

ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ И КОМПЛЕКСЫ

ИЗДАЕТСЯ С ЯНВАРЯ 1996 Г.

№ 2(59), ИЮНЬ 2023

Журнал входит в Перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук, а также в базу данных Российского индекса научного цитирования (РИНЦ).

Редакционная коллегия

Главный редактор:

В.Р. Храмишин – проф., д-р техн. наук,
МГТУ им. Г.И. Носова, г. Магнитогорск, Россия.

Ответственный редактор:

Е.А. Панова – доц., канд. техн. наук,
МГТУ им. Г.И. Носова, г. Магнитогорск, Россия.

Члены редколлегии:

С.М. Андреев – доц., д-р техн. наук,
МГТУ им. Г.И. Носова, г. Магнитогорск, Россия;

И.В. Бочкарев – проф., д-р техн. наук,
Кыргызский государственный технический
университет им. И. Раззакова, г. Бишкек,
Кыргызстан;

Н.Ф. Джагаров – проф., д-р техн. наук,
Высшее военно-морское училище
им. Николы Вапцарова, г. Варны, Болгария;

А.М. Зюзев – доц., д-р техн. наук,
УрФУ им. первого Президента России
Б.Н. Ельцина, г. Екатеринбург, Россия;

Е.Н. Ишметьев – д-р техн. наук,
R&D МГТУ, г. Магнитогорск, Россия;

А.С. Карандаев – проф., д-р техн. наук,
МГТУ им. Г.И. Носова, г. Магнитогорск, Россия;

А.Л. Карякин – с.н.с., д-р техн. наук,
УГТУ, г. Екатеринбург, Россия;

Г.П. Корнилов – проф., д-р техн. наук,
МГТУ им. Г.И. Носова, г. Магнитогорск, Россия;

О.А. Кравченко – проф., д-р техн. наук,
Тульский государственный университет,
г. Тула, Россия;

Б.М. Логинов – канд. техн. наук,
ПАО «ММК», г. Магнитогорск, Россия;

О.С. Логунова – проф., д-р техн. наук,
МГТУ им. Г.И. Носова, г. Магнитогорск, Россия;

В.Н. Мецераков – проф., д-р техн. наук,
ЛГТУ, г. Липецк, Россия;

Р.Г. Мугалимов – доц., д-р техн. наук,
МГТУ им. Г.И. Носова, г. Магнитогорск, Россия;

Е.Г. Нещипоренко – доц., канд. техн. наук,
МГТУ им. Г.И. Носова, г. Магнитогорск, Россия;

О.И. Осипов – проф., д-р техн. наук,
НИУ «МЭИ», г. Москва, Россия;

А.В. Паздерин – проф., д-р техн. наук,
УрФУ им. первого Президента России
Б.Н. Ельцина, г. Екатеринбург, Россия;

А.А. Радионов – проф., д-р техн. наук,
Московский Политехнический университет,
г. Москва, Россия;

А.С. Сарваров – проф., д-р техн. наук,
МГТУ им. Г.И. Носова, г. Магнитогорск, Россия;

И.М. Ячиков – проф., д-р техн. наук,
ЮУрГУ (НИУ), г. Челябинск, Россия.

Технические редакторы:

Н.П. Боярова – МГТУ им. Г.И. Носова,
г. Магнитогорск, Россия;

Е.А. Храмишина – МГТУ им. Г.И. Носова,
г. Магнитогорск, Россия.

© ФГБОУ ВО «МГТУ им. Г.И. Носова», 2023

Подписной индекс издания 45083 в объединенном каталоге «Пресса России», том 1.
Журнал зарегистрирован Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий
и массовых коммуникаций (Роскомнадзор).

Свидетельство о регистрации ПИ № ФС77-58181 от 29 мая 2014 г.

Учредитель – Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова
(455000, Челябинская обл., г. Магнитогорск, пр. Ленина, 38)

16+, в соответствии с Федеральным законом №436-ФЗ от 29.12.10.

Адрес редакции:

455000, Россия, Челябинская обл., г. Магнитогорск,
пр. Ленина, д. 38, ФГБОУ ВО «МГТУ им. Г.И. Носова»
e-mail: ecis.red@gmail.com

Адрес издателя:

МГТУ им. Г.И. Носова, 455000, Челябинская обл.,
г. Магнитогорск, пр. К. Маркса, 45/2,
ФГБОУ ВО «МГТУ им. Г.И. Носова», издательский центр.

Адрес типографии:

455000, Челябинская обл., г. Магнитогорск, пр. К. Маркса, 45/1,
ФГБОУ ВО «МГТУ им. Г.И. Носова»
участок оперативной полиграфии.

Выход в свет 27.06.2023. Заказ 207. Тираж 500 экз.
Цена свободная.

ELECTROTECHNICAL SYSTEMS AND COMPLEXES

PUBLISHED SINCE JAN., 1996

NO. 2(59), JUNE, 2023

The journal is included in the List of peer-reviewed scientific issues publishing main results of Ph.D. thesis in Engineering Science, doctoral thesis, and in the database of Russian Scientific Citation Index (RSCI).

Editorial Board

Editor in Chief:

V.R. Khramshin – Professor, D.Sc.
(Engineering), NMSTU, Magnitogorsk, Russia.

Executive Editor:

E.A. Panova – Associate Professor, Ph.D.
(Engineering), NMSTU, Magnitogorsk, Russia.

Editor Board Members:

S.M. Andreev – Associate Professor, D.Sc.
(Engineering), NMSTU, Magnitogorsk, Russia;
I.V. Bochkarev – Professor, D.Sc. (Engineering),
KSTU, Bishkek, Kyrgyzstan;
N.F. Dzhabarov – Professor, D.Sc.
(Engineering), NVNA, Varna, Bulgaria;
A.M. Zyuzev – Associate Professor, D.Sc.
(Engineering), UrFU named after the first
President of Russia B.N.Yeltsin,
Ekaterinburg, Russia;
E.N. Ishmet'ev – D.Sc. (Engineering),
of R&D NMSTU, Magnitogorsk, Russia;
A.S. Karandaev – Professor, D.Sc. (Engineering),
NMSTU, Magnitogorsk, Russia;
A.L. Karyakin – Senior Research Associate, D.Sc.
(Engineering), UFMU, Ekaterinburg, Russia;
G.P. Kornilov – Professor, D.Sc. (Engineering),
NMSTU, Magnitogorsk, Russia;

O.A. Kravchenko – Professor, D.Sc.
(Engineering), Tula State University, Tula,
Russia;

B.M. Loginov – Ph.D. (Engineering),
MMK PJSC, Magnitogorsk, Russia;
O.S. Logunova – Professor, D.Sc. (Engineering),
NMSTU, Magnitogorsk, Russia;

V.N. Meshcheryakov – Professor, D.Sc.
(Engineering), LSTU, Lipetsk, Russia;

R.G. Mugalimov – Associate Professor, D.Sc.
(Engineering), NMSTU, Magnitogorsk, Russia;

E.G. Neshporenko – Associate Professor, Ph.D.
(Engineering), NMSTU, Magnitogorsk, Russia;

O.I. Osipov – Professor, D.Sc. (Engineering),
MPEI, Moscow, Russia;

A.V. Pazderin – Professor, D.Sc. (Engineering),
UrFU named after the first President of Russia
B.N.Yeltsin, Ekaterinburg, Russia;

A.A. Radionov – Professor, D.Sc. (Engineering),
Moscow Polytech University, Moscow, Russia;

A.S. Sarvarov – Professor, D.Sc. (Engineering),
NMSTU, Magnitogorsk, Russia;

I.M. Yachikov – Professor, D.Sc. (Engineering),
SUSU (NRU), Chelyabinsk, Russia.

Technical Editors:

N.P. Boyarova – NMSTU, Magnitogorsk, Russia;
E.A. Khramshina – NMSTU, Magnitogorsk, Russia.

© FSBEI HE NMSTU, 2023

The subscription index of the journal is 45083 in the «Pressa Rossii» union catalog, vol. 1.

The journal is registered by the Federal Service for Supervision of Communications, Information Technology,
and Mass Media (Roskomnadzor).

Registration certificate PI No. FS77-58181 on May 29, 2014.

Founder – Novos Magnitogorsk State Technical University (38, pr. Lenina, Magnitogorsk 455000, Chelyabinsk Region)
16+ in accordance with Federal Law no. 436-FZ dated 29.12.10

The publisher:

Novos Magnitogorsk State Technical University
455000, 38, Lenin ave., Magnitogorsk, Chelyabinsk region, Russia
NMSTU publishing center

The editorial office:

455000, 38, Lenin ave., Magnitogorsk, Chelyabinsk region, Russia
Novos Magnitogorsk State Technical University
e-mail: ecis.red@gmail.com

The printing-office:

455000, 38, Lenin ave., Magnitogorsk, Chelyabinsk region, Russia
Novos Magnitogorsk State Technical University, printing section

Publication date: 27.06.2023. Order 207. Circulation: 500.
Open price.

СОДЕРЖАНИЕ

ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКА 4

Лосев Ф.А., Сушкова В.Р., Хамитов Р.Н.
Оценка устойчивости электротехнических систем
нефтедобывающих объектов с погружными
электродвигателями при изменении частоты
питающего напряжения 4

Христинич Р.М., Христинич Е.В., Христинич А.Р.
Исследование модели повышения энергетической
эффективности системы собственных нужд
трансформаторной подстанции 11

Евдокимов А.А., Чарыков В.И., Саттаров Р.Р.
Параметрическая идентификация гибридной
энергетической установки 20

*Корнилов Г.П., Абдулвелеев И.Р., Иванов Е.Ф.,
Бочкарев А.А., Одицов К.Э.*
Повышение надёжности электроснабжения
потребителей промышленных предприятий
средствами быстрогодействующего
автоматического ввода резерва 26

Панова Е.А., Хисматуллин А.И., Андреев С.М.
Разработка системы комплексного
автоматизированного расчета уставок релейной
защиты линии напряжением 6(10) кВ 33

ТЕОРИЯ И ПРАКТИКА АВТОМАТИЗИРОВАННОГО

ЭЛЕКТРОПРИВОДА 43

*Омельченко Е.Я., Лымарь А.Б.,
Гибдуллин А.И., Мальцев А.П.*
Многомассовая термодинамическая модель
асинхронного двигателя 43

ИНФОРМАЦИОННОЕ, МАТЕМАТИЧЕСКОЕ И ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ 49

*Месропян А.В., Галицына А.М.,
Меркулова А.П., Шабельник Ю.А.*
Перспективы реализации электродвижения
в маломерном судостроении 49

ПРОМЫШЛЕННАЯ ЭЛЕКТРОНИКА, АВТОМАТИКА И СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ 55

Андриянов А.И., Пугачев А.А.
Система управления импульсным
преобразователем напряжения
с частотно-импульсной модуляцией 55

Махлаков А.С., Антоненко А.С.
Исследование поведения спектров напряжения
двухуровневого АИН при ШИМ
с удалением выделенных гармоник 65

МОНИТОРИНГ, КОНТРОЛЬ И ДИАГНОСТИКА ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЯ 73

Брякин И.В., Бочкарев И.В.
Феррозонд с мультифакторным режимом
возбуждения 73

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ 84

CONTENT

ELECTRICAL ENGINEERING 4

Losev F.A., Sushkova V.R., Khamitov R.N.
Oil Producing Facilities
Electrical Systems Stability
Assessment in Case
of Voltage Frequency Change 4

Khristinich R.M., Khristinich E.V., Khristinich A.R.
Model for Improving the Auxiliary
Equipment Efficiency
at Transformer Station 11

Evdokimov A.A., Charykov V.I., Sattarov R.R.
Parametric Identification
of a Hybrid Power Plant 20

*Kornilov G.P., Abdulvelev I.R., Ivanov E.F.,
Bochkarev A.A., Odintsov K.E.*
Improving the Power
Supply Reliability for Industrial
Consumers Through
High-Speed Bus Transfer 26

Panova E.A., Khismatullin A.I., Andreev S.M.
Development of a System for Integrated Automated
Calculation of Relay Protection Settings for a Line
with a Voltage of 6(10) kV 33

THEORY AND PRACTICE OF AUTOMATED

ELECTRIC DRIVE 43

*Omelchenko E.Ya., Lyman A.B.,
Gibadullin A.I., Maltsev A.P.*
Multi-Mass Thermodynamic Model
of Induction Motor 43

TECHNICAL SYSTEMS DATAWARE AND SOFTWARE 49

*Mesropyan A.V., Galitsyna A.M.,
Merkulova A.P., Shabelnik Yu.A.*
Outlook for the Implementation of Electric Movement
in Shipbuilding 49

POWER ELECTRONICS, AUTOMATION AND CONTROL SYSTEMS 55

Andriyanov A.I., Pugachev A.A.
Control System for DC/DC Converter
Based on Pulse-Frequency
Modulation 55

Maklakov A.S., Antonenko A.A.
Two-level Output Voltage Waveforms
of VSI based on Selective Harmonic
Elimination PWM 65

MONITORING, DIAGNOSTICS AND CONTROL OF ELECTRIC EQUIPMENT 73

Bryakin I.V., Bochkarev I.V.
Ferroprobe with Multifactor
Excitation Mode 73

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS 84

ОЦЕНКА УСТОЙЧИВОСТИ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ НЕФТЕДОБЫВАЮЩИХ ОБЪЕКТОВ С ПОГРУЖНЫМИ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯМИ ПРИ ИЗМЕНЕНИИ ЧАСТОТЫ ПИТАЮЩЕГО НАПЯЖЕНИЯ

Электротехнические системы нефтедобывающих предприятий должны отвечать высоким требованиям надежности и бесперебойности. При этом они имеют высокую протяженность электрических сетей и специфических потребителей, таких как погружные электродвигатели. Эти факторы приводят к высокой чувствительности подобных электротехнических систем к провалам напряжения, что может вызвать потерю устойчивости электродвигателей. Кроме того, в энергосистеме возможны колебания частоты, которые также оказывают влияние на устойчивость электротехнической системы. Таким образом, оценка устойчивости электротехнических систем нефтедобывающих предприятий при изменении частоты питающего напряжения является актуальной задачей. Для оценки устойчивости была составлена математическая модель во вращающейся с частотой напряжения системе координат. Расчеты производились для электротехнической системы типового куста скважин с двигателями ПЭД-110 117, электроснабжение которого осуществляется по схеме с двойным преобразованием напряжения. На первом этапе было смоделировано изменение частоты в номинальном режиме работы, это позволило установить, что рассматриваемая электротехническая система становится абсолютно устойчивой при пониженной частоте и абсолютно неустойчивой при повышенной частоте. Для количественной оценки устойчивости с учетом ограничений по частоте была предложена методика на основе метода площадей. На втором этапе были рассмотрены изменения частоты по линейному закону, возникающие одновременно с провалом напряжения. Установлено, что при линейном повышении частоты коэффициент запаса устойчивости снижается, а при уменьшении частоты – повышается. Полученные результаты позволяют оценивать устойчивость электротехнических систем не только при изменении напряжения, но и при изменении его частоты.

Ключевые слова: электротехническая система, устойчивость, погружной электродвигатель, изменение частоты, граница динамической устойчивости, коэффициент запаса устойчивости

ВВЕДЕНИЕ

Нефтедобыча – это непрерывный технологический процесс, зависящий от надежности электроснабжения. Наиболее опасными для нефтедобывающих предприятий являются аварии в энергосистеме, которые приводят к отклонениям как величины напряжения, так и его частоты. В результате таких возмущений электротехническая система (ЭТС) предприятия может потерять устойчивость, что приведет к значительным экономическим потерям.

Под ЭТС будем понимать совокупность распределительной сети и высоковольтных электродвигателей, входом системы будет выступать сторона высокого напряжения трансформаторной подстанции.

Исследованию устойчивости электродвигательной нагрузки посвящены работы [1-8], но, как правило, авторы уделяют внимание только изменению величины питающего напряжения, не учитывая другие факторы. Однако аварии во внешней энергосистеме также приводят к изменению частоты питающего напряжения в результате возникновения небаланса мощности между генерацией и потреблением [9-11]. Изменение частоты напряжения обычно происходит в системах автономного электроснабжения при сопоставимой мощности генераторов и двигателей, но подобные ситуации могут возникать и в системах централизованного электроснабжения [9].

В работах [1, 12] авторы оценили влияние изменения частоты напряжения на устойчивость синхронных

и асинхронных электродвигателей на примере ЭТС нефтегазоперерабатывающих производств. При этом ЭТС нефтедобывающих предприятий отличаются большой протяженностью кабельных линий и наличием погружных электродвигателей (ПЭД), что накладывает дополнительные требования на запас устойчивости [4, 8]. Таким образом, оценка устойчивости ЭТС нефтедобывающих объектов с погружными электродвигателями при изменении частоты питающего напряжения является актуальной задачей.

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Для решения поставленной задачи математическая модель должна обеспечивать изменение частоты питающего напряжения во время расчета переходных процессов. Этим требованиям отвечает система координат dq0, вращающаяся с частотой питающего напряжения [13].

При оценке устойчивости ЭТС для моделирования ПЭД была использована Т-образная схема замещения, описанная полными уравнениями Парка-Горева [13]. Математические модели записаны в относительных единицах относительно осей dq вращающихся с частотой питающего напряжения ω_k . Ось «0» исключена из уравнений, так как были рассмотрены только симметричные электрические машины при симметричных провалах напряжения. Для учета влияния изменения частоты питающего напряжения на индуктивные элементы схемы замещения был введен коэффициент

$$\alpha = \frac{\omega_k}{\omega_0}, \quad (1)$$

где ω_0 – синхронная частота ПЭД.

Математическая модель ПЭД для расчета устойчивости:

$$\begin{cases} U_d = \frac{d\Psi_{sd}}{dt} + \Psi_{sq}\omega_k + I_{sd}r_s; \\ U_q = \frac{d\Psi_{sq}}{dt} - \Psi_{sd}\omega_k + I_{sq}r_s; \\ 0 = \frac{d\Psi_{rd}}{dt} + \Psi_{rq}(\omega_k - \omega) + I_{rd}\frac{r'_r}{\omega_k - \omega}; \\ 0 = \frac{d\Psi_{rq}}{dt} - \Psi_{rd}(\omega_k - \omega) + I_{rq}\frac{r'_r}{\omega_k - \omega}; \\ \Psi_{sd} = \alpha(x_s + x_m)I_{sd} + \alpha x_m I_{rd}; \\ \Psi_{sq} = \alpha(x_s + x_m)I_{sq} + \alpha x_m I_{rq}; \\ \Psi_{rd} = \alpha(x'_r + x_m)I_{rd} + \alpha x_m I_{sd}; \\ \Psi_{rq} = \alpha(x'_r + x_m)I_{rq} + \alpha x_m I_{sq}; \\ T_j \frac{d\omega}{dt} = 1,5(\Psi_{sd}I_{sd} - \Psi_{sq}I_{sq}) - M_c; \\ M_c = M_0 + (M_n - M_0)\omega^2, \end{cases} \quad (2)$$

где U_d, U_q – проекции напряжения статора на оси d и q ; Ψ_{sd}, Ψ_{sq} – проекции потокосцепления статора на оси d и q ; t – время переходного процесса; I_{sd}, I_{sq} – проекции тока статора на оси d и q ; r_s – активное сопротивление статора; Ψ_{rd}, Ψ_{rq} – проекции потокосцепления ротора на оси d и q ; I_{rd}, I_{rq} – проекции тока ротора на оси d и q ; ω – частота вращения ротора; r'_r – активное сопротивление ротора, приведенное к обмотке статора; x_s – индуктивное сопротивление статора; x_m – взаимное индуктивное сопротивление статора и ротора; x'_r – индуктивное сопротивление ротора, приведенное к обмотке статора; T_j – электрохимическая постоянная времени ПЭД; M_c – момент сопротивления механизма; M_0 – момент сопротивления механизма при трогании; M_n – момент сопротивления при номинальной нагрузке.

Для оценки устойчивости была использована Т-образная схема замещения трансформатора, описанная аналогично ПЭД.

Математическая модель трансформатора относительно вращающихся осей:

$$\begin{cases} U_{1d} = \frac{d\Psi_{1d}}{dt} + \Psi_{1q}\omega_k + I_{1d}(r_1 + r_m) - I_{2d}r_m; \\ U_{1q} = \frac{d\Psi_{1q}}{dt} - \Psi_{1d}\omega_k + I_{1q}(r_1 + r_m) - I_{2q}r_m; \\ U_{2d} = \frac{d\Psi_{2d}}{dt} + \Psi_{2q}\omega_k - I_{2d}(r'_2 + r_m) + I_{1d}r_m; \\ U_{2q} = \frac{d\Psi_{2q}}{dt} - \Psi_{2d}\omega_k - I_{2q}(r'_2 + r_m) + I_{1q}r_m; \\ \Psi_{1d} = \alpha(x_1 + x_m)I_{1d} - \alpha x_m I_{2d}; \\ \Psi_{1q} = \alpha(x_1 + x_m)I_{1q} - \alpha x_m I_{2q}; \\ \Psi_{2d} = -\alpha(x'_2 + x_m)I_{2d} + \alpha x_m I_{1d}; \\ \Psi_{2q} = -\alpha(x'_2 + x_m)I_{2q} + \alpha x_m I_{1q}, \end{cases} \quad (3)$$

где U_{1d}, U_{1q} – проекции напряжения первичной обмотки на оси d и q ; Ψ_{1d}, Ψ_{1q} – проекции потокосцепления первичной обмотки на оси d и q ; I_{1d}, I_{1q} – проекции тока первичной обмотки на оси d и q ; U_{2d}, U_{2q} – проекции напряжения вторичной обмотки на оси d и q ; Ψ_{2d}, Ψ_{2q} – проекции потокосцепления вторичной обмотки на оси d и q ; I_{2d}, I_{2q} – проекции тока вторичной обмотки на оси d и q ; r_1, x_1 – активное и индуктивное сопротивления первичной обмотки; r'_2, x'_2 – активное и индуктивное сопротивления вторичной обмотки, приведенные к первичной; r_m, x_m – активное и индуктивное сопротивления ветви намагничивания.

Для линий электропередачи (ЛЭП) была использована упрощенная схема замещения в виде последовательной активно-индуктивной ветви.

Математическая модель ЛЭП относительно вращающихся осей:

$$\begin{cases} U_{1d} - U_{2d} = \alpha x \frac{dI_d}{dt} + rI_d + \alpha x \omega_k I_q; \\ U_{1q} - U_{2q} = \alpha x \frac{dI_q}{dt} + rI_q - \alpha x \omega_k I_d, \end{cases} \quad (4)$$

где U_{1d}, U_{1q} – проекции напряжения в начале ЛЭП на оси d и q ; U_{2d}, U_{2q} – проекции напряжения в конце ЛЭП на оси d и q ; I_d, I_q – проекции тока ЛЭП на оси d и q ; r, x – активное и индуктивное сопротивления ЛЭП.

При расчетах устойчивости необходимо учитывать сопротивление внешней энергосистемы [1], поэтому для ее моделирования использовался источник ЭДС с внутренним индуктивным сопротивлением.

Математическая модель внешней энергосистемы относительно вращающихся осей:

$$\begin{cases} U_{cd} = E_{cd} - \alpha x_c \frac{dI_d}{dt} + \alpha x_c I_q \omega_k; \\ U_{cq} = E_{cq} - \alpha x_c \frac{dI_q}{dt} - \alpha x_c I_d \omega_k, \end{cases} \quad (5)$$

где U_{cd}, U_{cq} – проекции выходного напряжения энергосистемы на оси d и q ; E_{cd}, E_{cq} – проекции эквивалентной ЭДС энергосистемы на оси d и q ; I_d, I_q – проекции тока энергосистемы на оси d и q ; x_c – эквивалентное индуктивное сопротивление энергосистемы.

Алгоритм оценки устойчивости ЭТС начинается с составления схемы замещения по описанным принципам. Затем составляется математическая модель ЭТС, которая будет включать в себя дифференциальные и алгебраические уравнения. Далее на входе ЭТС моделируется возмущающее воздействие заданной глубины и длительности по напряжению и частоте. По математической модели определяется поведение ПЭД, то есть рассчитывается выбег в течение заданного интервала времени. Далее возмущающее воздействие заканчивается и рассчитывается самозапуск. Если самозапуск успешный, то ЭТС устойчива и необходимо увеличить длительность возмущения. Длительность увеличивается до тех пор, пока самозапуск не станет не успешным. Затем полученное значение длительности сохраняется и изменяется глубина возмущающего воздействия. В результате расчета получается граница динамической устойчивости (ГДУ) ЭТС. Подробно методика и алгоритм расчета представлены в работе [7].

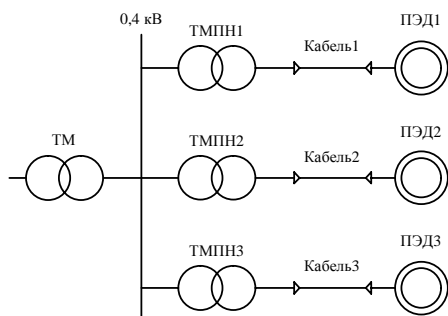
Для количественной оценки запаса устойчивости был использован коэффициент запаса устойчивости [14]:

$$k = \frac{S_{\text{уст}}}{S_{\text{огн}}}, \quad (6)$$

где $S_{уст}$ – площадь области устойчивой работы, ограниченная ГДУ и единицей по оси напряжения; $S_{общ}$ – площадь области, ограниченная единицей по оси напряжения и временем ввода резерва $t_{пр}$ по оси длительности провала напряжения.

ЭТС ТИПОВОГО КУСТА СКВАЖИН

Для оценки устойчивости была использована ЭТС куста скважин с ПЭД, упрощенная однолинейная схема электроснабжения которой приведена на **рис. 1**.



**Рис. 1. Упрощенная схема электроснабжения ЭТС
типового куста скважин**

Электроснабжение ПЭД осуществляется по схеме с двойным преобразованием, что усложняет математическую модель. Для упрощения расчетов были взяты одинаковые ПЭД на каждом фидере, работающие в одинаковом режиме. Информация об оборудовании ЭТС типового куста скважин приведена в **табл. 1**.

Для ЭТС была составлена схема замещения (рис.2). Значения сопротивлений схемы замещения были рассчитаны на основе данных каталогов электрооборудования по известным методикам [15,16]. Все сопротивления рассчитывались в относительных единицах, в качестве базисных величин использовались номинальное напряжение и мощность ПЭД и частота энергосистемы.

Далее была составлена математическая модель из уравнений (2) - (5), к которым был добавлен первый закон Кирхгофа для узла между ТМ и ТМПН для d и q осей. В результате была получена математическая модель, включающая 72 уравнения, из которых 39 дифференциальные. Алгоритм расчета был реализован в программном пакете Mathcad. Дифференциальные уравнения решались методом Рунге-Кутты четвертого порядка, алгебраические уравнения решались матричным методом на каждом шаге интегрирования.

Таблица 1

Оборудование ЭТС типового куста скважин

Обозначение на схеме	Оборудование
ПЭД1, ПЭД2, ПЭД3	ПЭД-110 117, номинальное напряжение 2180 В, нагрузка 70%, насос ЭЦН 5А-800
кабель 1, кабель 2, кабель 3	АКПНБГ-120, длина 1300 м, сечение 25 мм ²
ТМПН1, ТМПН2, ТМПН3	ТМПН-160-0.4/2,05
ТМ	ТМ-400/0.0.4

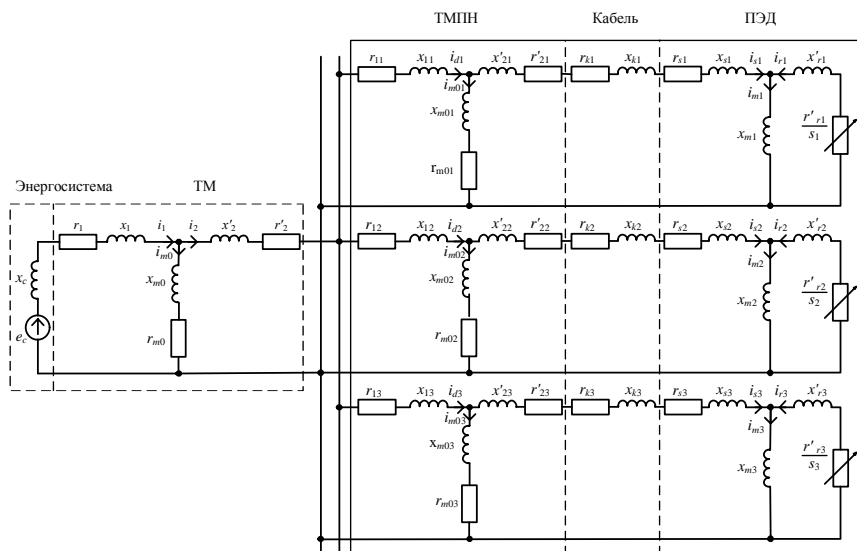


Рис. 2. Схема замещения ЭТС типового куста скважин

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

На первом этапе была выполнена оценка устойчивости ЭТС типового куста скважин при различных частотах напряжения в установившемся режиме работы, номинальная частота была равна 50 Гц. ГДУ ЭТС при изменении частоты установившегося режима работы приведены на **рис. 3**.

Анализ результатов моделирования показал, что уменьшение частоты напряжения на 5% приводит к увеличению допустимой продолжительности провала напряжения по условию сохранения устойчивости ЭТС в среднем на 129% и к уменьшению напряжения статической устойчивости на 0,07 о.е. При этом увеличение частоты на 5% приводит к уменьшению допустимой длительности провала напряжения в среднем на 64% и к увеличению напряжения статической устойчивости на 0,06 о.е. Следовательно, при увеличении частоты на 5% коэффициент запаса устойчивости уменьшился на 51%, а при уменьшении частоты на 5% – увеличился на 37%. Также было установлено, что при частоте 47,18 Гц ЭТС становится абсолютно устойчивой, то есть все двигатели могут быть запущены одновременно при начальном значении скольжения равном одному; при частоте 52,95 Гц ЭТС становится абсолютно неустойчивой, то есть электродвигатели начинают терять устойчивость даже при номинальных скольжении и напряжении питания. Возникновение абсолютных устойчивости и неустойчивости обусловлено тем, что при изменении частоты напряжения изменяется магнитный поток ПЭД, влияющий на перегрузочную способность.

В установившихся режимах работы отклонения частоты имеют небольшие значения [17], поэтому были рассмотрены аварийные режимы работы, в которых частота будет динамически изменяться из-за небаланса мощности в энергосистеме. В работе не учитывалась автоматика, направленная на регулировку частоты энергосистемы. Для исследования был принят линейный закон изменения частоты с постоянной скоростью, который позволяет выявить общие закономерности изменения устойчивости ЭТС [9]. Возмущающее воздействие задавалось симметричным провалом напряжения и одновременным линейным изменением частоты, по окончании возмущения напряжение восстанавливалось скачкообразно, а частота – с заданной скоростью по линейному закону (**рис. 4**).

При изменении частоты по линейному закону она может достигнуть граничных значений по условию абсолютных устойчивости и неустойчивости ЭТС, что приведет к остановке расчетного алгоритма.

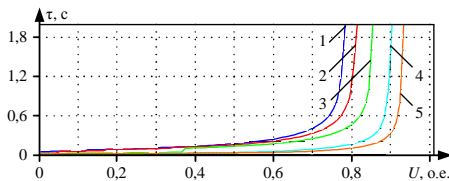


Рис. 3. ГДУ ЭТС типового куста скважин при частоте: 1 – 47,5 Гц; 2 – 48,5 Гц; 3 – 50 Гц; 4 – 51,5 Гц; 5 – 52,5 Гц

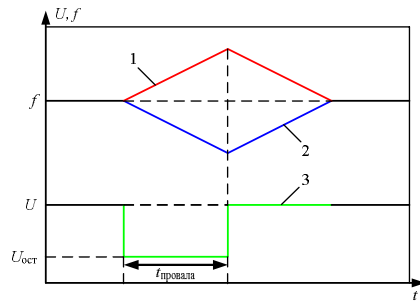


Рис. 4. Общий вид возмущающего воздействия: 1 – увеличение частоты напряжения; 2 – уменьшение частоты напряжения; 3 – симметричный провал напряжения

Для учета подобных ситуаций была рассмотрена плоскость с ГДУ (**рис. 5**). Для оценки запаса устойчивости ЭТС используется плоскость в координатах остаточного напряжения $E_{ост}$ и длительности провала τ , ограниченная по оси напряжения единицей, по оси длительности предельным значением уставок релейной защиты или автоматики $t_{пр}$ [1]. Под ГДУ находится область устойчивой работы $S_{уст}$, над ГДУ площадь неустойчивой работы $S_{неуст}$. Для учета изменения частоты на плоскость был добавлен отрезок ac , равный времени t_f , за которое частота достигнет критических значений по условию абсолютных устойчивости или неустойчивости ЭТС.

При повышении частоты возможен режим абсолютной неустойчивости ЭТС, в этом случае время возмущения в правой части плоскости будет ограничено значением t_f (отрезок bc), которое меньше предельного времени срабатывания автоматики, что уменьшает площадь устойчивой работы. При снижении частоты возможен режим абсолютной устойчивости ЭТС, тогда слева в верхней части плоскости появится дополнительная устойчивая область, ограниченная снизу t_f (отрезок ab), а сверху предельным временем срабатывания автоматики, что ведет к увеличению площади устойчивой работы.

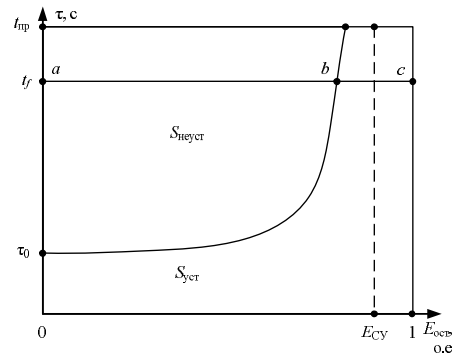


Рис. 5. Плоскость с ГДУ, показывающая области устойчивой и неустойчивой работы ЭТС

Затем рассчитывается коэффициент запаса устойчивости по формуле (6) с учетом дополнительных ограничений по частоте. Таким образом, предложена методика количественной оценки запаса устойчивости ЭТС при изменении частоты, учитывающая предельное время достижения критического значения частоты по условию абсолютных устойчивости или неустойчивости ЭТС в зависимости от ее повышения или снижения.

