрона.

Согласно критериям сформулированного *утверждения 1* вектор плотности тока в (13) должен совпадать с направлением вектора Пойнтинга и, соответственно, с вектором скорости равномерного перемещения электрона. Из двух типов токов – конвекционного (тока перемещающегося заряда) и тока смещения, с вектором Пойнтинга совпадает первый, так как ток смещения противоположный первому (обеспечивает условие непрерывности).

Конвекционный ток задается следующей формулой:

$$\vec{J} = \rho \cdot \vec{v}, \quad (14)$$

где \vec{v} – вектор скорости.

Вычислим электромагнитный импульс электрона на основе использования (13) – (14) и с учетом (4) – (6):

$$\vec{G} = \int_V \frac{\vec{\Pi}_3}{c^2} dV = \frac{\varphi(r_0) \cdot \vec{v}}{c^2} \int_V \rho dV \equiv m_3 \vec{v}. \quad (15)$$

Таким образом, электромагнитный импульс полностью совпал с механическим импульсом электрона, а предложенная методика расчета вектора Пойнтинга позволила снять противоречие несоответствия электромагнитной массы механической массе.

При выводе выражений для расчета электромагнитного импульса использовалось электростатическое приближение, которое оправдано при малых скоростях. Аналогичное приближение использовал Р. Фейнман [8]. Корректность использованных допущений представлена в приложении, в котором при помощи методики операторного преобразования волновых уравнений поля при равномерном движении заряженной частицы, разработанной в [9], получены корректные выражения для \vec{E} и \vec{H} .

IV. Заключение

1. Обоснована формула расчета вектора Пойнтинга через произведение приложенного напряжения и вектора плотности эквивалентного тока, направление которого совпадает с вектором Пойнтинга и удовлетворяет условию, что полный поток вектора плотности эквивалентного тока должен быть равен исходному физическому току.

2. Показана полезность такой формулы на примере получения положительного решения фундаментальной задачи, в которой в рамках классической теории установлена эквивалентность между электромагнитной массой и инерционной массой электрона.

3. Установлено граничное условие для энергии электрического поля на поверхности ограниченной области объемного заряда.

Приложение. Представление характеристик ЭМП через потенциальную составляющую электрического поля.

Применив к волновым уравнениям для \vec{E} и \vec{H} обратный к оператору Даламбера оператор \square^{-1} , получим:

$$\vec{H} = -\text{rot}\square^{-1}\vec{j} = -\text{rot}(\vec{v}\square^{-1}\rho) = [\vec{v}\text{grad}(\square^{-1}\rho)], \quad (16)$$

$$\vec{E} = \square^{-1}(\mu_0\partial\vec{j}/\partial t + \text{grad}\rho/\epsilon_0) = \text{grad}(\square^{-1}\rho/\epsilon_0) - \mu_0\vec{v}(\vec{v}\text{grad}(\square^{-1}\rho)), \quad (17)$$

где $\square = \Delta - c^{-2}\partial^2/\partial t^2$ – волновой оператор Даламбера ($\square^{-1}\square = 1$, [9]).

В (16) и (17) в квадратных скобках есть векторное произведение, а в круглых скобках – скалярное произведение двух векторов. Используя (14) и уравнение непрерывности тока в дифференциальной форме при условии $\vec{v} = \text{const}$, имеем:

$$\partial\vec{j}/\partial t = \vec{v}\partial\rho/\partial t = -\vec{v}\text{div}(\rho\vec{v}) = -\vec{v}(\vec{v}\text{grad}\rho).$$

Обозначим потенциальную составляющую электрического поля через \vec{E}_φ и выразим её через скалярный потенциал:

$$\vec{E}_\varphi = -\text{grad } \varphi = \text{grad} (\square^{-1} \rho / \epsilon_0), \quad (18)$$

который соответствует волновому уравнению $\square \varphi = -\rho / \epsilon_0$.

Подставляя (18) в (17) и (16) соответственно, приходим к следующим выражениям напряженностей ЭМП:

$$\vec{E} = \vec{E}_\varphi - c^2 \vec{v} \cdot (\vec{v} \cdot \vec{E}_\varphi); \quad \vec{H} = \epsilon_0 [\vec{v} \cdot \vec{E}_\varphi].$$

Вектор Пойнтинга примет следующий вид:

$$\begin{aligned} \vec{\Pi} &= [\vec{E} \cdot \vec{H}] = \epsilon_0 [\vec{v} \cdot \{(E_\varphi)^2 - c^2 (\vec{v} \cdot \vec{E}_\varphi)^2\} - \vec{E}_\varphi (\vec{v} \cdot \vec{E}_\varphi) \cdot \{1 - (vc^{-1})^2\}] = \\ &= \epsilon_0 v (E_\varphi)^2 \cdot \{(\vec{e}_v - \cos\theta \vec{e}_E) - (vc^{-1})^2 \cdot \cos\theta \cdot (\cos\theta \vec{e}_v - \vec{e}_E)\}, \end{aligned} \quad (19)$$

где \vec{e}_E – единичный вектор, совпадающий с вектором \vec{E}_φ . Представим вектор \vec{E}_φ в виде суммы двух взаимно перпендикулярных векторов:

$$\vec{E}_\varphi = E_\varphi \cdot \cos\theta \vec{e}_v + E_\varphi \cdot \sin\theta \vec{e}_\perp(\psi) = \vec{E}_{\varphi v} + \vec{E}_{\varphi \perp}, \quad (20)$$

где \vec{e}_v – единичный направляющий вектор скорости \vec{v} ; ψ – азимутальная переменная; $\vec{e}_\perp(\psi)$ – единичный вектор, перпендикулярный направлению скорости движения заряда; θ – угол между векторами \vec{E}_φ и \vec{v} . Подставив (20) в (19), получим конечное выражение вектора Пойнтинга:

$$\vec{\Pi} = \epsilon_0 v (E_\varphi)^2 \cdot [\sin^2\theta \vec{e}_v - \{1 - (vc^{-1})^2\} \cdot \sin\theta \cdot \cos\theta \cdot \vec{e}_\perp]. \quad (21)$$

Подставляя (21) в (15) и учитывая то, что интеграл от второго слагаемого (21) равен нулю в силу симметрии поля относительно прямолинейной траектории, получим строгую формулу расчета импульса равномерно движущейся заряженной частицы:

$$\vec{G} = \int_V \frac{\vec{P}}{c^2} dV = \frac{\varepsilon_0 \vec{v}}{c^2} \int_V E_\varphi^2 \sin^2 \theta dV. \quad (22)$$

Формула (22) по форме совпадает с электростатическим предположением Р. Фейнмана [8]. Погрешность применения к (22) электростатического приближения определяется отношением модулей напряженностей электрических полей (при совмещении начала системы отсчета с заряженной частицей в момент времени $t = 0$):

$$\frac{E_{ст}}{E_\varphi} = \left[1 - \left(\frac{v}{c} \right)^2 \frac{x^2 + y^2}{x^2 + y^2 + z^2} \right] \cdot \left[1 - \left(\frac{v}{c} \right)^2 \right]^{-\frac{1}{2}}.$$

© Меньшов Е.Н., 2021

Поступила в редакцию 29.11.2021

Received 29.11.2021

Библиографический список

- [1] Туровский Я. Техническая электродинамика. М.: Энергия, 1974. – 488 с.
- [2] Шелест С.Н., Федоров В.К., Рысев Д.В., Федорова М.В., Нестеров Д.О., Мазепа А.М. Эффект вырождения вектора Умова – Пойнтинга в режимах детерминированного хаоса электроэнергетических систем // Матер. VIII межд. науч.-техн. конф. «Динамика систем, механизмов и машин». Омск: ОмГТУ, 2012. С. 200-202.
- [3] Малыгин В.М. Локализация потока энергии в трансформаторе (по поводу статьи М.А. Шакирова, «Электричество», 2014, № 9 и 10) // Электричество. 2015. № 4. С. 60-65.
- [4] Шакиров М.А. Вектор Пойнтинга и новая теория трансформаторов. Часть 4. «Анатомия» трансформатора // Электричество. 2017. № 3. С. 37-49.
- [5] Бессонов Л.А. Теоретические основы электротехники. Электромагнитное поле. М.: Юрайт, 2014. – 317с.
- [6] Демирчян К.С., Нейман Л.Р., Коровкин Н.В., Чечурин В.Л. Теоретические основы электротехники. Т 3. С-Пб.: Питер, 2006. – 377 с.
- [7] Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Теоретическая физика. Теория поля. В 10 т. Том II. 8-е изд. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2003. – 536 с.
- [8] Фейнман Р., Лейтон Р., Сэндс М. Фейнмановские лекции по физике. Том 4. Электродинамика. М.: Изд-во АСТ, 2020. – 352 с.
- [9] Меньшов Е.Н. Метод анализа ЭМП равномерно движущегося заряда на основе модели Максвелла // Тр. межд. конф. «КЛИН-2004 «Схемно-топологические модели активных электрических цепей: синтез, анализ, диагностика», г. Ульяновск, 18-20 мая 2004. Ульяновск: УлГТУ, 2004. Том 4. С. 97-102.

References

- [1] Ya. Turovsky, *Tekhnicheskaya elektrodinamika [Technical Electrodynamics]*. Moscow: Energiya, 1974 (in Russian).
- [2] S.N. Shelest, V.K. Fedorov, D.V. Rysev, M.V. Fedorova, D.O. Nesterov and A.M. Mazepa, “Effekt vyrozhdeniya vektora Umova – Poyntinga v rezhimakh determinirovannogo haosa elektroenergeticheskikh sistem [The effect of degeneration of the Umov – Poynting vector in the modes of deterministic chaos of electric power systems]”, in proc. *VIII Int. scient. and techn. conf. “Dinamika sistem, mekhanizmov i mashin [Dynamics of systems, mechanisms and machines]”*, 2012, Omsk, Russia. Omsk: OmSTU, pp. 200-202, 2012 (in Russian).
- [3] V.M. Malygin, “Location of the energy flux in the transformer (by M.A. Shakariav article, «Elasticity»», 2014, Nos 9, 10)”, *Elektrichestvo*, no. 4, pp. 60-65, 2015.
- [4] M.A. Shakirov, “The Poynting vector and a new theory of transformers. Part 4. Transformer anatomy”, *Elektrichestvo*, no. 3, pp. 37-49, 2017.
- [5] L.A. Bessonov, *Teoreticheskie osnovy elektrotehniki. Elektromagnitnoe pole [Theoretical foundations of electrical engineering. Electromagnetic field]*. Moscow: Yurayt, 2014 (in Russian).
- [6] K.S. Demirchyan, L.R. Neiman, N.V. Korovkin and V.L. Chechurin, *Teoreticheskie osnovy elektrotehniki [Theoretical foundations of electrical engineering]*, vol. 3. St. Petersburg: Peter, 2006 (in Russian).
- [7] L.D. Landau and E.M. Lifshits, *Teoreticheskaya fizika. Teoriya polya [Theoretical Physics. Field Theory]*, vol. II, 8th ed. Moscow: FIZMATLIT, 2003 (in Russian).
- [8] R. Feynman, R. Leighton and M. Sands, *Fejnmanovskie lektsii po fizike. Tom 4. Elektrodinamika [Feynman lectures on physics. Vol. 4. Electrodynamics]*. Moscow: AST Publishing House, 2020 (in Russian).
- [9] E.N. Menshov, “Metod analiza EMP ravnomerno dvizhushchegosya zaryada na osnove modeli Maksvella [Method of analysis of the EMF of a uniformly moving charge based on the Maxwell model]”, in proc. *Int. conf. “KLIN-2004 “Skhemno-topologicheskie modeli aktivnykh elektricheskikh cepej: sintez, analiz, diagnostika» [Circuit-topological models of active electrical circuits: synthesis, analysis, diagnostics]”*, May 18-20, 2004, Ulyanovsk, Russia. Ulyanovsk: UISTU, vol. 4, pp. 97-102, 2004 (in Russian).

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ
INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Меньшов Евгений Николаевич, доктор технических наук, доцент Ульяновского государственного технического университета, г. Ульяновск, Российская Федерация.

Eugene N. Menshov, D. Sci (Eng.), associate professor of the Ulyanovsk State Technical University, Ulyanovsk, Russian Federation.

УДК 620.92: 338.51

DOI 10.46960/2658-6754_2021_4_47

ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ГИБРИДНОГО ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА НА ОСНОВЕ ВОДОРОДА

Р.Ш. Бедретдинов

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева
Нижний Новгород, Россия

ORCID: 0000-0003-0767-1096 e-mail: bedretdinov@nntu.ru

На современном этапе развития электроэнергетики особое внимание уделяется разработке и исследованию новых эффективных источников энергии. Для удаленных автономных систем электроснабжения перспективным является применение водородных топливных элементов. В статье проведены исследования экономической эффективности применения водородных источников для электроснабжения удаленных потребителей энергии. Выполнен сравнительный анализ различных способов получения водорода с точки зрения удельного расхода энергоресурсов и выбросов углекислого газа. Проведена оценка стоимости энергоресурсов, удельных капиталовложений для производства водорода и стоимости транспорта водородного топлива. Выполнена оценка стоимости электроэнергии от гибридного источника энергии по показателю *LCOE (levelised cost of energy)*. Определены факторы, влияющие на стоимость электроэнергии от водородного источника энергии, и выделены направления для снижения ее себестоимости.

Ключевые слова: водородный топливный элемент, гибридный энергетический комплекс, стоимость электрической энергии, удаленные автономные системы электроснабжения, *LCOE*.

Для цитирования: Бедретдинов, Р.Ш. Экономическая оценка эффективности применения гибридного энергетического комплекса на основе водорода // Интеллектуальная электротехника. 2021. № 4. С. 47-58.

DOI: 10.46960/2658-6754_2021_4_47

APPLICATION EFFECTIVENESS ECONOMIC ASSESSMENT OF HYBRID ENERGY COMPLEX BASED ON HYDROGEN

R.Sh. Bedretdinov

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

ORCID: 0000-0003-0767-1096 e-mail: bedretdinov@nntu.ru

Abstract. At the present stage of electric power industry development, special attention is being paid to the development and research of new efficient energy sources. The use of hydrogen fuel cells is promising for remote autonomous power supply systems. Economic efficiency studies of hydrogen sources application for remote consumers power supply have been conducted. A comparative analysis of various methods for producing hydrogen from the standpoint of specific energy consumption and carbon dioxide emissions is performed. An estimate of the energy resources cost, the specific investments for hydrogen production and the cost of transporting hydrogen fuel is provided. The cost estimation of the electric power generation by the hybrid energy complex has been carried out based on LCOE (levelised cost of energy). The factors influencing the electricity cost from a hydrogen energy source are determined, and directions for reducing its cost are identified.

Keywords: cost of electricity, hybrid energy complex, hydrogen fuel cells, LCOE, remote autonomous power supply systems.

For citation: R.Sh. Bedretdinov, “Application effectiveness economic assessment of hybrid energy complex based on hydrogen”, *Smart Electrical Engineering*, no. 4, pp. 47-58, 2021. DOI: 10.46960/2658-6754_2021_4_47

I. Введение

Глобальными трендами современной электроэнергетики являются декарбонизация и децентрализация производства электроэнергии, направленные на повышение экологичности, надежности и качества электроснабжения потребителей [1, 2]. Ключевыми преимуществами топливных элементов являются более высокая энергетическая эффективность за счет отсутствия промежуточных стадий преобразования энергии (электрический КПД до 70 %), отсутствие вредных выбросов, отсутствие шума, надежность (отсутствие движущихся частей) [3].

Водородные топливные элементы уже широко применяются в транспортной отрасли, космической сфере и т.д. [4, 5]. Однако для ускорения развития технологий их создания и снижения стоимости производства актуальным является расширение областей применения энергоустановок на их основе.

Для автономных систем электроснабжения удаленных потребителей малой мощности широко используются дизельные установки, серьезными проблемами которых являются низкая эффективность и надежность, необходимость частого обслуживания, загрязняющее воздействие на окружающую среду, шум и вибрация. Водородные топливные элементы являются перспективными источниками для питания удаленных потребителей малой мощности, устраняющими данные проблемы.

Однако недостатками топливных элементов являются низкая скорость протекания химических реакций, мягкая внешняя характеристика и

недопустимость резких бросков нагрузки [6]. Эти проблемы могут быть решены путем комбинированного использования топливных элементов с системой накопления и преобразователями электроэнергии в едином энергетическом комплексе. В [7] предложен вариант построения гибридного энергетического комплекса (ГЭК) на основе водорода. Внедрение ГЭК требует решения ряда вопросов, в том числе и экономических.

Целью исследования является анализ экономической эффективности применения ГЭК на основе водородных топливных элементов для электрообеспечения удаленных потребителей.

II. Факторы, влияющие на стоимость электроэнергии, вырабатываемой гибридным энергетическим комплексом

На стоимость единицы электрической энергии, вырабатываемой ГЭК, влияют следующие факторы:

- стоимость водорода (цена водорода может варьироваться в зависимости от страны-производителя и цен на ископаемое топливо в ней, способ получения водорода (паровая конверсия углеводородов, газификация твердых топлив, термохимическое разложение воды при использовании энергии высокотемпературного газоохлаждаемого реактора (ВТГР), электролиз воды), его транспортировки (по трубопроводу или в баллонах), состояния (сжатый или сжиженный)); способы получения водорода отличаются объемом затрат на электрическую энергию, H_2O , природный газ и другое, также для каждого способа получения H_2 характерен различный объем выбросов CO_2 ;
- мощность водородной установки, коэффициент ее загрузки и расход топлива;
- стоимость затрат на оплату выбросов парниковых газов и утилизацию водородной установки после окончания срока ее эксплуатации.

В табл. 1 приведен сравнительный анализ различных способов получения водорода с позиции удельного расхода энергоресурсов и выбросов углекислого газа [8, 9].

Для получения сжиженного водорода необходимо затратить в 3-7 раз большее количество электроэнергии, чем для получения сжатого газообразного водорода. При этом также увеличиваются выбросы CO_2 .

В табл. 2 приведена оценка стоимости энергоресурсов, удельных капиталовложений для производства водорода и стоимости транспорта водородного топлива [8-11].

Изменение стоимости производства сжатого водорода для различных технологий в зависимости от объема производства водорода показано на рис. 1 и 2 [8, 12, 13].

Таблица 1.
Сравнительный анализ различных способов получения сжатого водорода

Table 1.
Comparative analysis of various methods for producing compressed hydrogen

Технология получения H ₂	Расход энергоресурсов на 1 кг H ₂					Выбросы CO ₂ на 1 кг H ₂ , кг
	природный газ, м ³	уголь, кг	H ₂ O, кг	электрическая энергия, кВт·ч	тепловая энергия, кВт·ч	
Паровая конверсия метана	5-5,5	-	4-4,5	0,7-0,9	-	9,5
Газификация угля	-	7-7,5	9	0,7-0,8	-	21
Термохимическое разложение воды на базе ВТГР	-	-	9-20	2-2,5	60-65	1,7
Электролиз (от электрической сети)	-	-	9	55-60	-	41,1
Электролиз (от ветровых установок)	-	-	9	55-60	-	-
Электролиз (от солнечных установок)	-	-	9	55-60	-	-

Таблица 2.
Оценка стоимости затрат на производство водорода

Table 2.
Cost value estimation of hydrogen production

Наименование	Значение
1	2
Цены энергоносителей	
Природный газ, USD/тыс. м ³	111
Уголь, USD/т	112
Электроэнергия от централизованного источника, USD/кВт·ч	0,05
Удельные капиталовложения во вспомогательные источники энергии	
ВТГР, USD/кВт (тепловой мощности)	500
Солнечные электростанции, USD/кВт	1000
Ветровые электростанции, USD/кВт	500
Удельные капиталовложения в элементы технологии производства водорода	
Электролизер, USD/кВт	740
Установка для реформинга метана, USD/кг H ₂	25-30

Окончание табл. 2
Table 2 (ending).

Наименование	Значение
1	2
Водородный компрессор, $USD/kВт$	2000
Установка по сжижению H_2 , $USD/kg H_2/сут.$	1100
Стоимость транспорта водорода на 100 км	
По трубопроводу в сжатом виде, USD/kg	0,09
Автомобилем в сжиженном виде в криогенных цистернах, USD/kg	0,04

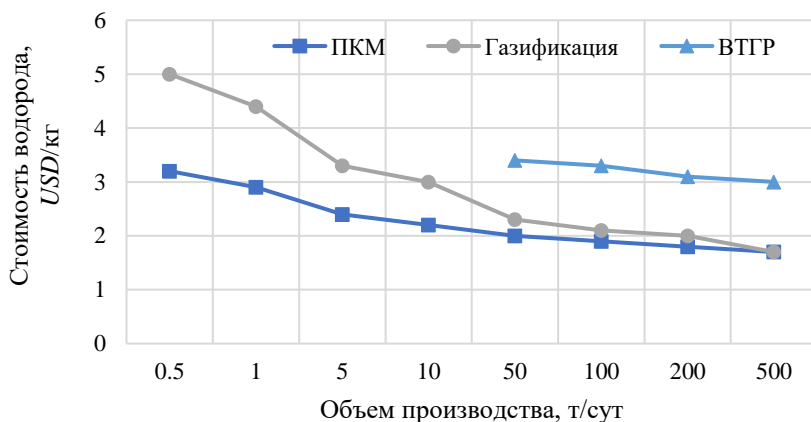


Рис. 1. Стоимость производства водорода для технологий паровой конверсии метана (ПКМ), газификации угля и термохимического разложения воды с использованием ВТГР

Fig. 1. Cost of hydrogen production for steam methane reformation (SMR) technologies, coal gasification and thermochemical water decomposition using high temperature gas cooled reactor

Таким образом, наиболее дешевым способом для широкого диапазона объема производства водорода является метод паровой конверсии метана (ПКМ). Он обеспечивает получение водорода по стоимости от 3 $USD/kg H_2$ при малых производительностях установок и до 1,7 $USD/kg H_2$ при очень высоких производительностях. Ему сильно уступает способ получения водорода методом газификации угля при малых производительностях, хотя при высоких производительностях угольный вариант практически оказывается равноэкономичным с методом ПКМ. Метод термохимичес-

ского разложения воды на базе ВТГР применим только при производительностях более 35-50 т H_2 /сут. Стоимость водорода при этом оказывается не ниже 3 USD/kg H_2 . Производство водорода на базе электролиза значительно уступает по стоимостным показателям рассмотренным ранее методам.