На втором этапе была проведена оценка устойчивости рассматриваемой ЭТС при линейном увеличении частоты с различной скоростью, ГДУ представлены на рис. 6. При увеличении частоты со скоростью 1 Гц/с за время, равное уставке автоматики (2 с), абсолютная неустойчивость не наступает, поэтому получаем классическую ГДУ (рис. 6, кривая 2). При скоростях увеличения частоты 2-4 Гц/с появляется дополнительное ограничение по условию абсолютной неустойчивости (рис. 6, кривые 3-5). При значениях остаточного напряжения менее 50% ГДУ практически совпадают вне зависимости от скорости изменения частоты, это связано с малым значением момента инерции ПЭД, которое приводит к малым значениям допустимой длительности провала напряжения. При скорости увеличения частоты 4 Гц/с коэффициент запаса устойчивости уменьшился на 52%, а при частоте 1 Гц/с – на 9% (табл. 2).

На третьем этапе была проведена оценка устойчивости ЭТС типового куста скважин при линейном уменьшении частоты напряжения с различной скоростью, ГДУ представлены на рис. 7. При уменьшении частоты со скоростью 1 Гц/с за время, равное уставке автоматики (2 с), абсолютная неустойчивость не наступает, поэтому получаем ГДУ без изменений (рис. 7, кривая 4). При скоростях уменьшения частоты 2-4 Гц/с появляется дополнительное ограничение по условию абсолютной устойчивости (рис. 7, кривые 1-3). При скорости уменьшения частоты 4 Гц/с коэффициент запаса устойчивости увеличился на 247%, а при частоте 1 Гц/с – на 4% (табл. 3).

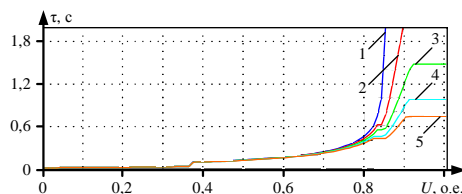


Рис. 6. ГДУ ЭТС типового куста скважин при увеличении частоты со скоростью: 1 – 0 Гц/с; 2 – 1 Гц/с; 3 – 2 Гц/с; 4 – 3 Гц/с; 5 – 4 Гц/с

Таблица 2
Значения коэффициентов запаса устойчивости при различных скоростях увеличения частоты напряжения

Скорость увеличения частоты, Гц/с	Коэффициент запаса устойчивости, о.е.
0	0,22
1	0,2
2	0,16
3	0,12
4	0,11

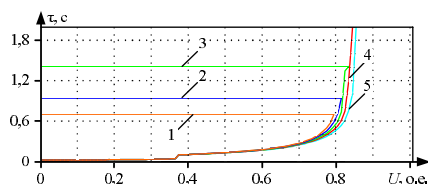


Рис. 7. ГДУ ЭТС типового куста скважин при уменьшении частоты со скоростью: 1 – 4 Гц/с; 2 – 3 Гц/с; 3 – 2 Гц/с; 4 – 1 Гц/с; 5 – 0 Гц/с

Таблица 3
Значения коэффициентов запаса устойчивости при различных скоростях уменьшения частоты напряжения

Скорость уменьшения частоты, Гц/с	Коэффициент запаса устойчивости, о.е.
0	0,22
1	0,23
2	0,48
3	0,68
4	0,77

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты исследования показали, что для электротехнических систем с погружными электродвигателями существует граничное значение частоты энергосистемы, при котором наступает абсолютная устойчивость или абсолютная неустойчивость. Для рассмотренной электротехнической системы абсолютная устойчивость наступила при частоте 47,18 Гц, а абсолютная неустойчивость – при частоте 52,95 Гц, такие значения частоты достижимы только при крупных системных авариях.

Предложена методика количественной оценки запаса устойчивости электротехнической системы, учитывающая предельные значения частоты абсолютных устойчивости и неустойчивости на основе метода площадей.

Выполнена оценка устойчивости электротехнической системы типового куста скважин при линейном изменении частоты с различными скоростями. Установлено, что при скорости увеличения частоты 4 Гц/с коэффициент запаса устойчивости уменьшился на 52%, при частоте 1 Гц/с – на 9%, а при скорости уменьшения частоты 4 Гц/с коэффициент запаса устойчивости увеличился на 247%, при частоте 1 Гц/с – на 4%.

Исследование показало необходимость учета изменения частоты в энергосистеме при оценке устойчивости электротехнических систем, при этом наиболее опасно для электродвигателей повышение частоты. Однако полученные значения лежат в широких пределах и их достижение маловероятно при централизованном электроснабжении. Поэтому в дальнейших исследованиях планируется рассмотреть автономную систему электроснабжения, в которой мощности генераторов и двигателей соизмеримы.

Список источников

- Ершов М.С., Егоров А.В., Трифонов А.А. Устойчивость промышленных электротехнических систем. М.: ООО «Издательский дом «Недра», 2010. 319 с.

2. Ершов М.С., Комков А.Н., Блюк В.В. Процедуры расчета показателей устойчивости многомашинных электротехнических систем промышленных производств // Промышленная энергетика. 2021. № 9. С. 18-26. doi: 10.34831/EP.2021.54.41.004
3. Komkov A., Ershov M., Blyuk V. Algorithms for quick calculation of transition processes at asymmetric modes of multi-machine electrotechnical systems with asynchronous drives // Proceedings of 2nd International Conference on Control Systems, Mathematical Modeling, Automation and Energy Efficiency (SUMMA). IEEE, 2020. Pp. 901-904. doi: 10.1109/SUMMA50634.2020.9280642
4. Абрамович Б.Н., Устинов Д.А., Поляков В.Е. Динамическая устойчивость работы установок электроцентробежных насосов // Нефтяное хозяйство. 2010. №9. С. 104-106.
5. Abdulvelev LR., Kornilov G.P., Gazizova O.V. Improving stability of TPP load center by optimization of startup modes of synchronous motors // Proceedings of the International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM). IEEE, 2022. Pp. 440-445. doi: 10.1109/ICIEAM54945.2022.9787246
6. Нигаматуллин Р.М., Газизова О.В., Малафеев А.В. Исследование влияния регулирующего эффекта нагрузки на уровень напряжения питающей подстанции с учётом мощности короткого замыкания энергосистемы // Электротехнические системы и комплексы. 2020. № 2 (47). С. 19-25. doi: 10.18503/2311-8318-2020-2(47)-19-25
7. Лосев Ф.А., Сушков В.В. Разработка методики и алгоритмов оценки влияния несимметричных провалов напряжения на устойчивость узла асинхронной электродвигательной нагрузки нефтяных месторождений // Омский научный вестник. 2018. № 4(160). С. 94-98. doi: 10.25206/1813-8225-2018-160-94-98
8. Лосев Ф. А., Мартыянов А.С., Сушков В.В. Оценка динамической устойчивости погружных установок электроцентробежных насосов // Актуальные вопросы энергетики: материалы Международной научно-практической конференции. Омск, 2017. С. 303-306.
9. Ippolito M.G., Musca R., Zizzo G. Frequency dynamics of power systems with temporally distributed disturbances // Sustainable Energy, Grids and Networks. 2021. Vol. 28. 100536. doi: 10.1016/j.segan.2021.100536
10. Modeling frequency response dynamics in power system scheduling / Z. Zhang, E. Du, G. Zhu, N. Zhang, C. Kang, M. Qian, J.P.S. Catalao // Electric Power Systems Research. 2020. Vol. 189. 106549. doi: 10.1016/j.epsr.2020.106549
11. Ghorbaniparvar M. Survey on forced oscillations in power system // Journal of Modern Power Systems and Clean Energy. 2017. Vol. 5. Pp. 671-682. doi: 10.1007/s40565-017-0273-4
12. Ершов М.С., Егоров А.В., Комков А.Н. Влияние частоты на устойчивость промышленных электротехнических систем // Промышленная энергетика. 2013. № 9. С. 21-25.
13. Веников В.А. Переходные электромеханические процессы в электрических системах: учеб. для электроэнергет. спец. вузов. М.: Высш. шк., 1985. 536 с.
14. Егоров А.В., Новоселова Ю.В. Устойчивость асинхронных многомашинных комплексов при внешних многопараметрических возмущениях // Промышленная энергетика. 2000. № 11. С. 24-27.
15. Важнов А.И. Электрические машины. Ленинград: Энергия, 1968. 768 с.
16. Вольдек А.И., Попов В.В. Электрические машины. Машины переменного тока: учебник для вузов. Санкт-Петербург : Питер, 2010. 350 с.
17. ГОСТ 32144-2013. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. М.: Стандартинформ, 2014. 18 с.

Поступила в редакцию 13 марта 2023 г.

Принята к печати 19 апреля 2023 г.

INFORMATION IN ENGLISH

OIL PRODUCING FACILITIES ELECTRICAL SYSTEMS STABILITY ASSESSMENT IN CASE OF VOLTAGE FREQUENCY CHANGE

Fedor A. Losev

Ph.D. (Engineering), Associate Professor, Department of Power Industry, Industrial University of Tyumen, Tyumen, Russia, fedor_los@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-7437-5655>

Viktoriia R. Sushkova

Assistant Professor, Department of Power Industry, Industrial University of Tyumen, Tyumen, Russia, vikyantropova@yandex.ru

Rustam N. Khamitov

D.Sc. (Engineering), Associate Professor, Professor, Department of Power Industry, Industrial University of Tyumen, Tyumen, Russia, Department of Electrical Engineering, Omsk State Technical University, Omsk, Russia, apple_27@mail.ru

Electrical systems of oil production facilities have to meet high reliability and continuity requirements. At the same time, they have a high length of electric networks and specific users such as submersible electric motors. These factors lead to a high sensitivity of the electrical systems to voltage sags. In addition, frequency fluctuations are possible in the power system, which also affect the electrical system stability. The purpose of the article is assessing the electrical systems stability in the case of the voltage frequency change. The mathematical model for stability assessment was compiled in a coordinate system rotating with a voltage frequency. Computations were made for the electrical system of a typical well cluster with PED-110 117

motors, the power supply of which is carried out according to the scheme with double voltage conversion. At the first stage, the frequency change in the nominal operating mode was simulated. The electrical system would be absolutely stable at 47.18 Hz and absolutely unstable at 52.95 Hz. The method based on the area method has been proposed to quantify stability based on frequency constraints. At the second stage, frequency changes according to the linear law that occur simultaneously with voltage sag were simulated. It has been found that linear frequency increase leads to the decrease in the stability margin factor, and frequency decrease leads to its increase. The obtained results can

be used to assess the electrical systems stability in the case of voltage and frequency changes.

Keywords: electrical system, stability, submersible electric motor, voltage frequency change, dynamic stability curve, stability margin factor

REFERENCES

1. Ershov M.S., Egorov A.V., Trifonov A.A. *Ustoychivost promyshlennyykh elektrotekhnicheskikh sistem* [Stability of the industrial electrotechnical systems]. Moscow, Nedra Publ., 2010. 319 p. (In Russian)
2. Ershov M.S., Komkov A.N., Blyuk V.V. Procedures for calculation of the stability indicators of industrial multi-machine electrical engineering systems. *Promyshlennaya energetika* [Industrial power engineering], 2021, no. 9, pp. 18-26. (In Russian). doi:10.34831/EP.2021.54.41.004
3. Komkov A., Ershov M., Blyuk V. Algorithms for quick calculation of transition processes at asymmetric modes of multi-machine electrotechnical systems with asynchronous drives. Proceedings of 2nd International Conference on Control Systems, Mathematical Modeling, Automation and Energy Efficiency (SUMMA). IEEE, 2020, pp. 901-904. doi: 10.1109/SUMMA50634.2020.9280642
4. Abramovich B.N., Ustinov D.A., Polyakov V.E. Dynamic stability of operating modes electro-centrifugal pumps installations. *Nefyanoe khozyaystvo* [Oil Industry], 2010, no. 9, pp. 104-106. (In Russian)
5. Abdulvelev I.R., Kornilov G.P., Gazizova O.V. Improving stability of TPP load center by optimization of startup modes of synchronous motors. Proceedings of the International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM). IEEE, 2022, pp. 440-445. doi: 10.1109/ICIEAM54945.2022.9787246.
6. Nigmatullin R.M., Gazizova O.V., Malafeev A.V. Study of the influence of regulating load effect on the voltage of the supply substation taking into account the power of short-circuit of the energy system. *Elektrotekhnicheskie sistemy i komplekсы* [Electrotechnical Systems and Complexes], 2020, no. 2(47), pp. 19-25. (In Russian). doi: 10.18503/2311-8318-2020-2(47)-19-25
7. Losev F.A., Sushkov V.V. Technique and algorithms for induction electromotive loading node stability assessment of oil fields at three-phase unbalance voltage sag. *Omskiy*

nauchnyy vestnik [Omsk Scientific Bulletin], 2018, no. 4(160), pp. 94-98. (In Russian). doi: 10.25206/1813-8225-2018-160-94-98

8. Losev F. A., Martyanov A.S., Sushkov V.V. Evaluation of submersible electric centrifugal pumps dynamic stability. *Materialy Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii "Aktualnye voprosy energetiki"* [Materials of the International scientific conference "Topical issues of power engineering"]. Omsk, OmSTU Publ., 2017, pp. 303-306. (In Russian)
9. Ippolito M.G., Musca R., Zizzo G. Frequency dynamics of power systems with temporally distributed disturbances. *Sustainable Energy, Grids and Networks*. 2021, vol. 28, pp. 100536. doi: 10.1016/j.segan.2021.100536.
10. Zhang Z., Du E., Zhu G., Zhang N., Kang C., Qian M., Catalão J.P.S. Modeling frequency response dynamics in power system scheduling. *Electric Power Systems Research*. 2020, vol. 189, pp. 106549. doi: 10.1016/j.epr.2020.106549.
11. Ghorbaniparvar M. Survey on forced oscillations in power system. *Journal of Modern Power Systems and Clean Energy*. 2017, no. 5, pp. 671-682. doi: 10.1007/s40565-017-0273-4
12. Ershov M.S., Egorov A.V., Komkov A.N. Frequency impact on stability of industrial electrotechnical systems. *Promyshlennaya energetika* [Industrial power engineering], 2013, no. 9, pp. 21-25. (In Russian)
13. Venikov V.A. *Perekhodnye elektromekhanicheskie protsessy v elektricheskikh sistemakh* [Transient electromechanical phenomena in electrical systems]. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 1985. 536 p. (In Russian)
14. Egorov A.V., Novoselova Yu.V. Asynchronous multiple machine complexes stability in case of external multiparameter interruptions. *Promyshlennaya energetika* [Industrial power engineering], 2000, no. 11, pp. 24-27. (In Russian)
15. Vazhnov A.I. *Elektricheskie mashiny* [Electrical machines]. Leningrad, Energy Publ., 1968. 768 p. (In Russian)
16. Voldek A.I. Popov V.V. *Elektricheskie mashiny. Mashiny peremennogo toka* [Electrical machines. AC machines]. St. Petersburg, Piter Publ., 2010. 350 p. (In Russian)
17. State Standard R 32144-2013. Electric energy. Electromagnetic compatibility of technical equipment. Power quality limits in the public power supply systems. Moscow, STANDARTINFORM Publ., 2014. 18 p. (In Russian)

Лосев Ф.А., Сушкова В.Р., Хамитов Р.Н. Оценка устойчивости электротехнических систем нефтедобывающих объектов с погружными электродвигателями при изменении частоты питающего напряжения // Электротехнические системы и комплексы. 2023. № 2(59). С. 4-10. [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2023-2\(59\)-4-10](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2023-2(59)-4-10)

Losev F.A., Sushkova V.R., Khamitov R.N. Oil Producing Facilities Electrical Systems Stability Assessment in Case of Voltage Frequency Change. *Elektrotekhnicheskie sistemy i komplekсы* [Electrotechnical Systems and Complexes], 2023, no. 2(59), pp. 4-10. (In Russian). [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2023-2\(59\)-4-10](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2023-2(59)-4-10)

Христинич Р.М.¹, Христинич Е.В.¹, Христинич А.Р.²¹ Красноярский государственный аграрный университет² Красноярский институт железнодорожного транспорта (филиал ИрГУПС)

ИССЛЕДОВАНИЕ МОДЕЛИ ПОВЫШЕНИЯ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ СИСТЕМЫ СОБСТВЕННЫХ НУЖД ТРАНСФОРМАТОРНОЙ ПОДСТАНЦИИ

Снижение расхода электрической энергии на собственные нужды (СН) трансформаторных подстанций (ПС) является актуальной задачей. В представленной работе с помощью методов анализа и синтеза работы силового электрооборудования, методов оптимизации разработана и исследована модель снижения расхода электроэнергии на СН подстанции Сибирского региона. Данный регион характеризуется продолжительным отопительным сезоном. Комплексная модель снижения расхода электроэнергии на СН ПС состоит из следующих составляющих: интеллектуальной системы управления охлаждением автотрансформаторов (АТ) подстанции и системы рекуперации электрических потерь АТ. Разработанная адаптивная система с использованием искусственной нейронной сети включает частотно-регулируемый электропривод и позволит осуществить оптимальное управление системой охлаждения АТ, а также даст возможность повысить энергетическую эффективность работы оборудования для обеспечения СН ПС. Кроме того, интеллектуальная система управления охлаждением АТ напрямую совмещена с установкой рекуперации тепла, выделяемого АТ. В качестве базового объекта рассмотрена подстанция 500 кВ, в составе которой присутствует шесть силовых автотрансформаторов. Электрические потери АТ использованы в данной модели для целей отопления нескольких зданий подстанции. Предложена система утилизации электрических потерь, выделяемых в виде теплоты масла автотрансформатора, которая состоит из теплообменника, теплового насоса, соединительных трубопроводов и системы управления. Исследование модели показало, что тепловая энергия электрических потерь автотрансформаторов может успешно использоваться для замещения тепловой мощности электродогревателей обогрева зданий подстанции, что позволит снизить потребление электрической энергии на собственные нужды ПС. Исследование также показало, что для каждой конкретной ПС необходимо адаптировать модель в зависимости от её входной информации: климата, удалённости потребителей от АТ, мощности отопления, объёма потребления горячей воды, загрузки АТ и других факторов. Также разработанная комплексная модель даст возможность поддерживать заданный температурный режим работы оборудования при минимальном расходе электроэнергии на охлаждение.

Ключевые слова: электрические потери, автотрансформатор, снижение расхода электрической энергии, собственные нужды подстанции, утилизация тепловой энергии, теплообменник, система охлаждения автотрансформатора

ВВЕДЕНИЕ

Во время работы автотрансформатора или силового трансформатора (Т) в его активных материалах – металле обмоток и стали магнитной системы – выделяются потери энергии в виде тепла. Тепло нагрева силовых Т и АТ выделяется в них в виде постоянных потерь (холостого хода) и переменных (нагрузочных) потерь. Электрические потери электроэнергии в Т и АТ большой мощности составляют сотни киловатт. Электрические потери Т и АТ необходимо снижать и использовать их для собственных нужд подстанции, например для отопления вспомогательных помещений ПС. Для каждой ПС необходимо разработать индивидуальную модель и оптимальное техническое решение, которое бы учитывало зависимость результата от многофакторной входной информации, а именно: места расположения потребителей, климатических условий, коэффициента загрузки Т или АТ, мощности отопления, объёма потребления горячей воды и т. п. [1-5]. Задача снижения расхода электрической энергии на собственные нужды ПС является актуальной и направлена на повышение эффективности работы энергетического комплекса.

Исследования в области снижения и утилизации электрических потерь Т и АТ силовых подстанций в Сибирском регионе с продолжительным отопительным сезоном отсутствуют. В рамках данной работы предло-

гается исследование вышеобозначенных проблем и разработка комплексной модели и рекомендаций для снижения расхода электрической энергии на СН ПС Сибирского региона, в составе которой присутствует шесть автотрансформаторов АОДЦТН-167000/500/220-У1.

Предлагается к рассмотрению комплексная модель снижения расхода электрической энергии на СН ПС, которая состоит из следующих компонентов: интеллектуальной системы управления охлаждением АТ и системы рекуперации электрических потерь. Основные шаги исследования:

- изучение исходных данных ПС, а именно технические данные АТ; генеральный план ПС, включая расположение всех промышленных зданий и сооружений ПС; источники теплоснабжения зданий и их технические данные и др.;
- расчёт электрических потерь АТ;
- расчёт распределения температуры масла в АТ;
- расчёт других параметров, необходимых при выборе оптимальной системы отбора тепла от АТ;
- разработка адаптивной системы управления системой охлаждения АТ, построенной на основе искусственной нейронной сети для оптимального управления системой охлаждения АТ и повышения энергетической эффективности работы оборудования для обеспечения СН ПС;
- разработка системы рекуперации электрических потерь ПС;
- оценка ожидаемого экономического эффекта.

РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕМПЕРАТУР В АВТОТРАНСФОРМАТОРЕ
АОДЦТН-167000/500/220-У1 ПРИ РАЗЛИЧНЫХ
СПОСОБАХ ОХЛАЖДЕНИЯ

Количество энергии, теряемой АТ, зависит от различных параметров: площади поверхности охлаждения, температуры окружающего воздуха, скорости ветра и т.п. [6]. Поэтому потери по мощности эквивалентны потерям холостого хода в нём. Ориентировочно можно считать, что потенциальное количество потерь электрической энергии на подстанциях 220-750 кВ соответствует в среднем переменным (нагрузочным) потерям электроэнергии в автотрансформаторах, которые находятся в квадратичной зависимости от их загрузки [3].

На рис. 1 представлен график зависимости потерь электрической энергии от коэффициента нагрузки для автотрансформатора АОДЦТН-167000/500/220-У1 [3]. Из графика видно, что при увеличении коэффициента нагрузки электрические потери в АТ будут увеличиваться.

На первом этапе исследования необходимо рассчитать потери электрической энергии в АТ и объёмный расход масла в зависимости от температуры масла в верхней и нижней точках, которая показана на рис. 2.

Рассмотрим систему охлаждения автотрансформатора АОДЦТН-167000/500/220-У1 (см. рис. 2). Расход масла в системе принудительного охлаждения (ДЦ) рассчитаем по выражению

$$\Phi_M = \frac{\Delta P}{C_M \Delta t_1}, \quad (1)$$

где ΔP – потери мощности в автотрансформаторе, кВт; C_M – удельная теплоёмкость трансформаторного масла, Вт·с/кг·С°; Δt_1 – разность температур масла в верхней и нижней точках.

Для приближенных расчетов постоянную составляющую потерь в трансформаторе (потери в стали) можно считать равной потерям холостого хода ΔP_{XX} . При этом предполагается, что напряжение на автотрансформаторе примерно равно номинальному.

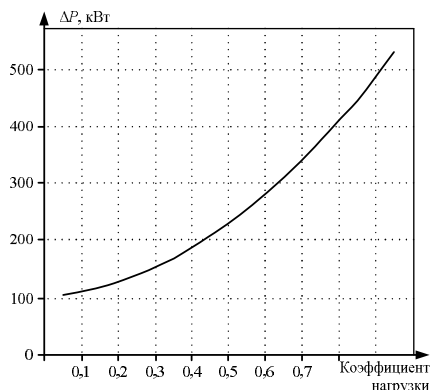


Рис. 1. График зависимости потерь электрической энергии от коэффициента нагрузки для автотрансформатора АОДЦТН-167000/500/220-У1

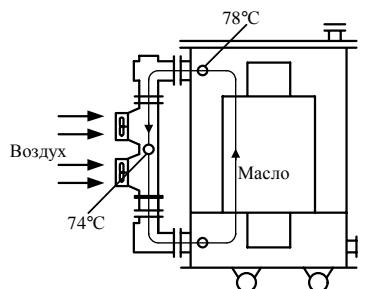


Рис. 2. Распределение температуры масла в автотрансформаторе

Переменная составляющая активных потерь в параллельно включенных автотрансформаторах (потери в меди) в соответствии с [7] может быть определена по формуле

$$\Delta P_M = \Delta P_{K3B} \left(\frac{S_B}{S_{ном}} \right)^2 + \Delta P_{K3C} \left(\frac{S_C}{S_{ном}} \right)^2 + \Delta P_{K3H}. \quad (2)$$

Рассчитаем объёмный расход масла:

$$V_M = \frac{\Phi_M}{\rho_M}, \quad (3)$$

где Φ_M – расход масла в системе ДЦ, кг/с; ρ_M – плотность трансформаторного масла, кг/м³.

Потери мощности в автотрансформаторе равны

$$\Delta P = \Delta P_{XX} + \Delta P_M. \quad (4)$$

Результаты расчётов представлены в табл. 1.

Рассмотрим систему охлаждения автотрансформатора АОДЦТН-167000/500/220-У1 с помощью установки рекуперации электрических потерь автотрансформатора (рис. 3).

Таблица 1

Результаты расчёта

Параметры автотрансформатора	Результаты расчёта
Расход масла в системе ДЦ	29,4 кг/с
Потери в меди	387 кВт
Суммарные потери	489 кВт
Объёмный расход масла	0,035 м³/с

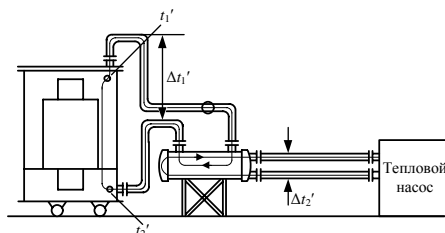


Рис. 3. Установка рекуперации электрических потерь

В связи с тем, что состояние нагрузки АТ, а также температура окружающей среды меняются, целесообразно рассмотреть несколько температур:

$$\Delta t_1' = 74 - 62 = 12^\circ\text{C}; \Delta t_1' = 74 - 66 = 8^\circ\text{C};$$

$$\Delta t_1' = 65 - 53 = 12^\circ\text{C}; \Delta t_1' = 65 - 57 = 8^\circ\text{C};$$

$$\Delta t_1' = 55 - 43 = 12^\circ\text{C}; \Delta t_1' = 55 - 47 = 8^\circ\text{C}.$$

Результаты расчётов параметров Φ'_m и V'_m в зависимости от загрузки автотрансформатора разности температур $\Delta t_1'$ представлены в табл. 2.

Для более эффективного регулирования температуры масла при использовании теплообменника рекомендуется применить систему частотного регулирования, что позволит значительно снизить затраты электрической энергии на работу приводных двигателей масляных насосов и вентиляторов.

Авторами в работе [8] разработана математическая модель режимов пуска и останова АД маслонасоса и вентилятора в программе Matlab Simulink для исследования переходных режимов приводных двигателей в режиме прямого пуска АД и пуска АД от преобразователя частоты. Результаты расчётов показали снижение пускового тока АД при использовании преобразователя частоты и экономии электроэнергии при пуске АД маслонасосов и вентиляторов, а также исключение ударных режимов на обмотки статора и ротора приводного АД. В работе [9] авторами была представлена адаптивная система управления системой охлаждения автотрансформатора, построенная на основе искусственной нейронной сети, позволяющая осуществить оптимальное управление системой охлаждения автотрансформатора и повысить энергетическую эффективность работы оборудования. Система даст возможность поддерживать заданный температурный режим оборудования при минимальном расходе электроэнергии на охлаждение и минимизировать электрические потери АТ.

Математическая модель управления системой охлаждения АТ будет эффективно обеспечивать процесс его охлаждения с учётом характеристик условий эксплуатации. Кроме того, она должна быть напрямую совмещена с установкой рекуперации тепла, выделяемого автотрансформатором, характеризующим одно из энергосберегающих направлений конструкционного исполнения.

Таблица 2

Данные расчётов параметров Φ'_m и V'_m

ΔP , кВт	$\Delta t_1' = 12^\circ\text{C}$		$\Delta t_1' = 8^\circ\text{C}$	
	Φ'_m , кг/с	V'_m , м ³ /с	Φ'_m , кг/с	V'_m , м ³ /с
489	19,6	0,023	29,4	0,035
400	16,03	0,019	24,04	0,028
300	12,02	0,014	18,03	0,021
200	8,01	0,01	12,02	0,014
100	4,0	0,005	6,00	0,007

СИСТЕМА УТИЛИЗАЦИИ ТЕПЛОВОЙ ЭНЕРГИИ АВТОТРАНСФОРМАТОРА

Следующий этап исследования предполагает выбор и расчёт системы отбора тепла. В зависимости от типа подстанции, количества и мощности установленных АТ, их нагрузки, требуемой тепловой производительности, вида используемого теплоносителя в системе отопления (трансформаторное масло, вода, воздух) и других используются различные системы отбора тепла [10-13], которые, в свою очередь, имеют преимущества и недостатки.

На ПС источником теплоснабжения промышленных зданий – общеподстанционного пункта управления (ОПУ), гаража, здания трансформаторно-масляного хозяйства (ТМХ) – служат встроенные электрокотельные с электрокотлами типа КЭВ-0,4 кВ.

Котлы электродные водогрейные КЭВ-0,4 кВ предназначены для получения горячей воды за счет тепла, выделяемого электрическим током при прохождении его непосредственно через воду и применяются для отопления и горячего водоснабжения жилых и производственных помещений как в закрытых, так и в открытых системах с параметрами $+70...+90^\circ\text{C}$.

Теплоносителем для систем отопления, горячего водоснабжения является вода с параметрами 70°C . Электрические котлы установлены: в ОПУ КЭВ-160/0,4 – 4 шт., в ТМХ КЭВ-250/0,4 – 6 шт., в гараже КЭВ-250/0,4 – 2 шт. В здании ТМХ принята закрытая однотрубная система отопления с П-образными стояками, смешанными замыкающими участками. В качестве нагревательных приборов используются: в бытовых помещениях – конвекторы типа «Комфорт», в производственных – регистры из гладких труб $\varnothing 108 \times 4$.

В гараже принята закрытая однотрубная система отопления с верхней разводкой теплоносителя. В качестве нагревательных приборов в боксах для ремонта и стоянок автомобилей используются регистры из гладких труб, в остальных помещениях – конвекторы типа «Комфорт».

В ОПУ принята открытая однотрубная система отопления с верхней разводкой теплоносителя.

Горячее водоснабжение зданий ТМХ и гаража обеспечивается электродными котлами типа КЭВ-0,4 кВ, установками для нагревания холодной воды до температуры 80°C и сетью разводящих трубопроводов. В скоростном проточном водонагревателе вода протекает со значительной скоростью через нагревательные трубки, которые, в свою очередь, подогреваются водой из теплосети, проходящей внутри корпуса водонагревателя и омывающих их. В электрокотельных для обеспечения циркуляции теплоносителя в системе отопления установлены по два центробежных насоса (СН – 1, 2) типа «К», один из которых – рабочий, второй – резервный.

Для обеспечения циркуляции воды в системе горячего водоснабжения в здании ТМХ установлены два центробежных насоса (ВН – 1, 2), в здании гаража – один насос (ВН – 1) типа «К».

В электрокотельной ОПУ и гараже установлены по два насоса К-20/30, в электрокотельных ТМХ установлены в системе отопления СН – 1 К80-50-200С, СН – 2 К45/30, в системе горячего водоснабжения (ГВС) уста-

новлены два насоса К20/30. Насосные агрегаты К 20/30 укомплектованы электродвигателями серии 4А100-2 мощностью 4 кВт, 3000 об/мин. Насосные агрегаты К 45/30 и К 80-50-200 укомплектованы электродвигателями серии ДМ-132А2, мощностью 5,5 кВт, 3000 об/мин.

При загрузке АТ на 25% температура масла в АТ зимой не превышает 30° С. Поэтому для реализации системы рекуперации электрических потерь АОДЦН-167000/500/220-У1 для отопления зданий ОПУ, ТМХ и гаража предлагается система утилизации потерь электрической энергии, выделяемых в виде теплоты масла автотрансформатора посредством применения теплового насоса, представленная на **рис. 4**. Система состоит из теплообменника, теплового насоса, соединительных трубопроводов и системы управления.

Современные тепловые насосы, спроектированные на температурную обеспеченность 95%, позволяют сократить расход электроэнергии на отопление приблизительно в 5-6 раз [1]. Для использования теплового насоса не требуется модернизация системы отопления, а существующие электродкотлы могут применяться в качестве резервных.

На **рис. 4** представлено следующее оборудование: 1 – тепловой насос для обогрева здания ОПУ; 2 – тепловой насос для обогрева ТМХ; 3 – тепловой насос для обогрева гаража; 4, 5 – кожухотрубные теплообменники для подачи нагретой жидкости на тепловой насос 1; 6 – кожухотрубный теплообменник для подачи нагретой жидкости на тепловой насос 3; 7, 8, 9 – кожухотрубные теплообменники для подачи нагретой жидкости на тепловой насос 2.

Для обеспечения надёжности работы силовых АТ группы 5 и 6 около каждого из АТ располагается кожухотрубный теплообменник. Так как для каждого из зданий необходимо подать различную тепловую мощность на тепловой насос, то теплообменники объединены в группы. Такая схема позволяет обеспечивать надёжную работу АТ и эффективную подачу нагретой жидкости (этиленгликоль) на тепловые насосы.

От теплообменников 7, 8 и 9 автотрансформаторов тепловая мощность направляется к теплому насосу 2 здания ТМХ (расстояние от теплообменников 7, 8, 9 до теплового насоса здания ТМХ составляет 100 м). От теплообменников 5 и 6 автотрансформаторов тепловая мощность направляется к теплому насосу 1 здания ОПУ (расстояние от теплообменников 5 и 6 до теплового насоса здания ОПУ составляет 400 м). От тепло-

обменника 4 автотрансформатора тепловая мощность направляется к теплому насосу 3 здания гаражей (расстояние от теплообменника 4 до теплового насоса здания гаражей составляет 700 м).

Требуемая мощность на обогрев каждого из зданий различная: 640 кВт – ОПУ, 1500 кВт – здание ТМХ, 500 кВт – гаражи. В связи с этим для каждого из зданий требуется поддерживать определённую тепловую мощность, что возможно при наличии отдельного типа теплообменника. Так как на тепловой насос 1 требуется подача жидкости от теплообменников 4 и 5, то внутренний диаметр трубы должен составлять не менее 170 мм для обеспечения нормального течения жидкости. Подача нагретой жидкости от теплообменников 7, 8, 9 на тепловой насос 2 обеспечивается трубопроводом с внутренним диаметром не менее 210 мм; так как тепловой насос 2 находится в ТМХ и это здание расположено на незначительном расстоянии от теплообменников 7, 8, 9, то можно предложить подключение каждого из теплообменников к теплому насосу непосредственно. В этом случае внутренний диаметр труб от каждого теплообменника 7, 8, 9 будет составлять 120 мм. От теплообменника 6 к теплому насосу 3 используется трубопровод для подачи нагретой жидкости с внутренним диаметром 120 мм.

Таким образом, предложенная схема подачи нагретой жидкости от теплообменника к тепловым насосам должна обеспечить приемлемые скорости течения жидкости в трубопроводах без увеличения гидравлического сопротивления. Так как к трубопроводу диаметром 170 и 210 мм подключены по несколько теплообменников, для регулирования равномерной подачи жидкости в теплообменники на их входе и выходе рекомендуется установить задвижки с автоматической регулировкой. Это позволит обеспечить равномерное распределение жидкости в параллельно подключённых теплообменниках и поддержание одинаковой температуры масла на всех АТ.

Для модернизации штатной системы охлаждения АТ подстанции 500 кВ, с целью утилизации тепловой энергии АТ АОДЦН-167000/500/220-У1 можно принять за основу систему, которая реализуется по трёхконтурной схеме, где в первом контуре производится отбор теплоты АТ при помощи трансформаторного масла, во втором контуре от теплообменника до теплового насоса тепловая мощность передаётся при помощи этиленгликоля.

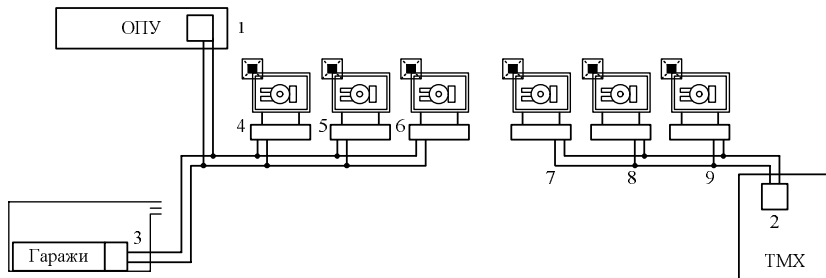


Рис. 4. Расположение оборудования системы утилизации тепла

Применение этиленгликоля обусловлено низкими температурами наружного воздуха в Сибирском регионе (до 40°C ниже нуля) и предотвращает повреждения теплообменника. Третий контур системы обеспечивает отопление зданий (ОПУ, ТМХ, гараж), а также нагрев воды для хозяйственно-бытовых нужд.

Данную схему можно представить в виде двух частей: первая часть обеспечивает передачу теплоты при помощи системы маслоснабжения; вторая часть обеспечивает передачу теплоты при помощи водоснабжения. Система отбора теплоты посредством масла подключается параллельно штатной системе охлаждения АТ в местах присоединения к охладителю при помощи трёхходового клапана с приводом. Такое подключение обеспечивает минимальную реконструкцию штатной системы охлаждения АТ и возможность её работы в случае отключения системы маслоснабжения, например, на профилактику. В качестве маслоснасоса используется штатный насос системы охлаждения 5Т–100/8 АТ. Во втором контуре используется этиленгликоль.

Узел отбора масла от штатной системы охлаждения АТ выполнен по схеме «масляный насос – теплообменник», который располагается в непосредственной близости от АТ.

Каждое из обогреваемых зданий имеет свою систему обогрева в виде электробойлерных с использованием электродкотлов. При этом здания расположены на некотором расстоянии друг от друга. Поэтому является целесообразным в каждом из этих зданий установить свой тепловой насос, который будет обеспечивать их достаточной тепловой мощностью.

Для здания ОПУ с установленной тепловой мощностью 640 кВт можно применить тепловой насос мощностью 829 кВт с коэффициентом преобразования 5,5. Для обогрева здания ТМХ рекомендуется использовать тепловой насос мощностью 1740 кВт с коэффициентом преобразования 6,0. Для обогрева гаражей рекомендуется использовать тепловой насос мощностью 553 кВт с коэффициентом преобразования 5,4.

Необходимо выбрать такие тепловые насосы, которые бы подходили для работы в условиях частичной нагрузки, для гибкой эксплуатации (с частичной нагрузкой до 12% без значительных потерь эффективности) и для резервной мощности в одном компактном устройстве с бесступенчатым регулированием производительности с помощью преобразователя частоты. Промышленные тепловые насосы используют нагреву в теплообменнике жидкость до температуры 30–40°C и позволяют поднять её до температуры 70°C.

ИССЛЕДОВАНИЕ КОНСТРУКЦИИ И РАБОТЫ ТЕПЛООБМЕННИКА

Теплообменные аппараты по принципу действия разделяют на аппараты с трубчатой поверхностью теплообмена (кожухотрубные) и с плоской поверхностью теплообмена (пластинчатые).

Пластинчатые теплообменники, так же как и кожухотрубные, применяются во многих отраслях промышленности и имеют свои достоинства и недостатки. Как показали исследования [14], основные причины отказов пластинчатых теплообменников, установленных на тепловых и атомных электрических станциях, следующие: внешние течи, внутренние течи и засорение теплообменников. Внешняя течь – нарушение гер-

метичности контура эластичного уплотнения, приводящее к истечению теплоносителя в окружающую среду. Внутренняя течь – повреждение теплообменной поверхности, приводящее к смешению рабочих сред. Смешение рабочих сред, таких как трансформаторное масло и этиленгликоль недопустимо, так как может привести к выходу из строя автотрансформаторов и трансформаторной подстанции, обесточиванию потребителей и к большому экономическому ущербу. Исходя из этих причин, был выбран именно кожухотрубный теплообменник.

Учитывая требование высокой надёжности теплообменника, для системы рекуперации отвода тепла от АТ на основании теплового и гидравлического расчётов [15–18] спроектирован кожухотрубный теплообменник на максимальную мощность 500 кВт. Это позволит использовать его для установки рядом с АТ и обеспечить отбор тепла от АТ при максимальной его нагрузке. Некоторые параметры расчёта приведены в табл. 3. Кожухотрубный теплообменник мощностью 500 кВт (рис. 5) имеет активную длину 2000 мм, внутренний диаметр – 380 мм.

Многотрубный кожухотрубный теплообменник представляет собой пучок труб, помещённых в цилиндрическую камеру (кожух); таким образом, внутренность камеры является межтрубным пространством. Трубки приварены к трубным решеткам, ограничивающих камеру со всех сторон. К трубным решеткам крепятся распределительные коробки с патрубками для впуска рабочей жидкости, протекающей внутри труб. Камера снабжена также патрубками для подвода и отвода второго рабочего тела. Кожух теплообменника стальной, цилиндрический. Конструкция теплообменника должна быть компактной, простой и надёжной в работе. В соответствии с этими требованиями выбираем кожухотрубный теплообменник со стальными цельнотянутыми трубами.

Холодный теплоноситель: 52% смесь вода – этиленгликоль; минимальная рабочая температура заморозки составляет –40°C. Горячий теплоноситель – трансформаторное масло.

Система подачи охлаждающей жидкости принята двухконтурной и состоит из 190 труб (95 труб в каждом контуре) ДУ 16. Камера подачи и отбора охлаждающей жидкости разделена перегородкой, что обеспечивает расположение входного и выходного патрубка ДУ 120 совместно на одной панели.

Таблица 3
Параметры расчёта теплообменника

Параметр	Значение
Расход первичного теплоносителя	18,46 кг/с
Скорость трансформаторного масла на выходе подводящей и отводящей труб	1,7 м/с
Суммарная площадь, которую занимают 95 труб	0,0269 м ²
Площадь под сегментом перегородки	0,029 м ²
Площадь выпускной (выпускной) трубы для трансформаторного масла	0,0123 м ²
Скорость течения трансформаторного масла в теплообменнике	1,16 м/с
Внешний диаметр кожуха	0,395 м
Толщина стенки	0,005 м
Внутренний диаметр кожуха	0,385 м
Площадь поверхности теплообмена	22,0 м ²
Расход вторичного теплоносителя	10,3 кг/с

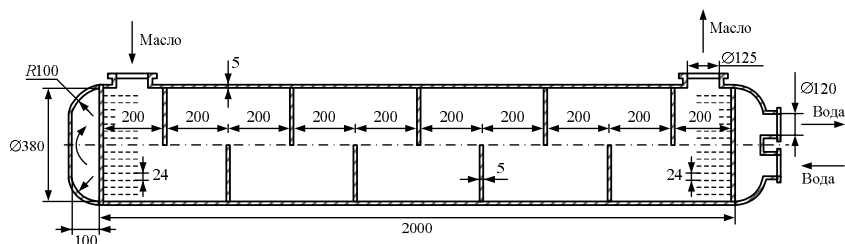


Рис. 5. Кожухотрубный теплообменник «масло-этиленгликоль» мощностью 500 кВт

Подача и отвод масла осуществляется через трубки ДУ 125, выполненные в боковой поверхности теплообменника. Количество ходов по маслу равно 9, что обеспечивается сегментными перегородками, состоящими друг от друга на расстоянии 200 мм. Кожухотрубный теплообменник может быть установлен как в горизонтальном, так и вертикальном положении.

Кожухотрубный теплообменник выполнен из сварных элементов, что обеспечивает максимальную надёжность при отборе тепла системы «масло-этиленгликоль». Для снижения загрязнения масла все элементы кожухотрубного теплообменника выполняются из нержавеющей антикоррозионной стали 12 Х18Н10Т.

Спроектированный кожухотрубный теплообменник системы «масло – охлаждающая жидкость» мощностью 500 кВт позволит обеспечить номинальное поддержание температуры масла АТ 74/60°С и температуру охлаждающей жидкости 33/20°С.

ОЦЕНКА ЭКОНОМИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ СИСТЕМЫ ОТОБДА ТЕПЛА ОТ АТ

Экономический эффект достигается за счет снижения доли электроэнергии, используемой на покрытие тепловых нагрузок, а также на охлаждение и обдув АТ в общем объеме электроэнергии, расходуемой на собственные нужды подстанции.

Для оценки ожидаемого экономического эффекта от внедрения системы отопления помещений ПС теплом АТ сравним затраты на электрическое отопление с затратами на отопление теплом АТ. Для расчётов примем длительность отопительного сезона с сентября по май.

Структура расхода электроэнергии на СН ПС ПАО «ФСК ЕЭС» по результатам энергетического обследования показала, что расход электроэнергии на обогрев зданий ПС составляет в среднем 18% от общего энергопотребления на собственные нужды ПС. По отдельным подстанциям эта цифра может достигать 40% и более. На сегодняшний день точная информация о структуре фактического расхода на собственные нужды отсутствует, так как нормы проектирования подстанций предусматривают только учет электроэнергии на трансформаторах, используемых для обеспечения собственных нужд [1].

Поэтому для расчёта нормативного расхода будем корректировать в соответствии с величиной фактического расхода электроэнергии по данным счётчиков за несколько лет. В табл. 4. приведены результаты расчёта расхода электроэнергии за три года и нормативные

цифры расхода электроэнергии на обогрев зданий ПС.

В зависимости от времени года загрузка АТ изменяется и зависит от мощности подключенных потребителей. Минимальная загрузка АТ может составлять 25% от номинальной. При минимальной загрузке АТ данная система рекуперации тепла АТ будет обеспечивать потребность в тепловой энергии зданий ОПУ, ТМХ и гаражей.

Среднее потребление электроэнергии на обогрев зданий в отопительный сезон составит 2451,85 тыс. кВт·ч в случае использования существующей системы отопления с помощью электрических котлов.

Энергопотребление на обогрев зданий при использовании системы рекуперации составит 445,79 тыс. кВт·ч в год. Экономия электроэнергии за отопительный сезон в среднем составит 2006,06 тыс. кВт·ч. Система рекуперации тепла от АТ рассчитана на максимально возможную загрузку АТ при дальнейшем развитии региона и подключении новых промышленных потребителей электроэнергии в перспективе развития импортозамещения.

Таблица 4

Результаты расчёта расхода электроэнергии

Нормативный расход электроэнергии на СН ПС, тыс. кВт·ч - ОПУ, ТМХ, гаражи									
январь	февраль	март	апрель	май	сентябрь	октябрь	ноябрь	декабрь	Итого
382,84	370,55	346,67	300,78	195,94	198,96	346,67	370,55	382,84	2895,8
Расход электроэнергии на СН ПС, тыс. кВт·ч, 2018 год – ОПУ, ТМХ, гаражи									
383,85	311,08	288,42	180,14	168,10	140,82	224,81	334,82	333,10	2365,12
Расход электроэнергии на СН ПС, тыс. кВт·ч, 2019 год – ОПУ, ТМХ, гаражи									
324,2	298,00	233,11	199,23	132,22	140,45	220,10	351,3	373,55	2272,16
Расход электроэнергии на СН ПС, тыс. кВт·ч, 2020 год – ОПУ, ТМХ, гаражи									
314,22	281,2	255,34	203,14	160,56	174,76	233,78	300,85	350,45	2274,3

В данном случае затраты на реализацию системы будут максимальными. Однако один раз реализованная система будет работать при любой нагрузке АТ и их тепловыделении.

Проведённые расчёты при реализации данной системы рекуперации тепла АТ выполнены в диапазоне температур охлаждающего масла от 45 до 75°C, включая различный расход масла и перепад в 8 или 12°C. При увеличении нагрузки АТ до номинальной излишки тепла могут быть отведены за пределы зданий ПС и обеспечивать тепловой энергией здания ближайшего села или их можно использовать для вновь построенного тепличного хозяйства.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные результаты работы заключаются в следующих положениях:

1. Разработана и исследована комплексная модель снижения расхода электроэнергии на СН ПС.

2. В качестве базового объекта для исследования модели снижения расхода электроэнергии на СН принята подстанция Сибирского региона, в составе которой присутствуют шесть силовых автотрансформаторов АОДЦТН-167000/500/220-У1.

3. Исследована разработанная система рекуперации тепла от АТ ПС. Показано, что тепловая энергия электрических потерь АТ может успешно использоваться для замещения тепловой мощности электрических котлов обогрева зданий общей площадью 7000 м², которая составит 2640 кВт для данной ПС при максимальных потерях в АТ.

4. При нагрузке АТ 25% от номинальной система рекуперации тепла от АТ сможет обеспечивать теплом здания ПС в полном объёме и экономия электроэнергии будет составлять 2006,06 тыс. кВт·ч в год.

5. Показано, что исследования в области утилизации и рекуперации электрических потерь силового электрооборудования ПС являются перспективным направлением. Реализация комплексной адаптивной системы, включающей интеллектуальную систему управления охлаждением автотрансформаторов ПС и систему рекуперации электрических потерь АТ позволит повысить энергетическую эффективность СН ПС.

Список источников

- Рябин Т.В., Паринов И.А. Пилотные проекты как этап создания энергоэффективных подстанций ПАО «ФСК ЕЭС» // Энергия единой сети. 2015. №3(20). С. 16-27.
- Анализ отечественного и мирового опыта повышения энергетической эффективности собственных нужд трансформаторных подстанций 220-750 кВ / А.Р. Христинич, А.Г. Степанов, Р.М. Христинич, Е.В. Христинич // Энергия единой сети. 2019. №6 (49). С. 66-73.
- Воротнический В.Э. Системы утилизации тепла транс-

- форматоров и автотрансформаторов 220-750 кВ // Энергия единой сети. 2014. №6 (17). С. 32-42.
- Воденников Д.А. Снижение расхода электроэнергии на собственные нужды подстанций 500-750 кВ // Электроэнергия. Передача и распределение. Ежеквартальный спецвыпуск. 2019. №2(13). С. 44-48.
- Рябин Т.В., Давыдов Е.Ю., Паринов И.А. Возможности снижения расхода энергии на собственные нужды подстанций. Опыт ПАО «ФСК ЕЭС» // Энергосбережение. 2016. №6. С. 36-45.
- Киш Л. Нагрев и охлаждение трансформаторов. М.: Энергия, 1980. 180 с.
- Ананичева С.С., Мызин А.Л. Схемы замещения и установившиеся режимы электрических сетей: учеб. пособие. 6-е изд., испр. Екатеринбург: УрФУ, 2012. 80 с.
- Христинич Р.М., Христинич Е.В., Христинич А.Р. Моделирование режимов работы асинхронного двигателя маслоснасоса силового автотрансформатора // Ресурсосберегающие технологии в агропромышленном комплексе России: материалы III Международной научной конференции. Красноярск: КрасГАСУ, 2022. С. 157-162.
- Христинич Р.М., Христинич Е.В., Христинич А.Р. Повышение эффективности и надежности работы силовых трансформаторов и автотрансформаторов при использовании интеллектуальной системы управления // Ресурсосберегающие технологии в агропромышленном комплексе России: материалы II Международной научной конференции. Красноярск: КрасГАСУ, 2022. С. 138-142.
- Olekshii R. Linkevis O., Kuka N. Utilization of latent heat of 330 kV autotransformer for space and water heating in substation Imanta // 5 th International Conference on Power Engineering, Energy and Electrical Drives. IEEE, 2015. Pp. 49-54. doi: 10.1109/PowerEng.2015.7266295
- Беседин В.Г., Манусов В.З. Использование тепла силовых масляных трансформаторов для теплоснабжения электрических подстанций. Часть 1: способы использования // Сборник научных трудов НГТУ. 2005. №4. С. 1-6.
- Воротнический В.Э., Люблин А.С. Использование потерь силовых трансформаторов для экономии электроэнергии на подстанциях. М.: Науч.-учеб. центр «ЭНАС», 1995. 170 с.
- Богданов А.Б. Обзор шести передовых энергосберегающих технологий в электросетевом комплексе России // Энергосетевое. 2010. №7(12). С. 42-47.
- Кузин С.А., Болдырева Н.А., Кравец С.Б. Эксплуатационная надёжность пластинчатых теплообменников, применяемых на АЭС // Глобальная ядерная безопасность. 2021. №1 (38). С. 75-83. doi: 10.26583/gns-2021-01-07.
- Аметистов Е.В. Основы теории теплообмена: учеб. пособие. М.: МЭИ, 2000. 245 с.
- Быстрицкий Г.Ф. Теплотехника и энергосиловое оборудование промышленных предприятий: учебник для вузов. 5-е изд. М.: Изд-во Юрайт, 2020. 305 с.
- Жукаускас А.А. Конвективный перенос в теплообменниках. М.: Наука, 1982. 472 с.
- Справочник по теплообменникам: в 2 т. Т. 2: пер. с англ. / под ред. О.Г. Мартыненко М.: Энергоатомиздат, 1987. 352 с.

Поступила в редакцию 15 марта 2023 г.

Принята к печати 28 апреля 2023 г.

INFORMATION IN ENGLISH

MODEL FOR IMPROVING THE AUXILIARY EQUIPMENT EFFICIENCY AT TRANSFORMER STATION

Roman M. Khristinich

D.Sc. (Engineering), Professor, Department of Theoretical Foundations of Electrical Engineering, Krasnoyarsk State Agrarian University, Krasnoyarsk, Russia, rkhrstinich@mail.ru

Elena V. Khristinich

Ph.D. (Engineering), Associate Professor, Department of Theoretical Foundations of Electrical Engineering, Krasnoyarsk State Agrarian University, Krasnoyarsk, Russia, ekhristinich@mail.ru

Aleksey R. Khristinich

Ph.D. (Engineering), Associate Professor, Department of Systems for Ensuring the Movement of Trains, Krasnoyarsk Institute of Railway Transport, Branch of the Irkutsk State University of Railways, Krasnoyarsk, Russia, lex_0986@mail.ru

Reducing the consumption of electrical energy for own needs (ON) of transformer substations (TS) is an urgent task. In the presented work, using the methods of analysis and synthesis of power electrical equipment operation and optimization methods, a model was developed and studied to reduce the consumption of electricity at the ON substation of the Siberian region. This region is characterized by a long heating season. An integrated model for reducing the consumption of electricity at the SN substation consists of the following components: an intelligent control system for substation autotransformers (AT) cooling and a system for recovering electrical losses of the AT. The developed adaptive system using an artificial neural network includes a frequency-controlled electric drive and will provide optimal control of the AT cooling system, and will also make it possible to increase the energy efficiency of equipment for ON substation power supply. In addition, the intelligent AT cooling control system is directly combined with the AT heat recovery unit. As a base facility, a 500 kV substation is considered, which includes six power autotransformers. The electrical losses of AT are used in this model for the purpose of heating several buildings of the substation. A system for the utilization of electrical losses released in the form of autotransformer oil heat is proposed, which consists of a heat exchanger, a heat pump, connecting pipelines and a control system. The study of the model showed that the thermal energy of electrical losses of autotransformers can be successfully used to replace the thermal power of electric boilers for substation building heating, which will reduce the consumption of electrical energy for the substation needs. The study also showed that for each specific substation, it is necessary to adapt the model depending on its input information: climate, distance of consumers from the AT, heating power, hot water consumption, AT load and other factors. Also, the developed complex model will make it possible to maintain a given temperature regime of equipment operation with a minimum consumption of electricity for cooling.

Keywords: electrical losses, autotransformer, reduction of electrical energy consumption, substation auxiliary needs, heat energy utilization, heat exchanger, autotransformer cooling system

REFERENCES

1. Ryabin T. V., Parinov I. A. Pilot projects as a stage in the creation of energy efficient substations at Public Joint Stock Company «Federal Grid Company of the Unified Energy System». *Energiya edinoi seti*. [Energy of Unified Grid, Scientific and Technical Journal], 2015, no. 3(20), pp. 16-27. (In Russian)
2. Khristinich A.R., Stepanov A.G., Khristinich R.M., Khristinich E.V. Analysis of domestic and world experience in improving the energy efficiency of in-house needs of 220–750 kV transformer substations. *Energiya edinoi seti*. [Energy of Unified Grid, Scientific and Technical Journal], 2019, no. 6(49), pp. 66-73. (In Russian)
3. Voronitskiy V.E. Heat recovery systems for 220-750 kV transformers and autotransformers. *Energiya edinoi seti*. [Energy of Unified Grid, Scientific and Technical Journal], 2014, no. 6 (17), pp. 32-42. (In Russian)
4. Vodennikov D.A. Reducing electricity consumption for in-house needs of 500-750 kV substations. *Elektroenergiya. Peredacha i raspredelenie*. [Electric power. Transmission and distribution], 2019, no. 2(13), pp. 44-48. (In Russian)
5. Ryabin T.V., Davydov E.Yu., Parinov I.A. Opportunities to reduce energy consumption for in-house needs of substations. Experience of «Federal Grid Company of the Unified Energy System». *Energoberezhenie*. [Energy conservation], 2016, no. 6, pp. 36-45. (In Russian)
6. Kish L. *Nagrev i okhlazhdenie transformatorov*. [Heating and cooling transformers]. Moscow, Energiya Publ., 1980. 180 p. (In Russian)
7. Ananicheva S.S., Myzin A.L. *Skhemy zameshcheniya i ustanovivshiesya rezhimy elektricheskikh setey*. [Equivalent Circuits and Steady Modes of Electrical Networks]. Yekaterinburg, UrFU Publ., 2012. 80 p. (In Russian)
8. Khristinich R.M., Khristinich E.V., Khristinich A.R. Simulation of operating modes of an asynchronous motor of the power autotransformer oil pump. *Resursosberegayushchie tekhnologii v agropromyshlennom komplekse Rossii*. [Materials of the III International scientific conference "Resource-saving technologies in the agro-industrial complex of Russia"]. Krasnoyarsk, KrasGAU Publ., 2022, pp. 157-162. (In Russian)
9. Khristinich R.M., Khristinich E.V., Khristinich A.R. Improving the efficiency and reliability of power transformers and autotransformers using an intelligent control system. *Resursosberegayushchie tekhnologii v agropromyshlennom komplekse Rossii*. [Materials of the II International scientific conference "Resource-saving technologies in the agro-industrial complex of Russia"]. Krasnoyarsk, KrasGAU Publ., 2022, pp. 138-142. (In Russian)
10. Olekshii R., Linkevis O., Kuka N. Utilization of latent heat of 330 kV autotransformer for space and water heating in substation Imanta. 5th International Conference on Power Engineering, Energy and Electrical Drives. IEEE, 2015, pp. 49-54. Doi: 10.1109/PowerEng. 2015.7266295
11. Besedin V.G., Manusov V.Z. Use of heat from power oil transformers for heat supply of electrical substations. Part 1: how to use. *Sbornik nauchnykh trudov NGTU*. [Collection of scientific works of NGTU], 2005, no. 4, pp. 1-6. (In Russian)
12. Voronitskiy V.E., Lyublin A.S. *Ispolzovanie poter silovykh transformatorov dlya ekonomii elektroenergii na podstantsiyakh*. [Use of power transformer losses to save electricity at substations]. Moscow, Scientific and educational centre "ENAS", 1995. 170 p. (In Russian)
13. Bogdanov A.B. Overview of six advanced energy-saving technologies in the power grid complex of Russia. *Energosovet* [Energy Council], 2010, no. 7 (12), pp. 42-47. (In Russian)
14. Kuzin S.A., Boldyreva N.A., Kravets S.B. Operational reliability of plate heat exchangers used at nuclear power plants. *Globalnaya yadernaya bezopasnost* [Global Nuclear Safety], 2021, no. 1 (38), pp. 75-83. (In Russian). doi: 10.26583/gns-2021-01-07
15. Ametistov E.V. *Osnovy teorii teploobmena: uchebnoe posobie*. [Fundamentals of the theory of heat transfer: a tutorial]. Moscow, MEI Publ., 2000. 245 p. (In Russian)

16. Bystritskiy G.F. *Teplotekhnika i energosilovoe oborudovanie promyshlennykh predpriyatiy*. [Heat engineering and power equipment of industrial enterprises]. Moscow, Yurayt Publ., 2020. 305 p. (In Russian)
17. Zhukauskas A.A. *Konvektivnyy perenos v teploob-*
mennikakh. [Convective transfer in heat exchangers]. Mos-
cow, Nauka Publ., 1982. 472 p. (In Russian)
18. Martynenko O. G. *Spravochnik po teploobmennikam*.
[Handbook of heat exchangers]. Moscow, Energoatomizdat
Publ., 1987. 352 p. (In Russian)

Христинич Р.М., Христинич Е.В., Христинич А.Р. Ис-
следование модели повышения энергетической эффек-
тивности системы собственных нужд трансформатор-
ной подстанции // Электротехнические системы и
комплексы. 2023. № 2(59). С. 11-19.
[https://doi.org/10.18503/2311-8318-2023-2\(59\)-11-19](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2023-2(59)-11-19)

Khristinich R.M., Khristinich E.V., Khristinich A.R.
Model for Improving the Auxiliary Equipment Efficiency
at Transformer Station. *Elektrotekhnicheskie sistemy i*
kompleksy [Electrotechnical Systems and Complexes],
2023, no. 2(59), pp. 11-19. (In Russian).
[https://doi.org/10.18503/2311-8318-2023-2\(59\)-11-19](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2023-2(59)-11-19)

Евдокимов А.А.¹, Чарыков В.И.², Саттаров Р.Р.³

¹ Сургутский государственный университет

² Курганский институт железнодорожного транспорта (филиал Уральского государственного университета путей сообщения)

³ Уфимский государственный нефтяной технический университет

ПАРАМЕТРИЧЕСКАЯ ИДЕНТИФИКАЦИЯ ГИБРИДНОЙ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ УСТАНОВКИ

В России на больших территориях имеется большое количество энергопотребителей, которые не присоединены к Единой энергосистеме. Более того, их объединение в единую энергосистему часто нецелесообразно по технико-экономическим причинам. Автономное электроснабжение может быть обеспечено за счет возобновляемых ресурсов, прежде всего ветровой и солнечной энергии. В данной статье исследуется гибридная ветросолнечная энергетическая установка для автономного электроснабжения удаленных населенных пунктов и рассматриваются вопросы ее параметрической идентификации. Оптимальная структура гибридной ветросолнечной энергетической установки определена на основе проведенного анализа возобновляемых ресурсов на примере ряда населенных пунктов Ханты-Мансийского автономного округа – Югра. Моделирование характерных режимов и сценариев работы реализовано с помощью компьютерных имитационных моделей. Имитационная модель реализована в подсистеме имитационного моделирования Simulink на основе Matlab. Основными исходными данными для моделирования гибридной установки являются мощность, коэффициент мощности и напряжение удаленной системы электроснабжения. Проведено моделирование ряда установившихся и переходных режимов в гибридной энергетической системе. Дополнительное использование солнечных панелей совместно с ветроэнергетической установкой позволило увеличить и выровнять выходную мощность энергетической установки. Кроме того, при типовых нагрузках в установившемся режиме обеспечивается качественное электроснабжение. Форма трехфазного напряжения в установившемся режиме близка к синусоидальной. Действующее значение фазного напряжения соответствует требуемой величине (221 В), а переходной процесс протекает за 0,002 секунды. Таким образом, результаты исследования показывают, что комбинирование солнечных и ветроустановок улучшает качество и повышает надежность электроснабжения.

Ключевые слова: изолированная энергосистема, ветроэнергетическая установка, моделирование, имитационная модель, солнечная панель, мощность, симуляция

ВВЕДЕНИЕ

Территория России огромна и большое количество потребителей, включая гражданское население, не присоединено к единой энергетической системе, из-за чего все чаще поднимается вопрос о глобальном энергетическом объединении. Основная задача – обеспечение доступности дешевой электроэнергии для каждого потребителя. Однако питание удаленных нагрузок в регионах с недостаточно развитым электросетевым хозяйством, таких как Сибирь, Дальний Восток и Кавказ, рационально и выгодно осуществить от местных источников энергии. Большие территории, малая потребительская способность и сложный ландшафт делают сооружение необходимой электросетевой инфраструктуры нерентабельным.

На сегодня единственный существующий источник получения электроэнергии в таких условиях – это дизельные электрические станции. Однако дизельное топливо постоянно дорожает, его доставка может быть затруднена, а моторесурс установок истощается, что в совокупности выливается в большую себестоимость 1 кВт·ч энергии, достигающую в некоторых областях 40 руб. Такая цена значительно повышает эксплуатационные затраты предприятий данных регионов и они становятся экономически невыгодными [1-3].

Один из способов решения данной проблемы, как говорилось ранее, – создание местных источников электроэнергии. В качестве решения перспективным направлением в этом вопросе является сооружение гибридных электровырабатывающих систем, включа-

ющих в себя ветряную установку, работающую при малых скоростях ветра, солнечную панель, способную вырабатывать ток при малых значениях инсоляции, и существующий дизель-генератор, применяемый только в случаях резервирования основных установок возобновляемой энергии.

В Ханты-Мансийском автономном округе – Югре 21 населенный пункт не подключен к единой энергетической системе [4]. Электроснабжение населенных пунктов осуществляется от дизельных электростанций установленной электрической мощностью от 63,6 до 3191 кВт. В состав электростанций входит от 3 до 6 генераторов, а также в редких случаях солнечные электростанции (табл. 1).

В рамках инвестиционных программ, выполняемых АО «Юграэнерго» с целью повышения показателей энергосбережения и энергетической эффективности работы электротехнического оборудования, проводится работа по модернизации энергетического комплекса, но эти мероприятия имеют точную замену электрооборудования и не обеспечивают полноценный ремонт ветхого фонда.

Проведенный анализ ветровой нагрузки за 5 лет показывает, что максимальная ветровая активность наблюдается в зимний и весенний периоды, а минимальные значения скоростей ветра – каждый год в летнем сезоне. Динамика по годам существенно не меняется, поэтому достаточно будет данных за 2022 год. Были также проанализированы данные среднесуточных скоростей ветра за месяцы январь, апрель, июль и октябрь 2022 года.

Таблица 1
Сводные данные населенных пунктов ХМАО-Югры, работающие изолированно от ЕЭС России

№ п/п	Название населенного пункта	Количество генераторов	Мощность электростанций, кВт	W собственных нужд, кВт·ч
1	Тугияны	3	148	126
2	Папторгы	3	104	89
3	Вензеват	5	960	815
4	Нумто	4	243	206
5	Никулкина	2+солнечная электростанция	63,6	56,4
6	Карым	3	116	99
7	Шугур	4+солнечная электростанция	1312	1120
8	Кимкясуй	4	288	246
9	Сартынья	3	143	122
10	Елизарово	4	1080	918
11	Кедровый	4	3183	2846
12	Кирпичный	3	1080	918
13	Согом	6	900	766
14	Няксимволь	4+солнечная электростанция	1260	1010
15	Урманый	6	2730	2108
16	Сосновый бор	4	118	108
17	Гонореченск	5	1000	340
18	Анеева	5	288	245
19	Сосьва	4	3191	2796
20	Ломбовож	4	348	286
21	Корлики	5	1900	1615

На основе этих данных построены графики изменения среднесуточных скоростей в течение рассматриваемых месяцев (рис. 1). Из диаграммы видно, что минимальные значения среднесуточных скоростей ветра наблюдаются в июле – 0,64 м/с, а максимальные в апреле – 5,05 м/с. Среднее значение скорости ветра за 5 лет составляет 2,584 м/с, среднегодовые скорости ветра представлены в табл. 2.