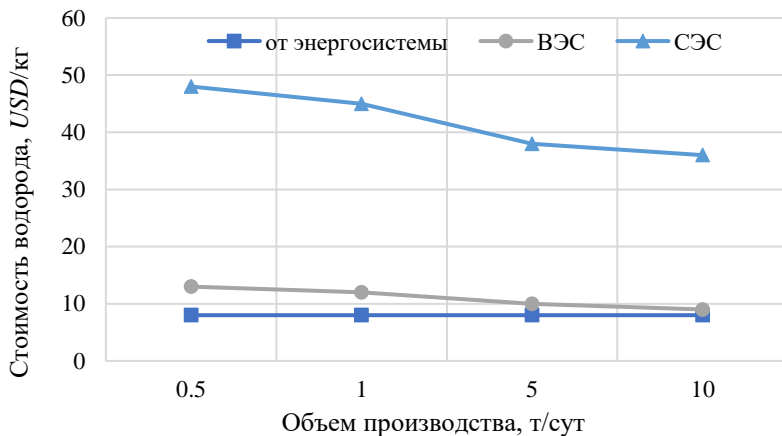


Рис. 2. Стоимость производства сжатого водорода для технологий электролиза воды на базе электроэнергии от электрической сети и возобновляемых источников энергии

Fig. 2. Cost of producing compressed hydrogen for water electrolysis technologies based on electric energy from the network and renewable energy sources

Стоимость электролитического водорода оказывается намного выше: от 7-8 USD/kg H_2 при работе на электроэнергии от энергосистемы, 9-13 USD/kg H_2 при получении электроэнергии от ветровых электростанций и 35-50 USD/kg H_2 при использовании в качестве источника электроэнергии фотоэлектрических преобразователей.

Удельная стоимость транспортировки водорода показана на рис. 3. Сжижение водорода позволяет сократить затраты на перевозку в 2-5 раз по сравнению с вариантом сжатого водорода. Как и в производстве водорода, стоимость транспорта будет зависеть от темпов развития технологий и снижения затрат [14].

Сравнение результатов оценки стоимости водорода, полученных отечественными учеными, с данными зарубежных публикаций приведено в табл. 3. По большинству технологий значения итоговой стоимости водорода, рассчитанные зарубежными исследователями, являются более оптимистичными [8, 10, 14].

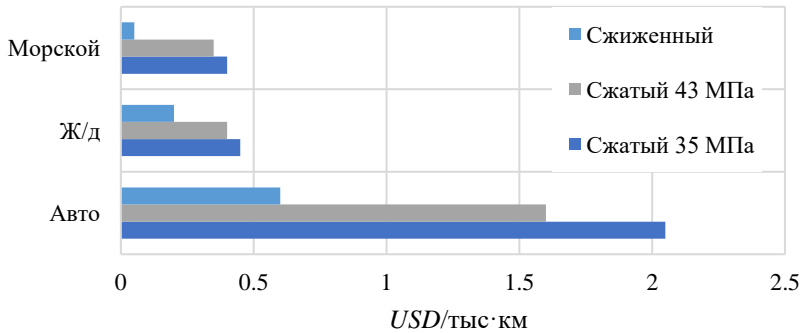


Рис. 3. Удельная стоимость транспортировки водорода различными способами в различных видах

Fig. 3. Specific cost of hydrogen transportation in different forms by various transport

Таблица 3.

Сравнение результатов расчета стоимости водорода отечественными специалистами с зарубежными данными

Table 3.

Comparison of the hydrogen cost estimation results by Russian specialists with global data

Технология производства водорода		Стоимость водорода, USD/кг H ₂	
		Оценки отечественных специалистов	Зарубежные оценки
сжатый	ПКМ (природный газ)	1,2-2,7	1,8-3,5
	Газификация угля	1,9-2,3	1,6
	Термохимическое разложение с ВТГР	3,3-7,5	1,0-1,6
	Электролиз (от электрической сети)	4,3-9,3	4,7
	Электролиз (от ветровых установок)	4,4-25,9	3,9-7,1
	Электролиз (от солнечных установок)	7,1-50	6,4-25,8
сжиженный	ПКМ (природный газ)	2,9-4,4	3,8
	Газификация угля	3,8-4,1	4,5-5,1
	Термохимическое разложение с ВТГР	5,7-10,2	1,4-2,1
	Электролиз (от электрической сети)	5,7-11,6	7,8
	Электролиз (от ветровых установок)	6,0-31,3	4,5-9,5
	Электролиз (от солнечных установок)	9,1-60,0	7,5

III. Оценка стоимости выработки электрической энергии гибридным энергетическим комплексом

Для анализа конкурентоспособности ГЭК рассчитана средняя нормированная стоимость электрической энергии $LCOE$ (*levelised cost of energy*):

$$LCOE = \frac{\sum_{t=1}^n \frac{I_t + M_t + F_t + Carb + Util}{(1+r)^t}}{\sum_{t=1}^n \frac{E_t}{(1+r)^t}}, \quad (1)$$

где I_t – инвестиционные (капитальные) затраты в год, USD ; M_t – операционные затраты и затраты на содержание в год, USD ; F_t – затраты на топливо в год, USD ; E_t – количество произведенной электроэнергии в году, кВт·ч; $Carb$ – затраты на оплату выбросов парниковых газов в году; $Util$ – затраты на вывод из эксплуатации после окончания срока службы энергоустановки; r – ставка дисконтирования; $t = 1..n$ – срок службы (количество полных лет) [15].

Исходные данные для расчета стоимости электроэнергии от ГЭК приведены в табл. 4.

Таблица 4.

Исходные данные для расчета стоимости электроэнергии

Table 4.

Initial data for electric energy cost calculation

Параметр	Значение
Мощность топливного элемента, кВт	1
Расход водорода, л/мин	12
Срок эксплуатации водородного источника, лет	10
Суммарная стоимость экспериментального образца водородного источника (с учетом генератора водорода), тыс. USD	50
Стоимость дистиллированной воды, USD/m^3	18
Уровень инфляции, %	5,1

Инвестиционные затраты складываются из стоимости комплектующих ГЭК (топливный элемент, аккумуляторы, преобразователи, генератор водорода) и стоимости монтажных и пуско-наладочных работ. В качестве источника водорода в экспериментальном образце ГЭК предусмотрен генератор водорода на основе электролиза с производительностью 12 л/мин. Согласно его техническим параметрам из 1 л дистиллированной воды в среднем вырабатывается 1000 л H_2 .

Операционные затраты и затраты на содержание ГЭК включают в себя стоимость услуг по обслуживанию источника. Затраты на оплату выбросов парниковых газов и затраты на вывод из эксплуатации ГЭК после окончания срока его службы приняты равными 0. Подставив значения из табл. 4 в (1), рассчитан $LCOE = 1,17 \text{ USD/кВт}\cdot\text{ч}$.

На рис. 4 показаны $LCOE$ для энергоустановок одинаковой мощности на дизеле, бензине, водороде.

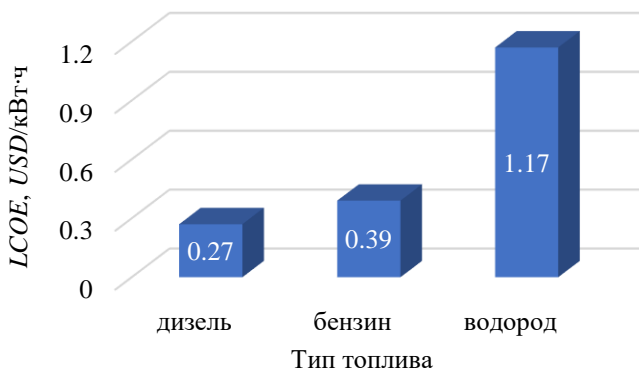


Рис. 4. $LCOE$ для энергоустановок одинаковой мощности на дизеле, бензине, водороде

Fig. 4. $LCOE$ for diesel, gasoline and hydrogen power plants of the equal capacity

IV. Выводы

В ходе исследований выделены основные факторы, влияющие на стоимость электрической энергии от ГЭК. К основным факторам относятся: стоимость водорода; мощность водородной установки, коэффициент его загрузки и расход топлива; стоимость затрат на оплату выбросов парниковых газов и утилизацию водородной установки после окончания срока ее эксплуатации.

Стоимость водорода во многом зависит от метода его получения. С точки зрения минимизации выбросов CO_2 , наиболее перспективным является метод получения водорода на основе электролиза. Однако данный метод в настоящее время уступает по стоимостным показателям другим методам получения водорода. Также на стоимость водорода влияет состояние водорода (сжиженное или сжатое) и способ транспортировки. Наиболее выгодной является транспортировка сжиженного водорода морским путем.

Выполнена оценка стоимости выработки электрической энергии

гибридным энергетическим комплексом. Она превышает стоимость электроэнергетики от энергоустановок, работающих на бензине и дизеле. Установлено, что на себестоимость электроэнергии влияет как стоимость самого источника энергии, так и стоимость водорода. Это позволяет выделить два важных направления в снижении стоимости электроэнергии – совершенствование элементов, входящих в состав водородного источника (топливные элементы, преобразователи, аккумуляторы и др.) и развитие методов более эффективного способа получения водорода.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ, НТУ «Сириус», ОАО «РЖД» и Образовательного Фонда «Талант и успех» в рамках научного проекта № 20-38-51016.

© Бедретдинов Р.Ш., 2021

Поступила в редакцию 20.09.2021

Received 20.09.2021

Библиографический список

- [1] Концепция развития водородной энергетики в Российской Федерации: утв. распоряжением Правительства Рос. Федерации от 5 августа 2021 г. № 2162-р.
- [2] Воропай Н.И. Направления и проблемы трансформации электроэнергетических систем // *Электричество*. 2020. № 7. С. 12-21. DOI: <https://doi.org/10.24160/0013-5380-2020-7-12-21>
- [3] Соснина Е.Н., Шалухо А.В., Веселов Л.Е. О применении ТОТЭ на биогазе в системах электроснабжения сельскохозяйственных предприятий // *Интеллектуальная электротехника*. 2020. № 4 (12). С. 27-41. DOI 10.46960/2658-6754_2020_4_27
- [4] Melo S., Yahyaoui I., Fardin J., Encarnaçã L.F., Tadeo F. A review of fuel cell and energy cogeneration technologies // in proc. 9th International Renewable Energy Congress (IREC), March 20-22, 2018, Hammamet, Tunisia, 2018. P. 1-6. DOI:10.1109/IREC.2018.8362573
- [5] Zhou S., Cui Q., Zhang M., Xia G., Wang K. Study on the management of fuel cell vehicle energy system using hybrid fuzzy logic controller // *Power Generation Technology*. 2018. Vol. 39. No. 6. P. 554-560. DOI: 10.12096/j.2096-4528.pgt.18157
- [6] Wang Q., Xiao D., Qi W. Research of energy management strategy for fuel cell hybrid electric vehicle // *Chinese Journal of Power Source*. 2012. Vol. 36, no. 10. P. 1459-1462.
- [7] Kulikov A., Loskutov A., Kurkin A., Dar'enkov A., Kozelkov A., Vanyaev V., Shahov A., Shalukho A., Bedretdinov R., Lipuzhin I., Kryukov E. Development and operation modes of hydrogen fuel cell generation system for remote consumers' power supply // *Sustainability*. 2021. Vol. 13. No. 16. Article number 9355. DOI: 10.3390/su13169355
- [8] Сняк Ю.В. Моделирование стоимости водородного топлива в условиях его централизованного производства // *Мат. семинара лаборатории ВЭТ ОИВТ РАН «Водородные энергетические технологии»*. 2017. Вып. 1. С. 39-56.

- [9] Митрова Т., Мельников Ю., Чугунов Д., Глаголева А. Водородная экономика – путь к низкоуглеродному развитию. М.: Центр энергетики Московской школы управления СКОЛКОВО, 2019. – 61 с.
- [10] Christensen A. Assessment of hydrogen production costs from electrolysis: United States and Europe. International Council on Clean Transportation, 2020. – 64 p.
- [11] Glenk G., Reichelstein S. Economics of converting renewable power to hydrogen // *Nature Energy*. 2019. Vol. 4. P. 216–222. DOI: 10.1038/s41560-019-0326-1
- [12] Albrecht U., Barth F., Bünger U., Fraile D., Lanoix J.-C., Pschorr-Schoberer E., Vanhoudt W., Weindorf W., Zerta M., Zittel W. Study on hydrogen from renewable resources in the EU. Munich: Ludwig-Bölkow-Systemtechnik GmbH, 2015. – 220 p.
- [13] Grube T., Höhlein B. Costs of making hydrogen available in supply systems based on renewables // *Hydrogen and Fuel Cell*, Töpler J., Lehmann J. Springer: Berlin, Heidelberg, 2016. – P. 223-237. DOI: 10.1007/978-3-662-44972-1_13
- [14] Opportunities for Australia from hydrogen exports. ACIL Allen Consulting for ARENA: Australia, 2018. – 114 p.
- [15] Черняховская Ю.В. Эволюция методологических подходов к оценке стоимости электроэнергии. Анализ зарубежного опыта // *Вестник ИГЭУ*. 2016. Вып. 4. С. 56-68. DOI: 10.17588/2072-2672.2016.4.056-068

References

- [1] Концепция развития водородной энергетики в Российской Федерации [The concept of hydrogen energy development in the Russian Federation]. Approved by the Order of Russian Federation Government № 2162-р on August 5, 2021.
- [2] N.I. Voropay, “Prospects and problems of electric power system transformations”, *Elektrichestvo*, no. 7, pp. 12-21, July 2020. DOI: <https://doi.org/10.24160/0013-5380-2020-7-12-21>
- [3] E.N. Sosnina, A.V. Shalukho and L.E. Veselov, “Application of SOFCs on biogas in power supply systems of agricultural enterprises”, *Smart Electrical Engineering*, vol. 12, no. 4, pp. 27-41, Dec. 2020. DOI 10.46960/2658-6754_2020_4_27
- [4] S. Melo, I. Yahyaoui, J. Fardin, L.F. Encarnaça and F. Tadeo, “A review of fuel cell and energy cogeneration technologies”, in proc. *9th International Renewable Energy Congress (IREC)*, March 20-22, 2018, Hammamet, Tunisia, pp. 1-6. DOI:10.1109/IREC.2018.8362573
- [5] S. Zhou, Q. Cui, M. Zhang, G. Xia and K. Wang, “Study on the management of fuel cell vehicle energy system using hybrid fuzzy logic controller”, *Power Generation Technology*, vol. 39, issue 6, 2018, pp. 554-560. DOI: 10.12096/j.2096-4528.pgt.18157
- [6] Q. Wang, D. Xiao and W. Qi, “Research of energy management strategy for fuel cell hybrid electric vehicle”, *Chinese Journal of Power Source*, vol. 36, no. 10, 2012, pp. 1459-1462.
- [7] A. Kulikov, A. Loskutov, A. Kurkin, A. Dar’envkov, A. Kozelkov, V. Vanyaev, A. Shahov, A. Shalukho, R. Bedretdinov, I. Lipuzhin and E. Kryukov, “Development and operation modes of hydrogen fuel cell generation system for remote consumers’ power supply”, *Sustainability*, vol. 13, no. 16, 2021, article number 9355. DOI: 10.3390/su13169355

- [8] Yu.V. Sinyak, “Modeling the cost of hydrogen fuel in the conditions of its centralized production”, in proc. *Vodorodnye energeticheskie tekhnologii [Hydrogen energy technologies] seminar of HET JIHT RAS laboratory*. Moscow: JIHT RAS, 2017, vol. 1, pp. 39-56 (in Russian).
- [9] T. Mitrova, Yu. Melnikov, D. Chugunov and A. Glagoleva, *The Hydrogen Economy - A Path towards Low Carbon Development*. Moscow: SKOLKOVO Energy Centre, Moscow School of Management SKOLKOVO, 2019.
- [10] A. Christensen, “Assessment of hydrogen production costs from electrolysis: United States and Europe”, International Council on Clean Transportation (ICCT), 2020.
- [11] G. Glenk and S. Reichelstein, “Economics of converting renewable power to hydrogen”, *Nature Energy*, vol. 4, pp. 216–222, 2019. DOI: 10.1038/s41560-019-0326-1.
- [12] U. Albrecht, F. Barth, U. Bünger, D. Fraile, J.-C. Lanoix, E. Pschorr-Schoberer, W. Vanhoudt, W. Weindorf, M. Zerta and W. Zittel, *Study on Hydrogen from renewable resources in the EU*. Munich: Ludwig-Bölkow-Systemtechnik GmbH, 2015.
- [13] T. Grube and B. Höhle, “Costs of making hydrogen available in supply systems based on renewables”, in *Hydrogen and Fuel Cell*, J. Töpler, J. Lehmann, Springer: Berlin, Heidelberg, 2016, pp. 223-237. DOI: 10.1007/978-3-662-44972-1_13
- [14] Opportunities for Australia from hydrogen exports. ACIL Allen Consulting for ARENA: Australia, 2018.
- [15] Yu.V. Chernyakhovskaya, “Evolution of methodological approaches to electricity cost assessment. Analysis of best foreign practices”, *Vestnik IGEU*, vol. 4, pp. 56-68, 2016. DOI: 10.17588/2072-2672.2016.4.056-068

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Бедретдинов Рустам Шамилевич, кандидат технических наук, доцент Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева, г. Нижний Новгород, Российская Федерация.

Rustam Sh. Bedretdinov, Cand. Sci. (Eng.), associate professor of the Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev, Nizhny Novgorod, Russian Federation.

УДК 629.12:621.313.333.2

DOI 10.46960/2658-6754_2021_4_59

ВЕКТОРНОЕ УПРАВЛЕНИЕ ГРЕБНЫМ АСИНХРОННЫМ ЭЛЕКТРОПРИВОДОМ

Т.Э. Муртазин

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева
Нижний Новгород, Россия
e-mail: tm.murtazin@yandex.ru

В.Г. Титов

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева
Нижний Новгород, Россия
e-mail: eos@nntu.ru

О.А. Мотина

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева
Нижний Новгород, Россия
e-mail: eos@nntu.ru

В настоящее время подавляющее большинство регулируемых асинхронных электроприводов разрабатывается с системой векторного управления. Современное программное обеспечение имитационного моделирования позволяет на этапе проектирования оценивать качество переходных процессов токов, скорости и момента электродвигателя. Представлена структура векторного управления гребным асинхронным электродвигателем. Предложена математическая модель частотно-регулируемого асинхронного электропривода с векторным управлением и контуром активной мощности. Результаты моделирования подтверждают правильность настройки контуров регулирования и позволяют говорить о пригодности разработанной модели для инженерных расчетов.

Ключевые слова: асинхронный электропривод, векторное управление, имитационное математическое моделирование, система электродвижения судна, частотное регулирование.

Для цитирования: Муртазин Т.Э., Титов В.Г., Мотина О.А. Векторное управление гребным асинхронным электроприводом // Интеллектуальная электротехника. 2021. № 4. С. 59-67. DOI: 10.46960/2658-6754_2021_4_59

VECTOR CONTROL OF ASYNCHRONOUS ELECTRIC DRIVE IN SHIP PROPULSION SYSTEM

T.E. Murtazin

Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev
Nizhny Novgorod, Russia
e-mail: tm.murtazin@yandex.ru

V.G. Titov

Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev
Nizhny Novgorod, Russia
e-mail: eos@ntu.ru

O.A. Motina

Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev
Nizhny Novgorod, Russia
e-mail: eos@ntu.ru

Abstract. Currently, the vast majority of regulated asynchronous electric drives are being developed with a vector control system. Modern simulation software makes it possible to evaluate the quality of transient processes of currents, speed and torque of an electric motor at the design stage. The structure of vector control of the asynchronous electric drive in ship propulsion system is presented. A mathematical model of a frequency-controlled asynchronous electric drive with vector control and an active power circuit is proposed. The simulation results confirm the correctness of the adjustment of the control circuits and allow one to talk about the suitability of the developed model for engineering calculations.

Keywords: asynchronous electric drive, frequency control, ship electric propulsion system, simulation mathematical modeling, vector control.

For citation: T.E. Murtazin, V.G. Titov and O.A. Motina, “Vector control of asynchronous electric drive in ship propulsion system”, *Smart Electrical Engineering*, no. 4, pp. 59-67, 2021. DOI: 10.46960/2658-6754_2021_4_59

I. Введение

Современные системы электродвижения судов строятся на базе машин переменного тока с частотным регулированием. Применение гребных электроустановок позволяет проще и шире организовать автоматизацию и дистанционное управление, делает более удобным обслуживание и контроль, а также позволяет обеспечить подачу электроэнергии от главных генераторов на вспомогательные судовые электромеханизмы и другие потребители [1-6].

Здесь рассматривается имитационное математическое моделирование частотно-регулируемого гребного асинхронного электропривода с контролем активной мощности и с векторным управлением.

II. Структура системы управления гребным электродвигателем

Гребной электродвигатель передает вращение на движители, которые создают силу тяги, прикладываемую к корпусу судна, и приводят его в

движение. Момент нагрузки на валу двигателя имеет центробежный характер, то есть зависит от квадрата скорости вращения, а также от параметров воды, в которую погружен движитель. К таким параметрам относятся вязкость, температура, наличие ледяной кашицы (для ледоходных судов) и др. Поэтому нет особого смысла в регулировании только скорости вращения двигателя. Целесообразнее организовать в системе управления контур активной мощности на валу двигателя. Возможности векторного управления позволяют вычислять момент без применения сложных систем датчиков. Для этого необходимо знать лишь потокосцепление ротора, которое вычисляется в рамках управления, и значение проекции тока статора на ось q , которое определяется путем координатных преобразований сигналов с датчиков тока статора. Таким образом, при помощи датчиков тока и положения можно вычислить активную мощность на валу и сигнал обратной связи на регулятор мощности.

В качестве источника питания гребного электродвигателя чаще всего выступает синхронный генератор с дизельным первичным двигателем. От этого же генератора могут получать питание и другие электропотребители судна. Превышение потребляемой из генератора мощности свыше 105-110% от номинального уровня может привести к перегрузке агрегата, снижению срока эксплуатации из-за длительной работы на предельных режимах, большому расходу топлива. Поэтому необходимо ограничивать потребляемую гребным электродвигателем мощность до уровня 110% от номинала.

Во избежание бросков мощности в переходных режимах целесообразно применить задатчик интенсивности, который осуществляет плавное нарастание и снижение задающего сигнала с определенной интенсивностью.

В соответствии со сказанным ранее составлена структура системы векторного управления гребным асинхронным двигателем [7, 8] (рис. 1). Элементы данной структуры: ЗИ – задатчик интенсивности, Огр. $S_{\text{потр}}$ – ограничитель потребляемой полной мощности, $PP_{\text{мех}}$ – регулятор активной механической мощности, ВМ – вычислитель электромагнитного момента двигателя, VI_q – вычислитель тока I_q , VI_d – вычислитель тока I_d , $V\psi_r$ – вычислитель потокосцепления ротора ψ_r , $V\theta$ – вычислитель угла вектора потока ротора, PT_q – регулятор тока I_q , PT_d – регулятор тока I_d , БКПС – блок компенсации перекрестных связей, ПК1-ПК2 – преобразователи координат, ШИМ – широтно-импульсный модулятор.

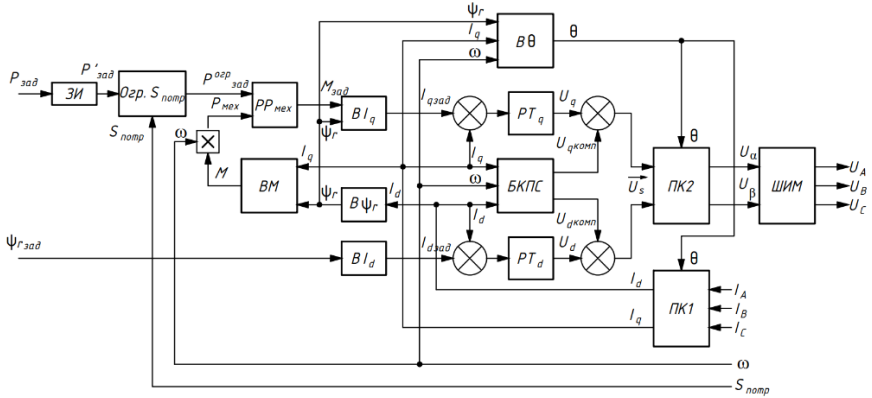


Рис. 1. Структура системы векторного управления гребным асинхронным двигателем

Fig. 1. Structure of the propeller asynchronous motor vector control system

Параметры гребного асинхронного двигателя представлены в табл. 1.

Таблица 1.

Параметры асинхронного электродвигателя

Table 1.

Asynchronous motor parameters

Номинальная мощность S , ВА	6000000
Номинальное линейное напряжение U_n , В	6300
Номинальная частота питающего напряжения f , Гц	50
Тип роторной обмотки	«беличья клетка»
Число пар полюсов, p	25
Активное сопротивление статора R_s , Ом	0,3625
Активное сопротивление ротора R_r , Ом	0,6883
Индуктивность рассеяния статора $L_{\sigma s}$, Гн	0,002416
Индуктивность рассеяния ротора $L_{\sigma r}$, Гн	0,002416
Взаимная (главная) индуктивность L_m , Гн	0,02621
Момент инерции ротора J , кг·м ²	3619,45

III. Расчет параметров имитационной модели

На основе данной структуры и параметров электродвигателя разработан математическая имитационная модель в *Matlab Simulink* [9, 10] (рис.

2, 3). Модель разработана с допущением того, что вместо синхронного генератора с дизельным первичным двигателем используется идеальный источник трехфазного напряжения, мощность которого много больше мощности электропривода.

Блок «Inverter», построенный на базе *IGBT* транзисторов, получает питание от идеального источника трехфазного напряжения « V_a, V_b, V_c » через выпрямитель «*Universal Bridge*». Затем через блок измерений «*Three-Phase V-I Measurement*» напряжение поступает на двигатель. С помощью элемента «*Bus selector*» и блок «*Scope*» будем наблюдать за сигналами двигателя. Блок «*Power calculation*» рассчитывает потребляемую системой мощность. Блок «*Torque simulation*» имитирует на валу двигателя центробежную нагрузку.

Блоки «*Clark*», «*D_Park-Gorev*» и «*I_Park-Gorev*» осуществляют координатные преобразования. Блоки «*Iq* calculation*», «*Id* calculation*», «*Flux calculation*» и «*Flux position*» производит вычисление задания на ток по осям q и d , амплитуду и угол поворота вектора потокосцепления ротора соответственно. Блоки «*Filter Id*» и «*Filter Iq*» предназначены для фильтрации сигналов обратных связей по току оси d и q соответственно от высокочастотных искажений. Блоки «*PI Id*» и «*PI Iq*» – ПИ-регуляторы тока I_d и тока I_q соответственно. Блок «*P P*» – П-регулятор активной мощности. Блок «*Compensation*» осуществляет компенсацию перекрестных связей. Блок «*M calculation*» вычисляет момент на валу электродвигателя. В блоке «*Pmech calculation*» вычисляется механическая мощность путем перемножения скорости вращения вала двигателя на электромагнитный момент. Блок «*Input power limiter*» ограничивает потребляемую системой мощность. Блок «*Intensity setter*» – задатчик интенсивности.

Система управления формирует сигналы напряжения U_a и U_b . Для реализации данных векторов использован блок векторной ШИМ «*SVPWM Generator (2-Level)*», который на основе этих сигналов подает импульсы, частотой 10 кГц, на затворы транзисторов инвертора.

Система управления и регулирования построена по подчиненному принципу и имеет два внутренних параллельных контура тока и один внешний контур активной мощности. Если математическое выражение коэффициентов является практически невозможным для такой сложной системы, то возможно прибегнуть к методу подбора. Используя метод Циглера-Никольса [11] (вывод системы на границу устойчивости увеличением k_n), определены коэффициенты регуляторов токов и мощности. Переходные процессы пуска под нагрузкой показаны на рис. 4.

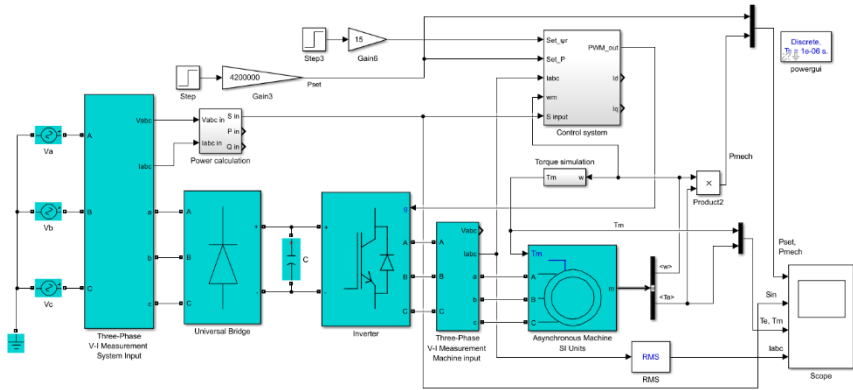


Рис. 2. Модель гребного асинхронного электропривода
Fig. 2. Model of the rowing electric drive

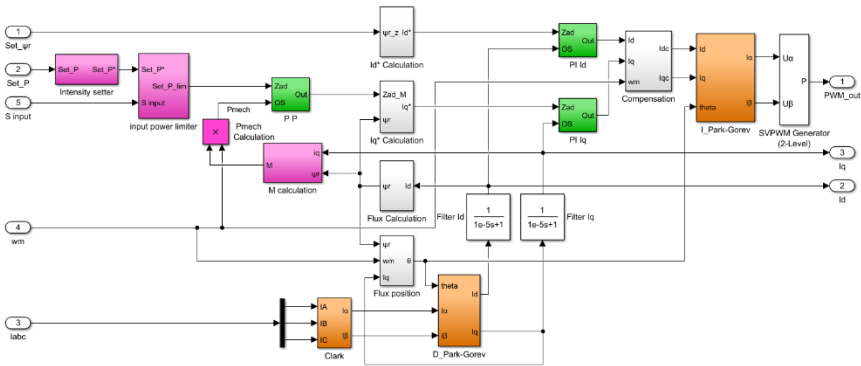


Рис. 3. Модель структуры векторного управления (блок «Control system»)
Fig. 3. Model of the vector control structure (block “Control system”)

Обозначения на рис. 4: $P_{\text{зад}}$ – задание на активную мощность; $P_{\text{мех}}$ – механическая мощность на валу двигателя; $S_{\text{потр}}$ – полная потребляемая электроприводом мощность; M – электромагнитный момент двигателя; M_c – момент нагрузки; I_A, I_B, I_C – токи двигателя в фазах A, B и C ; I_n – номинальный ток двигателя

Как видно из рис. 4, бросок момента двигателя не превышает ограничения в 900 000 Н·м. Активная мощность с заданной интенсивностью вышла на необходимое значение. Небольшая статическая ошибка при использовании П-регулятора мощности является допустимой. Потребляемая мощность не превышает ограничение в 6 600 000 ВА.

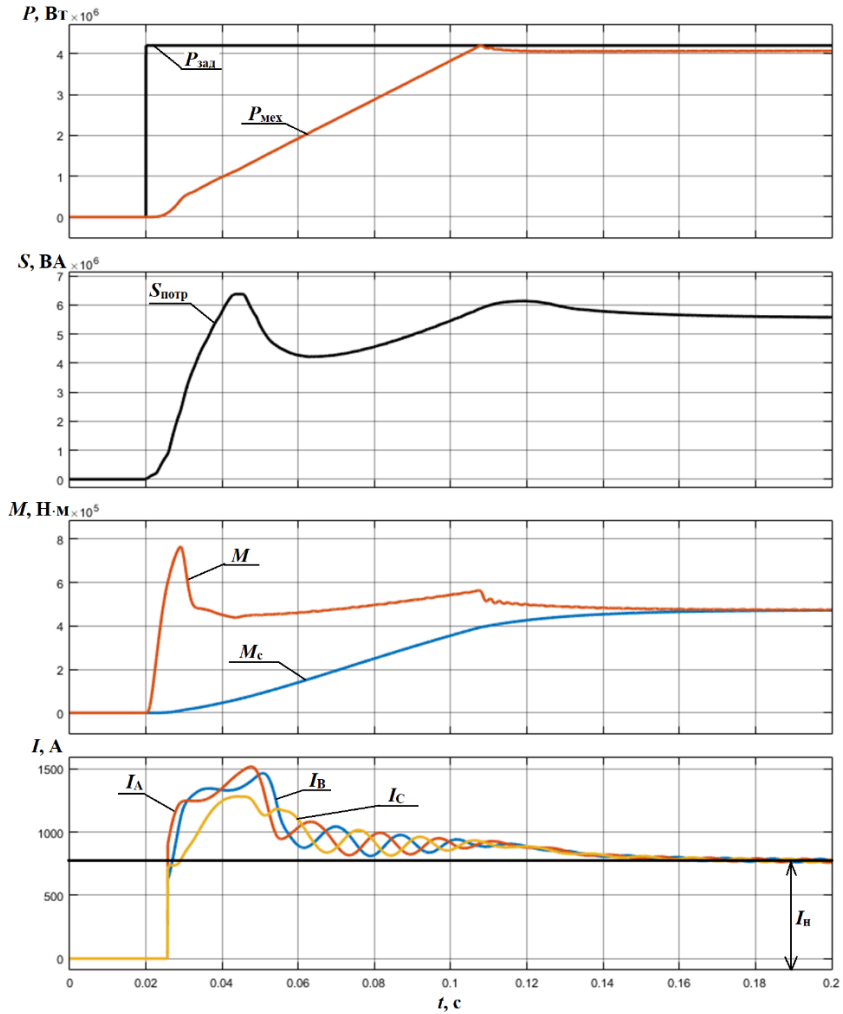


Рис. 4. Переходные процессы при пуске гребного асинхронного двигателя
 Fig. 4. Transients when starting a rowing asynchronous motor

IV. Заключение

Анализ результатов моделирования показал, что предложенный вариант системы векторного управления частотно-регулируемым гребным асинхронным электроприводом работоспособен: контура регулирования обрабатывают задающее воздействие с необходимым быстродействием и

точностью, величины параметров системы не превышают заданных ограничений. В дальнейшем планируется изучить влияние работы системы на реальную судовую энергосеть и модернизировать математическую модель.

© Муртазин Т.Э., 2021

© Титов В.Г., 2021

© Мотина О.А., 2021

Поступила в редакцию 08.10.2021

Received 08.10.2021

Библиографический список

- [1] Соколовский Г.Г. Электроприводы переменного тока с частотным регулированием. М.: Академия, 2006. – 265 с.
- [2] Дарьенков А.Б., Титов В.Г., Мирясов Г.М., Охотников М.Н., Умяров Д.В. Гребные электрические установки. Н. Новгород: НГТУ, 2015. – 206 с.
- [3] Тихомиров В.А., Титов В.Г., Хватов С.В. Технические и экономические аспекты применения регулируемых приводов постоянного и переменного тока // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. 2010. № 4 (83). С. 190-204.
- [4] Михеев Е.А. Частотное регулирование электропривода // Символ науки: Международный научный журнал. 2016. № 11-3. С. 124-126.
- [5] Терехов В.М., Осипов О.И. Системы управления электроприводов. М.: Издательский центр «Академия», 2005. – 300 с.
- [6] Гельвер Ф.А., Белоусов И.В., Самосейко В.Ф. Гребные электрические установки судов большой мощности // Вестник ПНИПУ. Электротехника, информационные технологии, системы управления. 2019. № 30. С. 7-27.
- [7] Борисевич А.В., Омельченко Н.В. Реализация векторного управления асинхронным электродвигателем на микроконтроллере STM32F4 // Электронный научно-практический журнал «Современные научные исследования и инновации». 2014. № 4. Ч. 1. [Электронный ресурс]. URL: <https://web.snauka.ru/issues/2014/04/33144> (дата обращения: 03.09.2021).
- [8] Калачев Ю.Н. Векторное регулирование (заметки практика). М.: Издательский дом МЭИ, 2013. – 72 с.
- [9] Дьяконов, В.П. MATLAB. Полный самоучитель. М.: ДМК Пресс, 2012. – 768 с.
- [10] Дьяконов В.П. Simulink 5/6/7: Самоучитель. М.: ДМК Пресс, 2008. – 784 с.
- [11] Вадутов О.С., Настройка типовых регуляторов по методу Циглера–Николяса. Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2014. – 10 с.

References

- [1] G.G. Sokolovsky, *Elektroprivody peremennogo toka s chastotnym regulirovaniem [Variable frequency AC drives]*. Moscow: Academy, 2006 (in Russian).
- [2] A.B. Daryenkov, V.G. Titov, G.M. Miryasov, M.N. Okhotnikov and D.V. Umiarov, *Grebnye elektricheskiye ustanovki [Electric propulsion systems]*. N. Novgorod, NNSTU, 2015 (in Russian).

- [3] V.A. Tikhomirov, V.G. Titov and S.V. Hvatov, "Technical and economic aspects of the using controlled drive constant and alternating current", *Transactions of NNSTU n.a. R.E. Alekseev*, no. 4 (83). pp. 190-204, 2010.
- [4] E.A. Mikheev, "Chastotnoe regulirovanie elektropriivoda [Electric drive variable frequency control]", *Symbol of Science: International Scientific Journal*, № 11-3, pp. 124-126, 2016 (in Russian).
- [5] V.M. Terekhov and O.I. Osipov, *Sistemy upravleniya elektropriivodov [Electric drive control systems]*. Moscow: Akademiya, 2005 (in Russian).
- [6] F.A. Gelver, I.V. Belousov and V.F. Samoseiko, "Electrical propulsion plant of ships, heavy-duty", *PNRPU Bulletin. Electrotechnics, Informational Technologies, Control Systems*, no. 30, pp. 7-27, 2019 (in Russian).
- [7] A.V. Borisevich and N.V. Omelchenko, "Implementation of a field oriented control of induction motor using STM32F4", *Electronic scientific & practical journal «Modern scientific researches and innovations»*, no. 4, p. 1, 2014. [Online]. Available at: <https://web.snauka.ru/en/issues/2014/04/33144>.
- [8] Yu.N. Kalachev, *Vektornoye regulirovanie (zametki praktika) [Vector control (practitioner's notes)]*. Moscow: Publishing house MPEI, 2013 (in Russian).
- [9] V.P. Diakonov. *MATLAB. Polniy samouchitel [MATLAB. Complete tutorial]*. Moscow: DMK Press, 2012 (in Russian).
- [10] V.P. Diakonov. *Simulink 5/6/7: Samouchitel [Simulink 5/6/7: Tutorial]*. Moscow: DMK Press, 2008 (in Russian).
- [11] O.S. Vadutov, *Nastroyka tipovyh regulatorov po metodu Tsiglera-Nikol'sa [Setting up standard regulators using the Ziegler-Nichols method]*. Tomsk: TPU, 2014 (in Russian).

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Муртазин Тимур Эмильевич, аспирант Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексева, г. Нижний Новгород, Российская Федерация.

Титов Владимир Георгиевич, доктор технических наук, профессор Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексева, г. Нижний Новгород, Российская Федерация.

Мотина Ольга Адольфовна, заведующий лабораторией Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексева, г. Нижний Новгород, Российская Федерация.

Timur E. Murtazin, postgraduate student of the Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev, Nizhny Novgorod, Russian Federation.

Vladimir G. Titov, D. Sci. (Eng.), professor of the Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev, Nizhny Novgorod, Russian Federation.

Ol'ga A. Motina, head of the laboratory of the Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev, Nizhny Novgorod, Russian Federation.

УДК 621.316.761, 62-533.6

DOI 10.46960/2658-6754_2021_4_68

БЛОК КОММУТАЦИИ КОНДЕНСАТОРОВ, ПОВЫШАЮЩИЙ ЭФФЕКТИВНОСТЬ УСТАНОВОК КОМПЕНСАЦИИ РЕАКТИВНОЙ МОЩНОСТИ

В.В. Бабенко

Воронежский государственный технический университет
Воронеж, Россия
e-mail: vova.babenko.94@mail.ru

В.Н. Крысанов

ООО ПКФ «Современные Технологии»
Воронеж, Россия
ORCID: 0000-0003-1111-8402 e-mail: sovteh2000@mail.ru

В статье рассматриваются вопросы реализации эффективного блока коммутации конденсаторов (конденсаторных батарей) установок компенсации реактивной мощности, использующих как электромеханические элементы коммутации, так и полупроводниковые ключи. С учетом рассмотренных критериев оптимального режима работы системы электроснабжения производственных объектов процесс компенсации реактивной мощности целесообразно реализовать с помощью управляемых конденсаторных установок. Предложены структура силовой части блока коммутации и алгоритм работы системы управления регулирующими конденсаторными установками, которые при меньшей стоимости полупроводниковых ключи, обеспечивают лучшие показатели качества электроснабжения и надежности.

Разработана блок-схема системы управления тиристорными ключами конденсаторных установок, работающих по принципу гибридного подключения конденсаторных батарей к сети и использующие дополнительные контакторные группы коммутации. На основе многофакторного анализа, проведено имитационное моделирование в программной среде *Matlab Simulink* для количественной оценки оптимальных параметров управляемой конденсаторной установки. На основании результатов моделирования, сделаны выводы о возможности существенного снижения затрат при компенсации реактивной мощности на производственных объектах, при правильном выборе мощности и числа ступеней регулирования конденсаторных установок. Рекомендовано использовать предложенные аппаратные и алгоритмические решения для реализации блоков коммутации тиристорных конденсаторных установок в промышленности для повышения их эффективности и сроков службы.

Ключевые слова: алгоритм, коммутация конденсаторов, компенсация реактивной мощности, система управления, тиристорные конденсаторные установки.

Для цитирования: Бабенко В.В., Крысанов В.Н. Блок коммутации конденсаторов, повышающий эффективность установок компенсации реактивной мощности // Интеллектуальная электротехника. 2021. № 4. С. 68-80.

DOI: 10.46960/2658-6754_2021_4_68

STATIC CONVERTER CONTROL ALGORITHMS INCREASING EFFICIENCY OF REACTIVE POWER COMPENSATION PROCESS

V.V. Babenko

Voronezh State Technical University
Voronezh, Russia
e-mail: vova.babenko.94@mail.ru

V.N. Krysanov

LLC PKF "Modern Technologies"
Voronezh, Russia
ORCID: 0000-0003-1111-8402 e-mail: sovteh2000@mail.ru

Abstract. The article discusses the implementation of effective control algorithms for switching processes of reactive power compensation plants using both electromechanical switching elements and semiconductor keys. Taking into account the considered criteria of the optimal operation mode of the power supply system of production facilities, it is shown that the process of reactive power compensation should be implemented using controlled capacitor plants. The algorithm of operation of the control system of static devices of the thyristor capacitor plants is proposed, which at lower costs for semiconductor switches provides the main indicators of power quality and reliability.

A block diagram of a system for controlling thyristor keys of capacitor plants operating on the principle of hybrid switching of capacitor batteries to the network and using additional switching contactor groups has been developed. On the basis of the multiple-factor analysis, simulation modeling in the Matlab Simulink for quantitative assessment of optimum parameters of the operated condenser installation is carried out. Based on the simulation results, conclusions were drawn on the possibility of a significant reduction in costs when compensating for reactive power at production facilities, with the correct selection of capacity and the number of control stages of condenser plants. It is recommended to use the proposed algorithmic solutions for control systems of thyristor capacitor plants in industry to increase the efficiency of power equipment use, their service life and reduce power losses.

Keywords: algorithm, capacitor switching, control system, reactive power compensation, thyristor capacitor plants.

For citation: V.V. Babenko and V.N. Krysanov, "Static converter control algorithms increasing efficiency of reactive power compensation process", *Smart Electrical Engineering*, no. 4, pp. 68-80, 2021. DOI: 10.46960/2658-6754_2021_4_68

I. Введение

Задачи повышения энергоэффективности современных производств являются особенно актуальными на фоне постоянного роста стоимости энергоресурсов. Поэтому вопросы снижения непроизводительных потерь электроэнергии, значительная часть которых затрачивается на передачу реактивной мощности, требуют реализации современных, эффективных энергосберегающих технологий – таких как компенсация реактивной мощности (КРМ). Эти технологии весьма разнообразны как в аппаратном, так и в алгоритмическом аспекте своей реализации [1, 2].

В настоящее время существует большое разнообразие устройств КРМ, которые достаточно хорошо изучены и широко распространены в сегменте производственных предприятий. Наиболее распространенным устройством КРМ являются управляемые батареи статических конденсаторов (БСК).

Однако вопрос реализации устройств КРМ, отвечающего всем требованиям современных цифровых технологий по параметрам быстродействия, автоматизации, надежности, экономичности и других показателей, остается до сих пор в стадии постоянного развития.