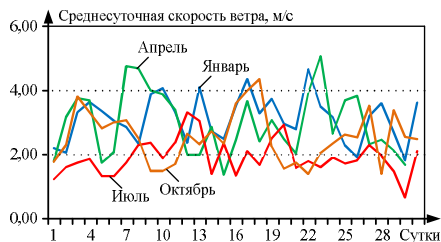


Рис. 1. Изменения среднесуточной скорости ветра

Таблица 2
Среднегодовая скорость ветра с 2018 по 2022 годы

Год	2018	2019	2020	2021	2022
Скорость ветра, м/с	2,56	2,55	2,62	2,64	2,55

На основании данных о среднемесечном поступлении солнечной энергии построена диаграмма помесячного распределения солнечной радиации в течение 2022 года (рис. 2). Наибольшая солнечная активность приходится на летний сезон, а максимум достигается в июне. Солнечная электроустановка будет эффективная, если суммарный годовой приход солнечной энергии на квадратный метр будет больше, чем 500 кВт·ч. Данное условие удовлетворяется [5], что подтверждается данными, приведенными в табл. 3.

На основании плана «Мероприятий по модернизации неэффективной дизельной (мазутной, угольной) генерации» в изолированных и труднодоступных районах [6] Ханты-Мансийского автономного округа – Югры, до 2025 года планируется провести анализ населенных пунктов. Приоритетом является целесообразность применения гибридных электростанций как в индивидуальных подворьях, так и муниципальных организаций.

При разработке установки, работающей в составе изолированной электрической сети, должны рассматриваться следующие основные вопросы: выбор оптимального типа и конструкции; выбор оптимальных параметров генератора, анализ его работы в предполагаемых условиях; выбор методики управления электроустановкой в составе сети; анализ взаимодействий элементов сети [7-9].

Установлено, что оптимальная конфигурация включает в себя использование двух ветровых установок и массива солнечных панелей (рис. 3). В данном случае ветряки обеспечивают 68,7% необходимой энергии. Солнечная панель выступает в качестве второго источника и предоставляет 37,2% от годового потребления нагрузки.

Отсутствие АКБ не позволяет излишней мощности накапливаться, в этом случае необходимо подключение дополнительной балансовой нагрузки во избежание понижения КПД системы.



Рис. 2. Распределение солнечной энергии в летний период за 2022 год

Таблица 3
Суммарные годовые значения поступления солнечной энергии с 2018 по 2022 годы

Год	2018	2019	2020	2021	2022
Сумма солнечной энергии, кВт·ч	745,9	781,4	757,2	750,7	757,2

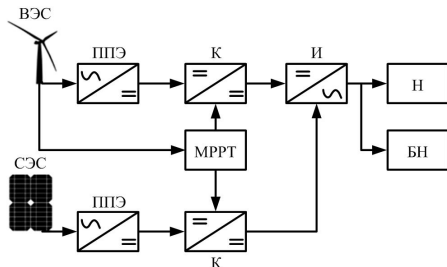


Рис. 3. Реализация оптимальной конфигурации:

СЭС – солнечная электрическая станция;

ВЭС – ветросиловая электрическая станция;

ППЭ – первичный преобразователь электроэнергии (выпрямляющий диодный мост); К – конвертер;

И – инвертер; MRPT – контроллер поиска максимальной мощности; Н – нагрузка; БН – балансовая нагрузка

Методы и принципы исследования

Гибридная ветро-солнечная электроэнергетическая система с трехфазным потребителем выполнена комбинированием солнечной панели и модели ветроэлектрической установки [10, 11]. Разработанная гибридная система реализована в подсистеме имитационного моделирования Simulink на основе Matlab и показана на рис. 4, состоящая из следующих блоков: блока солнечной панели, конвертора солнечной панели, блока ветрогенератора, конвертора ветрогенератора, блока инвертора.

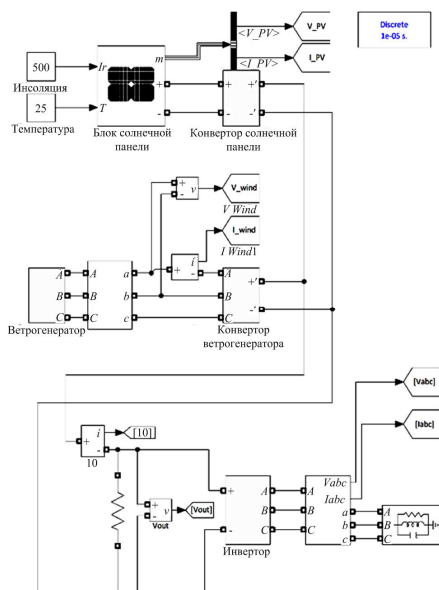


Рис. 4. Гибридная ветро-солнечная энергетическая

В качестве исходных данных [12] моделирования были взяты: полная мощность потребителя $S_{load} = 28,9$ кВ·А; коэффициент мощности $\cos \alpha = 0,95$; номинальное напряжение потребителя $U_{load} = 380$ В.

Мощность ветроэлектрической установки составляет $P_{wind} = 22$ кВт, а мощность массива солнечных панелей $P_{pv} = 13,6$ кВт.

Массив фотоэлектрических модулей реализован с помощью встроенного в библиотеку Simscape блока PVArray. Блок PV Array подразумевает собой массив, состоящий из цепочек модулей, соединенных параллельно, при этом каждая цепь может содержать в себе последовательно соединенные панели.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Результаты моделирования разработанной гибридной ветро-солнечной энергетической установки с выработкой в электрическую сеть трехфазного напряжения позволяют рассмотреть влияние трехфазной нагрузки на работоспособность системы энергоснабжения удаленных потребителей. Основной задачей было моделирование переходных процессов при внешних изменениях генерации (или нагрузки) от исходных постоянных уровней до новых постоянных значений. Результаты проведенных экспериментов в ветро-солнечной энергетической системе с применением электрического генератора и фотоэлектрических элементов (блок солнечной панели) имеют типовой характер. На характер протекания кратковременных переходных процессов совокупность временных факторов и сезонность времени года существенного влияния не оказывает.

Рис. 5 представляет график линейного напряжения на выходе ветроэнергетической установки. Установившийся стационарный режим со значением напряжения 152 В наступает за 0,041 секунду, что позволяет передавать в сеть стабильное линейное напряжение, обеспечивающее бесперебойное энергоснабжение потребителей. Рис. 6 иллюстрирует напряжение солнечной панели, стационарное напряжение которой достигает значения в 230 В за 0,25 секунд и далее, с учетом принятых ограничений, не меняется. На рис. 7 представлен график постоянного напряжения после выпрямления тока. Напряжение в 230 В достигает своего значения за 0,15 секунд. На рис. 8 изображен график пофазного напряжения нагрузки, значение которого достигает 221 В и переходит в установившийся режим за 0,002 секунды.

Анализ полученных типовых зависимостей показывает, что внедрение солнечной панели положительно повлияло на напряжение, передаваемое потребителю, так как колебаний в начале симуляции не наблюдается и нагрузка сразу получает ровный синусоидальный ток.

Такой результат возник вследствие получения с солнечных коллекторов постоянного напряжения со скачком в первых интеграциях симуляции.

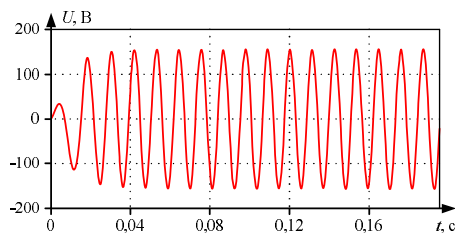


Рис. 5. График линейного напряжения на выходе ВЭУ

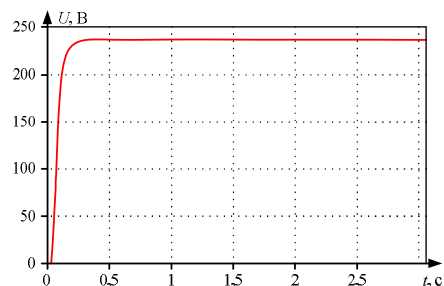


Рис. 6. График напряжения фотоэлектрического массива

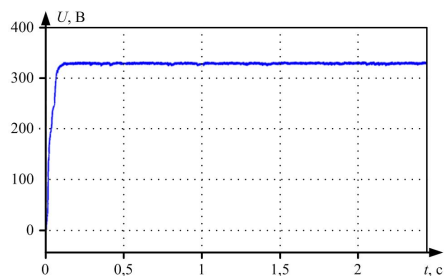


Рис. 7. График напряжения после преобразования

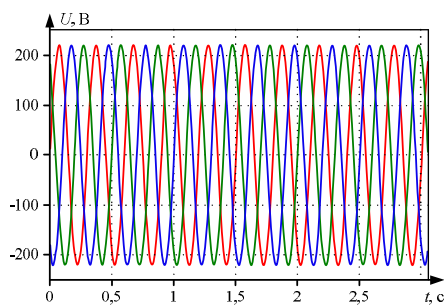


Рис. 8. График напряжения, передаваемого нагрузке

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе представлен анализ возобновляемых ресурсов в северо-восточных регионах России. Представлена оптимальная конфигурация гибридной электроэнергетической системы для автономного электроснабжения трехфазных потребителей. Проведено

исследование гибридной системы с типовыми параметрами. Результаты моделирования показывают, что комбинирование солнечных и ветроустановок улучшает качество и повышает надежность электроснабжения.

На основе разработанных моделей дальнейшие исследования позволят выявить оптимальные сочетания конфигураций и в дальнейшем провести сравнительный анализ с определением технических параметров для потребителей. Кроме того, необходимо будет исследовать влияние на электроснабжение потребителей длительных переходных процессов при суточном и сезонном изменении нагрузки и генерации.

Список источников

1. Возобновляемая энергия в России. От возможности к реализации. М.: Международное энергетическое агентство, 2004. 120 с.
2. Соломин Е.В., Сироткин Е.А. Состояние развития мировой ветроиндустрии // Альтернативная энергетика и экология. 2014. № 5(145). С. 20-25.
3. Безруких П.П. Справочник по ресурсам возобновляемых источников энергии России и местным видам топлива (показатели по территориям). М.: ИАЦ Энергия, 2007. 272 с.
4. Схема и программа развития электроэнергетики Ханты-Мансийского автономного округа – Югры на период до 2025 г.: утв. губернатором Ханты-Манс. авт. округа – Югры Н.В. Комаровой // Департамент жилищно-коммунального комплекса и энергетики Ханты-Мансийского автономного округа – Югры: сайт. URL: <https://depjkke.admhmao.ru/deyatelnost/energetika/elektroenergetika/ob-utverzhenii-skhem-i-programmy-razvitiya-elektroenergetiki-khanty-mansiyskogo-autonomnogo-okruga/sipr-na-period-do-2025-goda/4249235/skhema-i-programma-razvitiya-elektroenergetiki-khanty-mansiyskogo-autonomnogo-okruga-yugry-na-period/> (дата обращения 16.04.2023).
5. Кашкаров А.П. Ветрогенераторы, солнечные батареи и другие полезные конструкции. М.: ДМК Пресс, 2011. 144 с.
6. План мероприятий по модернизации неэффективной дизельной (мазутной, угольной) генерации в изолированных и труднодоступных территориях / утв. зам. пред. Правительства Д. Козаком 15 авг. 2019 г. № 7456П-19 // Министерство энергетики РФ (Минэнерго России): офиц. сайт. URL: <https://minenergo.gov.ru/view-pdf/16540/108073> (дата обращения 16.04.2023).
7. Лукутин Б.В., Муравлев И.О., Плотинов И.А. Системы электроснабжения с ветровыми и солнечными электростанциями: учеб. пособие. Томск: Изд-во Томск. политех. ун-та, 2015. 128 с.
8. Исследование характеристик автономных источников электроэнергии на основе фотоэлектрических модулей в условиях средних широт России / Ф.Р. Исмагилов, Р.Р. Саттаров, Б.М. Гайсин, М.Б. Гумерова, Д.А. Андроников // Электротехнические и информационные комплексы и системы. 2015. № 1. Т. 11. С. 52-58.
9. Пат. 2602802 Российская Федерация, МПК N 02 K 3/26. Тихоходный электрический генератор на постоянных магнитах / Игнатьев С.Г., Евдокимов А.А.; заявитель и патентообладатель Игнатьев С.Г. № 2013124190/07, заявл. 07.07.2015, опубл. 20.11.2016.
10. Буторин В.А., Чарыков В.И., Мошкин В.И. Энергосбережение: теория, практика. Курган: Изд-во Курган. гос. ун-та, 2019. 146 с.

11. Янсон Р.А. Ветроустановки. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2007. 14 с.
12. Определение конструктивных параметров ветроэнергетической установки для электроснабжения удаленных

объектов АПК / А.А. Евдокимов, В.И. Чарыков, Р.Р. Саттаров, И.И. Копытин // Вестник Курганской ГСХА. 2022. № 4(44). С. 66–72.

Поступила в редакцию 27 марта 2023 г.

Принята к печати 19 апреля 2023 г.

INFORMATION IN ENGLISH

PARAMETRIC IDENTIFICATION OF A HYBRID POWER PLANT

Alexander A. Evdokimov

Ph.D. (Engineering), Associate Professor, Department of Radio Electronics and Electric Power Engineering, Surgut State University, Surgut, Russia, aleksandr-aae@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-7818-3351>

Victor I. Charykov

D.Sc. (Engineering), Professor, Higher Education Department, Kurgan Railway Transport Institute, Branch of the Ural State University of Railway Transport, Kurgan, Russia, Viktor52-CHIMESH@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-6434-3825>

Robert R. Sattarov

D.Sc. (Engineering), Associate Professor, Professor, Department of Electrical Engineering and Electrical Equipment of Enterprises, Ufa State Petroleum Technical University, Ufa, Russia, Sattar.rb@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0001-9624-965X>

Currently, the task of modernizing inefficient fuel generation of electricity in isolated and hard-to-reach regions of the Russian Federation is urgent. The paper analyzes renewable wind and solar energy resources in hard-to-reach areas of the Far North (or/and Siberia). Based on this analysis, the optimal configuration of a hybrid autonomous power supply system has been determined, which contains two wind turbines and an array of solar photovoltaic panels. In order to verify the optimal configuration and parametric optimization, a simulation model of the proposed hybrid wind-solar energy system was developed in MatLab/Simulink environment. The simulation model was investigated under various conditions and in typical scenarios of the autonomous energy system. The research results show that the addition of photovoltaic modules to the wind power plant made it possible to increase the output power, which improves the reliability of power supply. In addition, the quality of electricity supply improves. The transition mode runs fast enough, no more than 0.002 seconds, and in steady-state mode, the effective value of the three-phase voltage is 220 V.

Keywords: isolated power system, wind power plant, simulation, simulation model, solar panel, power, simulation

REFERENCES

1. *Vozobnovlyayemaya energiya v Rossii. Ot vozmozhnosti k realizatsii* [Renewable energy in Russia. From Possibility to realization]. Moscow, International Energy Agency Publ., 2004. 120 p. (In Russian)
2. Solomin E.V., Sirotkin E.A. The state of development of the world wind industry. *Alternativnaya energetika i ekologiya* [Alternative Energy and Ecology], 2014, no. 5(145), pp. 20–25. (In Russian)
3. Bezrukikh P.P. *Spravochnik po resursam vozobnovlyayemykh istochnikov energii Rossii i mestnym vidam topliva (pokazately po territoriyam)* [Handbook of renewable energy resources of Russia and local fuels (Territory indicators)]. Moscow, IAC Energy Publ., 2007. 272 p. (In Russian)
4. *Skhema i programma razvitiya elektroenergetiki Khanty-Mansiyskogo avtonomnogo okruga – Yugry na period do 2025 g.: utv. gubernatorom Khanty-Mans. avt. okruga – Yugry N.V. Komarovoy* [Scheme and program of the electric power industry development in the Khanty-Mansiysk Autonomous Okrug - Yugra for the period up to 2025, approved

by the Governor of the Autonomous Region - Ugra N.V. Komarova). Department of Communal Complex Housing and Energy of the Khanty-Mansiysk Autonomous Okrug – Ugra. Available at:

URL:<https://depkke.admhmao.ru/deyatelnost/energetika/elektroenergetika/ob-utverzhdenii-skhem-y-i-programmy-azvitiya-elektroenergetiki-khanty-mansiyskogo-avtonomnogo-okruga/sipr-na-period-do-2025-goda/4249235/skhema-i-programma-razvitiya-elektroenergetiki-khanty-mansiyskogo-avtonomnogo-okruga-yugry-na-period/> (accessed 16 April 2023).

5. Kashkarov A.P. *Vetrogeneratory, solnechnyye batarei i drugie poleznyye konstruksii* [Wind generators, solar batteries and other useful structures]. Moscow, DMK Press Publ., 2011. 144 p. (In Russian)
6. *Plan meropriyatiy po modernizatsii neeffektivnoy dizelnoy (mazutnoy, ugolnoy) generatsii v izolirovannykh i trudnodostupnykh territoriyakh, utv. Zam. Pred. Pravitelstva D. Kozakom 15 avg. 2019 g. № 7456P-P9* (Action plan for the modernization of inefficient diesel (fuel oil, coal) generation in isolated and hard-to-reach areas, approved by the Deputy Prime Minister D. Kozak 15 Aug. 2019 no. 7456P-P9). Ministry of Energy of Russia. Available at: URL:<https://minenergo.gov.ru/view-pdf/16540/108073> (accessed 16 April 2023)
7. Lukutin B.V., Muravlev I.O., Plotnikov I.A. *Sistemy elektrosnabzheniya s vetrovymi i solnechnymi elektrostantsiyami* [Power supply systems with wind and solar power plants]. Tomsk, Tomsk Polytechnic University Publ., 2015. 128 p. (In Russian)
8. Ismagilov F.R., Sattarov R.R., Gaysin B.M., Gumerova M.B., Andronikov D.A. Characteristics of autonomous power sources based on photoelectric modules in the conditions of the middle latitudes of Russia. *Elektrotekhnicheskiye i informatsionnyye komplekсы i sistemy* [Electrical and data processing facilities and systems], 2015, no. 1, vol. 11, pp. 52–58. (In Russian)
9. Ignatiev S.G., Evdokimov A.A. *Tikhokhodnyy elektricheskii generator na postoyannykh magnitakh* [Low-speed electric generator on permanent magnets]. Patent RF, no. 2602802, 2016.
10. Butorin V.A., Charykov V.I., Moshkin V.I. *Energosbere-*

zheniye: teoriya, praktika [Energy saving: theory, practice]. Kurgan, Kurgan State University Publ., 2019. 146 p. (In Russian)

11. Yanson R.A. *Vetroustanovki* [Wind Turbines]. Moscow, Bauman State Technical University Publ., 2007. 14 p. (In Russian)

Евдокимов А.А., Чарыков В.И., Саттаров Р.Р. Параметрическая идентификация гибридной энергетической установки // Электротехнические системы и комплексы. 2023. № 2(59). С. 20-25. [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2023-2\(59\)-20-25](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2023-2(59)-20-25)

12. Evdokimov A.A., Charykov V.I., Sattarov R.R., Kopytin I.I. Determination of constructive parameters of a wind power plant for power supply of remote agricultural facilities. *Vestnik Kurganskoy GSKhA* [Bulletin of the Kurgan State Agricultural Academy], 2022, no. 4(44), pp. 66–72. (In Russian)

Evdokimov A.A., Charykov V.I., Sattarov R.R. Parametric Identification of a Hybrid Power Plant. *Elektrotekhnicheskie sistemy i komplekсы* [Electrotechnical Systems and Complexes], 2023, no. 2(59), pp. 20-25. (In Russian). [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2023-2\(59\)-20-25](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2023-2(59)-20-25)

Корнилов Г.П., Абдулвелеев И.Р., Иванов Е.Ф., Бочкарев А.А., Одинцов К.Э.

Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова

ПОВЫШЕНИЕ НАДЕЖНОСТИ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ПОТРЕБИТЕЛЕЙ ПРОМЫШЛЕННЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ СРЕДСТВАМИ БЫСТРОДЕЙСТВУЮЩЕГО АВТОМАТИЧЕСКОГО ВВОДА РЕЗЕРВА

Повышение надёжности электроснабжения особо ответственных потребителей является одной из важнейших задач, решаемых на стадии проектирования и эксплуатации промышленных предприятий. Для обеспечения необходимого уровня надёжности применяются различные технические средства. Устройство быстродействующего автоматического ввода резерва (БАВР) является в настоящее время одним из наиболее эффективных и доступных. Оно предназначено для повышения надёжности электроснабжения ответственных потребителей и обеспечения динамической устойчивости комплексной электродвигательной нагрузки при кратковременных нарушениях электроснабжения. Работа БАВР основана на непрерывном мониторинге величин фазных напряжений и токов на шинах двух вводов распределительного устройства, преобразовании их в комплексные действующие значения напряжений и токов прямой последовательности с последующей программной обработкой результатов измерений. Благодаря применению быстродействующих вакуумных выключателей и микропроцессорных устройств релейной защиты время переключения на резервный источник питания не превышает 100 мс. Приведены и проанализированы пять основных условий, при которых применение БАВР является особенно эффективным и оправданным. Особое внимание уделено оптимизации переходных процессов при переключении на резервный источник питания за счёт синхронизации момента включения вакуумного выключателя. Установлено и обосновано, что угол между векторами напряжения на шинах с выбегающей двигательной нагрузкой и резервным источником питания не должен превышать 30 электрических градусов. Приведены осциллограммы напряжений на работающей и отключенной секциях при срабатывании БАВР после потери питания на одной секции шин подстанции. По результатам исследований сделаны выводы об эффективности обеспечения динамической устойчивости комплексной электродвигательной нагрузки при кратковременных нарушениях электроснабжения.

Ключевые слова: быстродействующий автоматический ввод резерва, надёжность электроснабжения, промышленные потребители, непрерывный технологический процесс

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время наиболее тяжелыми авариями для систем электроснабжения промышленных предприятий являются провалы напряжения или полная потеря питания на шинах с двигательной нагрузкой. Подобные нарушения могут привести к нарушению сложного технологического процесса, а также к выходу из строя чувствительных и дорогостоящих микроэлектронных устройств. В отдельных случаях возможны предпосылки для получения травм персоналом предприятия, в том числе опасных для жизни [1-3].

Риски многомиллионных затрат, а также угроза жизни и здоровью человека сформировали строгие требования к обеспечению надёжности внутризаводского электроснабжения. Выполнение этих требований достигается за счет комплексного решения целого ряда задач:

- расчет надёжности электрооборудования и энергосистемы на этапе проектирования;
- оценка остаточного ресурса оборудования в ходе эксплуатации;
- постоянный поиск технических решений для повышения надёжности и их внедрение.

Самым эффективным и распространенным средством повышения надёжности в системах электроснабжения промышленных предприятий является использование современных микропроцессорных устройств релейной защиты и автоматики [4, 5]. Одним из таких технических решений, традиционно применяемых для повышения надёжности электроснабжения при нарушениях электроснабжения в питающих

сетях, является устройство автоматического включения резерва (АВР) [6, 7]. Оно срабатывает при исчезновении напряжения на шинах подстанции – отключает с выдержкой времени выключатели рабочего источника питания и включает выключатель резервного источника питания. Тем не менее это не всегда приводит к желаемому результату, поскольку повторный пуск двигателей после восстановления напряжения сопровождается значительными пусковыми токами, что негативно сказывается на их эксплуатационных характеристиках и сроке службы [8-10].

В последние годы в системах электроснабжения промышленных предприятий Российской Федерации получили широкое распространение устройства БАВР [11-14]. Внедрение этих устройств стало особенно актуальным на подстанциях, осуществляющих питание ответственных электроприемников и технологических агрегатов. Применение современной микропроцессорной элементной базы в БАВР позволяет не только избежать повторных пусков двигателей, но и кардинально изменить главную электрическую схему подстанции. При новых конфигурациях схем отпадает необходимость в подключении реакторов, что приводит к значительному сокращению расходов при реализации новых проектных решений [15, 16].

В заводском энергохозяйстве сети 6-10 кВ являются наиболее сложной системой, состоящей из большого числа элементов, имеющих обширные внутренние и внешние связи. В работе исследуется вопрос обеспечения бесперебойного электроснабжения промышленных потребителей аглофабрики – одна из важнейших задач для рассматриваемого металлургического предприятия.

После кратковременных нарушений электроснабжения в питающих сетях и возникновения провалов напряжения на шинах 6 кВ происходит нарушение непрерывности режима работы электроприводов аглофабрики (рис. 1). Эти нарушения приводят к отключению двигателя устройствами релейной защиты и автоматики (РЗА) и нарушению сложного технологического процесса.

Для повышения надежности работы насосных и компрессорных станций агрофабрики, а также для снижения затрат на их эксплуатацию, принято решение об установке устройства БАВР на подстанции 110/6 кВ предприятия. Данная статья посвящена анализу опыта использования и исследованию эффективности этого решения.

ПРИМЕНЕНИЕ УСТРОЙСТВА БАВР НА МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОМ ПРЕДПРИЯТИИ

Устройство БАВР предназначено для обеспечения надежного и непрерывного энергоснабжения путем быстрого действия (до 100 мс) автоматического переключения на резервный источник электропитания потребителей в распределительных сетях 6-10 кВ, в том числе и с преобладающей двигательной нагрузкой (синхронной и асинхронной). Необходимость применения устройства возникает при различных аварийных ситуациях в энергосистемах:

- исчезновение питания от основного источника (ошибочные действия устройств РЗА, ошибочные действия оперативного персонала, прямой пуск или самозапуск двигателей и т.п.);
- возникновение всех видов коротких замыканий в цепях питающей линии.

Следует отметить, что использование БАВР в системе электроснабжения промышленного предприятия позволяет добиться ряда серьезных преимуществ.

1. Основные преимущества.

Отсутствие срабатывания БАВР при всех видах коротких замыканий со стороны потребителей 6-10 кВ исключает возможность дополнительных повреждений, возникающих по причине подпитки места повреждения от резервного источника электропитания. Вследствие этого обеспечивается непрерывность технологического процесса при аварийных и ненормальных режимах работы сетей электроснабжения вне зависимости от наличия двигательной нагрузки на шинах.

В случае комбинирования потребителей подстанции 6(10)/0,4 кВ с высоковольтной электродвигательной нагрузкой обеспечивается существенное уменьшение отпадания магнитных пускателей и контакторов в цепи питания низковольтных электродвигателей, а также снижается вероятность возникновения сбоев систем управления электроприводами. Устройство выполняет автоматическое восстановление схемы нормального режима энергоснабжения с обеспечением как параллельной работы двух источников электропитания с контролем их синхронной работы, так и с перерывами питания при работе от несинхронизированных источников электропитания [17, 18].

2. Описание объекта исследования.

В настоящее время на рассматриваемой аглофабрике крупного металлургического предприятия (см. **рис. 1**) установлено устройство быстрогодействующего автоматического ввода резерва, основной задачей которого является эффективное решение проблемы кратковременных нарушений нормального электроснабжения предприятия. БАР выполнен на базе микропроцессорного пускового устройства (МПУ) и позволяет осуществить переход на резервный источник питания за минимально возможное время с возможностью последующего восстановления нормального режима энергоснабжения.

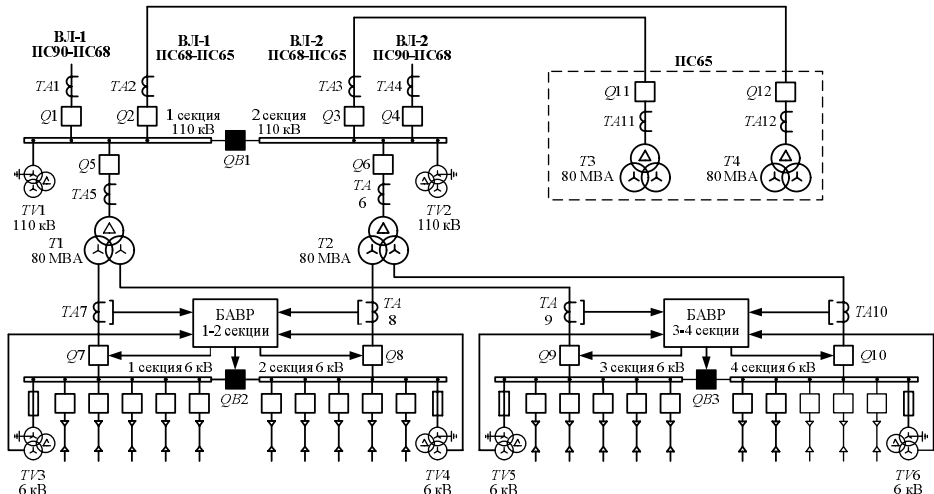


Рис. 1. Принципиальная однолинейная схема электроснабжения потребителей агрофабрики

Это устройство является лишь одной составляющей системы БАВР, в которую также входят трансформаторы тока, трансформаторы напряжения и силовые выключатели, число которых определяется схемой распределительного устройства. Из перечисленного оборудования на быстрдействие переключения на резервный источник питания оказывают влияние только силовые выключатели, что обуславливает необходимость применения современных сверхбыстродействующих вакуумных выключателей (БВВ) [17]. С учетом времени срабатывания пускового устройства БВВ обеспечивают требуемое полное время переключения на резервный источник питания, как следствие – устойчивое функционирование всей нагрузки подстанции.

УСЛОВИЯ СРАБАТЫВАНИЯ И ПРИНЦИП РАБОТЫ УСТРОЙСТВА БАВР

Устройство БАВР осуществляет переключение на резервный источник электропитания потребителей подстанции в следующих случаях:

- 1) при снижении напряжения прямой последовательности \underline{U}_1 на шинах ниже заданного значения, при условии, что \underline{U}_1 на резервном источнике питания выше заданного значения;
- 2) при увеличении скорости изменения угла (частоты) df/dt между напряжениями прямой последовательности на шинах и резервном источнике выше заданного значения;
- 3) при снижении частоты напряжения прямой последовательности фаз Δf ниже заданного значения наличии разрешения от реле направления мощности;
- 4) при внешнем пуске от быстродействующих защит (например, дистанционные защиты линий и трансформаторов);
- 5) при самопроизвольном или механическом отключении БВВ основного источника питания, вследствие которого произошла потеря питания секции шин.

Схема устройства предполагает также наличие запрета на автоматический ввод резерва и указанные выше переключения блокируются при выполнении одного из условий:

- отсутствие «разрешения» от реле направления мощности (РНМ);
- наличие одновременных однофазных замыканий на землю на секции шин и на резервном источнике;
- срабатывание максимальной токовой защиты (МТЗ);
- наличие блокировок от устройств релейной защиты;
- наличие неисправности в цепях управления БВВ или его неготовности;
- наличие неисправности в измерительных цепях трансформаторов напряжений.

Реле направления мощности обеспечивает блокировку при нарушении нормального электроснабжения, связанных с внутренними повреждениями в сети 6–10 кВ, и осуществляет выполнение цикла БАВР при нарушениях электроснабжения со стороны источника питания. Блокировка переключения при одновременном наличии однофазных замыканий на землю на шинах и резервном источнике исключает возможность создания искусственного двойного замыкания на землю в момент переключения на резервный источник питания.

Функционально-логическая схема устройства также позволяет исключить излишние или неверные переключения при увеличении угла между вектором напряжения прямой последовательности шин резервного источника питания вследствие отсутствия синхронизма (равенства величин, частот и углов векторов напряжений) между источниками питания (например, работе от разных энергосистем или собственной генерации), в том числе и при отсутствии или малой нагрузке на секции шин 6(10) кВ, когда отсутствуют условия для работы РНМ.

Важным преимуществом использования БАВР является оптимизация переходных процессов и переключение на резервный источник питания без возникновения сверхтоков. Это обеспечивается за счет синхронизации момента включения главных контактов БВВ с углом между \underline{U}_1 на шинах с выходящей электродвижительной нагрузкой и резервным источником от 0 до 30 эл. град, а также при снижении напряжения на шинах, потерявших питание ниже 0,5 от номинального значения.

Для прогнозирования момента включения БВВ резервного источника электропитания определяется угол между напряжениями, при котором необходимо выдать команды на включение БВВ резервного источника электропитания. Прогнозирование выполняется с учетом скорости изменения угла между напряжениями прямой последовательности, времени работы схемы управления БВВ и его собственного времени включения. Важно отметить, что максимальное быстрдействие БАВР обеспечивается использованием МПМУ, которое реализует способ синхронизированного управления коммутационными аппаратами, – подача команд на отключение основного источника питания и включение резервного источника питания происходит одновременно.

Рассмотрим принцип работы БАВР для двигателей с прямым пуском. В этом случае предусмотрено срабатывание по углу между напряжениями \underline{U}_1 секций шин с контролем направления мощности.

При превышении значения угла заданной уставки φ , относительно предаварийного значения формируется сигнал на отключение БВВ соответствующей секции (рис. 2).

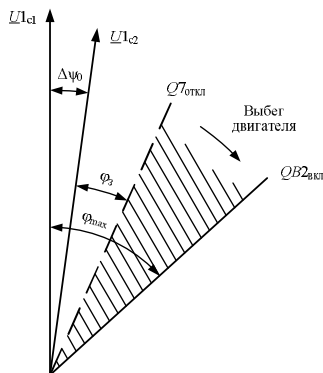


Рис. 2. Диаграмма работы БАВР по углу

По мере выбега двигателей МПМУ осуществляет расчет прогнозируемого угла срабатывания, значение которого соответствует моменту включения секционного выключателя (СВ). Защищенная область на **рис. 2** показывает допустимую зону угла срабатывания для секционного выключателя при выбеге двигателей на 2-й секции шин.

В случае положительного результата прогнозирования (угол срабатывания находится в допустимой зоне) выдается команда на включение СВ. Таким образом, включение СВ всегда обеспечивается для значения угла срабатывания не более значения максимально допустимой уставки φ_{\max} , что предотвращает появление сверхтоков.

Угол между напряжениями секций шин при выбеге двигателей является сложной временной функцией, зависящей от типа приводного механизма, загрузки двигателя, постоянной инерции и статического момента сопротивления. Для прогнозирования и расчета значения угла срабатывания используется разложение функции $\Delta\psi(t)$ в следующий степенной ряд:

$$\Delta\psi(t) = \Delta\psi_0 + \Delta\omega t + \frac{\Delta\epsilon t^2}{2}, \quad (1)$$

где $\Delta\psi_0 = \underline{U}_{i1} - \underline{U}_{i2}$ – угол между векторами напряжений в начальный момент; $\Delta\omega$ – относительная угловая скорость; $\Delta\epsilon$ – относительное угловое ускорение.