Одним из вариантов решения данного вопроса может быть использование новых аппаратных и алгоритмических реализаций на базе уже существующих и хорошо зарекомендовавших устройств КРМ. Такой подход, как правило, менее затратен, чем разработка и реализация новых решений. Поэтому необходима реализация структуры силовой части и алгоритма управления установками КРМ, при котором коммутация емкости к сети электропитания происходит без бросков тока, перенапряжений и с минимальными затратами на силовые элементы установки [3-6]. Данные решения, в отличие от «классических» способов подключения конденсаторной батареи, основанных на использовании либо только электромагнитных контакторов, либо только полупроводниковых приборов, должны обеспечить эффективный комбинированный (гибридный) способ коммутации.

II. УКРМ с комбинированным блоком коммутации конденсаторной батареи

В данной статье предложен алгоритм управления блоком коммутации установки КРМ (УКРМ), реализующий эффективное использование как электромеханических элементов коммутации (контакторы, пускатели), так и полупроводниковые ключи. Структура силовой части гибридной установки приведена на рис. 1 [5]. В схеме не указаны элементы управления, коммутации, защиты, измерения и сигнализации типовых установок, например УКМ, УКМТ.

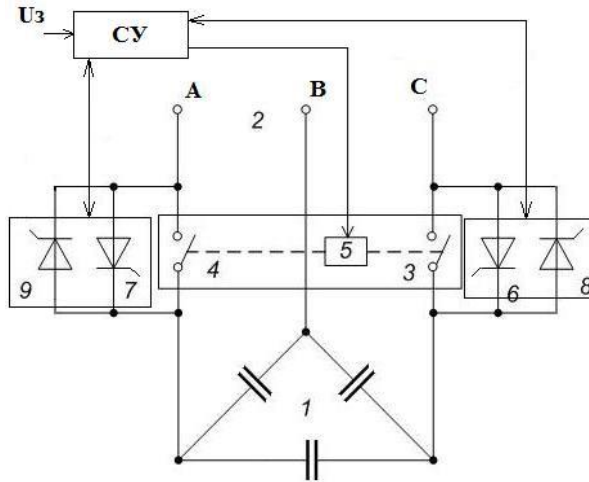


Рис. 1. Структура силовой части УКРМ с комбинированным блоком коммутации конденсаторной батареи

Fig. 1. The structure of the power section of a reactive power compensation unit with a combined switching unit of a capacitor bank

В типовых тиристорных УКРМ (широко применяемых для динамической компенсации реактивной мощности кранового, штамповочного, сварочного оборудования и т.д.), тиристорные ключи обеспечивают подключение БСК в течении всего периода компенсации, определяемой системой управления. При предлагаемой структуре блока коммутации и алгоритме управления тиристоры 6-9 подключают конденсаторную батарею 1 к сети 2 и находятся в проводящем состоянии в течение крайне малого времени всего периода компенсации (не более 0,01- 0,1 с, например, для контакторов серии КМ13, КТ12Р, пускателей ПМЕ, ПМА, ПМЛ), пока не оказываются шунтированными дополнительным контактором 3-5. Это обстоятельство позволяет осуществлять выбор силовых тиристоров (тиристорных модулей) не по значению номинального прямого тока, а по значению ударного тока. В соответствии с параметрами зависимости допустимого тока перегрузки от времени это значительно (в 5-10 раз) может снизить стоимость используемых силовых тиристоров (тиристорных модулей) [7, 8]. Пример зависимости допустимого тока перегрузки силового тиристора от времени включенного состояния приведен на рис. 2.

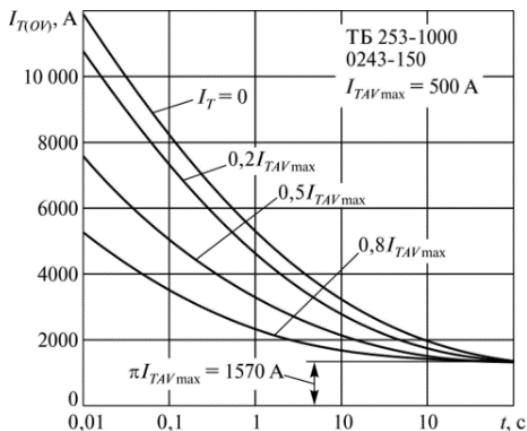


Рис. 2. Зависимость допустимого тока перегрузки силового тиристора (ТБ 253-1000.22) от времени включенного состояния
 Fig. 2. Dependence of the permissible overload current of the power thyristor (ТБ 253-1000.22) on the on-time

Широко применяемые для УКРМ тиристорные модули также имеют высокую перегрузочную способность. Так, силовые тиристорные модули *SKKT*, рассчитанные на рабочий ток 570 А (обратное импульсное напряжение до 1800 В), выдерживают в течении 0,01 с ток перегрузки 15500 А, $T_j = 135^\circ\text{C}$, а при $T_j = 25^\circ\text{C}$ – 19000 А. С учетом предварительной загрузки и режима охлаждения допустимые параметры ниже, но все же весьма значительны (табл. 1). Как видно из таблицы, технических параметров модуля *SKKT* на 570 А, для времени перегрузки 0,01-0,1 с допустимая кратность токов составляет от 6 до 20.

Таблица 1.
 Допустимые перегрузочные характеристики модуля *SKKT*

Table 1.
 Permissible overload characteristics of the *SKKT* module

Предварительная нагрузка			Допустимая амплитуда тока перегрузки, А, при длительности перегрузки, с				
$I_{T(x)}$, А	$P_{T(x)}$, Вт	t_n , °С	0,01	0,1	1,0	10	100
0	0	25	12 100	7800	5200	2580	1840
100	117,5	40,9	11 000	7260	4720	2400	1800
300	397,5	78,7	7600	5400	3400	2040	1700
400	560	100,6	5400	3560	2400	1800	1640

В то же время, использование тиристорного модуля при частых коммутациях конденсаторной батареи позволяет значительно повысить ресурс и самого электромагнитного контактора, отказавшись от дорогостоящих магнитных пускателей для коммутации емкостной нагрузки (все они выбираются с большим запасом по номинальному току и комплектуются дополнительными контактами с токоограничивающими резисторами для ограничения токов коммутации). Как вариант, при реализации предложенного алгоритма управления гибридной УКРМ в низковольтных сетях (0,4 кВ), возможно использовать вместо электромагнитного контактора твердотельное реле. Это позволит значительно повысить надежность экономичность всей системы в целом, полностью исключив механические элементы контактора [9].

III. Алгоритм работы системы управления

Принцип формирования структуры гибридной УКРМ с системой управления блоком коммутации на основе предложенного алгоритма показан на примере функциональной блок-схемы. На рис. 3 представлен упрощенный вариант без указания блоков управления, отвечающих за функции защиты, измерения, сигнализации.

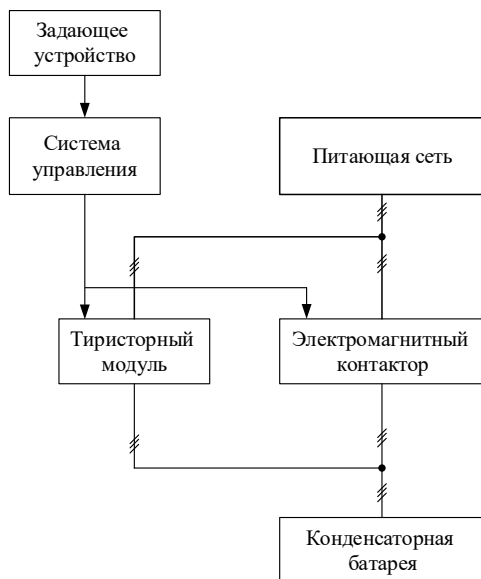


Рис. 3. Функциональная блок-схема гибридной УКРМ

Fig. 3. Functional block diagram of a hybrid reactive power compensation unit

Алгоритм работы системы управления односекционной (одноступенчатой) гибридной УКРМ (рис. 1) следующий.

При отсутствии сигнала на подключение к сети 2 конденсаторной батареи 1 от задающего устройства контакты 3, 4 электромагнитного контактора разомкнуты, а тиристорный модуль (тиристоры 7, 9 и 6, 8) заперт, то есть конденсаторная батарея оказывается отключенной от сети.

При поступлении сигнала на подключение от задающего устройства на вход системы управления происходит проверка состояния конденсаторной батареи. При отключенной конденсаторной батарее система управления осуществляет слежение и в момент нулевого напряжения на тиристорном модуле подает управляющие импульсы для открытия тиристоров. Далее происходит задержка на время t_1 , необходимое для полного отпирания тиристоров и подключения конденсаторной батареи к сети. После выдержки необходимого интервала времени система управления выдает сигнал на электромагнитный контактор для замыкания его контактов. Далее происходит задержка на время t_2 , необходимое для срабатывания контактора. После этого система управления перестает подавать сигналы на отпирание тиристоров, конденсаторная батарея остается подключена к сети через контактор.

При подаче сигнала на отключение конденсаторной батареи снова происходит проверка состояния батареи. При подключенной батарее система управления переходит в следящий режим и в момент нулевого напряжения на тиристорном модуле подает управляющие импульсы для открытия тиристоров. Далее происходит задержка на время t_1 , необходимое для полного отпирания тиристоров. В то же время электромагнитный контактор замкнут, таким образом, конденсаторная батарея остается подключенной и через контактор, и через тиристорный модуль. После выдержки необходимого интервала времени система управления снимает сигнал с контактора. Далее происходит задержка на время t_2 , в течение которого контакты размыкаются, оставляя конденсаторную батарею подключенной только через тиристорный модуль. После этого система управления перестает подавать сигналы на отпирание тиристоров, конденсаторная батарея отключается от сети. Данный алгоритм обеспечивает управление УКРМ с одной ступенью регулирования (одна секция конденсаторной батареи). Вход системы управления такой установки подключается к логическому выходу штатного измерителя-регулятора. При этом сигнал выставляется в логическую единицу при условии достижения уровня измеряемого параметра (ток нагрузки, давление воды в магистрали, уровень напряжения узла нагрузки и т.д.) определенной уставки. Обычно оно пропорционально значению потребляемой ре-

активной мощности конкретной нагрузки, которую необходимо скомпенсировать. Блок управления обрабатывает логический сигнал и выдает команду на подключение установки КРМ.

С точки зрения энергосбережения более эффективна работа конденсаторных УКРМ с несколькими ступенями регулирования. Для такого варианта алгоритм управления приведен на рис. 4.

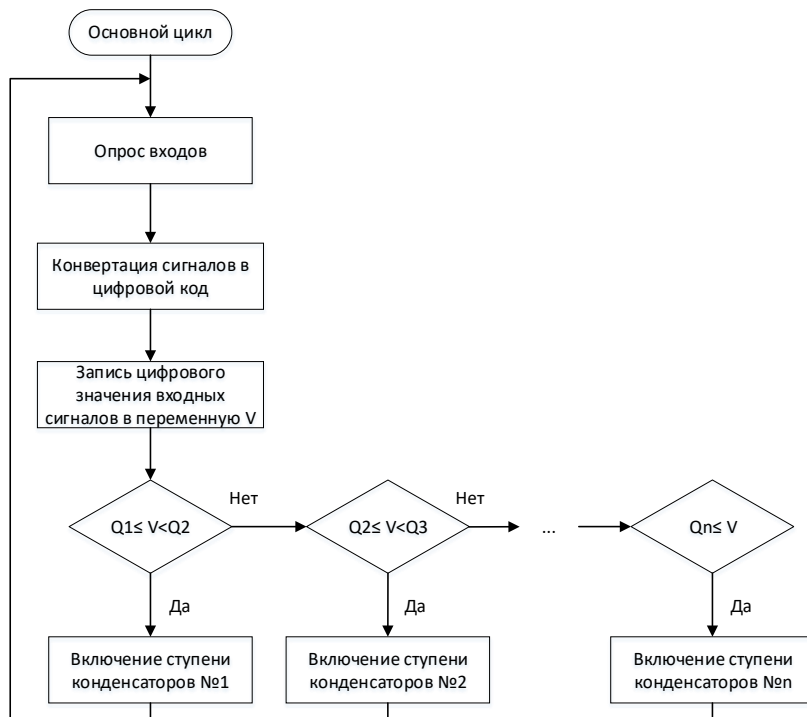


Рис. 4. Алгоритм работы многоступенчатой конденсаторной установки
Fig. 4. Algorithm of operation of a multistage reactive power compensation unit

Основной цикл включает в себя подключение основных элементов силовой части УКРМ, далее осуществляется съем информации на требуемый уровень КРМ с объекта (потребителя). Возможно получение информации с нескольких потребителей через несколько измерителей-регуляторов, далее она преобразуется в цифровое значение в зависимости от коэффициентов, характеризующих мощность каждого потребителя, и на ее основе выработывается команда на включение определенной секции установки КРМ.

На рис. 4 буквами Q_1, Q_2, Q_3, Q_n обозначены значения уставок для включения соответствующих секции установки.

При этом подключение выбранных ступеней происходит лишь после обязательного цикла срабатывания силовых элементов по алгоритму, описанному ранее для одноступенчатой УКРМ (рис. 1): «включение тиристорного модуля и контакторов выбранных ступеней» – «подключение выбранных ступеней к сети» – «включение контактора, шунтирующего тиристорный модуль» – «отключение тиристорного модуля» – «рабочий режим компенсации реактивной мощности». Рабочий режим длится до момента, когда требуется отключение ступеней КБ или изменение величины компенсируемой РМ. При этом последовательность отключения секций КБ обратная.

VI. Экономический эффект

Эффект энергосбережения при использовании УКРМ тем выше, чем больше ступеней регулирования при заданной величине компенсируемой реактивной мощности. Однако увеличение количества ступеней регулирования приводит к удорожанию УКРМ. При всех плюсах многоступенчатого регулирования РМ установки такого типа существенно дороже.

При определении оптимальных параметров установки КРМ необходимо учитывать тип потребителей электроэнергии, их мощности, график нагрузки, структуру системы электроснабжения, требования стандартов качества напряжения для конкретного производства. Наиболее часто руководствуются рекомендациями самих заводов-изготовителей УКРМ, в которых как правило используются упрощённые методики расчета. Поэтому целесообразным является использование автоматизированной методики расчета, основанной на критерии минимальных затрат и энергоэкономических характеристик потребителей [10].

В качестве основных определяемых параметров установки КРМ были приняты ее номинальная реактивная мощность и дискретность (количество ступеней регулирования). Для автоматизации данных расчетов был использован специально разработанный алгоритм в программе *Matlab* [11]. Пример результата расчета представлен в графическом виде на рис. 5 (промышленный вариант структуры нагрузки: 80 % – асинхронные двигатели, 20 % – осветительная нагрузка).

По вертикальной оси фиксируются данные годовых затрат (руб.), учитывающие стоимость установки КРМ, затраты на ее эксплуатацию и выплаты энергоснабжающей организации за некомпенсированную реактивную мощность. Цветом отмечены вариации уровня напряжения сети (0.9, 0.95, 1, 1.05, 1.1, 1.15 от U_n), а по горизонтальной оси – вариации числа ступеней регулирования конденсаторной установки (от 1 до 4). Анализ полученных результатов имитационного моделирования показывает достаточно сложную, многофакторную зависимость оптимальных параметров УКРМ

по критерию минимума совокупных затрат. Однако возможно дать качественную оценку для технико-экономического обоснования выбора конкретного варианта установки. Так, из рис. 5 очевидно, что для рассмотренных исходных данных целесообразно использовать батарею статических конденсаторов с 2 или 3 ступенями. При этом желательно обеспечить уровень фазного напряжения на низкой стороне потребителя в пределах 220-230 В.

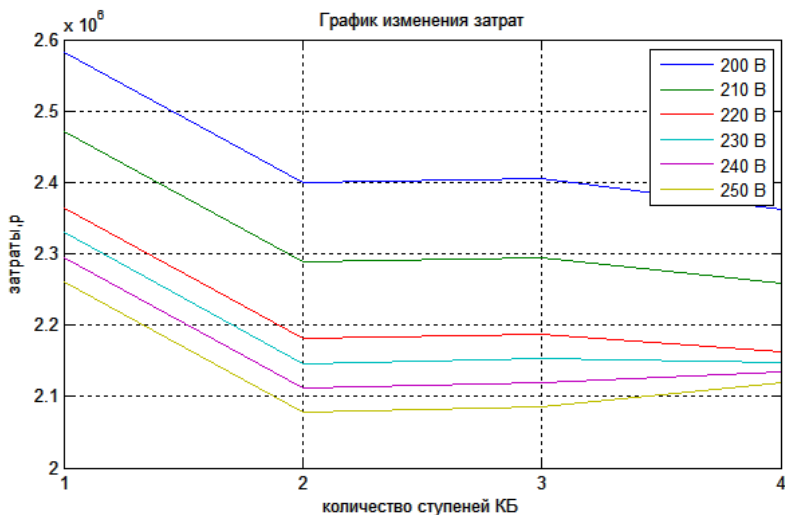


Рис. 5. Зависимости годовых затрат на компенсацию реактивной мощности от уровня напряжения и количества ступеней регулирования установки
 Fig. 5. Dependences of the annual costs for reactive power compensation on the voltage level and the number of control steps of the installation

V. Заключение

Вопросы повышения эффективности процессов снижения потерь активной мощности на производствах со значительным потреблением реактивной мощности целесообразно решать за счет алгоритмов управления статическими преобразователями. Предложенный алгоритм управления статической УКРМ позволяет обеспечить эффективную динамическую компенсацию за счет снижения стоимости, повышения надежности и срока службы силовых элементов.

Показаны результаты оптимизационного моделирования работы типовых производств (имеющих в качестве основной – асинхронную и осветительную нагрузку) по критерию минимума среднегодовых затрат, с учетом типа потребителей электроэнергии, их мощности, графика нагрузки,

структуры системы электроснабжения, требования стандартов качества напряжения. Определены оптимальные параметры УКРМ (мощность, число ступеней) и узла нагрузки.

Предложенную методику определения лучшего варианта установок компенсации целесообразно использовать на стадии проектирования систем электроснабжения предприятий для технико-экономического обоснования выбранного энергосберегающего оборудования.

Реализация предложенных решений позволяет получить значительный технический и экономический эффект на уровне широкого класса тиристорных конденсаторных установок для промышленных производств и распределительных сетей 0,4 кВ.

© Бабенко В.В., 2021

© Крысанов В.Н., 2021

Поступила в редакцию 01.11.2021

Received 01.11.2021

Библиографический список

- [1] Крысанов В.Н. Программно-аппаратное обеспечение систем управления ЭЭС на базе технологии FACTS. Воронеж: ВГТУ, 2016. – 232 с.
- [2] Крысанов В.Н. Аппаратно-программное управление режимами узлов нагрузки региональных сетей электроснабжения с помощью статических устройств. Воронеж: ВГТУ, 2017. – 234 с.
- [3] Шакарян Ю.Г., Новиков Н.Л. Технологическая платформа Smart grid (основные средства) // Энергоэксперт. 2009. № 4. С. 42-49.
- [4] Тайц А.А., Мешель Б.С. Регулирование напряжения и реактивной мощности в электрических сетях промышленных предприятий. М., Л.: Госэнергоиздат, 1960. – 224 с.
- [5] Крысанов В.Н. Эффективность использования тиристорных конденсаторных установок в промышленных системах электроснабжения // Энергобезопасность и энергосбережение. 2017. № 3. С. 15-20. DOI: 10.18635/2071-2219-2017-3-15-20
- [6] Булатов О.Г., Царенко А.И. Тиристорно-конденсаторные преобразователи. М.: Энергоиздат, 1982. – 217 с.
- [7] Силовой тиристорный модуль SKKT // АС Энергия. [Электронный ресурс]. URL: <https://asenergi.com/catalog/moduli-silovye/modul-skkt.html> (дата обращения 01.09.2021).
- [8] Тиристор быстродействующий ТБ 253-1000-14, АС Энергия, 2018. – 7 с. [Электронный ресурс]. URL: <https://asenergi.ru/pdf/tiristor/tb253/tb253-1000.pdf> (дата обращения 02.09.2021).
- [9] SCR output. Single phase SSR (200 to 400 A) // GREEGOO. [Электронный ресурс]. URL: http://www.greego.com/Catalogue/scr-output-ssr_ID3.html (дата обращения 02.09.2021).

- [10] Крысанов В.Н., Иванов К.В. Управление силовыми коммутационными элементами конденсаторной установки, Свид. о гос. рег. № 2017615137, заявл. 06.03.2017; опубл. 03.05.2017.
- [11] Крысанов В.Н., Иванов К.В. Определение оптимальных параметров конденсаторной установки для компенсации реактивной мощности по критерию минимума затрат, Свид. о гос. рег. № 2017618141, заявл. 31.05.2017; опубл. 24.07.2017.

References

- [1] V.N. Krysanov, *Programmno-apparatnoe obespechenie sistem upravleniya EES na baze tekhnologii FACTS [Software and hardware of electric power systems control systems based on the FACTS technology]*. Voronezh: VSTU, 2016 (in Russian).
- [2] V.N. Krysanov, *Apparatno-programmnoe upravlenie rezhimami uzlov nagruzki regional'nyh setej elektrosnabzheniya s pomoshch'yu staticheskikh ustrojstv [Hardware and software control of load node modes of regional power supply networks using static devices]*. Voronezh: VSTU, 2017 (in Russian).
- [3] Yu.G. Shakaryan and N.L. Novikov, "Tekhnologicheskaya platforma Smart grid (osnovnye sredstva) [Technological platform Smart grid (fixed assets)]", *Energoekspert [Energy expert]*, no. 4, pp. 42-49, 2009 (in Russian).
- [4] A.A. Taitz and B.S. Meshel, *Regulirovanie napryazheniya i reaktivnoj moshchnosti v elektricheskikh setyah promyshlennykh predpriyatij [Regulation of voltage and reactive power in electrical networks of industrial enterprises]*. Moscow, Leningrad: Gosenergoizdat, 1960 (in Russian).
- [5] V.N. Krysanov, "Thyristor switched capacitor in energy efficient industrial power systems", *Energy Safety and Energy Economy*, iss. 3, pp. 15-20, 2017. DOI: 10.18635/2071-2219-2017-3-15-20
- [6] O.G. Bulatov and A.I. Tsarenko, *Tiristoro-kondensatornye preobrazovateli [Thyristor-capacitor converters]*. Moscow: Energoizdat, 1982 (in Russian).
- [7] Silovoj tiristornyj modul' SKKT [Power thyristor module SKKT]. [Online]. Available at: <https://asenergi.com/catalog/moduli-silovye/modul-skkt.html> [Accessed: Sept. 1, 2021] (in Russian).
- [8] *Tiristor bystrodeystvuyushchij TB 253-1000-14 [High-speed thyristor TB 253-1000-14]*, AS Energi. [Online]. Available at: <https://asenergi.ru/pdf/tiristor/tb253/tb253-1000.pdf> [Accessed: Sept. 2, 2021] (in Russian).
- [9] SCR output. Single phase SSR (200 to 400A). [Online]. Available at: http://www.greegoo.com/Catalogue/scr-output-ssr_ID3.html [Accessed: Sept. 2, 2021].
- [10] V.N. Krysanov and K.V. Ivanov, "Upravlenie silovymi kommutacionnymi elementami kondensatornoj ustanovki [Control of power switching elements of a capacitor plant]", Certificate of state registration no. 2017615137, May 03, 2017 (in Russian).
- [11] V.N. Krysanov and K.V. Ivanov, "Opredelenie optimal'nyh parametrov kondensatornoj ustanovki dlya kompensacii reaktivnoj moshchnosti po kriteriyu minimuma zatrat [Determination of optimal parameters of a condenser plant for compensation of reactive power according to the minimum cost criterion]", Certificate of state registration no. 2017618141, July 24, 2017 (in Russian).