Значения $\Delta\omega$ и $\Delta\epsilon$ рассчитываются исходя из скорости изменения частоты напряжений для каждой секции шин подстанции. Момент подачи сигнала на включение секционного выключателя определяется выражением

$$|\Delta\psi(t)T_{\text{вкл}}| \leq \varphi_{\max}, \quad (2)$$

где $T_{\text{вкл}}$ – время включения секционного выключателя (с учётом времени срабатывания промежуточных реле или блоков управления); φ_{\max} – максимально допустимый угол при включении секционного выключателя.

При выбеге двигателей с высоким начальным ускорением (малые постоянные инерции) или при скачкообразном изменении угла (отключение КЗ) быстроедействие системы может оказаться недостаточно для включения СВ в пределах допустимой зоны. В этом случае включение СВ осуществляется после полного оборота векторов ЭДС двигателей относительно напряжения «здоровой» секции шин до момента, когда угол между векторами вновь не будет превышать φ_{\max} .

ИССЛЕДОВАНИЕ РАБОТЫ БАВР ПРИ АВАРИЙНОЙ ПОТЕРЕ ПИТАНИЯ НА ШИНАХ ПОДСТАНЦИИ

Ниже рассматривается пример возникновения аварийной ситуации и потери питания на одном из вводов подстанции 110/6 кВ алголабрыки. Результаты осциллографирования позволяют проанализировать алгоритм работы БАВР и провести исследование эффективности срабатывания по углу.

Усредненные действующие значения линейных напряжений и фазных токов на вводах 1, 2, 3, 4-й секций 6 кВ до момента возникновения аварии представлены в **таблице**. При этом нормальная схема электроснабжения потребителей алголабрыки соответствует схеме на

рис. 1 со следующими положениями выключателей:

- выключатели $Q1$ и $Q4$ (линии ВЛ1, ВЛ2 «ПС90-ПС68», 110 кВ) включены и питают 1-ю и 2-ю секции шин 110 кВ подстанции ПС68 соответственно;
- выключатели $Q2$ и $Q3$ (линии ВЛ1, ВЛ2 «ПС68-ПС65», 110 кВ) включены и питают силовые трансформаторы Т3 и Т4 подстанции ПС65 соответственно;
- выключатели $Q5$ и $Q6$ включены и питают силовые трансформаторы Т1 и Т2 подстанции ПС68 соответственно;
- секционный выключатель $QB1$ на шинах 110 кВ подстанции ПС68 отключен;
- вводные выключатели $Q7...Q10$ включены и питают секции шин 6 кВ подстанции ПС68;
- секционные выключатели $QB2$ и $QB3$ на шинах 6 кВ подстанции ПС68 отключены.

В момент аварии происходит перекрытие опорного изолятора фазы «А» 110 кВ подстанции ПС68 на землю и возникновение однофазного короткого замыкания. В результате срабатывания дифференциальной защиты шин 110 кВ на подстанции произведены отключения выключателей $Q1$, $Q2$ и $Q5$ – 1-я секция шин 110 кВ подстанции ПС68 полностью потеряла питание.

При работе БАВР произведены следующие переключения на 1-й и 2-й секциях шин 6 кВ подстанции:

- отключен вводной выключатель $Q7$ 1-й секции шин 6 кВ;
- включен секционный выключатель $QB2$ 1-й и 2-й секций шин 6 кВ.

Аналогичные коммутации выключателей произведены также для 3-й и 4-й секций шин 6 кВ ($Q8$ – отключен, $QB3$ – включен).

Анализ аварийных осциллограмм (**рис. 3**) показал следующие временные характеристики работы БАВР на 1-й и 2-й секциях:

- $T1 = 94$ мс – время начала КЗ;
- $T2 = 199$ мс – время отключения всех присоединений на 1-й секции 110 кВ;
- $T3 = 207$ мс – пуск БАВР;
- $T4 = 281$ мс – подано напряжение на 1-ю и 3-ю секции шин 6 кВ подстанции.

По результатам анализа векторных диаграмм (**рис. 4**) определено, что запуск устройства БАВР произошёл при достижении разницы между фазами напряжений прямой последовательности 1-й и 2-й секций, равной $11,2^\circ$ (угол уставки $\varphi_s = 11^\circ$). В момент включения секционных выключателей (через 75 мс) и замыкания главных контактов угол срабатывания составлял $28,8^\circ$ (максимально допустимый угол $\varphi_{\max} = 30^\circ$). Действующие значения линейных напряжений и фазных токов на вводах 1, 2, 3, 4-й секций 6 кВ после срабатывания БАВР представлены в **таблице**.

Усредненные значения токов и напряжений на секциях шин подстанции

Параметры схемы	Номер секции			
	1	2	3	4
До срабатывания БАВР				
Напряжение U , кВ	6,3	6,2	6,2	6,2
Ток I , А	1270	1170	890	1020
После срабатывания БАВР				
Напряжение U , кВ	6,0	6,1	6,0	6,0
Ток I , А	0	2460	0	1930

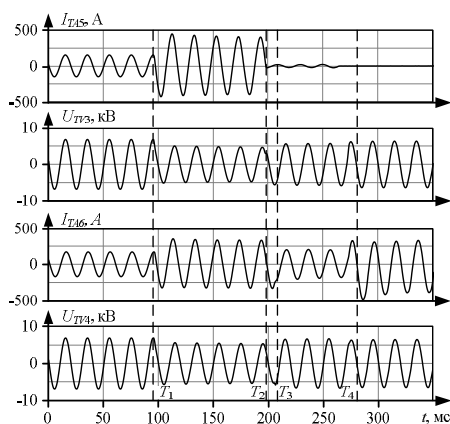


Рис. 3. Осциллограммы токов и напряжений при работе БАВР

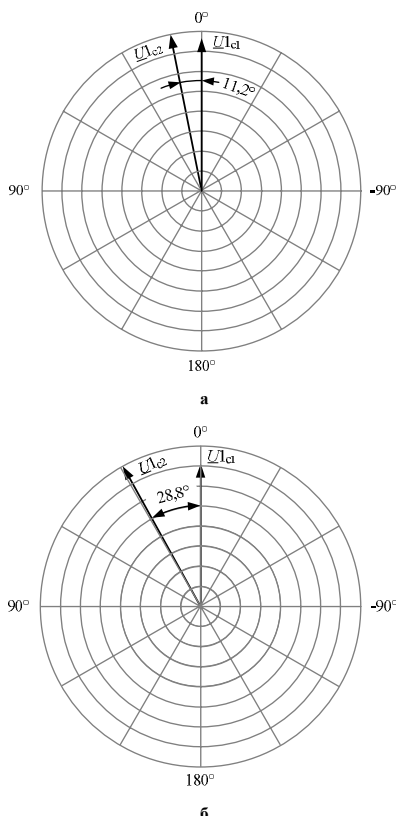


Рис. 4. Диаграммы работы БАВР по углу:
а – при запуске БАВР; б – при включении секционного выключателя

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Анализ данных, полученных в ходе экспериментальных исследований, позволяет дать положительную оценку работы БАВР при возникновении аварийного режима в системе электроснабжения металлургического предприятия. Согласно полученным результатам, время между отключением ввода, потерявшего питание, и включением секционного выключателя составило 75 мс, тогда как успешной работой БАВР считается время переключения до 100 мс. Следует отметить, что угол срабатывания при этом не превысил максимально допустимого значения в 30°.

Такие условия работы БАВР положительно сказываются на устойчивости двигательной нагрузки, что обеспечило синфазность включения секционного выключателя и непрерывность технологического процесса. Использование устройств быстродействующего автоматического ввода резерва в системе электроснабжения промышленного предприятия повысило надежность схемы и позволило обеспечить динамическую устойчивость комплексной электродвигательной нагрузки при кратковременных нарушениях электроснабжения.

Работа выполнена при финансовой поддержке стипендии Президента Российской Федерации для молодых учёных – кандидатов наук СП-1841.2022.1.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Особенности электроснабжения металлургического комбината и возможные перспективы его развития / Г.П. Корнилов, И.Р. Абдулвелеев, О.В. Газизова, Л.А. Коцев // Металлург. 2021. №7. С. 81-89.
2. Корнилов Г.П., Абдулвелеев И.Р., Коваленко А.Ю. Повышение надежности электроснабжения металлургических агрегатов за счет схемотехнических решений // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Энергетика. 2019. Т. 19. №4. С. 59-69. doi:10.14529/power190407
3. Пупин В.М., Куфтин Д.С., Сафонов Д.О. Анализ провалов напряжений в питающих сетях предприятий и способы защиты электрооборудования // Электрооборудование: эксплуатация и ремонт. 2013. №4. С. 40-46.
4. Варганова А.В., Ирихов А.С. Оценка надежности внешнего электроснабжения сетей 6-10 кВ с источниками распределенной генерации // Электротехнические системы и комплексы. 2021. №3(52). С. 22-28. doi: 10.18503/2311-8318-2021-3(52)-22-28
5. Способы повышения надежности ответственных электроприводов заводских электростанций металлургических производств / К.Э. Одинцов, М.Ю. Петушков, Е.Ф. Иванов, А.А. Бочкарев, М.М. Лыгин // Электротехнические системы и комплексы. 2021. №4(53). С. 28-32. doi: 10.18503/2311-8318-2021-4(53)-28-32
6. Kirby R.D., Schwartz R.A. Microprocessor-based protective relays // IEEE Industry Applications Magazine. 2009. Vol. 15, No. 5. Pp. 43-50. doi: 10.1109/MIAS.2009.933405
7. Das J. Power System Protective Relaying. CRC Press, 2017. 702 p.
8. Review and prospect of hidden failure: protection system and security and stability control system / L. Zhao, X. Li, M. Ni, T. Li, Y. Cheng // Journal of Modern Power Systems and Clean Energy. 2019. Vol. 7. No. 6. Pp. 1735-1743. doi: 10.1007/s40565-015-0128-9
9. Research on new automatic bus transfer method which adapts to security and stability control system / W. Li, Z. Li,

- Y. Guo, X. Liang, Z. Zhang, X. Yin // IEEE International Conference on Power System Technology (POWERCON). IEEE, 2016. Pp. 1-6. doi: 10.1109/POWERCON.2016.7753857
10. Kornilov G. P., Khramshin T. R., Abdulvelev I. R. Increasing stability of electric drives of rolling mills with active front ends at voltage sag // International Conference on Electrotechnical Complexes and Systems (ICOECS). IEEE, 2019. Pp. 1-4. doi: 10.1109/ICOECS46375.2019.8949945
 11. Martin C.J., Jain A.K., Das A. Analysis and Speed Control of Induction Motor during Input Supply Voltage Sag // IEEE International Conference on Power Electronics, Smart Grid and Renewable Energy (PESGRE2020). IEEE, 2020. Pp. 1-6. doi: 10.1109/PESGRE45664.2020.9070517
 12. Wang Z., Wang X. Induction motor interactions after voltage sags // IEEE Electrical Power & Energy Conference. IEEE, 2013. Pp. 1-5. doi: 10.1109/EPEC.2013.6802974
 13. Orr G.T., Cooper S., Mozina C.J. High-speed transfer of two 4 kV motor bus sources using a digital motor bus transfer system // IEEE Industrial and Commercial Power Systems Technical Conference, IEEE, 2010. Pp. 1-6. doi: 10.1109/ICPS.2010.5489883
 14. Yalla M.V.V.S. Design of a High-Speed Motor Bus Transfer System // IEEE Transactions on Industry Applications. 2010. Vol. 46. No. 2. Pp. 612-619. doi: 10.1109/TIA.2010.2041097.
 15. Design and testing of fast transfer scheme for Sasol Secunda / M.R. Kganyago, B.A. Aderemi, G.S. Donev, S.P. Chowdhury // IEEE PES PowerAfrica. IEEE, 2017. Pp. 555-559. doi: 10.1109/PowerAfrica.2017.7991286
 16. Razzaghi R., Niayesh K. Current limiting reactor allocation in distribution networks in presence of distributed generation // 10th International Conference on Environment and Electrical Engineering. IEEE, 2011. Pp. 1-4. doi: 10.1109/EEEIC.2011.5874615
 17. The characteristics of the high-speed vacuum circuit breaker and its application / Y. Niwa, T. Funahashi, K. Yokokura, E. Kaneko // IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exhibition. IEEE, 2002. Vol. 3. Pp. 1786-1790. doi: 10.1109/TDC.2002.1177726
 18. Thiam F.B., Urbina M.D., Wisniewski J.B. Fast bus transfers for open phase analysis at nuclear power plants // IEEE Power & Energy Society General Meeting. IEEE, 2017. Pp. 1-5. doi: 10.1109/PESGM.2017.8274465

Поступила в редакцию 05 апреля 2023 г.

Принята к печати 04 мая 2023 г.

INFORMATION IN ENGLISH

IMPROVING THE POWER SUPPLY RELIABILITY FOR INDUSTRIAL CONSUMERS THROUGH HIGH-SPEED BUS TRANSFER

Gennadiy P. Kornilov

D.Sc. (Engineering), Professor, Electric Power Supply of Industrial Enterprises Department, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia, korn_mgn@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-2451-3850>

Il'dar R. Abdulvelev

Ph.D. (Engineering), Associate Professor, Electric Power Supply of Industrial Enterprises Department, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia, i.abdulvelev@magtu.ru, <https://orcid.org/0000-0003-2748-6533>

Evgeniy F. Ivanov

Postgraduate student, Industrial Power Supply Department, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia, kenny_F@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5207-2810>

Aleksey A. Bochkarev

Undergraduate student, Automated Electric Drive and Mechatronics Department, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia, analogsynth@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-8834-2384>

Konstantin E. Odintsov

Ph.D. (Engineering), Associate Professor, Industrial Power Supply Department, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia, eltech_mgtu@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-0699-6016>

Improving the reliability of power supply is one of the most important tasks to be solved at the stage of design and operation of industrial enterprises. To ensure the required level of reliability, various technical means are used. The high-speed bus transfer device (HBT) is currently one of the most efficient and affordable. It is designed to improve the reliability of power supply to critical consumers and ensure the dynamic stability of a complex electric motor load during short-term power outages. The HBT operation is based on continuous monitoring of the values of phase voltages and currents on the buses of two switchgear inputs, converting them into complex effective values of voltages and currents of direct sequence, followed by software processing of the measurement results. Thanks to the use of high-speed vacuum circuit breakers and microprocessor relay protection devices, the switching time to the backup power source does not exceed 100 ms. Five main conditions under which the use of HBT is especially effective are given and analyzed.

Particular attention is paid to the optimization of transient processes when switching to a backup power source by synchronizing the moment of switching on the vacuum circuit breaker. It has been established that the angle between the voltage vectors on the bus sections with a running-out motor load and the backup power source should not exceed 30 electrical degrees. The oscillograms of voltages on the operating and disconnected sections are given when the HBT is triggered after a power failure on one section of the substation bus sections. Based on the research results, some conclusions are made concerning the efficiency of transient stability assurance for a complex electric motor load during short-term power supply outages.

Keywords: high-speed bus transfer, power supply reliability, industrial consumers, continuous production

REFERENCES

1. Kornilov G.P., Abdulvelev I.R., Gazizova O.V.,

- Koptsev L.A. Power Supply Features of Metallurgical Iron-and-Steel Works and Possible Development Prospects. *Metallurg* [Metallurgist], 2021, no. 7, pp. 81-89. (In Russian)
2. Kornilov G.P., Abdulvelev I.R., Kovalenko A.Yu. Improving the Reliability of Steel Producing Units Electric Supply with Schematic Design Solutions. *Vestnik Yuzhno-Uralskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Energetika* [Bulletin of South Ural State University. Series "Power Engineering"], 2019, vol. 19, no. 4, pp. 59-69. (in Russian). doi:10.14529/power190407
3. Pupin V.M., Kufin D.S., Safonov D.O. Analysis of Voltage Losses in Supply Grid of Enterprises and Methods of Electrical Equipment Protection. *Elektrooborudovanie: ekspluatatsiya i remont* [Electrical equipment: Maintenance and Repair], 2013, no. 4, pp. 40-46. (in Russian)
4. Varganova A.V., Irikhov A.S. Evaluation of External Power Supply Reliability in 6-10 kV Networks with Distributed Generation. *Elektrotekhnicheskie sistemy i komplekсы* [Electrotechnical Systems and Complexes], 2021, no. 3(52), pp. 22-28. (In Russian). doi: [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2021-3\(52\)-22-28](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2021-3(52)-22-28)
5. Odintsov K.E., Petushkov M.Yu., Ivanov E.F., Bochkarev A.A., Lygin M.M. Improving the Critical Electric Drives Reliability at Industrial Power Plants of Metallurgical Enterprises. *Elektrotekhnicheskie sistemy i komplekсы* [Electrotechnical Systems and Complexes], 2021, no. 4(53), pp. 28-32. (In Russian). doi: [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2021-3\(52\)-28-32](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2021-3(52)-28-32)
6. Kirby R.D., Schwartz R.A. Microprocessor-based protective relays. *IEEE Industry Applications Magazine*, 2009, vol. 15, no. 5, pp. 43-50. doi: 10.1109/MIAS.2009.933405
7. J. Das. Power System Protective Relaying. CRC Press, 2017. 702 p.
8. Zhao L., Li X., Ni M., Li T., Cheng Y. Review and prospect of hidden failure: protection system and security and stability control system. *Journal of Modern Power Systems and Clean Energy*, 2019, vol. 7, no. 6, pp. 1735-1743. doi: 10.1007/s40565-015-0128-9
9. Li W., Li Z., Guo Y., Liang X., Zhang Z., Yin X. Research on new automatic bus transfer method which adapts to security and stability control system. 2016 IEEE International Conference on Power System Technology (POWERCON). IEEE, 2016, pp. 1-6. doi: 10.1109/POWERCON.2016.7753857
10. Kornilov G.P., Khramshin T.R., Abdulvelev I.R. Increasing stability of electric drives of rolling mills with active front ends at voltage sag. 2019 International Conference on Electrotechnical Complexes and Systems (ICOECS). IEEE, 2019, pp. 1-4. doi: 10.1109/ICOECS46375.2019.8949945
11. Martin C.J., Jain A.K., Das A. Analysis and Speed Control of Induction Motor during Input Supply Voltage Sag. 2020 IEEE International Conference on Power Electronics, Smart Grid and Renewable Energy (PESGRE2020). IEEE, 2020, pp. 1-6. doi: 10.1109/PESGRE45664.2020.9070517
12. Wang Z., Wang X. Induction motor interactions after voltage sags. 2013 IEEE Electrical Power & Energy Conference. IEEE, 2013, pp. 1-5. doi: 10.1109/EPEC.2013.6802974
13. Orr G.T., Cooper S., Mozina C.J. High-speed transfer of two 4 kV motor bus sources using a digital motor bus transfer system. 2010 IEEE Industrial and Commercial Power Systems Technical Conference, IEEE, 2010, pp. 1-6. doi: 10.1109/ICPS.2010.5489883
14. Yalla M.V.V.S. Design of a High-Speed Motor Bus Transfer System. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 2010, vol. 46, no. 2, pp. 612-619. doi: 10.1109/TIA.2010.2041097
15. Kganyago M.R., Aderemi B.A., Donev G.S., Chowdhury S.P. Design and testing of fast transfer scheme for Sisol Secunda. 2017 IEEE PES PowerAfrica. IEEE, 2017, pp. 555-559. doi: 10.1109/PowerAfrica.2017.7991286
16. Razzaghi R., Niayesh K. Current limiting reactor allocation in distribution networks in presence of distributed generation. 2011 10th International Conference on Environment and Electrical Engineering. IEEE, 2011, pp. 1-4. doi: 10.1109/EEEIC.2011.5874615
17. Niwa Y., Funahashi T., Yokokura K., Kaneko E. The characteristics of the high-speed vacuum circuit breaker and its application. *IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exhibition. IEEE*, 2002, vol. 3, pp. 1786-1790. doi: 10.1109/TDC.2002.1177726
18. Thiam F.B., Urbina M.D., Wisniewski J.B. Fast bus transfers for open phase analysis at nuclear power plants. 2017 IEEE Power & Energy Society General Meeting. IEEE, 2017, pp. 1-5. doi: 10.1109/PESGM.2017.8274465

Повышение надёжности электроснабжения потребителей промышленных предприятий средствами быстродействующего автоматического ввода резерва / Г.П. Корнилов, И.Р. Абдулвелеев, Е.Ф. Иванов, А.А. Бочкарев, К.Э. Одинцов // Электротехнические системы и комплексы. 2023. № 2(59). С. 26-32. [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2023-2\(59\)-26-32](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2023-2(59)-26-32)

Kornilov G.P., Abdulvelev I.R., Ivanov E.F., Bochkarev A.A., Odintsov K.E. Improving the Power Supply Reliability for Industrial Consumers Through High-Speed Bus Transfer. *Elektrotekhnicheskie sistemy i komplekсы* [Electrotechnical Systems and Complexes], 2023, no. 2(59), pp. 26-32. (In Russian). [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2023-2\(59\)-26-32](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2023-2(59)-26-32)

Панова Е.А.^{1,2}, Хисматуллин А.И.¹, Андреев С.М.¹¹ Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова² Тобольский индустриальный институт (филиал Тюменского индустриального университета)

РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ КОМПЛЕКСНОГО АВТОМАТИЗИРОВАННОГО РАСЧЕТА УСТАВОК РЕЛЕЙНОЙ ЗАЩИТЫ ЛИНИИ НАПРЯЖЕНИЕМ 6(10) КВ

Многообразие микропроцессорных терминалов релейной защиты требует сегодня от расчетчика знания особенностей методик расчета уставок релейной защиты на базе каждого из терминалов. К таким особенностям относятся, например, коэффициенты возврата, требования к измерительной аппаратуре, а также шаг и диапазон, регулирование уставок. Ряд производителей микропроцессорных устройств релейной защиты предлагают проектировщикам свои системы автоматизированного расчета уставок. Однако каждая из таких систем имеет свою логику представления исходных данных, что также создает определенные трудности при выполнении расчетов. Таким образом, актуальной является задача разработки комплексной системы автоматизированного расчета уставок релейной защиты, позволяющей на основе исходных данных об эквиваленте электрической сети и параметрах основного оборудования подстанции рассчитать токи короткого замыкания в максимальном и минимальном режимах и определить уставки срабатывания защиты на базе различных микропроцессорных терминалов с учётом их технических особенностей. В данной работе представлена система автоматизированного расчета уставок защит линии электропередачи напряжением 6(10) кВ на базе микропроцессорных терминалов производства ООО «НТЦ «Механотроника», АО «Радиус Автоматика», ООО НПП «ЭКРА» и АО «Шнейдер Электрик». Авторами разработаны алгоритмы автоматизированного расчета уставок максимальной токовой защиты и токовой отсечки на базе указанных терминалов защиты. Также выполнена программная реализация данных алгоритмов и приведен пример расчета уставок с использованием разработанного программного комплекса. Алгоритмы предусматривают формирование предупреждений для расчетчика о невыполнении требований по чувствительности защиты, выходя за пределы диапазона регулирования уставок.

Ключевые слова: система автоматизированного проектирования, релейная защита, уставки, чувствительность, максимальная токовая защита, токовая отсечка

ВВЕДЕНИЕ

С появлением современных вычислительных систем и программных комплексов процесс расчёта уставок РЗА стал менее трудоёмким, влияние человеческого фактора было сокращено.

Тем не менее выполнение данной задачи по сей день требует немалого внимания, времени, знаний методик расчёта, осведомлённости в особенностях той или иной области релейной защиты, высокой точности и отсутствия ошибок расчётов.

Одним из способов решения этих проблем является разработка системы автоматизированного расчёта (далее – САПР) параметров срабатывания РЗА, которая включает в себя следующие задачи:

1. Разработка алгоритмов расчёта уставок РЗА на микропроцессорной базе с учётом функционала и особенностей терминалов РЗ.

2. Реализация и автоматизация данных алгоритмов в программном обеспечении.

3. Представление данной системы в виде понятного пользовательского интерфейса.

4. Отладка реализованного САПР.

Преимуществами данного подхода являются:

1. Быстрота: подобный САПР позволяет существенно сократить время, затрачиваемое на расчёт уставок.

2. Универсальность: программа может использоваться для расчёта уставок любых типов защитных устройств и для различных схем электроснабжения.

3. Гибкость: возможность изменения параметров и условий задачи, что позволяет быстро оценить различные варианты расчёта.

4. Экономия времени и ресурсов: использование данного ПО снижает потребность в количестве проектного персонала, в том числе разгружает занятость проектных организаций.

5. Повышение качества проекта: САПР позволяет получить точные и адекватные результаты расчёта с учётом тех или иных особенностей расчёта, что повышает надёжность работы РЗА.

Данной области было уделено большое внимание научно-исследовательским обществом.

Авторами работы [1] был произведён анализ современных САПР уставок устройств РЗА, выводом которого является низкая «гибкость» рассмотренных программных комплексов (далее – ПК) для пользователя, в силу их «закрытого» кода. Исходя из чего, было принято заключение о том, что наиболее благоприятной и удобной является ПК «Excel», на основе которого авторы реализовали САПР уставок РЗА на микропроцессорной базе. В публикации [2] авторами представлен ПК «АРПС РЗА», реализованный на базе микросервисной архитектуры, позволяющей производить автоматизированный расчёт параметров срабатывания релейной защиты, особенностью которого является возможность автоматической коррекции за счет моделирования различных сценариев нормальных и аварийных режимов в программном комплексе PSCAD в режиме реального времени. Публикация [3] описывает технологию, автоматизирующую расчёты при динамическом изменении энергосистемы, содержащую в себе источники распределенной генерации, для перспективных децентрализованных многопараметрических ступенчатых релейных защит, МТЗ и ДЗ в электрических сетях напряжением до 220 кВ, оснащённых микропроцессорными устройствами РЗ. В статье [4] была

проанализирована проблематика, связанная с внедрением новых измерительных приборов, и предложены рекомендации по разработке САПР уставок РЗА для решения данных проблем. Кроме того, описаны перспективы развития микропроцессорных устройств РЗА. Авторами [5] представлена методика настройки цифровой ДЗТ, основанная на математическом представлении моделей РЗ и использования всемерного моделирующего комплекса реального времени электрооборудования электроэнергетических систем. Данная методика имеет перспективы реализации в виде САПР уставок РЗА на базе ПК. В публикации [6] описан ПК «ЭлектроРасчет», который позволяет создавать однолинейные схемы электросетей с помощью графического интерфейса, на основании которых производится расчёт токов КЗ по методу узловых потенциалов. На основании полученных данных ПК определяет положение выключателя, защищаемый объект, и оптимальные настройки РЗ для выбранной защиты с учётом их проверки по условию чувствительности. Авторами публикации [7] описаны алгоритмы, основанные на детальных математических моделях реле, с помощью которых возможен расчёт уставок срабатывания МТЗ и ДЗ. В статье [8] описывается программа, производящая анализ различных типов энергосистем (промышленные, коммунальные, коммерческие) и последствии производящая расчёт параметров срабатывания РЗ для замкнутых и радиальных конфигураций электросистем.

Разработанная программа для ЭВМ «Автоматизированная система расчета параметров срабатывания РЗА в микроэнергосистеме» [9] предназначена для автоматического расчета параметров срабатывания устройств РЗА электротехнического оборудования энергосистем. Результатом работы программы являются рассчитанные уставки и коэффициенты чувствительности для заданных защит. Цифровой двойник «прототип-экземпляр» распределительной электрической сети напряжением 6-10-35 кВ [10] описывает конкретный «экземпляр» распределительной электрической сети напряжением 6-35 кВ, моделируя необходимые параметры компонентов: протяженность участков сети; количество установленных коммутационных аппаратов; место возникновения КЗ на участках сети; виды установленной РЗ и ее уставки. ПК «Выбор уставок токовых защит силового трансформатора» [11] реализует функции: выбор шкафа РЗ в зависимости от типа трансформатора и места его установки; расчет уставок для продольной ДТЗ трансформатора, МТЗ с пуском по току и напряжению, ступенчатой направленной ТЗНП автотрансформаторов от замыканий на землю; ДЗ автотрансформатора от междофазных КЗ. «Программа автоматизированного расчета уставок релейной защиты и автоматики +» («ПАРУС РЗА +») [12] позволяет выбирать параметры срабатывания устройств РЗА оборудования подстанций, выполненных на электромеханической, микроэлектронной, микропроцессорной базе устройств РЗА.

Система автоматизированного расчёта уставок РЗА является актуальной разработкой в свете современных технологий и требований в области энергетики. Разработка данного САПР является актуальной и важной задачей, которая имеет высокий потенциал в

области энергетики и позволит обеспечить повышение безопасности и надёжности работы системы электрооборудования.

В данной работе авторами представлен алгоритм автоматизированного расчёта уставок защит линий электропередачи напряжением 6(10) кВ и его программная реализация.

АЛГОРИТМ РАСЧЁТА УСТАВОК ЗАЩИТ ЛЭП 6(10) КВ

Авторами разработан программный продукт, предназначенный для автоматизированного расчёта уставок РЗА подстанционного оборудования на основе данных об эквиваленте энергосистемы, а также параметрах основного электрооборудования. ПК рассчитан на микропроцессорные терминалы производства ООО «НТЦ «Механотроника», АО «Радиус Автоматика», ООО НПП «ЭКРА», АО «Шнейдер Электрик». В данной работе представлен алгоритм расчёта автоматизированного расчёта уставок защит линий электропередачи напряжением 6(10) кВ.

В модулях расчёта защит линий 6(10) кВ реализованной системы производится расчёт уставок срабатывания токовой отсечки (ТО), максимальной токовой защиты (МТЗ), проверка чувствительности защит, а также построение времятоковых характеристик МТЗ и характеристики защитоспособности ТО с учетом особенностей терминалов.

В качестве руководящих указаний для составления алгоритма расчёта МТЗ и ТО линий 6(10) кВ с односторонним питанием, а также построения их времятоковых характеристик были приняты методики, представленные заводами-изготовителями реле в [13-16].

Для автоматического расчёта пользователю необходимо задать следующие исходные параметры:

1. Результирующее сопротивление системы в максимальном и минимальном режимах $X_{с.рез.макс}$, $X_{с.рез.мин}$, Ом.
2. Номинальное напряжение защищаемой линии $U_{ном}$, кВ.
3. Коэффициенты схемы $k_{сх}$ и трансформации $k_{тг}$, измерительного ТТ, коэффициент трансформации $k_{тн}$ ТН, установленных на защищаемой линии.
4. Максимальная полная мощность нагрузки защищаемой линии $S_{нагр.плх}$, кВА.
5. Значение базисной мощности $S_{б}$, ВА.
6. Значение номинальной мощности силового трансформатора $S_{ном}$, МВА.
7. Выбрать из раскрывающегося списка тип силового трансформатора подстанции и ввести его напряжение короткого замыкания U_k , %.
8. В случае если выбран трансформатор с расщеплённой обмоткой, вводятся три паспортных значения напряжений короткого замыкания $U_{k\text{ вн-нн}}$, $U_{k\text{ вн-нн1}}$, $U_{k\text{ нн-нн1}}$.
9. Ввести предельное значение регулирования напряжения под нагрузкой (РПН) рассматриваемого трансформатора $\Delta U_{РПН}$, %.
10. Значение линейного напряжения в условиях самозапуска двигателей нагрузки после отключения КЗ в месте установки защиты $U_{мин}$, кВ. В ориентировочных расчётах может быть принято равным 0,85-0,9 $U_{ном}$.

11. Значение линейного напряжения в условиях самозапуска двигателей нагрузки при включении их от автоматики (АПВ, АВР) в месте установки защиты, кВ. В ориентировочных расчётах может быть принято равным $0,7 U_{ном}$.

12. Удельное сопротивление отходящей от шин ГПП кабельной линии x_0 , Ом/км, а также её длина l , км.

13. Указать из раскрывающегося списка, питает ли защищаемая линия одиночный трансформатор или группу силовых трансформаторов. При положительном условии вводится значение номинальной мощности питаемого трансформатора $S_{ном. тр.}$, кВА, и напряжение короткого замыкания $U_{кз. \%}$. При условии питания группы трансформаторов указывается также суммарный номинальный ток всех силовых трансформаторов, питаемых от защищаемой линии $\Sigma I_{ном. тр.}$, А.

14. Суммарный ток нагрузки неповреждённых элементов, питаемых от защищаемой линии $\Sigma I_{раб.}$, А.

15. Наибольший из токов срабатывания защит одного из предыдущих присоединений $I_{с.з. max}$, А.

В случае расчёта защит на базе терминалов ООО «НТЦ «Механотроника», предлагается также указать вид аппарата из раскрывающегося списка в соответствующей ячейке.

16. Если в качестве предыдущего защитного аппарата указан автоматический выключатель, указывается его ток срабатывания отсечки $I_{с.о.}$, А.

17. Если указан предохранитель, указывается наибольший номинальный ток плавкой вставки $I_{вс. ном. max}$, А.

В случае расчёта защит на базе терминалов ООО «НТЦ «Механотроника» в соответствии с выбранным модулем пользователю необходимо указать в раскрывающемся списке условие: питает ли защищаемая и смежная линия подстанцию с двумя взаиморезервируемыми секциями шин с АВР. При положительном выборе пользователю необходимо ввести значение максимальной полной мощности нагрузки второй линии.

На основе исходных данных выполняется автоматизированный расчет токов короткого замыкания и остальных напряжений, из которого для расчета уставок защит линии требуются:

1. Ток трехфазного КЗ в максимальном и двухфазного КЗ в минимальном режимах на шинах 6(10) кВ ($I_{к2. max}^{(2)}$, $I_{к2. min}^{(2)}$) и на конце защищаемой линии ($I_{к3. max}$, $I_{к3. min}^{(2)}$) на , кА.

2. Если линия питает трансформатор, то дополнительно рассчитывается ток трехфазного КЗ в максимальном и минимальном режимах за данным трансформатором $I_{к4. max}^{(2)}$, $I_{к4. min}^{(2)}$, кА.