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ
INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Бабенко Владимир Владимирович, аспирант Воронежского государственного технического университета, г. Воронеж, Российская Федерация.

Vladimir V. Babenko, postgraduate student of the Voronezh State Technical University, Voronezh, Russian Federation.

Крысанов Валерий Николаевич, кандидат технических наук, директор ООО ПКФ «Современные Технологии», г. Воронеж, Российская Федерация.

Valery N. Krysanov, Cand. Sci. (Eng.), director of the LLC PKF “Modern Technologies”, Voronezh, Russian Federation.

УДК 621.397.7

DOI 10.46960/2658-6754_2021_4_81

АДРЕСНАЯ СИГНАЛИЗАЦИЯ ПРОГНОЗИРУЕМОЙ ОСТАТОЧНОЙ ДЕФОРМАЦИИ ПЕРЕГРУЖЕННОГО ЭЛЕМЕНТА ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКОГО СИЛОВОГО АГРЕГАТА

Р.С. Ахметшин

Набережночелнинский институт (филиал)
Казанского (Приволжского) федерального университета
Набережные Челны, Россия
e-mail: zoia_2007@inbox.ru

А.Ф. Анчугова

Набережночелнинский институт (филиал)
Казанского (Приволжского) федерального университета
Набережные Челны, Россия
e-mail: plotnikova_af@mail.ru

В статье предложено техническое решение мониторинга остаточной деформации для прогнозирования отказа перегруженного элемента, узла (участка) электротехнического силового агрегата. Предлагается метод адресного определения места критической величины деформации, который сократит срок ремонта по устранению аварии, а также предлагается технический принцип выполнения устройства мониторинга.

Ключевые слова: механическая перегрузка, электропривод, механическая передача вращающего момента, отказ, остаточная деформация, поломка.

Для цитирования: Ахметшин Р.С., Анчугова А.Ф. Адресная сигнализация прогнозирования остаточной деформации перегруженного элемента электротехнического силового агрегата // Интеллектуальная электротехника. 2021. № 4. С. 81-89. DOI: 10.46960/2658-6754_2021_4_81

ADDRESS SIGNALING OF PREDICTED RESIDUAL DEFORMATION OF OVERLOADED ELEMENT OF ELECTRICAL POWER UNIT

R.S. Akhmetshin

Kazan Federal University – Naberezhnye Chelny Institute
Naberezhnye Chelny, Russia
e-mail: zoia_2007@inbox.ru

A.F. Anchugova

Kazan Federal University – Naberezhnye Chelny Institute

Naberezhnye Chelny, Russia

e-mail: plotnikova_af@mail.ru

Abstract. The article proposes a technical solution for monitoring residual deformation to predict the failure of an overloaded element, node, (section) of an electrical power unit. A method for addressing the location of the critical value of deformation, which will shorten the repair time to eliminate the accident, is proposed, and a technical principle for performing a monitoring device is proposed.

Keywords: breakdown, electric drive, failure, mechanical overload, mechanical transmission of torque, residual deformation.

For citation: R.S. Akhmetshin and A.F. Anchugov, “Address signaling of prediction of residual deformation of an overloaded element of an electrical power unit”, *Smart Electrical Engineering*, no. 4, pp. 81-89, 2021. DOI: 10.46960/2658-6754_2021_4_81

I. Введение

Все экспериментальные методы обнаружения и измерения остаточных напряжений в изделиях в основном определяют эксплуатационные свойства продукции. Эти методы можно разделить (в некоторой степени условно) на химические, механические, рентгенографические, твердости, магнитные, поляризационно-оптические, термические и металлохимические.

Химические методы, чаще всего направленные на обнаружение и определение знака поверхностных напряжений, основаны на явлении влияния остаточных (и не только) напряжений на коррозионную стойкость металла.

Все механические методы являются разрушающими и заключаются в замере деформаций после удаления части металла изделия, за счет которого происходит перераспределение в объеме внутренних напряжений. Механические методы находят ограниченное применение, так как изделие подвергается частичному или полному разрушению.

Методы химического или электролитического травливания, несмотря на разнообразие аппаратуры, базируются на тех же основных принципах, что и механические методы: на основании замеров изменяющихся размеров тела при травливании с его поверхности слоев металла вычисляют деформации, а затем и величину остаточных напряжений.

Рентгенографические методы имеют следующие преимущества перед механическими и химическими: во-первых, сохраняется объект исследования, если ограничиваться измерением напряжений в поверхностных слоях; во-вторых, появляется возможность измерять напряжения в каждой

точке поверхности при любом, даже несимметричном, распределении напряжений.

Метод твердости заключается в использовании влияния внутренних напряжений на величину твердости напряженных тел. Магнитный метод основан на зависимости между магнитными свойствами металла и упругими напряжениями. Поляризационно-оптический метод базируется на исследовании деформаций на поверхности металла с использованием оптически активных пленок. Термический метод заключается в определении остаточных напряжений, используя способность металлических изделий изменять размеры при отжиге.

Применение того или иного метода обуславливается конкретными условиями исследования.

Научная новизна данной работы состоит в разработке новой методики определения остаточной деформации перегруженного элемента электротехнического силового агрегата. Предлагается метод адресного определения места критической величины деформации, который сократит срок ремонта по устранению аварии, а также предлагается технический принцип выполнения устройства мониторинга. Статья в большей степени носит информационный характер.

II. Постановка задачи

Остаточная деформация, возникающая при превышении действующими нагрузками пределы упругости, относится к механическим повреждениям. Вредное действие остаточных напряжений сказывается в повышении общей химической активности металла. Остаточные напряжения могут вызвать искажение формы и изменение размеров изделия во время его обработки, эксплуатации или хранения [1, 2].

В промышленности известны технические решения по определению остаточной деформации для прогнозирования отказа, например, [3, 4].

Устройство для определения внутренних остаточных напряжений объектов (изделий), прогнозирующее аварию механического агрегата, содержит: блок для контроля создавшегося напряженно-деформированного состояния, измеритель деформации на поверхности, содержащий объектив. При этом измеритель деформации выполнен в виде голографического интерферометра, а блок для определения напряженно-деформированного состояния и объектив закреплены на корпусе интерферометра так, чтобы рабочая зона первого и фокус объектива совпали с геометрическим центром контролируемой зоны.

Устройством мониторинга внутренних остаточных напряжений [5-7] технически сложно получить корректный результат в производственных цехах, где возможны значительные вибрации и перепады температур, невозможно соблюдать чистоту измерений, а также отсутствует возможность

определения местоположения элемента в многоэлементном объекте с максимальным внутренним остаточным напряжением.

На практике находит применение также способ для определения внутренних остаточных напряжений в объекте [8], предназначенный для мониторинга остаточной механической деформации в участке или звене механического силового агрегата для прогнозирования аварии. Способ заключается в том, что повышение точности, производительности и расширение класса исследуемых объектов, зоны релаксации напряжений производят динамическим ударом с помощью сферического элемента диаметром в диапазоне 7-11 мм² из твердосплавного материала по направлению нормали к поверхности с силой, обеспечивающей образование на поверхности отпечатка диаметром 0,1-0,15 мм² сферического элемента.

Способ определения остаточных напряжений в объекте [9] обладает существенным недостатком: при использовании его в крупных цехах металлопроката определение внутренних остаточных напряжений в объекте некорректно по причине резко переменных температур и вибраций. Определение местоположения внутренних остаточных напряжений с наибольшей величиной не представляется возможным. Причем этот способ можно отнести к разрушительным, так как удар с остаточным отпечатком чреват появлением микротрещин.

III. Адресное определение места остаточной механической деформации

В статье приводится техническое решение адресного определения прогнозируемого возможного места возникающей с большей по величине остаточной механической деформации в участке (звене) силового агрегата.

Сущностью предлагаемого технического решения является устройство адресного мониторинга остаточной механической деформации во всех участках (звеньях) механического силового агрегата, содержащего двигатель (синхронный электродвигатель), движители участков или звеньев механического силового агрегата, дополненных на торцах валов двигателя и всех движителей особыми точками (метки, риски), например, их точечным намагничиванием. Напротив торцов валов двигателя и всех движителей, имеющих особые точки (метки, риски) на неподвижных частях (статорах, станинах механизмов), предусмотрены датчики отбора сигнала от точек с метками (рисками), что на торце вала двигателя и каждого движителя. Причем датчики закреплены на корпусе силового агрегата, и полученные сигналы в датчиках трансформируются в предусмотренном блоке, имеющем в свою очередь адаптер, регистратор и согласующий узел. Для возможности приведения по частоте вращения вала каждого движителя к базовой частоте вращения вала двигателя, дополнительно предусмотрен аналого-цифровой

преобразователь и цифровой вычислитель автоматического счета небаланса угла смещения между меткой (риском) на точке на валу каждого двигателя (или разница времени появления сигнала) относительно метки (риски) на точке на валу двигателя. Небаланс угла или разница времени образуется при наличии остаточной деформации в каком-либо элементе силового агрегата. Анализатор – компьютер предусмотрен с функциями исполнительного органа и сигнализатора предельной остаточной деформации.

При достижении критической величины измеренного угла или разницы времени передается сигнал предупреждения диспетчеру пульта.

На рис. 1 изображено устройство мониторинга остаточной механической деформации в участке или звене механического силового агрегата.

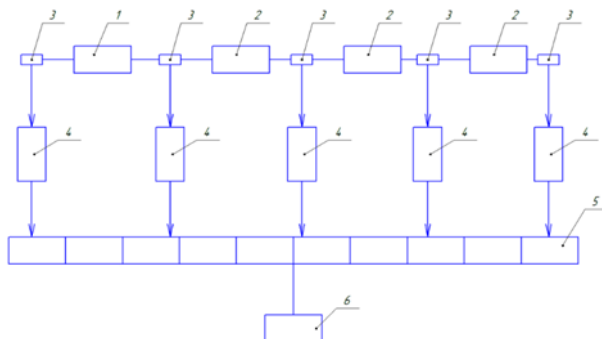


Рис. 1. Устройство мониторинга остаточной механической деформации в участке или звене механического силового агрегата

Fig. 1. Device for monitoring residual mechanical deformation in a section or link of a mechanical power unit

Обозначения на рис. 1: 1 – двигатель механического силового агрегата; 2 – движитель звена механического силового агрегата; 3 – датчик отбора сигнала от метки точки на торце вала двигателя 1 и каждого движителя 2 (при этом условно не показана метка (намагниченная точка или риска) на торце вала двигателя 1 и движителей 2); 4 – блок содержит адаптер, регистратор и согласующий узел отбора сигнала с метки (риски) (намагниченная точка) на торце вала двигателя 1 и точки с меткой (риской), точка на валу каждого движителя 2. Появляющиеся сигналы от датчиков в блоке 4, в котором показания от датчиков приводятся по частоте вращения вала каждого движителя 2 к базовой частоте вращения вала двигателя 1. Далее, 5 – аналогово-цифровой преобразователь (АЦП) и цифровой вычислитель определяют небаланс угла смещения между меткой (риской) на точке на валу движителя 2 (или разница времени появления сигнала) относительно

метки (риски) на точке на валу двигателя 1. Небаланс угла или разница времени образуется при появлении остаточной деформации в каком-либо элементе силового агрегата. 6 – анализатор – компьютер с функциями исполнительного органа и сигнализатора предельной остаточной деформации.

Предлагаемое техническое решение работает следующим образом.

Появившаяся остаточная деформация на элементах деталей, подверженных импульсным механическим давлениям, фиксируется в накопительном процессе работы механического силового агрегата. Она напрямую зависит от возникающих механических сил и моментов в динамических режимах работы и описывается следующими математическими моделями [10] по совокупности сил:

$$\sum F = m \cdot \frac{dv}{dt} + v \cdot \frac{dm}{dt}, \quad (1)$$

по совокупности моментов:

$$\sum M = J \cdot \frac{d\omega}{dt} + \omega \cdot \frac{dJ}{dt}, \quad (2)$$

где m и J – масса и момент инерции элемента, ω и v – угловая и линейная скорости движения элемента, t – время.

Если процесс соответствует установившемуся номинальному механическому режиму, то совокупность сил и моментов (1), (2) равны 0.

В общем виде уравнение движения принимает вид:

$$M - M_c = J \cdot \frac{d\omega}{dt} = M_{\text{дин}}, \quad (3)$$

где M – момент двигателя, M_c – момент нагрузки, $M_{\text{дин}}$ – динамический момент.

Если динамический момент увеличивается до критического, то будет наблюдаться деформация, которая может вызвать остаточную деформацию, последствием которой может стать отказ или поломка.

Устройство постоянно или периодически производит мониторинг остаточной деформации опросом угла расхождения меток (рисок) на точках на торцах, вращающихся валов каждого звена двигателей 2 (рис.1), механического силового агрегата при больших крутящих моментах, относительно метки (риски) на точках на торце вала двигателя 1, принятого за начало отсчёта. Это производится путём приведения частоты вращения валов двигателей 2 к базовой частоте вращения вала двигателя 1. И далее

путем опроса и сбора информация с каждого датчика 3 поступает информация через блок 4 (адаптер с регистратором) от движителей 2 о расположении меток на торцах валов движителей силового агрегата относительно расположения меток на торцах вала двигателя 1. Информация преобразуется в АЦП 5, вычисляются углы расхождения между метками, далее информация анализируется с помощью программного обеспечения анализатор - компьютера 6. Анализ позволяет определить место остаточной деформации, возможно предельной величины, то есть предельного угла расхождения между метками на торцах валов движителей 2 и двигателя 1.

IV. Заключение

Известные в промышленности технические решения по определению остаточной деформации для прогнозирования отказа обладают определенными недостатками:

- отсутствует адресность определения критических остаточных деформаций в звеньях (участках);
- определение местоположения внутренних остаточных напряжений с наибольшей величиной в существующих методах не представляется возможным.

Рассматриваемое устройство мониторинга остаточной механической деформации лишено указанных ранее недостатков, присутствующих в применяемых методах обнаружения и измерения остаточных напряжений. Адресность предлагаемого технического решения позволяет сократить сроки ремонта по устранению аварии за счет уменьшения времени поиска места аварии.

©Ахметшин Р.С., 2021

©Анчугова А.Ф., 2021

Поступила в редакцию 12.11.2021

Received 12.11.2021

Библиографический список

- [1] Буркин С.П., Шимов Г.В., Андрюкова Е.А. Металлургия. Остаточные напряжения в металлопродукции. Москва: Юрайт, 2021. – 247 с.
- [2] ГОСТ 27.302-86. Надежность в технике. Методы определения допустимого отклонения параметра технического состояния прогнозирования остаточного ресурса составных частей агрегатов и машин. Введ. 1987-01-01 (отменен).
- [3] Чернышев Г.Н., Попов А.Л., Козинцев В.М. Полезные и опасные остаточные напряжения // Природа. 2002. № 10 (1046). С. 17-24.
- [4] Тутушкин В.И., Фандеев Е.П. Методический подход к выбору диагностических параметров для прогнозирования технического состояния аппаратуры // Известия Высших Учебных Заведений. Поволжский регион. Технические науки. 2011. №3 (19). С. 124-131.

- [5] Вишняков М.А., Кравченко Б.А. Применение термомеханического упрочнения для повышения характеристик качества поверхности высоконагруженных деталей // Справочник. Инженерный Журнал. 2002. № 12. С. 15–18.
- [6] Лешерн П.И., Мацюк В.И., Пылайкин П.А., Петухов А.В. Способ определения величины остаточной деформации и устройство его осуществления, Пат. SU 787888, заявл. 01.09.1978; опубл. 15.12.1980. – Бюл. № 46.
- [7] Антонов А.А., Чернышев Г.Н., Морозов В.К. Устройство для определения внутренних остаточных напряжений изделий, Пат. SU 953438, заявл. 21.04.1980; опубл. 25.08.1982. – Бюл. № 31.
- [8] Игнатъев А.Г., Шахматов М.В., Костюченко В.П., Способ определения остаточных напряжений в объекте и устройство его осуществления, Пат. SU 1717941, заявл. 31.08.1989; опубл. 07.03.1992. – Бюл. № 9.
- [9] Шимов Г.В., Ковин Д.С. Остаточные напряжения в медных и латунных трубах // Известия вузов. Цветная Металлургия. 2015. № 5. С. 46-49. DOI: 10.17073/0021-3438-2015-1s-46-49
- [10] Москаленко В.В. Электрический привод. М.: Академия, 2007. – 368 с.

References

- [1] S.P. Burkin, G.V. Shimov and E.A. Andriukova, *Metallurgiya. Ostatochnye napryazheniya v metalloprodukcii [Metallurgy. Residual stresses in metal products]*. Moscow: Yurayt, 2021 (in Russian).
- [2] Industrial product dependability. Evaluation methods of admissible state-deviation and prognosis of the residual machine components, GOST 27.302-86, Jan. 1987.
- [3] G.N. Chernyshev, A.L. Popov and V.M. Kozintsev, “Useful and hazardous residual stresses”, *Priroda*, no. 10, pp. 17-24, Oct. 2002.
- [4] E.P. Fandeev and V.I. Tutushkin, “Metodicheskiy podhod k vyboru diagnosticheskikh parametrov dlya prognozirovaniya tekhnicheskogo sostoyaniya apparatury [Methodical approach to the choice of diagnostic parameters for predicting the technical condition of equipment]”, *University Proceedings. Volga Region. Technical Sciences*, no. 3 (19), pp. 124-131, 2011 (in Russian).
- [5] M.A. Vishnyakov and B.A. Kravchenko, “Primenenie termomekhanicheskogo uprochneniya dlya povysheniya harakteristik kachestva poverhnosti vysokonagruzhennykh detalej [Application of thermomechanical hardening to improve the surface quality characteristics of highly loaded parts]”, *Spravochnik. Inzhenernyi Zhurnal*, no. 12, pp. 15-18, 2002 (in Russian).
- [6] P.I. Leshern, V.I. Matsyuk, P.A. Pylaikin and A.V. Petukhov, “Sposob opredeleniya velichiny ostatochnoy deformatsii i ustrojstvo ego osushchestvleniya [A method for determining the magnitude of residual deformation and a device for its implementation]”, Patent SU 787888, Dec. 15, 1980 (in Russian).
- [7] A.A. Antonov, G.N. Chernyshev and V.K. Morozov, “Ustrojstvo dlya opredeleniya vnutrennih ostatochnyh napryazhenij izdelij [Device for determining the internal residual stress of the products]”, Patent SU 953438, Aug. 25, 1982 (in Russian).
- [8] A.G. Ignat'ev, M.V. Shakhmatov and V.P. Kostyuchenko, “Sposob opredeleniya ostatochnyh napryazhenij v ob'ekte i ustrojstvo ego osushchestvleniya [Method of determination of residual stresses in the object and device for its implementation]”, Patent SU 1717941, March 07, 1992 (in Russian).

- [9] G.V. Shimov and D.S. Kovin, “Residual stresses in copper and brass pipes after drawing”, *Izvestiya Vuzov. Tsvetnaya Metallurgiya (Izvestiya. Non-Ferrous Metallurgy)*, no. S, pp. 46-49, 2015. DOI: 10.17073/0021-3438-2015-1s-46-49
- [10] V.V. Moskalenko, *Elektricheskiy privod [Electric drive]*. Moscow: Academy, 2007 (in Russian).

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Ахметшин Роберт Султанович, кандидат технических наук, доцент Набережночелнинского института (филиала) Казанского (Приволжского) Федерального Университета, г. Набережные Челны, Российская Федерация.

Robert S. Akhmetshin., Cand. Sci. (Eng.), associate professor of the Kazan Federal University – Naberezhnye Chelny Institute, Naberezhnye Chelny, Russian Federation.

Анчугова Алевтина Флегентьевна, старший преподаватель Набережночелнинского института (филиала) Казанского (Приволжского) Федерального Университета, г. Набережные Челны, Российская Федерация

Alevtina F. Anchugova, assistant professor of the Kazan Federal University – Naberezhnye Chelny Institute, Naberezhnye Chelny, Russian Federation.

УДК 621.313.3

DOI 10.46960/2658-6754_2021_4_90

ЧЕТЫРЕХФАЗНЫЙ ВЕНТИЛЬНЫЙ ДВИГАТЕЛЬ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

В.М. Гридин

Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана
Москва, Россия
e-mail: gridin1940@mail.ru

В статье представлена конструкция двигателя, у которого обмотка выполнена несимметричной: ее вторая, третья и четвертая фазы смещены относительно первой фазы азы на угол, равный соответственно 90° , 135° и 225° электрических градусов. Рассмотрены особенности устройства и работы такого двигателя.

Составлены выражения для фазных токов и магнитных индукций в моментных четырехфазном и трехфазном двигателях в виде рядов Фурье. Получены выражения для электромагнитного момента и пульсации этого момента. При анализе этих выражений установлено, что пульсация момента у четырехфазного двигателя примерно в 2,4 раза меньше, чем у трехфазного. Также установлено, что четырехфазный двигатель создаёт такой же удельный момент, как и трехфазный двигатель, и является более надежным.

Ключевые слова: вентильный двигатель, пульсация момента, удельный момент, четырехфазный двигатель, четырехфазная несимметричная и трехфазная обмотки, электромагнитный момент.

Для цитирования: Гридин В.М. Четырехфазный вентильный двигатель переменного тока // Интеллектуальная Электротехника. 2021. № 4. С. 90-100. DOI: 10.46960/2658-6754_2021_4_90

FOUR PHASE VENT AC MOTOR

V.M. Gridin

Bauman Moscow State Technical University
Moscow, Russia
e-mail: gridin1940@mail.ru

Abstract. The article presents the design of a motor with an asymmetrical winding: its second, third and fourth phases are shifted relative to the first phase by an angle equal to 90° , 135° and 225° electrical degrees, respectively. The features of the device and the operation of such motor are considered.

The expressions for phase currents and magnetic inductions in torque four-phase and three-phase motors in the form of Fourier series are compiled. Expressions for the electromagnetic moment and pulsation of this moment are obtained. When analyzing these

expressions, it was found that the ripple of the moment in a four-phase motor is approximately 2.4 times less than in a three-phase motor. It has also been found that a four-phase motor produces the same specific torque as a three-phase motor and is more reliable.

Keywords: electromagnetic moment, four-phase motor, four-phase unbalanced and three-phase windings, ripple of torque, specific moment, vent motor.

For citation: V.M. Gridin, “Four phase vent AC motor”, *Smart Electrical Engineering*, no. 4, pp. 90-100, 2021. DOI: 10.46960/2658-6754_2021_4_90

I. Введение

Вентильные двигатели (ВД) по сравнению с двигателями постоянного тока обладают подобными характеристиками, но не имеют скользящих контактов. Поэтому они работают более надежно, особенно при вибрациях, ускорениях, после ударов, в вакууме и т.п.

ВД содержит синхронный двигатель (СД), инвертор тока (ИТ), формирующий значения фазных токов в соответствии с положением ротора, датчик положения ротора (ДПР) и преобразователь сигналов ДПР в напряжения, управляющие ИТ. ВД можно разделить на два типа: ВД постоянного тока и ВД переменного тока [1].

Здесь рассматриваются моментные, т.е. низкоскоростные ВД, у которых скорость вращения вала может быть, например, (0,01-0,1) об/с и, следовательно, ЭДС вращения является ничтожной по сравнению с напряжением питания. Такие двигатели применяют, например в гироскопических системах как коррекционные для удержания оси гироскопа в заданном направлении. Основными характеристиками моментных ВД являются удельный момент (отношение момента к объему активной, электромеханической части двигателя) и пульсация момента.

ВД постоянного тока – бесконтактный двигатель постоянного тока (БДПТ). Для моментных БДПТ [2-5] характерно трапецевидное распределение магнитной индукции по окружности воздушного зазора и постоянные фазные токи при соответствующих положениях ротора. Так как реальное распределение магнитной индукции по окружности воздушного зазора – не строго трапецеидальное, то при повороте ротора момент пульсирует. Пульсацию можно уменьшить, изменяя при повороте ротора фазные токи плавно или ступенчато, как это показано в [3, 4].

Для моментных ВД переменного тока [1, 6-8] характерны синусообразное распределение магнитной индукции по окружности воздушного зазора и синусообразные фазные токи. ИТ может быть выполнен линейным при относительно небольших значениях момента или с широтно-импульсным модулятором (ШИМ) фазных напряжений [1]. Так как реальное рас-

пределение магнитной индукции по окружности воздушного зазора и фазные токи – не строго синусоидальные, то при повороте ротора момент пульсирует. Пульсацию можно уменьшить, применяя для ИТ отрицательную обратную связь по току. В этом случае ВД содержит датчик тока, а схема ВД усложнена [1], [7]. С той же целью можно калибровать преобразователь сигналов ДПР в напряжения, управляющие ИТ, т.е. корректировать форму фазных токов. Но устройство и процесс калибровки весьма громоздки [1].

II. Четырехфазного вентильный двигатель переменного тока

На рис. 1 показана упрощенная электрическая схема четырехфазного ВД переменного тока с ИТ, содержащим ШИМ.

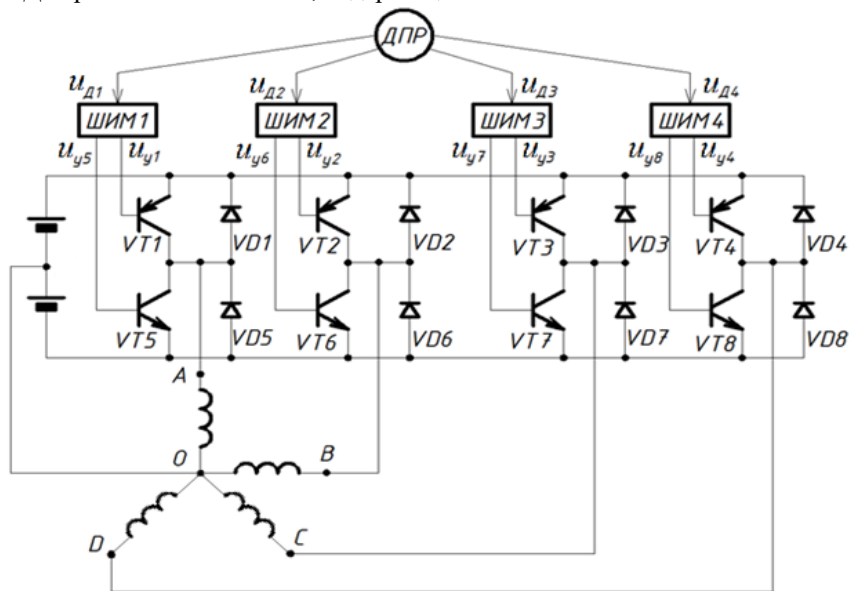


Рис. 1. Упрощенная электрическая схема ВД переменного тока:
 АО, ВО, СО, ДО – фазы обмотки; ДПР – датчик положения ротора;
 ШИМ1 – ШИМ4 – широтно-импульсные модуляторы

Fig. 1. Simplified electrical circuit of valve AC motor:
 AO, BO, CO, DO – winding phases; DPR – rotor position sensor;
 PWM1 – PWM4 – pulse width modulators

Силовая часть этой схемы, содержащая обмотку, транзисторы $VT1 - VT8$ и диоды $VD1 - VD8$, вместе с источником питания изображена в виде принципиальной электрической схемы. Остальная часть, содержащая ДПР и ШИМ1 – ШИМ4, изображена в виде упрощенной функциональной схемы

управления транзисторами $VT1 - VT8$. Преобразователь сигналов ДПР не показан. На входы ШИМ подаются также пилообразные напряжения, с которыми сравниваются преобразованные сигналы ДПР. Из-за несимметрии обмотки применен источник питания со средней точкой, которая соединена с общим выводом O фаз обмотки.

Обмотка – четырехфазная несимметричная предложена в [9]. Ее фазы BO , CO и DO смещены относительно фазы AO на электрический угол, равный соответственно 90° , 135° и 225° . Обмотка выполнена распределенной с укороченным шагом. Она может быть уложена в пазы, скошенные на одно пазовое деление, или на внутренней цилиндрической поверхности гладкого магнитопровода якоря для исключения пульсации момента, обусловленной зубчатым строением магнитопровода. Индуктор выполнен в виде цилиндрического постоянного магнита с радиальными неявно выраженными полюсами или состоящим из внутреннего магнито-мягкого основания, наружных полюсов – магнитом и профилированных полюсных наконечников [7].

ДПР может быть выполнен, например в виде синус-косинусного вращающегося трансформатора или в виде двухфазного микросина. При вращении ротора напряжения на выходе преобразователя сигналов ДПР изменяются по законам, близким к синусоидальным:

$$\begin{aligned} u_{д1} &\approx U_{дм} \cdot \sin \alpha; & u_{д2} &\approx U_{дм} \cdot \sin(\alpha - 90^\circ); \\ u_{д3} &= \frac{(-u_{д1} + u_{д2})}{\sqrt{2}} \approx U_{дм} \cdot \sin(\alpha - 135^\circ); \\ u_{д4} &= \frac{-(u_{д1} + u_{д2})}{\sqrt{2}} \approx U_{дм} \cdot \sin(\alpha + 135^\circ), \end{aligned} \quad (1)$$

где $U_{дм}$ – амплитуда выходных напряжений преобразователя, α – угловое положение ротора.

ШИМ1 – ШИМ4 создают последовательности импульсов напряжений $u_{y1} - u_{y8}$, у которых отношение γ их длительности к интервалу времени между соседними импульсами соответствует напряжениям $u_{д1} - u_{д4}$ и равно соответствующей синусоидальной функции от угла α .

На одном полупериоде изменения напряжений $u_{д1} - u_{д4}$ импульсы напряжений $u_{y1} - u_{y4}$ с изменяемым отношением γ поступают на входы транзисторов $VT1 - VT4$, а на другом полупериоде аналогичные импульсы напряжений $u_{y5} - u_{y8}$ поступают на входы транзисторов $VT5 - VT8$, и последние в это время открываются и проводят ток. В результате по фазам обмотки, представляющим активно-индуктивную нагрузку, через транзи-

сторы $VT1 - VT8$ и диоды $VD1 - VD8$ протекают непрерывные синусообразные токи, и двигатель создает электромагнитный момент. Более подробно устройство и работа ВД с ШИМ описаны в [6].

ВД переменного тока, в том числе четырехфазный, может быть выполнен и без ШИМ, с линейным ИТ при относительно небольших значениях момента [1].

Электромагнитный момент m можно выразить следующим образом:

$$m = A \cdot I_m \cdot w \cdot \varepsilon, \quad (2)$$

где:

$$A = D \cdot L \cdot B_m \cdot \rho; \quad \varepsilon = \sum_{k=1}^S \bar{i}_k \cdot \bar{b}_k; \quad \bar{i}_k = \frac{i_k}{I_m}; \quad \bar{b}_k = \frac{b_k}{B_m}, \quad (3)$$

где D – диаметр воздушного зазора между якорем и индуктором, L – длина магнитопровода якоря, B_m – максимальная магнитная индукция в воздушном зазоре, $\rho \approx 0,95-0,97$ – коэффициент, учитывающий скос пазов или укладку обмотки на гладком магнитопроводе якоря, I_m – максимальный ток в фазах обмотки, w – число витков в каждой фазе, S – число фаз обмотки, i_k – ток в k -й фазе, b_k – результирующая магнитная индукция для k -й фазы обмотки (равная сумме магнитных индукций в местах расположения q катушек этой фазы, деленной на $2 \cdot q$).

III. Сравнение характеристик четырехфазного и трехфазного ВД

Сравним основные характеристики четырехфазного и трехфазного моментных ВД переменного тока. У обоих ВД ИТ, ДПР и преобразователь сигналов ДПР – однотипные. Например, ИТ выполнены как линейные. СД имеют одинаковую конструкцию и выполнены в одинаковых габаритах, а их обмотки потребляют одну и ту же энергию от источников питания с одинаковым напряжением. При этом считаем, что у обоих ВД одинаковы распределения магнитной индукции по окружности воздушного зазора. Учитываем, что фазные токи в трехфазных ВД не содержат гармоники, кратные трем, и содержат таковые в четырехфазных ВД.

Для сравниваемых ВД сомножитель A – одинаковый, а произведения $I_m \cdot w \cdot \varepsilon$ – различные в формуле для электромагнитного момента. Будем обозначать характеристики трех и четырехфазного ВД с индексом 3 и 4 соответственно.

Если при вращении ротора магнитные индукции b_k и токи i_k изменялись бы строго синусоидально, то были бы справедливы следующие выражения и значения:

$$\varepsilon_4 = \sum_1^4 \overline{i_k} \cdot \overline{b_k} = \sin^2 \alpha + \sin^2 (\alpha - 90^\circ) + \sin^2 (\alpha - 135^\circ) + \sin^2 (\alpha + 135^\circ) = 2, 0; \quad (4)$$

$$\varepsilon_3 = \sum_1^3 \overline{i_k} \cdot \overline{b_k} = \sin^2 \alpha + \sin^2 (\alpha - 120^\circ) + \sin^2 (\alpha + 120^\circ) = 1, 5. \quad (5)$$

Очевидно, что сомножители ε_4 и ε_3 , а следовательно, и электромагнитные моменты (далее – моменты) не зависели бы от положения ротора и отсутствовала бы пульсация моментов.

Но реально фазные токи i_k и магнитные индукции b_k как периодические функции от угла α содержат высшие нечётные гармоники. С другой стороны, принципиально невозможно устранить хотя бы все значимые высшие гармоники или идеально откорректировать преобразователь сигналов ДПР, т.е. откорректировать форму фазных токов. Поэтому при вращении ротора момент всегда пульсирует.

Нахождение выражений для момента и пульсации момента с учетом всех дестабилизирующих момент факторов является очень сложной задачей. Искомые выражения были бы также очень сложными для анализа. А нахождение значений пульсаций вообще является неопределенной задачей, так как неизвестны гармонические составы (ряды) для относительных фазных токов $\overline{i_k}$ и магнитных индукций $\overline{b_k}$. Однако все же можно определить, оценить отношение пульсаций моментов сравниваемых ВД, а также отношение моментов, что и сделано далее. Отношение пульсаций моментов гораздо менее критично к значениям коэффициентов Фурье для гармонических рядов, чем сами пульсации моментов.

Для относительных фазных токов и магнитных индукций в четырехфазном ВД ($S = 4$) можно записать следующие выражения (ряды Фурье), считая, что $\overline{i_k} = \overline{b_k}$:

$$\overline{b_1} = \overline{i_1} = \sin \alpha + C_3 \cdot \sin 3\alpha + C_5 \cdot \sin 5\alpha + C_7 \cdot \sin 7\alpha + C_9 \cdot \sin 9\alpha + \dots; \quad (6)$$

$$\overline{b_2} = \overline{i_2} = \sin (\alpha - 90^\circ) + C_3 \cdot \sin (3\alpha + 90^\circ) + C_5 \cdot \sin (5\alpha - 90^\circ) + C_7 \cdot \sin (7\alpha + 90^\circ) + C_9 \cdot \sin (9\alpha - 90^\circ) + \dots; \quad (7)$$

$$\overline{b_3} = \overline{i_3} = \sin (\alpha - 135^\circ) + C_3 \cdot \sin (3\alpha - 45^\circ) + C_5 \cdot \sin (5\alpha + 45^\circ) + C_7 \cdot \sin (7\alpha + 135^\circ) + C_9 \cdot \sin (9\alpha - 135^\circ) + \dots; \quad (8)$$

$$\overline{b_4} = \overline{i_4} = \sin (\alpha + 135^\circ) + C_3 \cdot \sin (3\alpha + 45^\circ) + C_5 \cdot \sin (5\alpha - 45^\circ) + C_7 \cdot \sin (7\alpha - 135^\circ) + C_9 \cdot \sin (9\alpha + 135^\circ) + \dots; \quad (9)$$

Абсолютные фазные токи и магнитные индукции – результат умножения относительных фазных токов и индукций на максимальный ток I_m и на максимальную индукцию B_m соответственно.

Если учесть только 1-ю, 3-ю, 5-ю, 7-ю и 9-ю гармоники, пренебречь квадратами и произведениями выражений для высших гармоник как малыми членами и использовать формулу:

$$\sin(\alpha - \beta) \cdot \sin n(\alpha - \beta) = \frac{\cos[(n-1) \cdot (\alpha - \beta)] - \cos[(n+1) \cdot (\alpha - \beta)]}{2}, \quad (10)$$

где $\beta = 0, 90^\circ, 135^\circ, 225^\circ, n = 3, 5, 7, 9, \dots$

то можно получить выражения:

$$\varepsilon_4 = \sum_1^4 \bar{i}_k \cdot \bar{b}_k = \varepsilon_{\text{ср4}} \cdot (1 - v_4 \cdot \cos 8\alpha); \quad (11)$$

$$\varepsilon_{\text{ср4}} = 2; \quad v_4 = 2 \cdot (C_7 - C_9), \quad (12)$$

где $\varepsilon_{\text{ср4}}$ – среднее значение сомножителя ε_4 , v_4 – пульсация сомножителя ε_4 . Так как момент m пропорционален сомножителю ε , то v_4 есть пульсация момента четырехфазного ВД.

Для относительных магнитных индукций \bar{b}_k в трехфазном ВД ($S = 3$) можно записать аналогичные выражения (ряды Фурье):

$$\bar{b}_1 = \sin \alpha + C_3 \cdot \sin 3\alpha + C_5 \cdot \sin 5\alpha + C_7 \cdot \sin 7\alpha + C_9 \cdot \sin 9\alpha + \dots; \quad (13)$$

$$\begin{aligned} \bar{b}_2 = \sin(\alpha - 120^\circ) + C_3 \cdot \sin 3\alpha + C_5 \cdot \sin(5\alpha + 120^\circ) + \\ + C_7 \cdot \sin(7\alpha - 120^\circ) + C_9 \cdot \sin 9\alpha + \dots; \end{aligned} \quad (14)$$

$$\begin{aligned} \bar{b}_3 = \sin(\alpha + 120^\circ) + C_3 \cdot \sin 3\alpha + C_5 \cdot \sin(5\alpha - 120^\circ) + \\ + C_7 \cdot \sin(7\alpha + 120^\circ) + C_9 \cdot \sin 9\alpha + \dots \end{aligned} \quad (15)$$

Здесь весовые коэффициенты Фурье при синусах такие же, как и для ВД с четырехфазной обмоткой. Считаем, что выражения для относительных фазных токов $\bar{i}_1, \bar{i}_2, \bar{i}_3$ отличаются от приведенных выражений для относительных индукций только отсутствием гармоник, кратных трем. Действуя аналогично случаю $S = 4$, можно получить выражения:

$$\varepsilon_3 = \sum_1^3 \bar{i}_k \cdot \bar{b}_k = \varepsilon_{\text{ср3}} \cdot (1 - v_3 \cdot \cos 6\alpha); \quad (16)$$

$$\varepsilon_{\text{ср3}} = 1,5; \quad v_3 = 2 \cdot (C_5 - C_7). \quad (17)$$

Из (12) и (17) получим искомое отношение пульсаций момента:

$$\frac{v_3}{v_4} = \frac{(C_5 - C_7)}{(C_7 - C_9)}. \quad (18)$$

Так как $C_5 > C_7 > C_9$, то $(C_7 - C_9) < (C_5 - C_7)$.

Следовательно, $v_4 < v_3$.

Если, например $C_5 = 1/25$, $C_7 = 1/49$, $C_9 = 1/81$, то по (12) и (17) получим следующие значения:

$$v_4 = 0,016 \text{ или } 1,6 \%, \quad v_3 = 0,039 \text{ или } 3,9 \%.$$

Следовательно: $v_4 < v_3$, $v_3 / v_4 = 3,9 / 1,6 = 2,44$.

Этот результат близок к результатам испытаний моментных вентилярных двигателей в НИИ прикладной механики. В результате испытаний установлено, что: $v_4 \approx 1,5 \%$, $v_3 \approx 3,5 \%$, $v_3 / v_4 \approx 2,3$.

Если в гармонических рядах Фурье для относительных фазных токов и магнитных индукций весовые коэффициенты различные, то можно получить выражения, аналогичные (12) и (17):

$$v_4 = C_{7i} + C_{7b} - C_{9i} - C_{9b}, \quad v_3 = C_{5i} + C_{5b} - C_{7i} - C_{7b}, \quad (19)$$

где коэффициенты с индексом i относятся к относительному току, а коэффициенты с индексом b относятся к относительной магнитной индукции.

И в этом случае также $v_4 < v_3$.

Найдем отношение моментов M_4 / M_3 сравниваемых ВД. Условия сравнения указаны ранее. При равенстве площадей всех пазов якоря для $S = 4$ и $S = 3$ справедливы выражения:

$$8 \cdot w_4 \cdot g_4 = 6 \cdot w_3 \cdot g_3; \quad \frac{g_4}{g_3} = \frac{3}{4} \cdot \frac{w_3}{w_4}, \quad (20)$$

где w_3 и w_4 , g_3 и g_4 – числа витков в каждой фазе обмотки и площади поперечного сечения проводников обмотки при $S = 3$ и $S = 4$.

При равенстве напряжений питания отношение максимальных токов в фазах обмоток:

$$\frac{I_{m4}}{I_{m3}} = \frac{R_3}{R_4} = \frac{w_3}{g_3} \cdot \frac{g_4}{w_4} = \frac{3}{4} \cdot \left(\frac{w_3}{w_4} \right)^2, \quad (21)$$

где R_3 и R_4 – сопротивления фаз при $S = 3$ и $S = 4$.

С другой стороны, при равенстве напряжений питания и энергий, потребляемых обмотками, справедливо:

$$4I_{m4} = 3I_{m3}. \quad (22)$$

Из двух последних формул получим:

$$I_{m4} \cdot w_4 = \frac{3}{4} \cdot I_{m3} \cdot w_3. \quad (23)$$

Согласно вышеприведенной формуле для момента m справедливо выражение: $M = A \cdot \varepsilon_{\text{ср}} \cdot I_m \cdot w$.

Поэтому

$$\frac{M_4}{M_3} = \frac{\varepsilon_{\text{ср}4} \cdot I_{m4} \cdot w_4}{\varepsilon_{\text{ср}3} \cdot I_{m3} \cdot w_3}. \quad (24)$$

Нетрудно установить, что $M_3 \approx M_4 \approx M$. Следовательно, удельные моменты сравниваемых ВД одинаковы.

Оценим и сравним работу сравниваемых моментных ВД в случае отказа транзистора или схемы управления им. В этом случае для момента m справедливы выражения:

$$\begin{aligned} m_3 &= \left[\sin^2 \alpha + \sin^2 (\alpha - 120^\circ) \right] \cdot \frac{M}{1,5} = \left[1 + 0,5 \cdot \cos(2\alpha + 60^\circ) \right] \cdot \frac{M}{1,5} = \\ &= \left(\frac{1}{3} \div 1 \right) \cdot M; \end{aligned} \quad (25)$$

$$\begin{aligned} m_3 &\approx \left[\sin^2 \alpha + \sin^2 (\alpha - 90^\circ) + \sin^2 (\alpha \mp 135^\circ) \right] \cdot \frac{M}{2} = \\ &= \left[1,5 + 0,5 \cdot \sin 2\alpha \right] \cdot \frac{M}{2} = \left(\frac{1}{2} \div 1 \right) \cdot M. \end{aligned} \quad (26)$$

При повороте ротора момент m будет изменяться от M_{\min} до M :

$$M_{\min 4} = \frac{M}{2}; \quad M_{\min 3} = \frac{M}{3}; \quad \frac{M/2}{M/3} = 1,5. \quad (27)$$

Следовательно, четырехфазный ВД является более надежным.