3. Остаточное линейное напряжение при трехфазном КЗ в конце линии $U_{кз. max}$ КЗ, кВ, и остаточное напряжение обратной последовательности (НОП) U_{min} , кВ.

Разработанные алгоритмы представлены на рис. 1-5, где блоки, выполненные штрихпунктирной линией, относятся к частным условиям расчёта согласно МУ предприятия ООО «НТЦ «Механотроника», штриховой линией – согласно МУ предприятия АО «Радиус Автоматика».

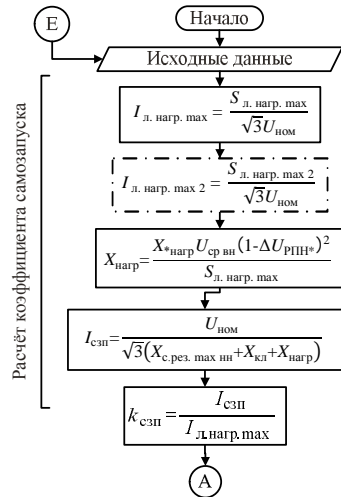


Рис. 1. Блок-схема алгоритма расчёта коэффициента самозапуска

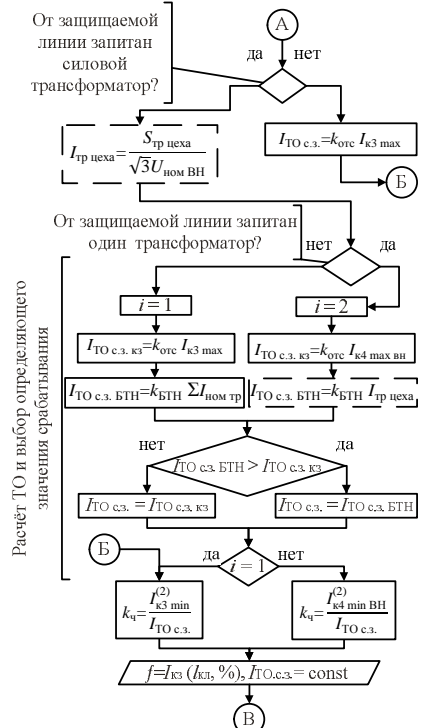


Рис. 2. Блок-схема алгоритма расчёта токовой отсечки, построения характеристики её защитоспособности

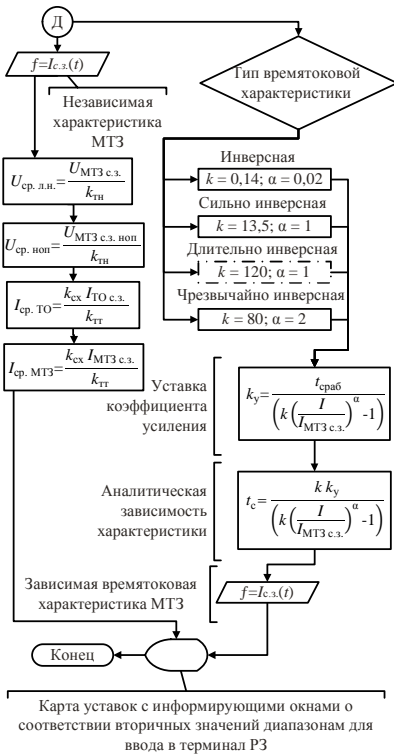


Рис. 5. Блок-схема алгоритма построения характеристик МТЗ и вывода уставок

2) по условию отстройки от броска тока намагничивания (далее – БГН) силовых трансформаторов $I_{ТО с.з. бгн}$, А, если таковые на защищаемой линии присутствуют. Для расчёта данного условия пользователю необходимо ввести в соответствующую ячейку, в случае модулей «Радиус Автоматика Л» и «ЭКРА Л», коэффициент отстройки ТО при БГН $k_{бгн}$. В случае упомянутых модулей данное значение является фиксированным.

Исходя из полученных расчётных значений токов срабатывания ТО, системой предусмотрен автоматический выбор наибольшего из полученных значений в качестве определяющего условия, согласно которому определяется коэффициент чувствительности k_c ТО к значению минимального двухфазного КЗ защищаемой линии.

Системой также производится построение характеристики защитоспособности ТО, представляющей собой график отношения максимального ТКЗ на защищаемом присоединении к длине защищаемой линии l , %, а также константы – параметра срабатывания ТО $I_{ТО с.з.}$ в первичных величинах, А. Алгоритм расчёта ТО представлен на блок-схеме (см. рис. 2).

Для расчёта МТЗ линий пользователю предлагается указать в соответствующих ячейках значение коэффициента отстройки $k_{отс}$, учитывающего погрешность

реле и необходимый запас во всех модулях, за исключением модуля «Радиус Автоматика Л», в котором значение $k_{отс}$ является фиксированным.

В модуле «Механотроника Л» при указании питания подстанцией двух взаиморезервируемых секций шин следует указать значение коэффициента отстройки $k'_{отс}$, учитывающего повышение тока нагрузки при подключении ко второй секции шин заторможенных двигателей при действии АВР.

Далее системой производится расчёт токов срабатывания максимальной токовой защиты (далее – МТЗ) $I_{МТЗ с.з.}$, А, по следующим условиям, определяющимся в зависимости от указанных параметров в блоках с исходными данными:

- отстройки от максимального рабочего тока при самозапуске двигателей нагрузки;
- согласования с защитами предыдущих элементов.

Кроме того, в модуле «Механотроника Л» предусмотрены следующие условия:

- отстройки от тока перегрузки при действии АВР;
- согласования с плавкими вставками предохранителей;
- согласования с отсечкой автоматического выключателя.

Исходя из полученных значений токов срабатывания МТЗ, системой предусмотрен выбор наибольшего из полученных значений в качестве определяющего условия.

Впоследствии производится проверка чувствительности МТЗ по току при минимальном значении двухфазного КЗ $I_{с.з. мин}^{(2)}$, кА, в конце защищаемого присоединения, а также расчёт уставки защиты от перегрузки $I_{МТЗ с.з. перерг.}$, А (применительно к модулям «Радиус Автоматика Л» и «ЭКРА Л»).

Системой предусмотрено информирующее окно, сигнализирующее о соблюдении/несоблюдении условия достаточной чувствительности защиты – коэффициент чувствительности $k_c \geq 1,5$. Алгоритм расчёта МТЗ представлен на блок-схеме (см. рис. 3).

В случае если МТЗ оказалась недостаточно чувствительна ($k_c < 1,5$), системой производится расчёт уставок срабатывания МТЗ с пуском по напряжению.

Рассчитывается ток срабатывания $I_{МТЗ с.з.}$, А, а также уставки срабатывания защиты по линейному напряжению $U_{МТЗ с.з. л.н.}$, кВ, по условию отстройки от минимального напряжения в условиях самозапуска после отключения КЗ, и включение от автоматики (АПВ, АВР) заторможенных двигателей ($U_{МТЗ с.з. см.}$), кВ. В качестве определяющего условия срабатывания МТЗ с пуском по напряжению системой выбирается наименьшее из полученных значений.

Уставка срабатывания защиты по напряжению обратной последовательности (ОП) $U_{МТЗ с.з. ноп.}$ в модулях «Механотроника Л» и «Шнейдер Электрик Л» принимается равной 12 В [13]. В модулях «Радиус Автоматика Л» и «ЭКРА Л» уставка определяется расчётным путём.

После системой производится проверка чувствительности пускового токового органа, органа минимального и ОП напряжений. В случае модуля «Радиус Автоматика Л» пользователю предлагается указать в соответствующей ячейке наличие пускового органа

напряжения обратной последовательности (НОП), что в дальнейшем повлияет на расчёт коэффициента чувствительности.

Аналогично предыдущей защите выполняется автоматическая проверка соответствия коэффициента чувствительности требованиям ПУЭ с выдачей пользователю уведомления.

Алгоритм расчёта МТЗ по напряжению изображен на блок-схеме (см. **рис. 4**).

Далее системой осуществляется построение время-токовых характеристик МТЗ $f=I(t)$ с независимой и зависимой выдержками времени.

Для этого пользователю необходимо ввести время срабатывания МТЗ и выбрать из раскрывающегося списка один из реализованных в системе видов характеристик, реализуемых терминалом релейной защиты: инверсная, сильно инверсная, длительно инверсная (применительно к модулю «Механотроника Л»), чрезвычайно инверсная.

Каждому типу характеристики соответствуют определённые постоянные величины k , α , а также β (модуль «Шнейдер Электрик Л»), на основе которых алгоритмом рассчитывается уставка коэффициента усиления K и времятоковая зависимость.

Конечным шагом системы является вывод в отдельный блок («Карта уставок») полученных значений уставок, приведённых ко вторичным значениям цепей измерительных ТТ и ТН. Пересчёт производится на основе ранее введённых параметров ТТ и ТН.

Полученные значения проверяются системой на соответствие их диапазону возможных для ввода значений в терминал РЗ. Рядом с блоком расположены окна, информирующие о возможности ввода полученных значений в терминал РЗ.

Алгоритм построения характеристик срабатывания МТЗ представлен на блок-схеме (см. **рис. 5**).

РАСЧЕТ УСТАВОК ЗАЩИТ ЛИНИИ В РАЗРАБОТАННОМ ПК

В качестве примера примем следующую модель эквивалента электрической системы для ввода исходных данных в систему:

- длина защищаемой линии, отходящей от распределительного устройства подстанции до ближайшего трансформатора $l = 3$ км;
- удельное сопротивление линии $\rho = 0,08$ Ом/км;
- максимальная мощность нагрузки линии равна $S_{\text{нагр. max}} = 2000$ кВА;
- известно, что линия питает группу трансформаторов 10/0,4 кВ, ближайший из которых имеет установленную мощность $S_{\text{ном. тр.}} = 250$ кВА со значением напряжения КЗ $u_k = 5,5\%$;
- в модуле для терминала «Механотроника» укажем защитный аппарат, установленный на линии – выключатель нагрузки со значением номинального тока срабатывания отсечки $I_{c.о} = 160$ А;
- результирующее сопротивление системы в максимальном и минимальном режимах $X_{c.pez. max} = 5,787$ Ом, $X_{c.pez. min} = 4,629$ Ом;
- номинальное напряжение защищаемой линии $U_{\text{ном}} = 10$ кВ;

– коэффициенты схемы $k_{сх} = 1,73$ и трансформации ТТ $k_{тт} = 200$, коэффициент трансформации ТН $k_{тн} = 100$.

Результаты расчёта системой значений ТКЗ и остальных напряжений при трёхфазном КЗ на конце линии представлены на **рис. 6**.

В модуле «Механотроника Л» укажем коэффициент отстройки для МТЗ ($k_{отс}$) равным 1,2, в модуле «Шнейдер Электрик Л» $k_{отс} = 1,1$. В модуле «Радиус Автоматика» укажем коэффициент отстройки ТО при БТН $k_{БТН}$ равным 3, в модуле «ЭКРА» соответственно $k_{отс} = 1,1$, $k_{БТН} = 3$.

Для построения независимой и зависимой время-токовых характеристик укажем время срабатывания и отстройки равными 0,5 с, тип характеристики – инверсная (нормально инверсная, стандартная обратная-зависимая).

Для наглядности полученные в результате работы системы значения уставок срабатывания защит приведены в **таблице**.

В качестве примера приведём сгенерированные характеристики и карту уставок для модуля «Механотроника Л» на **рис. 7-10**.

Исходя из полученных результатов, наблюдается значительная разница между значениями доли линии, защищаемой токовой отсечкой, которая обусловлена различными значениями коэффициента отстройки того или иного терминала РЗ. Так, согласно МУ в случае терминалов БМРЗ значение $k_{отс}$ является фиксированным и равняется 1,3.

В свою очередь, у АО «Радиус Автоматика» значение $k_{отс}$ равно 1,2. В то время как у ООО НПП «ЭКРА», АО «Шнейдер Электрик» значение данного коэффициента может приниматься в пределах от 1,1 до 1,15.

Определяющим условием для расчета тока срабатывания МТЗ (см. **рис. 3**) для всех терминалов оказалась отстройка от тока при самозапуске двигателей. Отличия величин уставок МТЗ заключаются в различных значениях коэффициента $k_{отс}$, а также, в случае Seram, коэффициента возврата k_v , который принимается равным 0,935, в отличие от значения 0,95 производителей остальных терминалов. Значения величин уставок различаются не более чем на 2%.

**Значения уставок ступеней МТЗ, приведенных
во вторичные значения измерительного ТТ**

Значения уставок ступеней МТЗ, А	Производитель терминала РЗА			
	Механотроника	Радиус Автоматика	ЭКРА	Шнейдер Электрик
МТЗ-1 (ТО)	78,85	72,78	66,72	66,72
МТЗ-2	3,29	3,29	3,02	3,06
МТЗ-3 (защита от перегрузки)	–	1,37	1,16	–
Коэффициент чувствительности	14,23	14,23	15,52	15,27
Доля длины линии, защищаемой ТО, %	18	40	65	65

Расчётная точка КЗ на отходящей от РУ ГПП линии	Ток короткого замыкания в точке КЗ, $I_{к3 \max}$, кА	7,004	$I_{к3 \min}$, кА	6,240
	Ток двухфазного короткого замыкания в точке КЗ, $I_{(2)к3 \min}$, кА	5,404		
	Остаточное максимальное напряжение при КЗ в точке КЗ, $U_{к3 \max \text{ КЗ}}$, кВ	3,598		
	Напряжение обратной последовательности при КЗ в точке КЗ, $U_{(2)ост. \text{ КЗ}}$, кВ	0,153		

Рис. 6. Окно результатов расчёта ТКЗ и остаточных напряжений на конце линии 10 кВ

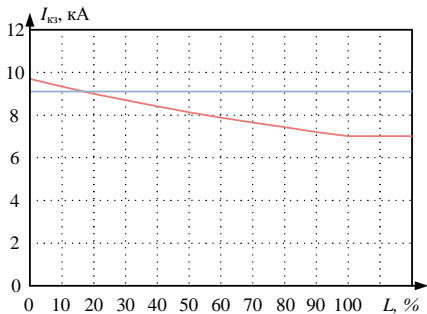


Рис. 7. Характеристика защитоспособности ТО

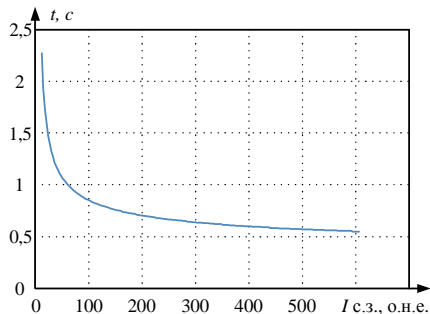


Рис. 8. Зависимая времятоковая характеристика МТЗ

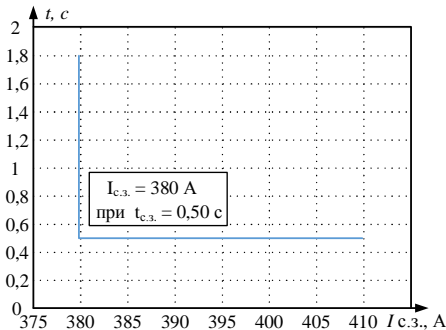


Рис. 9. Независимая времятоковая характеристика МТЗ

Токовая отсечка	[ТО РТ1] Уставка токовой отсечки, $I_{ТО \text{ с.з.}}$, А	78,85	ДОПУСТИМОЕ ЗНАЧЕНИЕ
Максимальная токовая защита	[МТЗ РТ1] Уставка МТЗ, $I_{МТЗ \text{ с.з.}}$, А	78,85	ДОПУСТИМОЕ ЗНАЧЕНИЕ

Рис. 10. Карта уставок с результатами уставок защит линии 10 кВ

Коэффициенты чувствительности МТЗ для всех модулей многократно превышают необходимое значение 1,5. Объясняется это небольшой протяженностью защищаемой линии, величиной результирующего сопротивления системы, влияющих на значение двухфазного ТКЗ на линии. Исходя из чего, включение в цепь РЗ пускового органа напряжения и расчёт МТЗ с пуском по напряжению не понадобились.

Согласно выборке среди трансформаторов разных классов напряжения и мощностей, чьи характеристики влияют на значение результирующего сопротивления и значения ТКЗ, добиться результата, когда МТЗ с пуском по току не будет удовлетворять условию чувствительности, – маловероятный случай. В том числе ко-

эффициент самозапуска в случае высокой доли двигательной нагрузки и номинального напряжения 6 кВ, как правило, не превышает значения, равного 5 ед.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработанный авторами алгоритм автоматизированного расчета уставок и созданный на его базе программный продукт позволяют на основе данных эквивалента сети и параметров защищаемого оборудования рассчитать уставки защит на базе нескольких видов терминалов, сравнить их по чувствительности, а также сгенерировать карты уставок. Система учитывает шаг дискретизации и пределы вводимых в терминал релейной защиты уставок и сигнализирует в информацион-

ных окнах о выполнении данных условий для рассчитанных параметров срабатывания РЗ. В случае всех терминалов полученные значения уставок, приведённые к вторичным цепям измерительного ТТ, актуальны и соответствуют диапазонам возможных вводимых значений в терминалы РЗ. Данная функция поможет расчётчику избежать возможных ошибок.

Исходя из анализа МУ производителей, в случае ООО «НТЦ «Механотроника» указания по расчёту 2 ступени МТЗ являются наиболее объёмными, так как заключают в себе условия по отстройке от тока перегрузки при действии АВР, а также согласования с защитными коммутирующими аппаратами.

Таким образом, реализованная система может позволить пользователю при проектных расчётах защит линии 6(10) кВ сравнить тот или иной терминал РЗ, выбрать наиболее подходящий под определённый вариант электрической системы, произвести быстрый расчёт в случае изменения структуры электросистемы, убедиться в адекватности полученных от проектной организации параметров срабатывания защиты.

Список источников

1. Магомедов М.Ш., Ганошина М.О., Хлебникова М.В. Автоматизация проектирования терминальных микропроцессорных релейных защит «Сириус» для воздушных и кабельных линий электропередачи // Молодой исследователь Дона. 2019. № 1(16). С. 56-59. EDN: VUAKHY.
2. Автоматизированная система расчета параметров срабатывания РЗА / А.А. Волошин, А.И. Коваленко, Д.А. Дегтярев, С.А. Данилов // Релейщик. 2021. № 2(40). С. 30-34. EDN: BSVWVW.
3. Шарыгин М.В., Вуколов В.Ю., Петров А.А. Разработка алгоритма автоматической адаптации параметров срабатывания многомерной интеллектуальной релейной защиты к конфигурации распределительных электрических сетей // Вестник НГИЭИ. 2020. № 11(114). С. 65-78. doi: 10.24411/2227-9407-2020-10106. EDN: ABHCUE
4. Базыль И.М., Верижников А.В. Тенденции развития микропроцессорных устройств релейной защиты // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2018. № 12. С. 186-189. EDN: YTEKKT.
5. Использование математической модели для настройки цифровой дифференциальной защиты трансформатора / М.В. Андреев, А.А. Суворов, А.В. Киевец, В.Е. Рудник // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2020. Т. 24. № 1(150). С. 85-96. doi: 10.21285/1814-3520-2020-1-85-96. EDN: OWOSTR.
6. Автоматизация расчетов уставок релейных защит в распределительных сетях промышленных предприятий / О.Г. Широков, А.А. Капанский, Д.Р. Мороз, А.С. Фиков // Вестник Гомельского государственного технического университета им. П.О. Сухого. 2011. № 1(44). С. 79-85. EDN: OIPXXU.
7. Macgregor D., Tirupati V., Patterson R. Automatic calculation of relay settings for a blocking pilot scheme. 18th International Conference and Exhibition on Electricity Distribution. IEEE, 2005. Vol. 3. Pp. 1-5. doi: 10.1049/cp:20051173
8. Penhthong T., Hongesombut K. An efficient method of automatic distance relay settings for transmission line protection. International Conference of IEEE Region 10 (TENCON), IEEE, 2013. Pp. 1-4. doi: 10.1109/TENCON.2013.6718905.
9. Свидетельство о гос. регистрации программы для ЭВМ 2021668958. Автоматизированная система расчета параметров срабатывания РЗА в микроэнергосистеме / Волошин Е.А., Сазанов В.С., Дегтярев Д.А., Данилов С.А., Волошин А.А., Лебедев А.А., Коваленко А.И.; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ». №2021667887; заявл. 10.11.2021; опубл. 22.11.2021.
10. Пат. 2021619486 Российская Федерация. Цифровой двойник «прототип-экземпляр» распределительной электрической сети напряжением 6-10-35 кВ / Сазыкин В.Г., Багметов А.А.; заявитель и патентообладатель Сазыкин В.Г., Багметов А.А. № 2021618710; заявл. 04.06.2021; опубл. 10.06.2021.
11. Свидетельство о гос. регистрации программы для ЭВМ 2018617233. Выбор уставок токовых защит силового трансформатора / Шурупов А.А., Рыбалкин А.Д.; заявитель и патентообладатель ООО НПП «ЭКРА». № 2018614591; заявл. 04.05.2018; опубл. 21.06.2018.
12. Свидетельство о гос. регистрации программы для ЭВМ 2013612412 Российская Федерация. Программа автоматизированного расчета уставок релейной защиты и автоматики+ («ПАРУС РЗА +»). Заявитель и патентообладатель ОАО «ФСК ЕЭС». № 2012661763; заявл. 27.02.2013; опубл. 29.12.2012.
13. Соловьев А.Л., Иванов И.В., Сельков Е.А. Стандарт организации СТО ДИВГ-059-2017. Релейная защита распределительных сетей 6-10 кВ: Расчёт уставок, Методические указания. Санкт-Петербург: ООО «НТЦ «Механотроника», 2017. 74 с.
14. Барабанов Ю.А. Выбор уставок срабатывания микропроцессорных терминалов релейной защиты и автоматики серии «Сириус» для распределительных сетей 6-35 кВ. Москва: ЗАО «Радиус Автоматики», 2013. 87 с.
15. Рекомендация к расчету и выбору уставок РЗА устройств серии ЭКРА 217 производства ООО НПП «ЭКРА» объектов станций напряжением 6-35 кВ. Чебоксары: ООО НПП «ЭКРА». 68 с. URL: <https://ekra.ru/product/rza-og/t-rza/ekra-217/> (дата обращения 02.05.2023)
16. Соловьев А.Л. Методические указания по выбору характеристик и уставок защиты электрооборудования с использованием микропроцессорных терминалов серии Serap производства Schneider Electric: методические указания с примерами. Санкт-Петербург: АО «Шнейдер Электрик», 2006. 74 с.
17. Релейная защита и автоматика понизительных подстанций промышленных предприятий: учебное пособие / Игуменшев В.А., Олейников В.К., Патшин Н.Т., Панова Е.А. Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та им. Г.И. Носова, 2014. 108 с.

Поступила в редакцию 14 апреля 2023 г.

Принята к печати 20 мая 2023 г.

INFORMATION IN ENGLISH

DEVELOPMENT OF A SYSTEM FOR INTEGRATED AUTOMATED CALCULATION OF RELAY PROTECTION SETTINGS FOR A LINE WITH A VOLTAGE OF 6(10) kV

Evgeniya A. Panova

Ph.D. (Engineering), Associate Professor, Department of Electric Power Supply of Industrial Enterprises, Power Engineering and Automated Systems Institute, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia,

Electrical Power Engineering Department, Tobolsk Industrial Institute, Tobolsk Branch of the Industrial University of Tyumen, Tobolsk, Russia. ea.panova@magtu.ru, <https://orcid.org/0000-0001-9392-3346>

Arslan I. Khismatullin

Student, Department of Electric Power Supply of Industrial Enterprises, Power Engineering and Automated Systems Institute, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.

Sergey M. Andreev

D.Sc. (Engineering), Associate Professor, Head of the Department, Automated Control Systems Department, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia, andreev.asc@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0003-0735-6723>

The variety of microprocessor relay protection terminals today requires the engineer to know the features of the methods for calculating relay protection settings based on each of the terminals. Such features include, for example, return factors, requirements for measuring equipment, as well as step and range, adjustment of setpoints. Several manufacturers of microprocessor relay protection devices offer designers their own systems for automated calculation of settings. However, each of these systems has its own logic for presenting the initial data, which also creates certain difficulties in performing calculations. Thus, the urgent problem is to develop an integrated system for automated calculation of relay protection settings, which allows, based on the initial data on the equivalent of the electrical network and the parameters of the main equipment of the substation, to calculate the short-circuit currents in the maximum and minimum modes and determine the protection operation settings based on various microprocessor terminals, taking into account their technical features. This paper presents a system for automated calculation of protection settings for a 6 (10) kV power line based on microprocessor terminals manufactured by STC Mekhanotronika LLC, RADIUS Avtomatika JSC, EKRA Research and Production Enterprise LLC and Schneider Electric JSC. The authors have developed algorithms for automated calculation of the maximum current protection and current cutoff settings based on the indicated protection terminals. And also, a software implementation of these algorithms was performed and an example of calculating the settings using the developed software package was given. The algorithms provide for the generation of warnings for the calculator about non-compliance with the requirements for protection sensitivity, going beyond the range of setting adjustment.

Keywords: computer-aided design system, relay protection, settings, sensitivity, overcurrent protection, current cutoff

REFERENCES

1. Magomedov M. Sh., Ganoshina M.O., Khlebnikova M.V. Automation of design of terminal microprocessor relay protection "Sirius" for overhead and cable power lines // *Molodoj issledovatel' Dona* [Don's young explorer], 2019, no. 1(16), pp. 56-59. EDN: VUAKHY.
2. Voloshin A.A., Kovalenko A.I., Degtyarev D.A., Danilov S.A. Automated system for calculating the parameters of the operation of the relay protection and automation equipment. *Relejsnik* [Protection engineer], 2021, no. 2(40), pp. 30-34. EDN: BSVWWV.
3. Sharygin M.V., Vukolov V.Ju., Petrov A.A. Algorithm of automatic adaptation of multidimensional relay protection setpoints to the configurable power distribution network. *Vestnik NGIEI* [Bulletin NGIEI], 2020, no. 11(114), pp. 65-78. doi: 10.24411/2227-9407-2020-10106. EDN: ABHCUE
4. BazyI' I.M., Verizhnikov A.V. Tendencies of development of microprocessor relay protection. *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya Tula State University], 2018, no. 12, pp. 186-189. EDN: YTEKKT.
5. Andreev M.V., Suvorov A.A., Kievec A.V., Rudnik V.E. Digital transformer differential protection setting using its mathematical models. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* [Proceedings of Irkutsk State Technical University], 2020, vol. 24, no. 1(150), pp. 85-96. doi: 10.21285/1814-3520-2020-1-85-96. EDN: OWOSTR.
6. Shirokov O.G., Kapanskij A.A., Moroz D.R., Fikov A.S. Automation of calculations of relay protection settings in distribution networks of industrial enterprises. *Vestnik Gomel'skogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. P.O. Suhogo* [Bulletin of the Sukhoi State Technical University of Gomel], 2011, no. 1(44), pp. 79-85. EDN: OIPXXU.
7. Macgregor D., Tirupati V., Patterson R. Automatic calculation of relay settings for a blocking pilot scheme. 18th International Conference and Exhibition on Electricity Distribution. IEEE, 2005, vol. 3, pp. 1-5. doi: 10.1049/cp:20051173
8. Penthong T., Hongesombut K. An efficient method of automatic distance relay settings for transmission line protection. International Conference of IEEE Region 10 (TENCON), IEEE, 2013. Pp. 1-4. doi: 10.1109/TENCON.2013.6718905
9. Voloshin E.A., Sazanov V.S., Degtyarev D.A., Danilov S.A., Voloshin A.A., Lebedev A.A., Kovalenko A.I. *Avtomatizirovannaya sistema rascheta parametrov sbratnyvaniya RZA v mikroenergosisteme* [Automated system for calculating the parameters of operation of relay protection and automation devices in a micropower system]. Computer program RF, no. 2021668958, 2021.
10. Sazykin V.G., Bagmetov A.A. *Cifrovoy dvoynik "prototip-jekzempljar" raspredelitel'noj jelektricheskoy seti napryazheniem 6-10-35 kV* [Digital twin "prototype-instance" of the electrical distribution network with a voltage of 6-10-35 kV]. Patent RF, no. 2021619486, 2021
11. Shurupov A.A., Rybalkin A.D. *Vybor ustavok tokovykh zashhit silovogo transformatora* [Selection of settings for current protection of a power transformer]. Computer program RF, no. 2018617233, 2018.
12. *Programma avtomatizirovannogo rascheta ustavok relej-noj zashhity i avtomatiki+ («PARUS RZA +»)* [The program for the automated calculation of settings for relay protection and automation + ("PARUS RZA +")]. Computer program RF, no. 2013612412, 2013.
13. Solov'jov A.L., Ivanov I.V., Sel'kov E.A. *Standart organizacii STO DIVG-059-2017. Relejnaja zashhita raspredelitel'nyh setej 6-10 kV: Raschjot ustavok, Metodicheskie ukazaniya* [Organizational standard STO DIVG-059-2017. Relay protection of distribution networks 6-10 kV: Calculation of settings, Guidelines]. Saint Petersburg, OOO STC Mekhanotronika Publ., 2017. 74 p.
14. Barabanov Ju.A. *Vybor ustavok sbratnyvaniya mikroprocessornyh terminalov relejnoj zashhity i avtomatiki serii «Sirius» dlja raspredelitel'nyh setej 6-35 kV* [Selection of operation settings for microprocessor terminals of relay protection and automation of the Sirius series for distribution networks 6-35 kV]. Moscow, CJSC RADIUS Avtomatika, 2013. 87 p.
15. *Rekomendatsiya k raschetu i vyboru ustavok RZA ustroystv serii EKRA 217 proizvodstva OOO NPP «EKRA» ob'ektov stantsiy napryazheniem 6-35 kV* [15. Recommendation for the calculation and selection of relay protection and automa-

- tion settings for devices of the EKRA 217 series manufactured by NPP EKRA LLC for objects of stations with a voltage of 6-35 kV]. Cheboksary, OOO NPP EKRA Publ. 68 p. Available at: <https://ekra.ru/product/rza-og/t-rza/ekra-217/> (accessed 02 May 2023)
16. Solov'ev A.L. *Metodicheskie ukazaniya po vyboru kharakteristik i ustavok zashchity elektrooborudovaniya s ispol'zovaniem mikroprotsessornykh terminalov serii Sepam proizvodstva Schneider Electric* [Guidelines for the selection of characteristics and settings for the protection of electrical equipment using microprocessor terminals of the Sepam series manufactured by Schneider Electric]. Saint Petersburg, JSC "Schneider Electric" Publ., 2006. 74 p.
17. Igumenshchev V.A., Oleynikov V.K., Patshin N.T., Panova E.A. *Releynaya zashchita i avtomatika ponizitel'nykh podstantsiy promyshlennogo predpriyatiya* [Relay protection and automation of step-down substations of an industrial enterprise]. Magnitogorsk, NMSTU Publ., 2014. 108 p.
- Панова Е.А., Хисматуллин А.И., Андреев С.М. Разработка системы комплексного автоматизированного расчета уставок релейной защиты линии напряжением 6(10) кВ // Электротехнические системы и комплексы. 2023. № 2(59). С. 33-42. [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2023-2\(59\)-33-42](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2023-2(59)-33-42)
- Panova E.A., Khismatullin A.I., Andreev S.M. Development of a System for Integrated Automated Calculation of Relay Protection Settings for a Line with a Voltage of 6(10) kV. *Elektrotekhnicheskie sistemy i komplekсы* [Electrotechnical Systems and Complexes], 2023, no. 2(59), pp. 33-42. (In Russian). [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2023-2\(59\)-33-42](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2023-2(59)-33-42)

ТЕОРИЯ И ПРАКТИКА АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА

УДК 621.34: 62-50

[https://doi.org/10.18503/2311-8318-2023-2\(59\)-43-48](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2023-2(59)-43-48)

Омельченко Е.Я., Лымарь А.Б., Гибадуллин А.И., Мальцев А.П.

Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова

МНОГОМАССОВАЯ ТЕРМОДИНАМИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ

В статье рассмотрены вопросы разработки компьютерной 6-массовой термодинамической модели асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором. Компьютерные модели многомассовых термодинамических моделей являются составной частью статических и динамических математических моделей, интенсивно развивающегося актуального направления в автоматизированном электроприводе. Целью статьи является разработка математической и компьютерной 6-массовой термодинамической модели асинхронного двигателя, характеризующейся рациональным разбиением на тепловые массы и теплогенерацию и имеющей в структурной схеме минимум перекрестных связей. На основе предыдущих статей авторов и анализа статей других авторов предложена структурная схема модели, в которой научная новизна состоит в расчете коэффициентов теплопередачи на основе переменных теплогенерации и установившихся температур выделенных масс. Практическая ценность статьи состоит в приведенных формулах по расчету теплоемкостей, коэффициентов теплопередачи, постоянных времени выделенных масс. Некоторые коэффициенты теплопередачи дополнительно зависят от скорости вращения двигателя в зависимости от типа системы вентиляции. Теоретические исследования выполнены с привлечением методов термодинамики и теории автоматического регулирования. При расчете тепловых процессов использовался на основе векторно-матричного дифференциального уравнения программный пакет проектирования инженерных приложений Matlab Simulink. Разработанная компьютерная программа в статье на примере асинхронного двигателя 4A90L4Y3 использована для анализа четырех различных тепловых процессов в режиме S1. Программа может быть использована в составе статических и динамических моделей автоматизированного электропривода переменного тока для расчета переходных процессов с использованием тахограмм и нагрузочных диаграмм с режимами работы S1, S2, S3 и S6, а также в составе моделей нагрузочных агрегатов для испытания двигателей после капитального ремонта.

Ключевые слова: термодинамическая математическая модель, теплогенерация, потери, асинхронный двигатель, тепловые параметры, компьютерная модель

ВВЕДЕНИЕ

Выбор электродвигателя является одним из ключевых моментов при проектировании промышленных установок. От правильного выбора двигателя зависит производительность, надежность и экономичность проектируемого агрегата. В большинстве случаев режимы работы отличаются от базовых стандартных S1, S2 или S3 и поэтому приходится повышать номинальную мощность двигателя, а это ведет к увеличению стоимости оборудования, недоиспользованию двигателя по мощности.