IV. Заключение

Рассмотрен четырехфазный вентильный двигатель переменного тока, у которого обмотка выполнена несимметричной: ее вторая, третья и четвертая фазы смещены относительно первой фазы азы на угол, равный соответственно 90° , 135° и 225° электрических градусов. Рассмотрены особенности устройства и работы такого двигателя.

Составлены выражения для фазных токов и магнитных индукций в моментных четырехфазном и в трехфазном двигателях в виде рядов Фурье. Используя их, получены выражения для электромагнитного момента и пульсации этого момента. При анализе этих выражений установлено, что пульсация момента у четырехфазного двигателя примерно в 2.4 раза меньше, чем у трехфазного. Также установлено, что четырехфазный двигатель создаёт такой же удельный момент, что и трехфазный двигатель, и является более надежным.

Поэтому четырехфазный моментный вентильный двигатель переменного тока, несмотря на более сложное устройство, чем у трехфазного двигателя, может и должен найти применение.

© Гридин В.М., 2021

Поступила в редакцию 15.09.2021

Received 15.09.2021

Библиографический список

- [1] Балковой А.П., Цаценкин В.К. Прецизионный электропривод с вентильными двигателями. М.: Издательский дом МЭИ, 2010. – 328 с.
- [2] Гридин В.М. Электромагнитные характеристики моментных бесконтактных двигателей постоянного тока // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Серия «Машиностроение». 2011. № 2. С. 75–86.
- [3] Гридин В.М. Способы уменьшения пульсации момента и выходного напряжения бесконтактных моментных двигателей и тахогенераторов постоянного тока // Электричество. 2016. № 4. С. 56–61.
- [4] Гридин В.М. Моментные бесконтактные двигатели постоянного тока с дискретным и дискретно-аналоговым управлением по положению ротора // Электричество. 2017. № 4. С. 50–55. DOI: 10.24160/0013-5380-2017-4-50-55
- [5] Гридин В.М. Характеристики моментных бесконтактных двигателей постоянного тока с симметричной и несимметричной обмотками // Электроника и электрооборудование транспорта. 2017. № 2. С. 28-31.
- [6] Косулин В.Д., Михайлов Г.Б., Омельченко В.В., Путников В.В. Вентильные электродвигатели малой мощности для промышленных роботов. Л.: Энергоатомиздат, 1988. – 184 с.
- [7] Столов Л.И., Афанасьев А.Ю. Моментные двигатели постоянного тока. М.: Энергоатомиздат, 1989. – 223 с.

- [8] Баранов М.В., Бродовский В.Н., Зимин А.В., Каржавов Б.Н. Электрические следящие приводы с моментным управлением исполнительными двигателями. М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2006. – 240 с.
- [9] Гридин В.М. Вентильный электродвигатель, Пат. SU 1270846, заявл. 06.04.1984; опубл. 15.07.1986. – Открытия. Изобретения. 1986, № 42.

References

- [1] A.P. Balkova and V.K. Tsatsenkin, *Precizionnyj elektroprivod s ventil'nymi dvigatelyami [Precision electric drive with valve motors]*. Moscow: Publishing house MEI, 2010 (in Russian).
- [2] V.M. Gridin, “Elektromagnitnye harakteristiki momentnyh beskontaktnyh dvigatelej postoyannogo toka [Electromagnetic characteristics of torque contactless DC motors]”, *Herald of the Bauman Moscow State Technical University. Series Mechanical Engineering*, no. 2, pp. 75-86, 2011 (in Russian).
- [3] V.M. Gridin, “Ways for decreasing torque pulsations and output voltage ripple in contactless torque motors and DC tachogenerators”, *Elektrichestvo*, no. 4, pp. 56-61, 2016.
- [4] V.M. Gridin, “Contactless torque DC motors with discrete and discrete-analog control with respect to rotor position”, *Elektrichestvo*, no. 4, pp. 50-55, 2017. DOI: 10.24160/0013-5380-2017-4-50-55
- [5] V.M. Gridin, “Characteristics of the contactless torque DC motors with symmetric and asymmetrical windings”, *Electronics and Electrical Equipment of Transport*, no. 2, pp. 28-31, 2017.
- [6] V.D. Kosulin, G.B. Mikhailov, V.V. Omelchenko and V.V. Putnikov, *Ventil'nye elektrodvigateeli maloj moshchnosti dlya promyshlennyh robotov [Valve electric motors of low power for industrial robots]*. Leningrad: Energoatomizdat, 1988 (in Russian).
- [7] L.I. Stolov and A.Yu. Afanasyev, *Momentnye dvigateli postoyannogo toka [DC torque motors]*. Moscow: Energoatomizdat, 1989 (in Russian).
- [8] M.V. Baranov, V.N. Brodovsky, A.V. Zimin and B.N. Karzhavov, *Elektricheskie sledyashchie privody s momentnym upravleniem ispolnitel'nymi dvigatelyami [Electric servo drives with torque control of executive motors]*. Moscow: MGТУ n.a. N.E. Bauman, 2006 (in Russian).
- [9] V.M. Gridin, “Rectifier electric motor”, Patent SU 1270846, July 15, 1986, in *Discoveries. Inventions*, no. 42, 1986.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Гридин Владимир Михайлович, кандидат технических наук, доцент Московского государственного технического университета имени Н.Э. Баумана, г. Москва, Российская Федерация.

Vladimir M. Gridin, Cand. Sci. (Eng.), associate professor of the Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation.

СИЛОВАЯ ЭЛЕКТРОНИКА

УДК 620.179.16

DOI 10.46960/2658-6754_2021_4_101

РАЗРАБОТКА АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ УПРУГИХ ВОЛН В МЕТАЛЛИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛАХ

Хлыбов А.А.

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева
Нижний Новгород, Россия
ORCID: 0000-0002-6559-7819 e-mail: hlybov_52@mail.ru

Кабалдин Ю.Г.

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева
Нижний Новгород, Россия
ORCID: 0000-0003-4300-6659 e-mail: uru.40@mail.ru

Желонкин М.В.

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева
Нижний Новгород, Россия
ORCID: 0000-0003-1036-6906 e-mail: noreas@mail.ru

Аносов М.С.

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева
Нижний Новгород, Россия
ORCID: 0000-0001-8150-9332 e-mail: anosov-maksim@list.ru

Шатагин Д.А.

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева
Нижний Новгород, Россия
ORCID: 0000-0003-1293-4487 e-mail: dmitsanych@gmail.com

Рябов Д.А.

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева
Нижний Новгород, Россия
ORCID: 0000-0002-0486-598X e-mail: ryabovdm1996@gmail.com

Приведено описание и применение автоматизированной измерительной системы неразрушающего контроля акустическим методом для получения физико-механических характеристик металлов. Представлены этапы проектирования и моделирования отдельных функциональных узлов разработанной системы.

Ключевые слова: автоматизированный измерительный комплекс, акустическая структурометрия, измерение физико-механических характеристик, нейросетевое моделирование, неразрушающий контроль, упругие волны.

Для цитирования: Хлыбов А.А., Кабалдин Ю.Г., Желонкин М.В., Аносов М.С., Шатагин Д.А., Рябов Д.А. Разработка автоматизированной измерительной системы неразрушающего контроля для измерения параметров упругих волн в металлических материалах // Интеллектуальная Электротехника. 2021. № 4. С. 101-114. DOI: 10.46960/2658-6754_2021_4_101

DEVELOPMENT OF AUTOMATED MEASURING SYSTEM OF NON-DESTRUCTIVE CONTROL FOR MEASURING PARAMETERS OF ELASTIC WAVES IN METALLIC MATERIALS

Khlybov A.A.

Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev
Nizhny Novgorod, Russia
ORCID: 0000-0002-6559-7819 e-mail: hlybov_52@mail.ru

Kabaldin Yu.G.

Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev
Nizhny Novgorod, Russia
ORCID: 0000-0003-4300-6659 e-mail: uru.40@mail.ru

Zhelonkin M.V.

Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev
Nizhny Novgorod, Russia
ORCID: 0000-0003-1036-6906 e-mail: noreas@mail.ru

Anosov M.S.

Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev
Nizhny Novgorod, Russia
ORCID: 0000-0001-8150-9332 e-mail: anosov-maksim@list.ru

Shatagin D.A.

Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev
Nizhny Novgorod, Russia
ORCID: 0000-0003-1293-4487 e-mail: dmitsanych@gmail.com

Ryabov D.A.

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

Nizhny Novgorod, Russia

ORCID: 0000-0002-0486-598X e-mail: ryabovdm1996@gmail.com

Abstract. The description and application of an automated measuring system for non-destructive testing by the acoustic method for obtaining the physical and mechanical characteristics of metals are presented. The stages of design and modeling of individual functional units of the developed system are given.

Keywords: acoustic structurometry, automated measuring complex, elastic waves, measurement of physical and mechanical characteristics, neural network modeling, non-destructive inspection.

For citation: A.A. Khlybov, Yu.G. Kabaldin, M.V. Zhelonkin, M.S. Anosov, D.A. Shtagin and D.A. Ryabov, "Development of automated measuring system of non-destructive control for measuring parameters of elastic waves in metallic materials", *Smart Electrical Engineering*, no. 4, pp. 101-114, 2021. DOI: 10.46960/2658-6754_2021_4_101

I. Введение

В зависимости от типа и интенсивности нагрузок в период эксплуатации в металлических материалах деталей возникают микро и макроповреждения. В зависимости от воздействий они могут быть разделены на силовые, температурные, химические и электрохимические [1].

Переменные напряжения приводят к изменению физико-механических характеристик, к зарождению и развитию повреждений в материале образца. Возникает задача предотвращения разрушения для повышения безопасной эксплуатации оборудования.

Решением данной проблемы является своевременный неразрушающий контроль механических характеристик, накопленных повреждений до появления видимых трещин.

Разработка новых методов измерений позволяет использовать различные типы и комбинации акустического контроля. Значительное развитие в области электронных компонентов позволяет повысить эффективность применения акустических методов диагностики за счет применения новых методов генерации и обработки сигналов и автоматизации процесса измерений.

Современный рынок предлагает большое разнообразие приборов и систем для решения различных научно-исследовательских задач в разных отраслях науки. Как правило, такой тип оборудования направлен на решение узкого спектра задач. Функционал встроенного программного обеспе-

чения (ПО) не позволяет решать задачи, которые стоят перед исследователями. Большое количество исследований требуют индивидуального подхода к процессу автоматизации и разработке специализированного ПО.

В связи с этим разработка автоматизированной измерительной системы неразрушающего контроля с использованием современных акустических методов для получения физико-механических характеристик металлов является актуальной задачей в области материаловедения.

Для создания автоматизированной измерительной системы основной метрологической характеристикой в качестве структурно-чувствительного параметра является измерение скорости распространения упругих волн [2-6].

II. Структура и основные этапы проектирования

Стадии разработки конструкторской документации и этапы проектирования автоматизированной измерительной системы неразрушающего контроля (АИС-НРК-3) соответствуют стандарту ГОСТ 2.103-2013 [7]. Стадии разработки АИС-НРК-3 и этапы создания в соответствии с ГОСТ 34.601-90 [8].

Для разработки АИС-НРК-3 применялся подход для проектирования радиоэлектронной аппаратуры I-го уровня с использованием средств автоматизированного проектирования (рис. 1). Проектирование АИС-НРК-3 начиналось с разработки электрической принципиальной схемы, затем проводилось цифроаналоговое моделирование схемы, размещение электронных компонентов на проектируемой печатной плате с последующей трассировкой электрических соединений между выводами размещенных компонентов в соответствии с правилами проектирования, и заключительным этапом проводилась проверка и контроль проектных результатов и выпуск данных на изготовления с выпуском проектной документации.

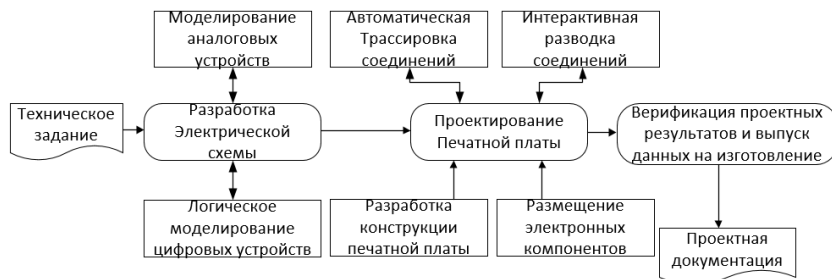


Рис. 1. Этапы проектирования АИС-НРК-3

Fig. 1. Design stages AMS-NDC-3

Для сокращения сроков разработки АИС-НРК-3 ввиду того, что физическое прототипирование связано с большими затратами, была использована система автоматизированного проектирования для имитационного моделирования цифро-аналоговых электротехнических устройств, которая позволяет проводить анализ рабочих режимов и осуществлять оценку параметров схемы без изготовления ее макетных образцов.

Для проведения анализа и расчета по постоянному току, расчета переходных процессов, спектров сигналов, нелинейных цепей во временной области были использованы алгоритмы функционирования схмотехнического моделирования программы *PSPICE* (рис. 2).

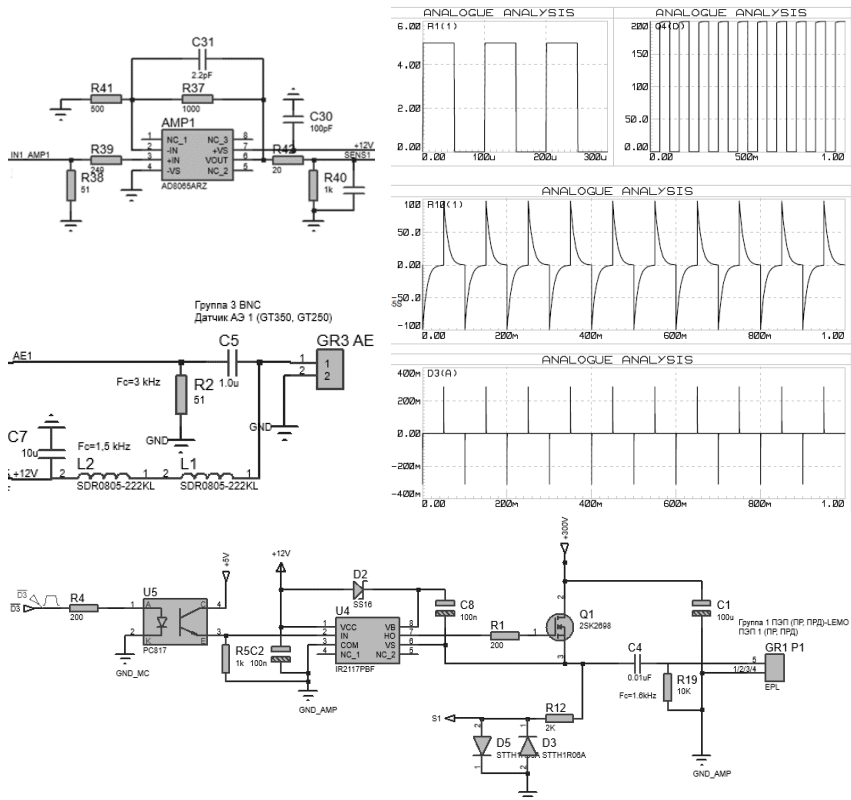


Рис. 2. Фрагмент моделирования усилительных каскадов и операционного усилителя для согласования входных и выходных сигналов
Fig. 2. Fragment of simulation of amplifier stages and an operational amplifier for matching input and output signals

Были получены временные характеристики блоков усилителя сигналов и блоков согласования системы. Моделировались входные сигналы с исполнительного микроконтроллера через усилительных тракт (рис. 2). В процессе моделирования использовались стандартные библиотеки элементов: резисторы, конденсаторы, индуктивные катушки, диоды, биполярные транзисторы и полевые транзисторы. Параметры симуляции, в частности: допуск по точности, количество шагов интегрирования, температурные параметры и параметры переходных процессов для некоторых используемых аналоговых интегральных схем были заданы вручную. Для моделирования входных воздействий были использованы источники напряжения и тока необходимой конфигурации.

Для исследования частотно-временных характеристик разработанной системы был получен спектр виртуального акустического сигнала (рис. 3, *а*) и его временная развертка (рис. 3, *б, в*) при возбуждении одиночным импульсом.

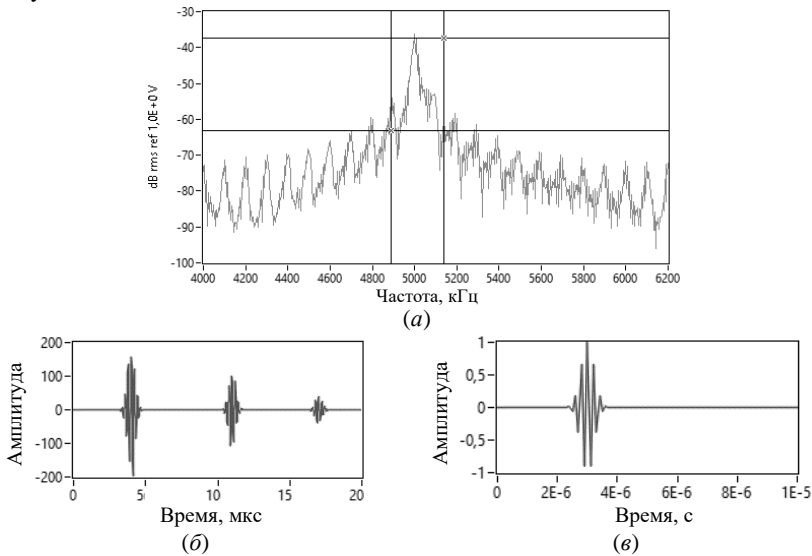


Рис. 3. Временные и частотные зависимости блока генерации: спектр сигнала, генерируемого пьезоэлектрическим преобразователем (ПЭП) (*а*); временная развертка сигнала, генерируемого ПЭП (*б*); единственный импульс с блока генерации сигнала (*в*)

Fig. 3. The time and frequency dependences of the generation unit: signal spectrum generated by a piezoelectric transducer (*a*), time base of the signal generated by piezoelectric transducer (*b*), single pulse from the signal generation unit (*c*)

III. Основные характеристики АИС-НРК-3

Методика измерений построена на измерении физико-механических характеристик акустическим методом.

Назначение АИС-НРК-3 состоит в измерении временных интервалов между импульсами упругих волн, распространяющимися в материале исследуемого объекта, и отношения размахов импульсов от генератора импульсов возбуждения (ГИВ) и приемного пьезоэлектрического преобразователя (ПЭП). Основной принцип действия основан на регистрации серии отраженных импульсов упругих волн, возбуждаемых в объекте контроля пьезоэлектрическим преобразователем, и последующей ее обработки программными средствами.

Основные характеристики АИС-НРК-3:

- методы контроля: эхо-, зеркально-теневого (ЗТМ), теневой;
- количество каналов ПЭП: 3 канала для совмещенных ПЭП; 1 канал для раздельного ПЭП;
- количество каналов акустической эмиссии (АЭ): 2 канала для подключения датчиков АЭ;
- входной импеданс: 50 Ом;
- зондирующий импульс: радиоимпульс, амплитудой V_{pp} –130 В..+130 В, с программной регулировкой амплитуды, диапазон регулировки $\pm 95\dots\pm 130$ В, заполнение от 0...100 %, изменяемая частота радиоимпульса (250 Гц – 200 кГц);
- режимы детектирования: автоматический, ждущий, однократный;
- измерение временных интервалов: от 0 до первого сигнала в зоне или между сигналами в зонах, по фронту, по максимуму сигнала или по переходу через "0".

Особенности АИС-НРК-3:

- подключение датчиков ПЭП, АЭ;
- настраиваемый генератор прямоугольных импульсов;
- поддержка беспроводного подключения (беспроводной передачи данных);
- цифровой приемник с широким динамическим диапазоном;
- настраиваемый пользовательский интерфейс;
- различные формы отчетов;
- объем данных для хранения и передачи 1 ТБ;
- скоростной *USB*-порт, *Ethernet* для обмена данными с ПК;
- аналоговый выход: частота дискретизации, макс 100 кГц, диапазон выходного сигнала ± 10 В;
- дополнительные функции: частотомер, спектроанализатор.

На рис. 4 представлена структурная схема работы АИС-НРК-3.

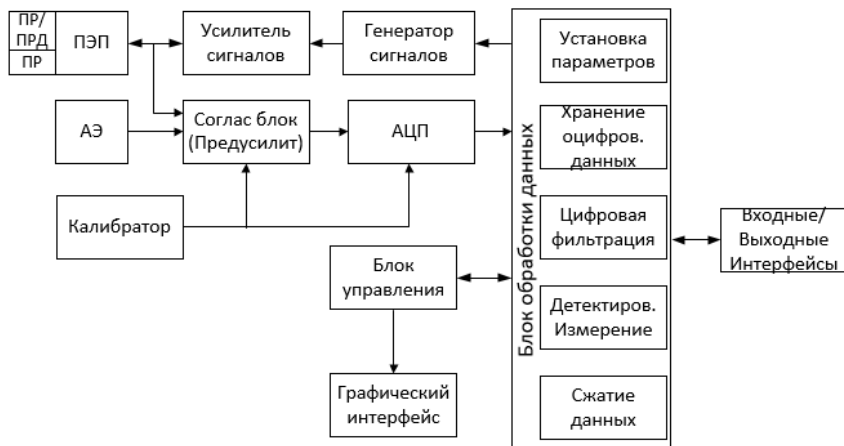


Рис. 4. Структурная схема АИС-НПК-3
 Fig. 4. Structural diagram of AMS-NDC-3

Основные компоненты:

- компьютерная платформа, реализующая функции блок управления и обработки данных с графическим интерфейсом пользователя;
- генератор сигналов базе микроконтроллера;
- аналого-цифровой преобразователь на базе системы сбора данных *DAQ*;
- согласующее устройство, реализующее функции усилителя сигналов, предусилителя и калибратора;
- подключаемые датчики ПЭП, АЭ;
- блок входных/выходных интерфейсов для обеспечения подключения проводным/беспроводным сетям.

В качестве первичных преобразователей ПЭП используются стандартные пьезоэлектрические преобразователи, удовлетворяющие требованиям ГОСТ Р 55725 - 2013 [9].

Генератор сигналов через усилитель подает высокочастотные импульсы с заданными параметрами частоты, заполнения и амплитуды от блока управления на передающий преобразователь ПЭП, генерируя ультразвуковые колебания. Отраженные от противоположной или внутренней поверхности изделия эхо-сигналы принимаются приемным ПЭП, преобразуются в электрические сигналы и подаются для согласования уровней сигналов на предусилитель приемника. С предусилителя через регулируемый

усилитель электрические сигналы поступают на аналого-цифровой преобразователь с большим динамическим диапазоном, где преобразуются в цифровой код. Цифровой код передается в блок обработки данных.

Блок управления синхронизирует работу генератора сигналов и выбирает часть волн для дальнейшей обработки и отображения. Встроенный калибратор используется для корректировки смещения постоянного уровня, коэффициента усиления, фазы и частотных характеристик аналогового входного блока с помощью цифрового преобразователя. Данная схема калибровки гарантирует отсутствие дрейфа нуля, линейность прибора и высокую степень воспроизводимости, что является основным преимуществом цифровой обработки сигналов перед аналоговым методом. После оцифровки выбранные эхо-сигналы сохраняются в памяти. Они подвергаются дальнейшей обработке цифровыми полосовыми фильтрами для оптимизации отношения сигнал-шум. Обработанные эхо-сигналы затем анализируются ПО для измерения времени/амплитуды, программируемого пользователем, и отображаются на экране.

Функции ПО заключаются в управлении аппаратными компонентами АИС-НРК-3, приеме первичной акустической информации и вычислениях в реальном масштабе времени временных интервалов между импульсами упругих волн, распространяющимися в материале исследуемого объекта, и отношения размахов импульсов.

Уровень защиты ПО – «низкий» в соответствии с Р 50.2.077-2014 [10].

Состав ПО АИС-НРК-3:

- 1) исполняемый пакет, предназначенный для запуска программы, для вызова других рабочих окон и для связи со всеми программными модулями ПО;
- 2) конфигурационный пакет, содержащий параметры настройки аппаратных компонентов, архивирования и хранения первичных данных на внешних носителях информации, файлы с драйверами подключения системы к беспроводным интерфейсам.

IV. Результаты

АИС-НРК-3 (рис. 5) предназначен для решения широкого класса научных и инженерных задач, связанных с исследованием структурных особенностей конструкционных материалов и оценкой физико-механических параметров материалов ответственных деталей и узлов с целью принятия решения о возможности их безопасной эксплуатации. В основу работы системы положен импульсный метод акустической структурометрии. Конструктивно АИС-НРК-3 выполнен в приборном исполнении в металлическом корпусе, внутри которого размещаются платы с радиоэлементами, выполненными в виде этажерочной конструкции. Беспроводное подключение

к системе обеспечивает максимальную мобильность и оперативность получаемых данных, быстрый способ организации научных исследований. Модульный подход к разработке ПО позволяет вносить изменения в отдельные модули, удалять некоторые из них или дополнять систему новыми модулями. В АИС-НРК-3 созданные модули представляют собой функциональные группы, которые объединены в единый программный комплекс как законченный программный продукт конкретного целевого назначения.

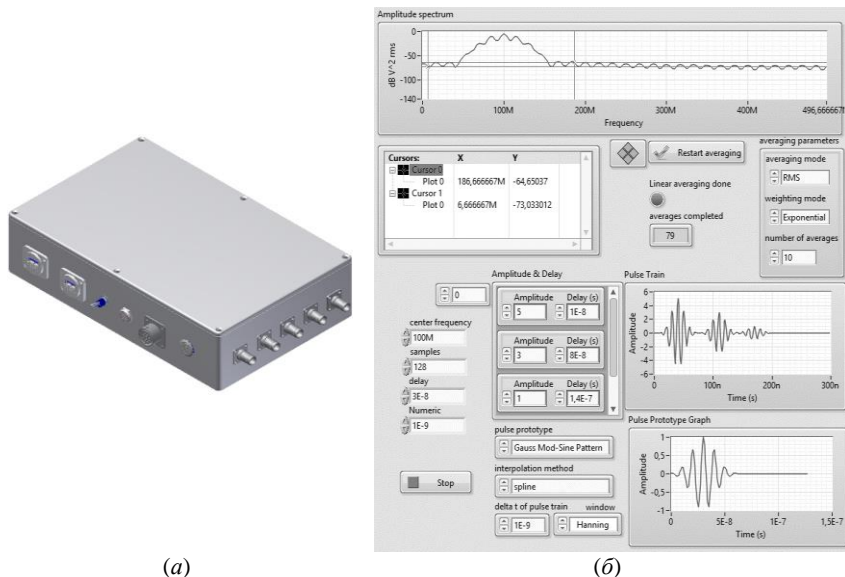


Рис. 5. Автоматизированная измерительная система неразрушающего контроля АИС-НРК-3:

общий вид (а); рабочий экран (б)

Fig. 5. Automated measuring system for non-destructive testing AMS-NDC-3:

general view (a); working screen (b)

Основные технические характеристики АИС-НРК-3 приведены в табл. 1.

В дальнейшем развитии ПО АИС-НРК-3 для определения более точных и расширенных физико-механических характеристик металлических материалов, планируется использование нейросетевых подходов. Ключевым этапом построения нейросетевых моделей является формирование обу-

чающей выборки. В частности, первым этапом предполагается использование полученных в ходе обучающих зависимостей акустических параметров от определяемых физико-механических характеристик. Под обучающими зависимостями понимают комплекс экспериментальных исследований, в ходе которых устанавливают вид функциональных или регрессионных связей акустических параметров с физико-механическими характеристиками материала объекта контроля.

Разработанная нейронная сеть, используемая в АИС-НРК-3, позволит определять следующие характеристики материала:

- объемный модуль упругости K , МПа;
- модуль Юнга E , МПа;
- коэффициент Пуассона ν ;
- предел текучести $\sigma_{0,2}$, МПа;
- предел прочности σ_B , МПа;
- накопленную поврежденность (выраженная через акустический параметр d).

Таблица 1
Основные технические характеристики

Table 1
Main technical characteristics

Напряжение питания, В	12 В ± 0,3
Потребляемая мощность, Вт не более	2
Габаритные размеры, мм, не более:	
– высота	65
– ширина	175
– длина	275
Масса, кг, не более	3
Условия эксплуатации:	
– температура окружающей среды, °С	от 5 до 40
– относительная влажность, %	от 30 до 80
– атмосферное давление, кПа	84 до 106,7
Средняя наработка на отказ, ч, не менее	10 000
Средний срок службы, лет, не менее	5

V. Выводы

При решении некоторых научных задач необходимо рассматривать применение специализированного ПО, функционал которого может быть использован либо уже в существующих приборах, либо в разрабатываемых системах. Разработанная автоматизированная измерительная система АИС-

НРК-3 позволяет обнаружить дефекты задолго до возникновения риска отказа оборудования путем их выявления на ранней стадии и измерения развития с помощью анализа акустических характеристик. Благодаря выявлению опасных дефектов и микродефектов применение разработанной системы на производстве позволит повысить экономическую эффективность путем сокращения издержек на ремонт, а также надежность контролируемых объектов путем обеспечения безопасной эксплуатации технических систем. При разработке системы использовались современные методы неразрушающего контроля, основанные на получении данных физико-механических характеристик путем регистрации акустического сигнала излучений и потоков частиц со структуры материала контролируемого изделия. Разработанная система может использоваться для диагностики выпускаемых и ремонтируемых изделий, а также для оценки их технического состояния в процессе эксплуатации.

Работа выполнена по гранту РФФИ №19-19-00332 «Разработка научно-обоснованных подходов и аппаратно-программных средств мониторинга поврежденности конструкционных материалов на основе подходов искусственного интеллекта для обеспечения безопасной эксплуатации технических объектов в Арктических условиях».

© Хлыбов А.А., 2021

© Кабалдин Ю.Г., 2021

© Желонкин М.В., 2021

© Аносов М.С., 2021

© Шатагин Д.А., 2021

© Рябов Д.А., 2021

Поступила в редакцию 11.10.2021

Received 11.10.2021

Библиографический список

- [1] Иванников В.В., Николаев А.Г., Шварц В.М., Рябов О.Б., Степанов В.Н. Характерные дефекты и повреждения металлических конструкций // Химическая техника. 2015. № 7. С. 5–12.
- [2] Углов А.Л., Хлыбов А.А., Макаров А.Д., Рязанов Р.Р., Соборнов А.Е. Методика оценки поврежденности аустенитной стали при термопульсациях акустическим методом // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. 2015. № 4 (111). С. 151–158.
- [3] Углов А.Л. Об одной модели накопления рассеянных повреждений // Прикладная механика. 1991. Т. 27. № 1. С. 77–84.
- [4] Волков И.А., Коротких Ю.Г. Уравнения состояния вязкоупругопластических сред с повреждениями. М.: Физматлит, 2008. – 424 с.
- [5] Углов А.Л., Ерофеев В.И., Смирнов А.Н. Акустический контроль оборудования при изготовлении и эксплуатации. М.: Наука, 2009. – 280 с.

- [6] Митенков Ф.М. [и др.]. Методы обоснования ресурса ядерных энергетических установок. М.: Машиностроение, 2007. – 445 с.
- [7] ГОСТ 2.103-2013. Единая система конструкторской документации. Стадии разработки. Введ. 2015-07-01. М.: Стандартинформ, 2019.
- [8] ГОСТ 34.601-90. Информационная технология. Комплекс стандартов на автоматизированные системы. Автоматизированные системы. Стадии создания. Введ. 1992-01-01. М.: Стандартинформ, 2009.
- [9] ГОСТ Р 55725 – 2013. Контроль неразрушающий Преобразователи ультразвуковые пьезоэлектрические. Общие технические требования. Введ. 2015-07-01. М.: Стандартинформ, 2014.
- [10] Р 50.2.077-2014. Государственная система обеспечения единства измерений. Испытания средств измерений в целях утверждения типа. Проверка защиты программного обеспечения. Введ. 2014-10-01. М.: Стандартинформ, 2014.

References

- [1] V.V. Ivannikov, A.G. Nikolaev, V.M. Shvarts, O.B. Ryabov and V.N. Stepanov, “Harakternye defekty i povrezhdeniya metallicheskih konstrukcij [Characteristic defects and damage of metal structures]”, *Himicheskaya tekhnika [Chemical Technology]*, no. 7, pp. 5–12, 2015 (in Russian).
- [2] A.L. Uglov, A.A. Khlybov, A.D. Makarov, R.R. Ryazapov and A.E. Sobornov, “Technique of assessing damage austenitic steel because of thermal pulsation by acoustic method”, *Transactions of NNSTU n. a. R.E. Alekseev*, no. 4, pp. 151–158, 2015.
- [3] A.L. Uglov, “One model of accumulation of scattered damages in structural materials”, *Soviet Applied Mechanics*, vol. 27, no. 1, pp. 77–84, 1991.
- [4] I.A. Volkov and Yu.G. Korotkikh, *Uravneniya sostoyaniya vyzkouprugoplasticheskikh sred s povrezhdeniyami [Equations of state for damaged viscoelastoplastic media]*. Moscow: Fizmatlit, 2008 (in Russian).
- [5] A.L. Uglov, V.I. Erofeev and A.N. Smirnov, *Akusticheskij kontrol' oborudovaniya pri izgotovlenii i ekspluatcii [Acoustic control of equipment during manufacture and operation]*. Moscow: Nauka, 2009 (in Russian).
- [6] F.M. Mitenkov et al., *Metody obosnovaniya resursa yadernyh energeticheskikh ustanovok [Methods for substantiating the resource of nuclear power plants]*. Moscow: Mashinostroenie, 2007 (in Russian).
- [7] Unified system for design documentation Stages of designing, GOST 2.103-2013, July 2015.
- [8] Information technology. Set of standards for automated systems. Automated systems. Stages of development, GOST 34.601-90, Jan. 1992.
- [9] Non-destructive testing. Piezoelectric ultrasonic transducers. General technical requirements, GOST R 55725 – 2013, July 2015.
- [10] State system for ensuring the uniformity of measurements. Pattern evaluations of a measuring instrument for pattern approval. Software validation for protection assurance, R 50.2.077-2014, Oct. 2014.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ
INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Хлыбов Александр Анатольевич, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева, г. Нижний Новгород, Российская Федерация.

Alexander A. Khlybov, D. Sci. (Eng.), professor, head of the chair of the Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev, Nizhny Novgorod, Russian Federation.

Кабалдин Юрий Георгиевич, доктор технических наук, профессор Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева, г. Нижний Новгород, Российская Федерация.

Yuri G. Kabaldin, D. Sci. (Eng.), professor of the Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev, Nizhny Novgorod, Russian Federation.

Желонкин Максим Викторович, кандидат технических наук, старший преподаватель Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева, г. Нижний Новгород, Российская Федерация.

Maksim V. Zhelonkin, Cand. Sci. (Eng.), assistant professor of the Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev, Nizhny Novgorod, Russian Federation.

Аносов Максим Сергеевич, кандидат технических наук, доцент Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева, г. Нижний Новгород, Российская Федерация.

Maksim S. Anosov, Cand. Sci. (Eng.), associate professor of the Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev, Nizhny Novgorod, Russian Federation.

Шатагин Дмитрий Александрович, кандидат технических наук, доцент Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева, г. Нижний Новгород, Российская Федерация.

Dmitriy A. Shatagin, Cand. Sci. (Eng.), associate professor of the Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev, Nizhny Novgorod, Russian Federation.

Рябов Дмитрий Александрович, аспирант Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева, г. Нижний Новгород, Российская Федерация.

Dmitry A. Ryabov, postgraduate student of the Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev, Nizhny Novgorod, Russian Federation.

ХРОНИКА

О 100-ЛЕТИИ ОПЕРАТИВНО-ДИСПЕТЧЕРСКОГО УПРАВЛЕНИЯ В ОТЕЧЕСТВЕННОЙ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКЕ

Оперативно-диспетчерское управление в электроэнергетике – особый процесс, который обеспечивает совместную работу множества разнообразных объектов генерации и потребителей, объединенных посредством электрических сетей в единый сложный технологический комплекс – энергосистему.

Основная особенность энергетической системы – единство технологического процесса, непрерывное взаимное влияние и неразрывная связь всех ее элементов – требует особых подходов к управлению ее работой. То, что объединение разрозненных субъектов в единую энергосистему позволяет существенно увеличить надежность и эффективность поставок электроэнергии потребителям, а управление такой системой – процесс, в корне отличающийся от организации эксплуатации отдельных электростанций, объектов электрических сетей и потребителей, стало понятно еще до начала реализации плана ГОЭЛРО.

К 1921 году шесть электростанций Москвы и области: Московская государственная электрическая станция (МГЭС), «Электропередача», Глуховская, Павловская, Шатурская и Ореховская были объединены для совместной параллельной работы, что потребовало организации выполнения новых, специальных функций диспетчерского (оперативного) управления – составления суточных графиков нагрузки потребителей, ее планового распределения между электростанциями и принятия мер в случае неплановых и аварийных изменений. Заниматься данной работой было поручено специально назначенным специалистам.

17 декабря 1921 года письмами № 8310 и 8348 за подписью Председателя Управления объединенными государственными электрическими станциями Московского района Главэлектро ВСНХ РСФСР А.И. Эйсмана на подчиненные электрические станции были разосланы документы: «Положение о мерах координирования параллельных работ электростанций» и «Календарь распределения нагрузки на декабрь 1921 г.».

«Для общей организации работы всех работающих параллельно станций Объединения учреждаются должности дежурных по Объединению инженеров», – говорилось в одном из документов.

«Станциям предлагается в точности придерживаться указанного календаря и руководствоваться инструкцией. Если почему-либо станция заранее предвидит невозможность для себя исполнения программы, она должна тотчас же сообщать об этом Районному правлению с доложением причин. О всяких отклонениях от заданий календаря во время текущей работы станция обязана немедленно извещать дежурного по Объединению инженера, который ведет соответствующий журнал».

Можно считать, что с этой даты первых официально оформленных указаний на особый статус оперативно-диспетчерского управления оно начало функционировать как отдельная технологическая структура.

Дальнейшее развитие энергосистемы страны неразрывно связано с совершенствованием оперативно-диспетчерского управления режимами ее работы.

В настоящее время ЕЭС России объединяет 880 крупных электростанций установленной мощностью более 245 тысяч МВт, а протяженность ЛЭП классом напряжения 110-750 кВ составляет 490 тысяч километров. Энергосистема России является наиболее крупной из входящих в энергообъединение 12 стран, работающих в параллельном режиме. Оперативно-диспетчерское управление Единой энергосистемой и входящими в нее энергосистемами 81 субъекта Российской Федерации осуществляет специально созданная в 2002 году 100 % государственная компания Системный Оператор ЕЭС, отвечающая в том числе за поддержание единой частоты во всем энергообъединении и обеспечивающая непрерывную связанную работу 57 диспетчерских центров. В настоящее время ЕЭС России является четвертой по годовой выработке электроэнергии и первой по обслуживаемой территории среди мировых энергосистем.

**MINISTRY OF SCIENCE AND HIGHER EDUCATION
OF THE RUSSIAN FEDERATION
NIZHNY NOVGOROD STATE TECHNICAL UNIVERSITY
n.a. R.E. ALEKSEEV**

SMART ELECTRICAL ENGINEERING

№ 4

Nizhny Novgorod 2021

Smart electrical engineering / NNSTU n.a. R.E. Alekseev. – Nizhny Novgorod, 2021. No. 4 (16). – 121 p.

The journal is issued 4 times in year

Editor-in-Chief A.B. Loskutov

EDITORIAL STAFF

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

MEMBERS OF EDITORIAL BOARD:

Gennadiy Yakovlevich Vagin	Doctor of technical sciences, professor, professor NNSTU (Nizhny Novgorod, Russia)
Nikolay Ivanovich Voropai	Associate member of RAS, doctor of technical sciences, professor, head of the chair INRTU (Irkutsk, Russia)
Leonid Abramovich German	Doctor of technical sciences, professor, professor SSTU Branch in Nizhny Novgorod (Nizhny Novgorod, Russia)
Valery Gennadievich Goldstein	Doctor of technical sciences, professor, professor SSTU (Samara, Russia)
Igor Vasilevich Gulyaev	Doctor of technical sciences, professor, professor MRSU (Saransk, Russia)
Anatoly Viktorovich Kuznetsov	Doctor of technical sciences, professor, head of the chair USTU (Ulyanovsk, Russia)
Pavel Vladimirovich Ilyushin	Doctor of technical sciences, Energy Research Institute of the Russian Academy of Sciences (Moscow, Russia)
Alexander Leonidovich Kulikov	Doctor of technical sciences, associate professor, professor NNSTU (Nizhny Novgorod, Russia)
Viktor Nikolaevich Mescheryakov	Doctor of technical sciences, professor, head of the chair LSTU (Lipetsk, Russia)
Georgy Borisovich Onishchenko	Doctor of technical sciences, professor, scientific director LLC «STC Drive Technique» (Moscow, Russia)
Aleksandr Sergeevich Plekhov	Candidate of technical sciences, associate professor, associate professor NNSTU (Nizhny Novgorod, Russia)
Aleksandr Yur'evich Smirnov	Doctor of technical sciences, associate professor, leading design engineer JSC «Afrikantov OKBM» (Nizhny Novgorod, Russia)
Vitezslav Styskala	Dr. Ing., Ph. D., associate professor VSB – Technical University of Ostrava (Ostrava-Poruba, Czech Republic)
Vladimir Georgievich Titov	Doctor of technical sciences, professor, professor NNSTU (Nizhny Novgorod, Russia)
Oleg Stanislavovich Khvatov	Doctor of technical sciences, professor, head of the chair FFEI HE «VSUWT» (Nizhny Novgorod, Russia)
Yuriy Ivanovich Khokhlov	Doctor of technical sciences, professor, professor FSAEIHE SUSU (NRU) (Chelyabinsk, Russia)
Alexandr Ivanovich Chivenkov	Doctor of technical sciences, associate professor, professor NNSTU (Nizhny Novgorod, Russia)
Roustiam Chakirov	Dr. Ing., Prof. Dr., professor H-BRS (Germany)

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

ISSN 2658-6754

The certificate on registration of periodic printed editions
III № ФС77-81688 on 06 Aug., 2021

© Nizhny Novgorod State Technical University
n.a. R.E. Alekseev, 2021

CONTENT

ELECTROTECHNICAL COMPLEXES AND SYSTEMS	4
A.L. Kulikov, A.A. Loskutov, A.B. Loskutov The method of automated synthesis of logical part to increase the sensitivity of relay protection devices.....	4
A.M. Oleynikov, L.N. Kanov Mathematical modeling of wave power plant operating modes	17
E.N. Menshov Representation of the Poynting vector via electrical characteristics of electrical systems.....	36
R.Sh. Bedretdinov Application effectiveness economic assessment of hybrid energy complex based on hydrogen.....	47
T.E. Murtazin, V.G. Titov and O.A. Motina Vector control of asynchronous electric drive in ship propulsion system.....	59
V.V. Babenko, V.N. Krysanov Static converter control algorithms increasing efficiency of reactive power compensation process.....	68
R.S. Akhmetshin, A.F. Anchugova Address signaling of prediction of residual deformation of overloaded element of electrical power unit.....	81
V.M. Gridin Four phase vent AC motor.....	90
POWER ENGINEERING	101
A.A. Khlybov, Yu.G. Kabaldin, M.V. Zhelonkin, M.S. Anosov, D.A. Shatagin, D.A. Ryabov Development of automated measuring system of non-destructive control for measuring parameters of elastic waves in metallic materials.....	101
CHRONICLE	115
On the 100th anniversary of operational dispatch management in the domestic electric power industry.....	115

ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНАЯ ЭЛЕКТРОТЕХНИКА

№ 4

Редактор О.В. Пугина
Компьютерный набор и верстка И.А. Липужин

Редакция:
603950, Нижний Новгород, ул. Минина, д. 24
smart_electric@nntu.ru

Свободная цена

Подписано в печать 25.12.2021. Дата выхода в свет: 30.12.2021

Формат 60x84 ¹/₁₆. Бумага офсетная.

Печать трафаретная. Усл. печ. л. 7,5. Тираж 300 экз. Заказ .

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

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