Для проверки двигателей по нагреву предпочтительнее пользоваться методами, основанными на построении и анализе температурных нагрузочных диаграмм [1]. При выборе двигателей должны внимательно учитываться особенности, накладываемые на процессы электрохимического преобразования энергии по условиям нагрева. Дополнительно необходимо учитывать характер внутренней теплогенерации в зависимости от системы электропривода [2]. При управлении асинхронным двигателем с короткозамкнутым ротором (АДК) от транзисторного преобразователя частоты на основе автономного инвертора напряжения (ПЧ-АД) потери в двигателе зависят от механической нагрузки (потери в меди) и скорости вращения (частота питания), поэтому достоверная термодинамическая модель в составе статической или динамической модели электропривода, учитывающая эти особенности, является неотъемлемой частью современного программного комплекта проектировщика.

АНАЛИЗ ЛИТЕРАТУРНЫХ ИСТОЧНИКОВ ПО ТЕПЛОВЫМ МОДЕЛЯМ АД

Тепловые модели могут быть одномассовыми и многомассовыми. Одномассовые модели не соответствуют современным требованиям. Многомассовые модели позволяют достаточно точно провести расчет температуры выделенного элемента, причем точность расчета повышается при увеличении количества рассматриваемых масс [3]. Однако при этом увеличивается и сложность расчета. Известны 2-, 3-, 4-, 5-, 19- и 24-массовые тепловые модели АДК [4-10], при этом основным направлением развития является уменьшение количества масс, при одновременном сохранении точности расчета температуры. В источниках [8, 11] отмечалось, что количество рассматриваемых элементов АДК, равное 6 или 7, позволяет с высокой точностью рассчитать температуру компонентов двигателя. Комплексная конечно-элементная модель [12, 13], рассматривающая одновременно электромагнитные, электрохимические и тепловые процессы в поперечном сечении АД, вызывает сомнения в достоверности получаемого массива результатов, так как изначально требуется скрупулезная подготовка массива исходных параметров по этому сечению, что не всегда возможно.

Основная идея

Выбор количества тепловых масс в тепловой модели должен основываться на типовой конструкции АДК, наличии исходных конструктивных данных, несложной методикой расчета исходных параметров с возможностью достоверных измерений и экспериментальной проверки полученных результатов. Трехфазные асинхронные двигатели с фазным или короткоза-

мкнутым ротором имеют явно выраженную радиальную структуру, в которой свойства материалов мало отличаются по длине, но существенно дифференцируются по радиусу двигателя. В статье предлагается 6-массовая термодинамическая радиальная модель с выделением основных масс, отличающихся друг от друга конструкцией, материалами, теплоемкостью, характером теплогенерации и теплопереноса в функции от нагрузки и относительной частоты f . Расчет параметров модели основывается на конструктивных данных двигателя (высота и количество зубцов, толщина и диаметр магнитопровода и т.д.) [14], на экспериментальных измерениях и экспертных оценках установленной температуры.

РАЗРАБОТКА ТЕПЛОВОЙ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ

Допущения, принимаемые при разработке математической модели АД:

1. Тепловые массы представляются концентрическими кольцами, вложенными друг в друга и имеющими разную массу, удельную теплоемкость и температуру.

2. Теплообмен между телами происходит в результате контактной теплопроводности и конвекции воздуха, обусловленными градиентом температур в первой степени. Теплообмен излучением не учитывается.

3. Коэффициенты теплопередачи от теплопроводности и конвекции линейно зависят от скорости движения охлаждающего воздуха и скорости вращения ротора.

4. Температура каждой тепловой массы неизменна по сечению и изменяется в функции внутренней теплогенерации, теплопроводности и температуры соседних масс.

В соответствии с этим тепловое состояние АД описывается векторно-матричным уравнением теплопроводности:

$$\frac{d\tau}{dt} = \frac{\Delta P}{C} = A\tau, \quad (1)$$

где τ – вектор превышения температур над окружающей средой, °C; ΔP – вектор теплогенерации (потери в АД), Вт; C – диагональная матрица теплоемкостей, Дж/°C; A – диагональная матрица тепловых проводимостей, Дж/с/°C.

Принятая в статье разбивка элементов двигателя по тепловым массам минимизирует перекрестные связи, матрицы теплоемкости и теплопроводности становятся диагональными, упрощаются тепловые расчеты. В табл. 1 сведены исходные формулы для расчета тепловой модели: разбивка элементов двигателя по тепловым массам; теплогенерация; теплоемкость; теплоотдача; теплопередача; установившиеся температуры; коэффициенты передачи и постоянные времени нагрева. В табл. 1 введены следующие коэффициенты:

$P_{1н}$ – номинальная электромагнитная мощность, Вт;
 $P_{2н}$ – номинальная механическая мощность, Вт;
 c_{Al} , c_c , c_M – удельная теплоемкость алюминия, стали и меди соответственно;
 f – относительная частота питающего напряжения АД;
 s – скольжение ротора.

ФУНКЦИОНАЛЬНАЯ СХЕМА МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ

Для достоверного описания процессов разработана функциональная схема математической модели (рис. 1), показывающая разбивку элементов двигателя по тепловым массам и взаимодействие между собой тепловых потоков выделенных масс.

Расчет 6-массовой термодинамической модели начинается с расчета теплоемкостей и переменных теплогенерации для номинального длительного режима работы S1. Далее по экспериментальным данным и на основании экспертной оценки определяются установившиеся температуры тепловых масс. Самой нагретой является четвертая тепловая масса – обмотка ротора, потому что у нее большая теплогенерация и плохие условия охлаждения.

Таблица 1

Исходные формулы для расчета тепловой модели

Наименование	1	2	3	4	5	6
Состав	Корпус, кожух, вентилятор	Магнитопровод статора без зубцов	Зубцы статора, обмотка, изоляция	Зубцы ротора, обмотка, изоляция	Магнитопровод ротора без зубцов	Вал, подшипник, шпиль
Потери, Вт	dP_d	dP_{cc} [15]	dP_{mc}	dP_{mr}	dP_{cr}	dP_{tex}
Расчет	$0,005P_{2н}f$	$0,02P_{1н}f$	$3f_1^2R_1$	$3f_2^2R_2$	sdP_{cc}	$dP_{сумм} - dP_{1,5}$
Установившаяся температура, °C	50	75	100	130	110	60
Теплоемкость C_i , Дж/°C	M_1c_a	$M_c c_c$	$M_{3c}c_c + M_{3m}c_m$	$M_{4c}c_c + M_{4a}c_a$	M_5c_c	M_6c_c
Теплопередача A_{ij} , Дж/с/°C	$\frac{dP_{сумм}}{Q_1 - 1,1Q_0 + 0,1Q_0}$	$\frac{A_{10}(Q_1 - Q_0) - dP_d}{Q_2 - Q_1}$	$\frac{A_{21}(Q_2 - Q_1) - dP_{cc}}{Q_3 - Q_2}$	$\frac{A_{32}(Q_3 - Q_2) - dP_{mc}}{Q_4 - Q_3}$	$\frac{dP_{mr} - A_{43}(Q_4 - Q_3)}{Q_5 - Q_4}$	$\frac{A_{54}(Q_5 - Q_4) + dP_{cr}}{Q_6 - Q_5}$
Коэффициент K_i , с/°C/Дж	$\frac{1}{A_{10} + A_{21} + A_{00}}$	$\frac{1}{A_{21} + A_{32}}$	$\frac{1}{A_{32} + A_{34}}$	$\frac{1}{A_{34} + A_{54}}$	$\frac{1}{A_{54} + A_{65}}$	$\frac{1}{A_{65} + A_{60}}$
Постоянная времени T_i , с	K_1C_1	K_2C_2	K_3C_3	K_4C_4	K_5C_5	K_6C_6

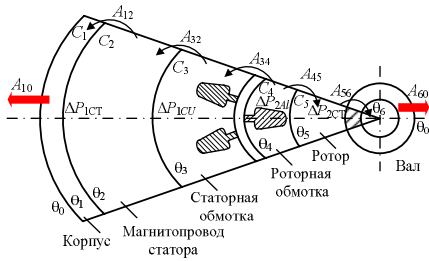


Рис. 1. Функциональная схема математической модели АДК

По величинам теплогенерации и температурам тепловых масс определяются коэффициенты теплопередачи (см. табл. 1), по которым рассчитываются численные значения коэффициентов теплогенерации и теплопередачи для номинального режима работы электродвигателя 4A90L4Y3 2,2 кВт 1500 об/мин (табл. 2).

Коэффициент A_{60} принят на порядок меньше коэффициента A_{10} . Величины коэффициентов A_{10} , A_{34} и A_{60} зависят от скорости вращения двигателя, поэтому их значения при нулевой скорости и самовентиляции уменьшены в 3 раза. Температура окружающей среды $\Theta_0 = 20^\circ\text{C}$.

Моделирование тепловых переходных процессов выполнялось с использованием программного пакета проектирования инженерных приложений Matlab Simulink [16]. Структурная схема 6-массовой термодинамической модели АДК разработана в соответствии с векторно-матричным уравнением (1) и включает в себя интеграторы с коэффициентами теплоёмкости C_i , блоки с коэффициентами теплопередачи A_{ij} , блоки теплогенерации ΔP_i , блоки управления скоростными режимами и осциллограф для контроля переходных процессов (рис. 2). Для интеграторов учитывается начальная температура выделенных масс Θ_0 .

Таблица 2

Численные значения коэффициентов модели

Наименование величин	Номер массы					
	1	2	3	4	5	6
Теплоёмкость C_i	4576,852	3775,667	2330,802	1595,866	783,356	275,209
Теплогенерация ΔP_i , Вт	11	86,738	415,023	149,44	8,67	28,782
Теплогенерация при остановке, Вт	0	0	415	149,5	0	28,8
Коэффициенты теплопередачи:	A_{10}	A_{21}	A_{32}	A_{43}	A_{54}	A_{65}
– Номинальные	20,356	23,987	25,6	9,79	2,576	1,755
– При остановке и самовентиляции	6,785	23,987	25,6	3,26	2,576	1,755
– При остановке и независимой вентиляции	20,356	23,987	25,6	3,26	2,576	1,755

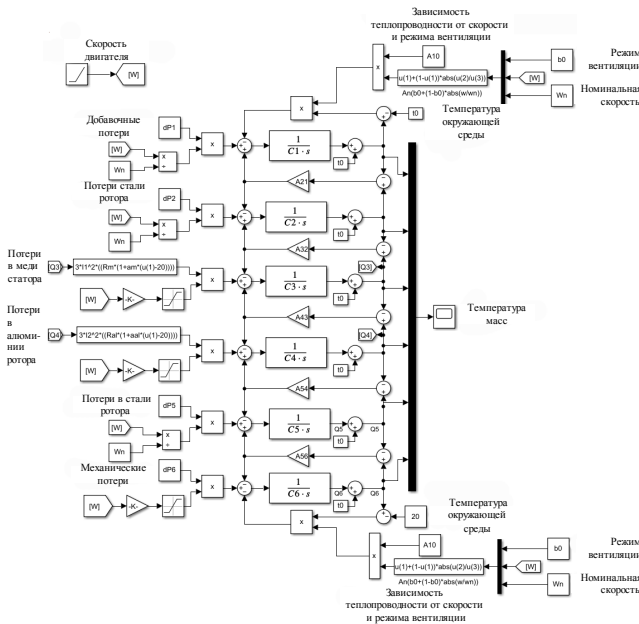


Рис. 2. Структурная схема компьютерной модели

ИССЛЕДОВАНИЯ РАБОТЫ ПРОГРАММЫ

Для каждого режима работы задавались величины теплогенерации, исходя из условия, что в системе ПЧ-АД добавочные потери и потери в стали зависят пропорционально от частоты f , а степень вентиляции для двигателя с самовентиляцией при нулевой скорости снижается с 1 до 0,33. Учтено, что активные сопротивления статорных и роторных обмоток зависят от соответствующих температур [17]. Исследование работы термодинамической модели проводилось для 4-х типовых режимов работы (рис. 3-5).

В табл. 3 сведены результаты исследований по установившимся температурам 6-массовой термодинамической модели двигателя 4A90L4Y3.

Первый и второй режимы идентичны, потому что коэффициенты теплопередачи приняты одинаковыми при номинальной скорости для самовентиляции и принудительной вентиляции. В третьем режиме несколько уменьшаются суммарные потери за счет сокращения добавочных потерь и потерь в стали. Температуры масс несколько уменьшаются. В четвертом режиме за счет самовентиляции существенно уменьшается коэффициент A_{10} , увеличиваются тепловые потери в обмотках, что приводит к существенному увеличению температур выделенных масс.

Контроль температур реального АД можно выполнять с помощью датчиков температуры [18], установленных на корпусе, магнитопроводе статора или на статорной обмотке. Разработанная тепловая модель АД применима для расчета температур выделенных тепловых масс $\Theta_1, \Theta_2, \Theta_3$, которые можно использовать для тепловой защиты АД или в замкнутых системах регулирования АЭП для контроля температуры двигателя.

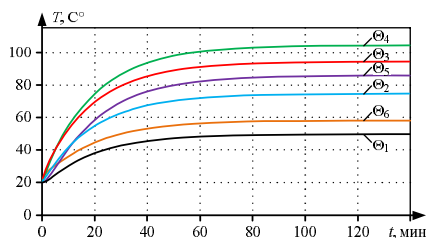


Рис. 3. Номинальный длительный режим с принудительной вентиляцией (Режим 1) и самовентиляцией (Режим 2)

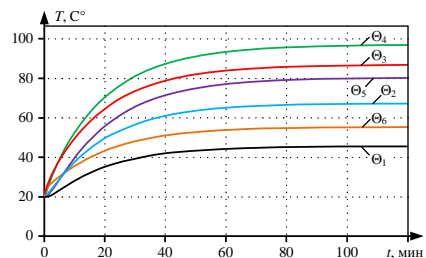


Рис. 4. Длительный режим с принудительной вентиляцией, номинальной нагрузкой и скоростью двигателя 0,25Wн (Режим 3)

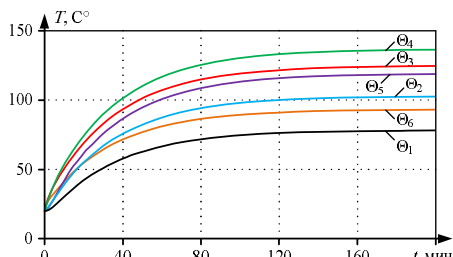


Рис. 5. Длительный режим с самовентиляцией, номинальной нагрузкой и скоростью двигателя 0,25Wн (Режим 4)

Таблица 3
Установившиеся температуры исследуемых режимов

Режим	Тип вентиляции	W/Wн	β0	Θ ₁	Θ ₂	Θ ₃	Θ ₄	Θ ₅	Θ ₆
1	Принудительная	1,0	1,0	50	75	94,4	104	86	58
2	Самовентиляция	1,0	0,33	50	75	94,4	104	86	58
3	Принудительная	0,25	1,0	46	68	87	97	80,3	55,5
4	Самовентиляция	0,25	0,33	78,22	102,7	124,8	136,5	119	93,2

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Разработанная 6-массовая термодинамическая компьютерная модель предназначена для исследования тепловых режимов асинхронных двигателей с фазным или с короткозамкнутым ротором.

2. Расчет исходных параметров модели выполняется по приведенным формулам на основании номинальных и конструктивных данных двигателя.

3. Компьютерная модель легко интегрируется в статические или динамические модели автоматизированного электропривода по системе ПЧ-АД.

4. Алгоритм работы модели учитывает разбивку асинхронного двигателя на 6 тепловых масс с изменением температурных режимов в функции питающего напряжения и частоты, скорости вращения и активного сопротивления обмоток, изменения теплогенерации и коэффициентов теплопередачи.

5. Разработанная тепловая модель АД применима для расчета температур тепловых масс, которые можно использовать для тепловой защиты АД или в замкнутых системах регулирования АЭП для контроля температуры двигателя.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Электромеханические и тепловые режимы асинхронных двигателей в системах частотного управления: учеб. пособие / Шрейнер Р.Т., Костылев А.В., Кривовяз В.К., Шилин С.И. Екатеринбург: ГОУ ВПО «Рос. гос. проф.-пед. ун-т», 2008. 361 с.
2. Зюзов А.М., Метельков В.П. Термодинамическая модель асинхронного двигателя электроприводов с интенсивными процессами тепловыделения // Известия ТулГУ. Технические науки. В 5 ч. Вып. 3. Тула: Изд-во ТулГУ, 2010. №1. С. 138-145.
3. Зюзов А.М., Метельков В.П. Использование термодинамических моделей для проверки асинхронного двигателя по нагреванию // Труды Междунар. пятнадцатой науч.-техн. конф. «Электроприводы переменного тока». Екатеринбург: Изд-во УМЦ УПИ, 2011. С. 183-186.

4. Ключев В.И. Теория электропривода: учебник для вузов. М.: Энергоатомиздат, 1985. 560 с.
5. Ильинский Н.Ф. Основы электропривода. М.: Изд-во МЭИ, 2007. 251 с.
6. Gao Z. Sensorless stator winding temperature estimation for induction machines. Georgia Institute of Technology, 2006.
7. Анучин А.С. Двухмассовая тепловая модель для энергоэффективного выбора асинхронного двигателя // Труды VII Международной (XVIII Всероссийской) конференции по автоматизированному электроприводу (АЭП). Иваново: ИГЭУ, 2012. С. 179-183.
8. Борисенко А.И., Костиков О.Н., Яковлев А.И. Охлаждение промышленных электрических машин: учебник для вузов. М.: Энергоатомиздат, 1983. 293 с.
9. Омельченко Е.Я., Агапитов Е.Б., Моисеев В.О. Термодинамическая модель асинхронного двигателя // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2012. №1(37). С. 67-70.
10. Свидетельство о гос. регистрации программы для ЭВМ № 2013661741. 7-массовая математическая термодинамическая модель асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором / Омельченко Е.Я., Моисеев В.О., Тележкин О.А., Бондаренко В.А.; заявитель Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова; заявл. 16.12.2013, опубл. 20.01.2014.
11. Сипайлов Г.А., Саников Д.И., Жадан В.А. Тепловые, гидравлические и аэродинамические расчеты в электрических машинах: учеб. для вузов. М.: Вышш. шк., 1989. 239 с.
12. Петушков М.Ю. Тепловая модель асинхронного двигателя // Известия вузов. Северокавказский регион. Технические науки. 2011. №4. С. 48-50.
13. Staton D., Cavagnino A. Convection heat transfer and flow calculation suitable for nalytical modeling of electrical machines IECON. URL: http://www.motor-dsign.com/cmsAdmin/uploads/iecon_2006_conv_and_flow.pdf (дата обращения 15.01.2023)
14. Асинхронные двигатели серии 4А: справочник / Кравчик А.Э., Шлаф М.М., Афонин В.И., Соболенская Е.А. М.: Энергоиздат, 1982. 504 с.
15. Сарваров А.С., Омельченко Е.Я. Методика расчета потерь в стали при анализе электромагнитных процессов в асинхронных машинах // Известия вузов. Проблемы энергетики, 2011. № 1-2. С. 101-108.
16. Черных И.В. SIMULINK: среда создания инженерных приложений / под общ. ред. Потемкина В.Г. М.: Диалог-МИФИ, 2004. 496 с.
17. Браславский И.Я., Ишматов З.Ш., Поляков В.Н. Энергосберегающий асинхронный электропривод: учеб. пособие. М.: Изд. центр «Академия», 2004. 256 с.
18. Математические модели нагрева и охлаждения асинхронных двигателей для микропроцессорного реле тепловой защиты / Г.А. Бугаев, А.Н. Леонтьев, Е.Ю. Ерохин, Д.В. Павлова // Известия вузов. Электромеханика. 2001. №2. С. 51-54.

Поступила в редакцию 01 марта 2023 г.

Принята к печати 24 апреля 2023 г.

INFORMATION IN ENGLISH

MULTI-MASS THERMODYNAMIC MODEL OF INDUCTION MOTOR

Evgeniy Ya. Omelchenko

D.Sc. (Engineering), Professor, Department of Automated Electric Drive and Mechatronics, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia, Momentum2@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-0547-485X>

Alexey B. Lymar

Assistant Professor, Department of Automated Electric Drive and Mechatronics, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia, lymar.alexei@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-2783-3662>

Arslan I. Gibadullin

Graduate Student, Department of Automated Electric Drive and Mechatronics, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia, gibadullin_arslan@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0005-1469-2612>

Aleksandr P. Maltsev

Graduate Student, Department of Automated Electric Drive and Mechatronics, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia, Sasha-malcev-1996@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0008-8687-3051>

The paper considers the development of computer 6-mass thermodynamic model of asynchronous motor with squirrel-cage rotor. Computer models of multi-mass thermodynamic models are an integral part of static and dynamic mathematical models, an intensively developing topical field in the automated electric drive. The aim of the paper is to develop a mathematical and computer-based 6-mass thermodynamic model of an induction motor characterized by rational partitioning into thermal masses and heat generation and having a minimum of cross-links in the structural scheme. On the basis of previous papers written by the authors and analysis of papers of other authors, the model structural scheme is offered in which scientific novelty consists in calculation of heat transfer coefficients on the basis of heat generation variables and steady-state temperatures of separated masses. The practical value of the article consists in formulas for calculation of heat capacity, heat transfer coefficients and time constants of isolated masses. Some heat transfer coefficients

additionally depend on the engine rotation speed depending on the type of the ventilation system. Theoretical research was carried out using the methods of thermodynamics and the theory of automatic control. The design software Matlab Simulink on the basis of the vector-matrix differential equation was used to calculate the thermal processes. The developed computer program in the article on the example of asynchronous motor 4A90S4Y3 was used to analyze the four different thermal processes in mode S1. The program can be used in the composition of static and dynamic models of an automated alternating current electric drive to calculate transients using tachograms and load diagrams with modes S1, S2, S3 and S6, as well as in the composition of models of load units for testing engines after overhaul.

Keywords: thermodynamic mathematical model, heat generation, losses, induction motor, thermal parameters, computer model

REFERENCES

- Shrejner R.T., Kostylev A.V., Krivoviyaz V.K., Shilin S.I. *Elektromekhanicheskie i teplovye rezhimy asinhronnykh dvigatelej v sistemah chastotnogo upravleniya* [Electromechanical and thermal modes of asynchronous motors in frequency control systems]. Ekaterinburg, GOU VPO «Ros. gos. prof.-ped. un-t» Publ., 2008. 361 p. (In Russian)
- Zyuzev A.M., Metelkov V.P. Thermodynamic model of an asynchronous motor of electric drives with intensive heat release processes. *Izvestiya TulGU. Dlya Tekh-nicheskie nauki*. [Izvestiya Tula State University], 2010, no. 3, pp. 138-145. (In Russian)
- Zyuzev A.M., Metelkov V.P. Using thermodynamic models to test an induction motor for heating. *Trudy Mezhdunar. py-atnadcatoj nauch.-tekh. konf. «Elektroprivody peremennogo toka»*. [Proceedings of the International fifteenth scientific and technical conference "AC electric drives"]. Ekaterinburg, UMC UPI Publ., 2011, pp. 183-186 (In Russian)
- Klyuchev V.I. *Teoriya elektroprivoda* [Electric Drive Theory] Moscow, Energoatomizdat Publ., 1985. 560 p. (In Russian)
- Ilyinskij N.F. *Osnovy elektroprivoda* [Electric drive fundamentals]. Moscow, MEI Publ., 2007. 251 p. (In Russian)
- Gao Z. Sensorless stator winding temperature estimation for induction machines. Georgia Institute of Technology, 2006.
- Anuchin A.S. Dual Mass Thermal Model for Energy Efficient Choice of Induction Motor. *Trudy VII Mezhdunarodnoj konferencii po avtomatizirovannomu elektroprivodu* [Proceedings of the VII International (VIII All-Russian) scientific and technical conference on safe electric drive]. Ivanovo, Ivanovo State Power Engineering University named after V.I. Lenin Publ., 2012, pp. 179-183. (In Russian)
- Borisenko A.I., Kostikov O.N., Yakovlev A.I. *Ohlazhdenie promyshlennykh elektricheskikh mashin* [Cooling of industrial electrical machines]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1983. 293 p. (In Russian)
- Omelchenko E.Ya., Agapitov E.B., Moiseev V.O. Thermodynamic model of an induction motor. *Vestnik MGTU* [Bulletin of Nosov Magnitogorsk State Technical University], 2012, no. 37, pp. 67-70. (In Russian)
- Omelchenko E.Ya., Moiseev V.O., Telezhkin O.A., Bondarenko V.A. *7-massovaya matematicheskaya termodinamicheskaya model asinhronnogo dvigatelya s korotkozamknutym rotorom* [7-mass mathematical thermodynamic model of an induction motor with a squirrel-cage rotor]. Computer program RF, no. 2013661741, 2013.
- Sipajlov G.A., Sannikov D.I., Zhadan V.A. *Teplovyje, gidravlicheskie i aerodinamicheskie raschety v elektricheskikh mashinah* [Thermal, hydraulic and aerodynamic calculations in electric machines]. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 1989. 239 p. (In Russian)
- Petushkov M.Yu. Thermal model of an induction motor *Izvestiya vuzov. Severokavkazskij region. Tekhnicheskienauki* [Scientific journal Bulletin of Higher Educational Institutions of North Caucasus region], 2011, no. 4, pp. 48-50. (In Russian)
- Staton D., Cavagnino A. Convection heat transfer and flow calculation suitable for nalytical modeling of electrical machines Available at: http://www.motor-design.com/cmsAdmin/uploads/iecon_2006_conv_and_flow.pdf (accessed 15 January 2023)
- Kravchik A.E., Shlaf M.M., Afonin V.I., Sobolenskaya E.A. *Asinhronnye dvigateli serii 4A* [4A Series Induction Motors]. Moscow, Energoizdat Publ., 1982. 504 p. (In Russian)
- Sarvarov A.S., Omelchenko E.Ya. Method for calculating losses in steel in the analysis of electromagnetic processes in asynchronous machines. *Izvestiya vuzov. Problemy energetiki* [Power engineering: research, equipment, technology], 2011, no. 1, 2, pp. 101-108. (In Russian)
- Chernyh I.V. *SIMULINK: sreda sozdaniya inzhenernykh prilozhenij* [SIMULINK environment for creating engineering applications]. Moscow, DIA-LOG-MIFI Publ., 2004. 496 p. (In Russian)
- Braslavskij I.Ya., Ishmatov Z.Sh., Polyakov V.N. *Energosberegayushchij asinhronnyj elektroprivod* [Energy-saving asynchronous electric drive]. Akademiya Publ., 2004. 256 p. (In Russian)
- Bugaev G.A., Leontyev A.N., Yerohin E. Yu., Pavlova D.V. Mathematical models of heating and cooling of asynchronous motors for microprocessor protection relays. *Elektromekhanika* [Bulletin of Higher Educational Institutions. Electromechanics], 2001, no. 2, pp. 51-54. (In Russian)

Многомассовая термодинамическая модель асинхронного двигателя / Е.Я. Омельченко, А.Б. Лымарь, А.И. Гибадуллин, А.П. Мальцев // Электротехнические системы и комплексы. 2023. № 2(59). С. 43-48. [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2023-2\(59\)-43-48](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2023-2(59)-43-48)

Omelchenko E.Ya., Lymar A.B., Gibadullin A.I., Maltsev A.P. Multi-Mass Thermodynamic Model of Induction Motor. *Elektrotekhnicheskie sistemy i komplekсы* [Electrotechnical Systems and Complexes], 2023, no. 2(59), pp. 43-48. (In Russian). [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2023-2\(59\)-43-48](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2023-2(59)-43-48)

ПЕРСПЕКТИВЫ РЕАЛИЗАЦИИ ЭЛЕКТРОДВИЖЕНИЯ В МАЛОМЕРНОМ СУДОСТРОЕНИИ

Целью работы является определение перспектив реализации электродвижения на маломерных судах. Использование электрической энергии при движении на воде является одним из направлений решения проблемы декарбонизации, необходимости снижения загрязнения водных акваторий и наносимого вреда экосистемам водоемов и прилегающих территорий. Рассмотрены основные факторы, влияющие на выбор электрической энергетической установки для маломерных судов, а также параметры, обуславливающие энергоэффективность судна на электродвижении. Рассмотрены существующие ограничения, определяющие целесообразность использования электродвижения на воде. В работе предложено поверхностное моделирование корпуса маломерного судна на электродвижении с учетом потребностей разрабатываемого судна, на основе которого сформирован эскизный проект маломерного судна и его характеристики. Выполнен параметрический анализ ходкости, расчет кривой сопротивления по длине корпуса, необходимый для дальнейшего проектирования движителя. Обеспечение энергоэффективности перспективного судна обеспечивается за счет использования нетрадиционных схемных решений гребных винтов, позволяющих улучшить качество рабочего процесса. Показана необходимость адаптации движителей судна к режимам работы, особенностям внешней скоростной характеристики электрической машины, отличающейся от традиционного ДВС. Это определяет качество согласования режимов работы системы «корпус–энергетическая установка–двигатель». Выполнен аналитический обзор и анализ рынка маломерных судов на электродвижении, на основе которого выявлены основные тенденции развития для выполнения дальнейших исследований, сформированы требования к перспективному движителю для реализации конкурентоспособного электродвижения на водных акваториях. Поставленные задачи по обеспечению энергоэффективности судна показывают необходимость применения комплексного подхода к моделированию режимов работы системы «корпус–энергетическая установка–двигатель».

Ключевые слова: электродвижение, водоизмещающий катер, электродвижение в судостроении, электропривод, гребные винты, перспективное судостроение, петлевидные гребные винты, корпус судна, электрификация, выбросы парниковых газов

ВВЕДЕНИЕ

Согласно принятому Киотскому протоколу, промышленно-развитые страны должны обеспечить сокращение выбросов парниковых газов в окружающую среду [1]. Можно отметить, что на долю мирового судостроения приходится порядка 2-3% от всех выбросов парниковых газов и данное значение может увеличиться на 90-130% к 2050 году, в связи с чем декарбонизация окружающей среды является актуальнейшей глобальной повесткой.

Согласно первоначальной стратегии Международной морской организации, снижение выбросов парниковых газов в окружающую среду должно сокращаться на 50% ежегодно с 2030 года и на 40% ежегодно до 2030 года [2]. Тем не менее за последние 10 лет реально удалось снизить выбросы всего лишь на 7% и возможным выходом из создавшейся ситуации видится переход на электродвижение и альтернативную энергетику.

Одной из главных движущих сил запуска электрических лодок в производство стало стремление снизить загрязнение водных акваторий и предотвратить причинение вреда экосистеме. Традиционные судовые двигатели внутреннего сгорания выбрасывают в атмосферу и водную среду отработанные газы, в составе которых присутствуют вредные вещества, такие как монооксид углерода, углеводороды, твердые частицы и оксиды азота.

В случае продолжения использования ископаемых видов топлива суда должны стать на 90% эффективнее для обеспечения соответствия экологическим нормам. Решением проблемы декарбонизации мирового научное сообщество видит в двух направлениях: эффективное использование электрической энергии и использование водорода. Особую роль в снижении выбросов углеводородов занимает минимизация воздействия на окружающую среду энергопреобразующих систем (автомобилей, летательных аппаратов, водного транспорта, наземных энергетических установок и станций). Таким образом, возможным решением может стать переход на аккумуляторные батареи, топливные элементы, водород, аммиак, силу ветра, природный газ, метанол и другие альтернативные источники энергии уже к 2035 году.

В 2021 году доля рынка судов на электродвижении составила всего 2%, причем из этих 2% полностью электрические – 20%, то есть от общего рынка это составляет 0,4% [3].

Анализ рынка электромоторных катеров и яхт показывает, что производственные компании расположены в 18 странах: Словении, Германии, Франции, Швейцарии, Швеции, Италии, Бельгии, США, Канаде, России, Португалии, Австрии, Польше, Великобритании, Дании, Испании, Финляндии и Нидерландах.

Самым быстрорастущим рынком здесь является рынок США. Объем продаж составляет пока порядка 15 000 шт./год, ожидается, что к 2030 году объем продаж может достигнуть порядка 70 000 шт./год. Фактически ключевым сдерживающим фактором интенсивного роста данной доли рынка является малая авто-

номность, при кратном увеличении со 100 до 1000 км ежегодный прирост рынка может составить 14-15% в год.

Существенным фактором, сдерживающим распространение судов на электродвижении, является автономность хода, составляющая значительную разницу с судами на традиционных тепловых двигателях [4]. К сдерживающим факторам также можно отнести отсутствие либо неразвитость инфраструктуры по зарядке подобных судов.

Основное влияние на автономность, на запас хода оказывают следующие факторы: емкость батарей, энерговооруженность судна, тип корпуса, скорость движения, режим движения, а также эффективность применяемых двигателей.

Увеличение емкости батарей позволяет увеличить автономность судна, однако при этом необходимо учитывать, что увеличение емкости батарей приводит к существенному росту массы комплекса для реализации электродвижения, что, в свою очередь, увеличивает осадку корпуса судна, как следствие, к повышенному сопротивлению корпуса судна при его движении, что в итоге приводит к нецелесообразности эксплуатации судна в глиссирующем режиме. Результаты приведенного обзора показывают, что автономность хода маломерных судов на электродвижении варьируется в диапазоне от 10 до 200 морских миль (от 20 до 370 км) в зависимости от скорости и режима движения [5]. Очевидно, что по этому показателю реализация электродвижения существенно проигрывает традиционным энергетическим установкам и для повышения привлекательности потребительских характеристик судов с электродвижением необходимо проводить дополнительные исследования, направленные на повышение удельной емкости аккумуляторных батарей и совершенствование рабочих процессов судовых систем для повышения энергоэффективности и автономности перспективных образцов подобной техники.

Энерговооруженность судна определяется мощностью энергетических установок (ЭУ), обеспечивающих привод двигателей судна (винты, импеллеры и т.п.) Необходимо отметить, что мощность ЭУ должна обеспечивать работу двигателей в зоне оптимальных значений их КПД на тех режимах движения судна, которые характеризуются минимальными потерями сопротивления движению судна и приемлемыми ходовыми характеристиками. Важным моментом является корректное соотношение мощности ЭУ и емкости аккумуляторных батарей, что непосредственным образом влияет на автономность хода судна.

Следующим важным фактором, определяющим в целом конкурентоспособность, привлекательность и востребованность судна, является тип корпуса, поскольку именно корпус создает сопротивление движению и от него зависят ходовые характеристики судна. Тип корпуса судна определяет уровень сопротивления при движении судна в водоизмещающем и глиссирующем режиме движения, остойчивость, маневренность, скорость и иные ходовые характеристики судна.

Тип корпуса судна зависит от области применения (морское, речное). Это определяет рациональные соотношения длины и ширины корпуса, во многом определяет компоновку и размещение всех судовых систем, организацию работы приводов двигателей, применимость различных конструкционных материалов для облегчения веса и сохранения живучести конструкции в условиях реальной многолетней эксплуатации.

Скорость движения судна определяется согласованием работы ЭУ, двигателей с учетом специфики обводов корпуса, веса, загруженности, дифферента судна, режимом его движения. Повышение скорости судна, как правило, обеспечивается более энергозатратными режимами работы двигателей, что позволяет реализовать глиссирующие режимы движения, снижая площадь смачиваемой поверхности корпуса и сопротивление движению, однако это существенно снижает автономность хода. Обзор серийно выпускаемых, опытно-экспериментальных и перспективных электролодок показывает, что диапазон максимальных скоростей движения варьируется в пределах от 5,5 до 50 узлов (от 10 до 93 км/ч), при этом на крейсерских режимах движения скорость электролодок не превышает 40 узлов (74,4 км/ч) даже для спортивных моделей [6].

Режим движения судна зависит от многих факторов и может определяться не только типом корпуса, спроектированного под конкретные условия эксплуатации, но и его загрузки, энергообеспеченности, согласованности работы ЭУ, двигателей с учетом кривой сопротивления корпуса на различных режимах движения судна в условиях реальной эксплуатации и т. п. Глиссирующий режим позволяет снизить площадь смоченной поверхности, как следствие – снизить сопротивление движению корпуса, однако является наиболее энергозатратным. Водоизмещающий режим характерен сравнительно низкими скоростями вследствие большой площади смоченной поверхности судна и более значительной, чем в предыдущем случае, осадкой, что тоже существенно влияет на сопротивление движению корпуса судна.

Обзор существующих схемно-компоновочных решений судов на электродвижении показывает, что наибольшее распространение находят суда, спроектированные под водоизмещающий режим движения (рис. 1).

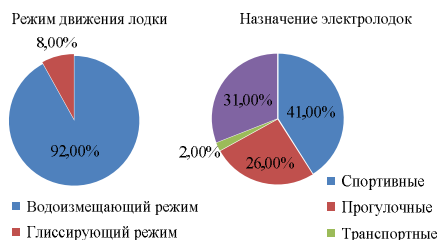


Рис. 1. Распределение маломерных судов

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Эффективность применяемых движителей определяется типом и количеством движителей, обеспечением режима их работы в области высоких значений КПД, согласованностью режимов работы движителя и мощности ЭУ, то есть обеспечение потребной мощности привода движителей от ЭУ на разных режимах работы. Несогласованность режимов работы движителей и ЭУ негативно сказывается на энергоэффективности судна в целом, кроме того, она может приводить к перегрузке и, как следствие, к перегреву и выходу из строя ЭУ, либо к неэффективной работе самого движителя, что может к тому же сопровождаться возникновением кавитационных явлений, приводящих к практически двукратному снижению тяги и к эрозии конструкционных материалов движителей. Приведенные в обзоре материалы показывают, что наибольшее распространение в качестве движителей находят гребные винты [7]. При этом надо отметить, что гребные винты, применяемые в судах с электродвижением, изначально, как правило, проектировались под работу с ДВС, которые имеют существенные отличия от электрических машин по характеру внешних скоростных характеристик (рис. 2). Для электродвигателей характерно резкое возрастание эффективной мощности до номинального значения. Изложенные факты предопределяют необходимость коррекции геометрии движителей при работе от электрических машин для обеспечения совершенства качества рабочего процесса движителя и, как следствие, реализации их максимальной энергоэффективности.

Обеспечение конкурентоспособности судна на российском и мировом рынках определяется гидродинамическим совершенством пропульсивного комплекса, что предполагает комплексное моделирование и исследование движителя, энергетической установки и корпуса судна.

Аналитический обзор форм корпусов серийно выпускаемых и опытно-экспериментальных электросудов [8] позволил сформировать перечень ключевых характеристик перспективного судна на электродвижении – судно монокорпусной конструкции, с одним приводным двигателем и одним движителем, в качестве движителя рассматривается гребной винт на поворотной рулевой колонке.

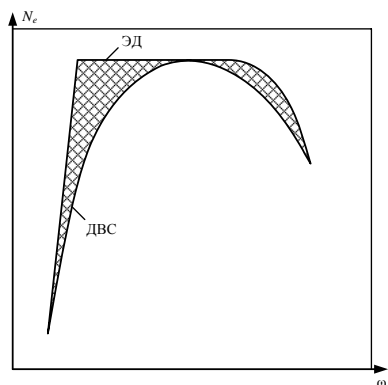


Рис. 2. Внешняя нагрузочная характеристика

Необходимо также учитывать следующие потребности разрабатываемого судна:

- сохранение заряда аккумуляторных батарей в течение длительного времени (для обеспечения увеличения общей дальности хода);
- остойчивость;
- безопасность движения в любых условиях;
- маневренность и курсовая устойчивость.

Учитывая вышеизложенное, одним из вариантов корпуса электрокатера рассматривается водоизмещающая монокорпусная конструкция с широким неглубоким V-образным днищем, наклонным носом и обыкновенной с подзором кормой.

Монокорпусная конструкция определяет целесообразность установки одного электродвигателя и связанного с ним движителя, что позволит сохранить маневренность, скорость лавирования и приемлемую экономичность. Широкое неглубокое днище обладает значительной грузоподъемностью и достаточной остойчивостью, наклонный форштевень увеличивает полезную площадь палубы и позволяет предусмотреть подходы к необорудованному берегу.

Таким образом, выбранный корпус рассчитан на небыстрое передвижение по тихой и маловзволнованной водной поверхности городских каналов, небыстрых рек и озер, при этом сохраняется остойчивость и компенсируется качка неглубоким килем при движении в водоизмещающем режиме.

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Указанные особенности судна на электродвижении моделируются в пакете FreeShip [9], предназначенном для параметрического анализа ходкости, пропульсивных качеств судна, позволяющем спроектировать обводы корпуса, выполнить расчеты гидростатики, остойчивости и других параметров гидродинамики судна. Кроме того, пакет позволяет создать сеточную модель корпуса, которую в дальнейшем можно использовать для проведения численного моделирования в других пакетах.

Общие характеристики эскизного проекта судна (рис. 3) представлены таблице.

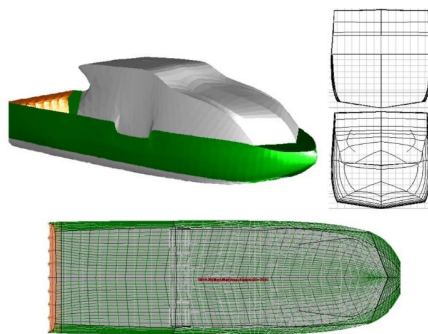


Рис. 3. Общий вид эскизного проекта судна

Общие характеристики проекта

Параметр	Значение
Длина между перпендикулярами, м	13
Длина максимальная, м	13,48
Ширина на миделе, м	4,3
Ширина максимальная, м	4,294
Проектная осадка, м	0,650
Абсцисса миделя, м	6,5

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Кривая сопротивления корпуса формируется по длине корпуса в соответствии с изменением площади водоизмещающей части. Распределение сопротивления по длине представлено на **рис. 4**.

Оптимальность геометрии корпуса во многом определяется кривой сопротивления, которая выстраивается по мере формирования обводов корпуса на боковой поверхности.

Резкий рост сопротивления в носовой части соответствует началу площади смоченной поверхности, дальнейший плавный рост соответствует относительному расширению площади смоченной поверхности по ватерлинии. Относительно горизонтальный участок кривой и плавные изменения сопротивления в кормовой оконечности говорят о высоком гидродинамическом качестве спроектированной геометрической формы подводной части корпуса.

Корпус выполнен в соответствии с требованиями Государственной инспекции маломерных судов Российской Федерации [10], габаритные размеры спроектированной модели составляют: длина – 13,5 м, ширина – 4,3 м. Каркасная модель позволяет сформировать представление о геометрической форме корпуса (см. **рис. 3**), с учетом остекления рубки и кормовых обводов.

При расчете гидростатических параметров судна учитываются поверхности выше и ниже конструктивной ватерлинии с учетом воздействия ветровой нагрузки и парусности проектируемого судна. Для корректного расчета учитываются все части подводных элементов корпуса судна, их площадь и расстояния обтекания: кронштейны гребного вала, обтекатели, выкружки, стабилизаторы, рули и т.д., их положение и расположение.

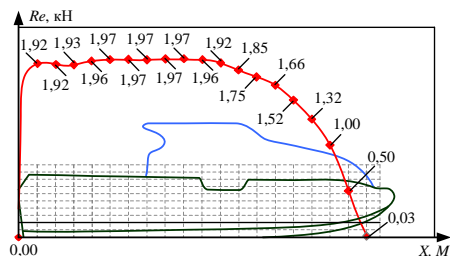


Рис. 4. Распределение кривой сопротивления по длине корпуса

Для полученной смоченной площади поверхности 53,687 м² водоизмещение составило 19,36 т, объемное водоизмещение 20,379 м³, площадь миделя 1,958 м². Поверочный коэффициент остойчивости (произведение водоизмещения на метацентрическую высоту) составил 7,043, что удовлетворяет требованиям к остойчивости маломерного судна.

Данные характеристики необходимы для дальнейшего согласования режимов работы пропульсивного комплекса судна, то есть исследования режимов работы системы «корпус–энергетическая установка–двигатель», для обеспечения максимально возможного гидродинамического совершенства судна в рассматриваемых условиях.

Исходя из условий работы, в качестве двигателя рассматривается гребной винт. По параметрам мощности двигателя, оборотов предполагается использование четырехлопастного винта с дисковым отношением 0,55. Стоит отметить, что для достижения поставленных целей целесообразно применение нетрадиционных схемных решений гребных винтов, в частности петлевидной схемы. Петлевидная форма лопасти способствует повышению эффективности гребного винта за счет исключения концевой вихря и улучшению качества рабочего процесса.

Использование петлевидного гребного винта требует проведения расчетных исследований с использованием численного моделирования в таких программных пакетах, как Ansys, для оптимизации формы лопасти под условия работы с учетом внешней скоростной характеристики электрической машины.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Выполненный обзор показывает перспективность развития направления судов на электродвижении, в частности для обеспечения сокращения выбросов парниковых газов, однако существует ряд ограничений, препятствующих широкому распространению электрических судов, связанных, например, с автономностью хода. Одним из факторов, влияющих на автономность хода является гидродинамическое совершенство обводов корпуса судна, требующих комплексного подхода к проектированию «корпус–энергетическая установка–двигатель».

Изложенные проблемы приводят к задачам адаптации двигателей к режимам работы электрических машин, необходимости разработки перспективных схемных решений, методик моделирования рабочих процессов двигателей, режимов работы системы «корпус–энергетическая установка–двигатель», что позволит обеспечить энергоэффективность судна и его конкурентоспособность на внутреннем и внешнем рынках.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Киотский протокол к Рамочной конвенции Организации Объединенных Наций об изменении климата. Принят 11 декабря 1997 года. URL: https://www.un.org/ru/documents/decl_conv/conventions/kyoto.shtml (дата обращения 22.03.2023).
2. Allied Market Research. URL: <https://www.alliedmarketresearch.com/reports-store> (дата обращения 22.03.2023).
3. Mobility Foresights | Custom Automotive Market Research.

- URL: <https://mobilityforeights.com/product-category/electrical-machinery/> (дата обращения 20.02.2023).
4. Why electric boats are good for the environment. URL: <https://www.rselectricboats.com/why-electric-boats-are-good-for-the-environment/> (дата обращения 20.02.2023).
 5. Villa D., Montoya A., Ciro, J. M. The electric boat charging problem // Production. 2019. No. 29. e20190067. doi: 10.1590/0103-6513.20190067
 6. Best electric boats: A-Z of the top hybrid and all-electric models. URL: <https://www.mby.com/features/best-electric-boats-116768> (дата обращения 20.02.2023).
 7. Месропян А.В., Шабельник Ю.А. О способах повышения эффективности водоходных двигателей // Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2021. № 48(3). С. 39-51. doi: 10.21822/2073-6185-2021-48-3-39-51
 8. Анализ рынка электромоторных катеров и яхт / А.В. Месропян, Ю.А. Шабельник, Е.А. Платонов, А.П. Меркулова, А.М. Галицына // Электротехнические комплексы и системы: материалы Международной научно-практической конференции. Уфа: УУНИТ, 2022. С. 90-100.
 9. Оценка сопротивления вспомогательного судна внутреннего плавания приближенными методами / Е.Ю. Чибан, Д.В. Никущенко, О.В. Мартмянова, Е.А. Лукина, М.Ю. Тихобаев // Морские интеллектуальные технологии. 2022. № 2(2). С. 59-65.
 10. Технический регламент Таможенного союза ТР ТС 026/2012 «О безопасности маломерных судов»; принят 15 июня 2012 №33. URL: <https://docs.cntd.ru/document/902352820>

Поступила в редакцию 26 апреля 2023 г.

Принята к печати 22 мая 2023 г.

INFORMATION IN ENGLISH

OUTLOOK FOR THE IMPLEMENTATION OF ELECTRIC MOVEMENT IN SHIPBUILDING

Arsen V. Mesropyan

D.Sc. (Engineering), Professor, Head of Mechanical Engineering and Digital Design Department, Ufa University of Science and Technology, Ufa, Russia, avm_74@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-7786-7209>

Arina M. Galitsyna

Postgraduate student, Mechanical Engineering and Digital Design Department, Ufa University of Science and Technology, Ufa, Russia, arina.galitsina@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0003-0501-7576>

Anastasia P. Merkulova

Engineer, Mechanical Engineering and Digital Design Department, Ufa University of Science and Technology, Ufa, Russia, nastymerkulova@mail.ru

Yuliya A. Shabelnik

Senior Lecturer, Mechanical Engineering and Digital Design Department, Ufa University of Science and Technology, Ufa, Russia, shabelnik.yua@ugatu.su, <https://orcid.org/0009-0000-4923-0200>

The aim of the paper is to review the prospects for the development of research in the direction of ships on electric propulsion. The use of electric energy when driving on water is one of the ways to solve the problem of decarbonization, reducing pollution of water areas and damage to the ecosystems of water and adjacent territories. The main factors influencing the choice of an electric power plant for small boats, as well as the parameters that determine the energy efficiency of a vessel on electric propulsion, are considered. The existing restrictions that affect the spread of electric propulsion application on water are considered. The work uses surface modeling of the hull of a small vessel on electric propulsion, taking into account the needs of the vessel being developed, on the basis of which a draft design of a small vessel and its characteristics are formed. A parametric analysis of propulsion was performed, the calculation of the resistance curve along the length of the hull, which is necessary for further design of the propulsion unit, was carried out. One of the solutions to achieve the goals of ensuring the efficiency of a promising vessel should be the use of non-traditional propeller circuit designs that improve the quality of the workflow. The necessity for adaptation of the ship propellers to the operating modes, the features of the external speed characteristic of the electric machine, the importance of the operating modes consistency to the "hull-power plant-propulsion" system is shown. The work on the analytical review and analysis of the market of small-sized vessels on electric propulsion was carried out, on the basis of which the main trends for further research were identified, the requirements for a promising propulsion unit for the implementation of competitive electric propulsion in water

areas were formed. The tasks set to ensure the energy efficiency of the vessel require an integrated approach and modeling of the operating modes of the "hull of a ship - power plant-propulsion" system.

Keywords: electric propulsion, water displacement boat, electric propulsion in shipbuilding, electric drive, propellers, advanced shipbuilding, loop propellers, ship hull, electrification, GHG emissions

REFERENCES

1. *Kiotskiy protokol k Ramochnoy konventsii Organizatsii Ob'edinennykh Natsiy ob izmenenii klimata. Prinyat 11 dekabrya 1997 goda* [Kyoto Protocol to the United Nations Framework Convention on Climate Change. Adopted December 11, 1997]. Available at: https://www.un.org/ru/documents/decl_conv/conventions/kyoto.shtml (accessed 22 March 2023). (In Russian)
2. Allied Market Research. Available at: <https://www.alliedmarketresearch.com/reports-store> (accessed 22 March 2023)
3. Mobility Foresights | Custom Automotive Market Research. Available at: <https://mobilityforeights.com/product-category/electricalmachinery/> (accessed 20 February 2023)
4. Why electric boats are good for the environment. Available at: <https://www.rselectricboats.com/why-electric-boats-are-good-for-the-environment/> (accessed 20 February 2023)
5. Villa D., Montoya A., Ciro J.M. The electric boat charging problem. Production. 2019, no. 29, e20190067. doi: 10.1590/0103-6513.20190067

6. Best electric boats: A-Z of the top hybrid and all-electric models. Available at: <https://www.mby.com/features/best-electric-boats-116768> (accessed 20 February 2023).
7. Mesropyan A.V., Shabelnik Yu.A. The ways to increase the efficiency of marine propulsion systems. *Vestnik Dagestanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* [Herald of Daghestan State Technical University. Technical Sciences], 2021, 48(3), pp. 39-51. (In Russian) doi: 10.21822/2073-6185-2021-48-3-39-51
8. Mesropyan A.V., Shabelnik Yu.A., Platonov E.A., Merkulova A.P., Galitsyna A.M. Analysis of the market for electric motor boats and yachts. *Elektrotekhnicheskiye komplekсы i sistemy: Materialy Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii* [Proceedings of the International Scientific and Practical Conference "Electrotechnical complexes and systems"], Ufa, Ufa University of Science and Technology Publ., 2022, pp. 90-100. (In Russian)
9. Cheban E.Yu., Nikushchenko D.V., Martemyanova O.V., Lukina E.A., Tikhobaev M.Yu. Estimation of an auxiliary vessel resistance for inland navigation by approximate methods. *Morskiye intellektualnyye tekhnologii* [Marine Intelligent Technologies], 2022, no. 2, part 2, pp. 59-65. (In Russian)
10. *Tekhnicheskii reglament Tamozhennogo soyuza TR TS 026/2012. O bezopasnosti malomernykh sudov ot 15 iyunya 2012 №33* [Technical regulation of the Customs Union TR TS 026/2012. On the safety of small boats of June 15, 2012, no. 33]. Available at: <https://docs.cntd.ru/document/902352820>. (In Russian)

Перспективы реализации электродвижения в маломерном судостроении / А.В. Месропян, А.М. Галицына, А.П. Меркулова, Ю.А. Шабельник // Электротехнические системы и комплексы. 2023. № 2(59). С. 49-54. [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2023-2\(59\)-49-54](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2023-2(59)-49-54)

Mesropyan A.V., Galitsyna A.M., Merkulova A.P., Shabelnik Yu.A. Outlook for the Implementation of Electric Movement in Shipbuilding. *Elektrotekhnicheskiye sistemy i komplekсы* [Electrotechnical Systems and Complexes], 2023, no. 2(59), pp. 49-54. (In Russian). [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2023-2\(59\)-49-54](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2023-2(59)-49-54)

СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ ИМПУЛЬСНЫМ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕМ НАПРЯЖЕНИЯ С ЧАСТОТНО-ИМПУЛЬСНОЙ МОДУЛЯЦИЕЙ

В работе рассматривается система управления импульсным преобразователем напряжения с частотно-импульсной модуляцией, учитывающая возможность возникновения нежелательных колебаний на выходе, связанных с динамическими нелинейностями системы. Рассматриваемое в работе устройство является системой автоматического управления с обратной связью на основе пропорционального регулятора, то есть является простейшей системой с астатизмом. Предлагается структура системы управления, включающая дополнительную систему управления нелинейными динамическими процессами, построенную на основе метода направления на цель. Это позволяет обеспечивать желаемый динамический режим при изменении параметров системы или параметров внешних воздействий в широких диапазонах. Получены расчетные выражения для выбора оптимальных параметров пропорционального регулятора и задающего воздействия для обеспечения заданной точности поддержания выходного напряжения в условиях меняющейся нагрузки. Показано, что высокие значения коэффициента усиления П-регулятора в системе без управления нелинейными динамическими процессами приводят к возникновению нежелательных динамических режимов, которые могут быть устранены лишь уменьшением указанного коэффициента, что приводит к падению статической точности замкнутой системы автоматического управления. В работе приведены нелинейная динамическая модель системы в виде отображения Пуанкаре и малосигнальная структурная модель системы на основе метода направления на цель, учитывающая дискретность системы управления из-за наличия в ее составе устройств выборки-хранения. Проведены исследования систем без управления нелинейными динамическими процессами и с их управлением. Показано, что малосигнальная структурная модель системы не позволяет точно определять параметрические границы перехода системы в нежелательные режимы, что требует применения нелинейных динамических моделей для уточнения данных границ. Подтверждено, что применение метода направления на цель позволяет исключить нежелательные колебания и обеспечить устойчивость системы без изменения коэффициента пропорционального регулятора, что позволяет сохранить статическую точность. Предлагаемый подход к построению систем управления преобразователей с частотно-импульсной модуляцией может быть применен и при других типах регуляторов в основном контуре управления с целью улучшения динамики системы.

Ключевые слова: непосредственный понижающий преобразователь напряжения, частотно-импульсная модуляция, пропорциональный регулятор, малосигнальная структурная модель, нелинейная динамика, нелинейные колебания, желаемый динамический режим, запас устойчивости

ВВЕДЕНИЕ

Частотно-импульсная модуляция (ЧИМ) достаточно часто применяется при построении систем преобразования электроэнергии, так как при работе в некоторых режимах обеспечивает более высокий коэффициент полезного действия [1–5].

Как и системы с широтно-импульсной модуляцией (ШИМ), системы с ЧИМ также являются системами автоматического управления (САУ) с обратной связью, являющиеся нелинейными динамическими системами, в которых наблюдаются колебания [2]. Причем если в системах с ШИМ частота колебаний определяется внешними периодическими воздействиями от тактового генератора [6, 7], то системы с ЧИМ являются автономными, что определяет специфику их систем управления.

Актуальной задачей в данном случае является устранение нелинейных колебаний выходного напряжения, которые могут появиться при определенных параметрах системы (емкость выходного конденсатора, индуктивность дросселя, сопротивление нагрузки) и параметрах внешних воздействий (входное напряжение, сигнал задания и т.п.) [8–11]. Нежелательные динамические режимы сопровождаются пульсациями выходного напряжения повышенной амплитуды, когда качество

выходного напряжения существенно снижается.

На практике выбор параметров регулятора импульсных преобразователей напряжения (ИПН), как правило, осуществляется с применением малосигнальных, усредненных динамических моделей, что позволяет применять теорию линейных систем автоматического управления [7]. При этом это не гарантирует исключение нежелательных режимов работы и требуется дополнительная коррекция параметров регулятора, что приводит к снижению быстродействия [8] или уменьшению статической точности [9].

Альтернативным подходом является использование специализированных структур систем управления, которые позволяют исключить появление нежелательных динамических режимов при изменении системных параметров и параметров внешних воздействий в заданных диапазонах. Данные САУ строятся на основе запаздывающей обратной связи (ЗОС) [12] или метода направления на цель (МНЦ) [8, 13].

Как известно, для анализа колебательных систем используется метод точечных отображений (сечение Пуанкаре). В этом случае анализируется устойчивость именно неподвижной точки отображения Пуанкаре периодического режима, а не точки равновесия, как в теории линейных систем автоматического управления. Основной задачей системы управления ИПН в этом случае является обеспечение устойчивости неподвижных точек желаемого динамического режима.

В составе САУ, построенных на основе ЗОС или МНЦ, помимо основного контура управления, обеспечивающего стабилизацию среднего значения выходного напряжения, еще присутствует дополнительная система управления нелинейными динамическими процессами (СУНДП), которая стабилизирует неподвижную точку отображения Пуанкаре желаемого режима.

При рассмотрении ИПН под желаемым динамическим режимом понимается режим, который характеризуется одной неподвижной точкой [10]. Он называется 1-циклом или однократным режимом. Это означает, что в соседние дискретные моменты времени фазовые переменные, характеризующие текущее состояние системы, идентичны. Нежелательные динамические режимы имеют более высокую кратность m и характеризуются m неподвижными точками. При возникновении хаотических колебаний $m \rightarrow \infty$.

В работе [2] рассмотрена система ИПН с ЧИМ с постоянной длительностью импульса, построенная на основе метода с запаздывающей обратной связью. В данной работе внимание уделяется ИПН с ЧИМ с постоянной длительностью паузы, а при построении системы управления будет использован метод направления на цель, который ранее использовался лишь для ИПН с ШИМ [8]. МНЦ в ряде случаев имеет большую эффективность, чем запаздывающая обратная связь, но при этом требует более сложную структуру системы управления, которая будет рассмотрена в данной работе.

СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ НЕПОСРЕДСТВЕННОГО ПОНИЖАЮЩЕГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ НАПРЯЖЕНИЯ С ЧАСТОТНО-ИМПУЛЬСНОЙ МОДУЛЯЦИЕЙ

Функциональная схема ИПН на основе ЧИМ представлена на **рис. 1**. Силовая часть представляет собой непосредственный понижающий преобразователь напряжения [6], состоящий из силового транзистора VT , силового диода VD , дросселя фильтра L с паразитным сопротивлением R_L , конденсатора фильтра C .

Система управления состоит из двух частей: ОСУ – основной системы управления, задачей которой является стабилизация среднего значения выходного напряжения (точки равновесия), и СУНДП – системы управления нелинейными динамическими процессами. Основной задачей СУНДП является стабилизация не-

подвижной точки однократного периодического режима, который является желаемым.

Рассмотрим принцип действия основной системы управления, которая является модификацией системы [2]. Для начала считаем, что корректирующий сигнал СУНДП $u_c = 0$, то есть СУНДП не функционирует.

Принцип действия преобразователя поясняется временными диаграммами на **рис. 2**. Сигнал обратной связи U_{oc} поступает с датчика обратной связи, имеющего коэффициент передачи β . Уровень выходного напряжения определяется сигналом задания U_s , скорость нарастания которого определяется задатчиком интенсивности ЗИ (в данном случае аperiodическое звено первого порядка). Сигнал управления, поступающий после пропорционального регулятора с коэффициентом передачи K , поступает на устройство выборки-хранения УВХ, которое сохраняет его значение в начале тактового интервала, которое определяется по фронту сигнала U_{yT} , открывающего силовой ключ.

На вход интегратора поступает постоянный сигнал $U_{оп}$ и напряжение на выходе интегратора U_n начинает нарастать по линейному закону после его сброса в дискретные моменты времени T_k .

Сигналы U_{yux} и U_n поступают на вход компаратора К1. Например, на интервалах $T_k - T_{k+1}$ на выходе компаратора наблюдается логический ноль, поскольку на указанном интервале $U_n < U_{yux}$. Однако в моменты T_k на выходе К1 кратковременно появляется логическая единица, которая устанавливает триггер в единичное состояние, а также сбрасывает интегратор и активизирует выборку нового значения U_y УВХ. Таким образом, в момент T_k происходит отпирание силового транзистора, который остается открытым до моментов t_{k1} . Моменты коммутации t_{k1} связаны со срабатыванием компаратора К2, на вход которого поступает напряжение U_n и напряжение $U_{yn} = U_{yux} - U_n$, где U_n – постоянное напряжение, определяющее длительность паузы. Как видно из **рис. 2**, чем больше значение U_n , тем больше длительность паузы, которая определяется по выражению

$$T_n = T_{k+1} - t_{k1} = \frac{U_n T_i}{U_{оп}},$$

где T_i – постоянная времени интегратора И (см. **рис. 1**).

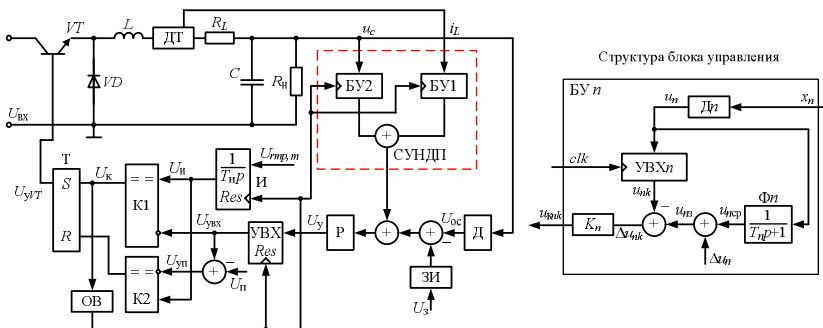


Рис. 1. Структурная схема преобразователя с частотно-импульсной модуляцией

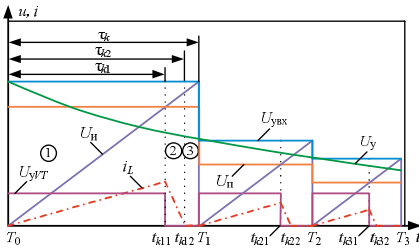


Рис. 2. К пояснению принципа действия основной системы управления

В моменты t_{k1} сигнал U_n становится больше U_{yn} , что приводит к появлению логической единицы на выходе компаратора К2, сбросу триггера Т и запирающему силовому ключа.

Также на рис. 2 приведены временные диаграммы тока, характерные для режима прерывистого тока преобразователя [6]. На интервалах $T_k - t_{k1}$, когда ключ VT открыт, ток дросселя нарастает. На интервалах $t_{k1} - t_{k2}$ открыт диод VD и ток дросселя спадает по линейному закону. В моменты t_{k2} ток дросселя спадает до нуля и диод VD закрывается.

Далее рассмотрим принцип действия СУНДП. Как упоминалось ранее, СУНДП обеспечивает работу системы в желаемом динамическом режиме (1-цикле). В рассматриваемом случае СУНДП состоит из двух блоков управления – БУ1 и БУ2 (см. рис. 1). На вход каждого блока управления поступает соответствующая фазовая переменная. Так, на блок БУ1 поступает информация о токе дросселя с датчика ДТ (фазовая переменная i_d), а на блок БУ2 поступает информация о напряжении на конденсаторе (фазовая переменная u_c).

Корректирующий сигнал СУНДП u_k рассчитывается по выражению [8]

$$\begin{aligned} u_k &= \sum_{n=1}^2 u_{nkn} = \sum_{n=1}^2 K_n (u_{n3} - u_{nk}) = \\ &= \sum_{n=1}^2 K_n (u_{ncp} + \Delta u_n - u_{nk}) = \\ &= \sum_{n=1}^2 K_n \beta_n (x_{ncp} + \Delta x_n - x_{nk}), \end{aligned} \quad (1)$$

где u_{n3} – задание на n -ю координату неподвижной точки желаемого режима; u_{nk} – выходной сигнал устройства выборки хранения УВХ $_n$, на вход которого подается выходной сигнал датчика Д $_n$; K_n – настраиваемый параметр СУНДП; u_{ncp} – среднее значение выходного сигнала датчика Д $_n$ u_n ; Δu_n – коррекция среднего значения выходного сигнала датчика Д $_n$; β_n – коэффициент передачи датчика Д $_n$; x_{ncp} – среднее значение фазовой переменной x_n ; Δx_n – коррекция среднего значения фазовой переменной x_n ; x_{nk} – значения фазовой переменной в дискретные моменты времени. Стоит отметить, что $x_1 = i_L$, а $x_2 = u_c$.

Сущность метода направления на цель состоит в следующем. По каждой фазовой переменной блоком БУ $_n$ рассчитывается ошибка Δu_{nk} , которая является разностью между текущим значением сигнала датчика

Д $_n$ в k -й дискретный момент времени и заданием на n -ю координату фазовой переменной u_{n3} .

Как известно, координаты неподвижной точки желаемого 1-цикла непосредственного понижающего преобразователя лежат вблизи средних значений фазовых переменных x_{ncp} , но могут быть отличны от них на определенную величину Δx_n . Поэтому задание на n -ю координату неподвижной точки желаемого режима определяется как $u_{n3} = u_{ncp} + \Delta u_n$ (см. рис. 1). Более подробно этот вопрос будет рассмотрен в следующем разделе.

Очевидно, что при работе системы в желаемом динамическом режиме (1-цикле) $u_{nk} = u_{n3}$ и $u_k = 0$. Устойчивость желаемого 1-цикла обуславливается правильным выбором коэффициентов пропорциональных звеньев K_n (рис. 1), каждое из которых фактически является пропорциональным регулятором по n -й координате неподвижной точки желаемого режима.

Как следует из рис. 1, среднее значение выходного сигнала датчика Д $_n$ u_{ncp} определяется путем фильтрации сигнала u_n с помощью фильтра нижних частот. В данном случае был использован фильтр первого порядка.

Таким образом, можно сделать вывод, что СУНДП стабилизирует неподвижную точку желаемого 1-цикла, а основная система управления обеспечивает устойчивость точки равновесия линеаризованной системы, координаты которой совпадают со средними значениями фазовых переменных. Причем в установившемся режиме СУНДП фактически не работает $u_k = 0$ и вступает в работу либо в переходных режимах, либо при работе в нежелательных динамических режимах.

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ ДИНАМИКИ СИСТЕМЫ

Система может рассматриваться как нелинейная дискретная и описывается отображением Пуанкаре, которое устанавливает связь между векторами фазовых переменных в соседние дискретные моменты времени (T_{k-1} и T_k).

При построении модели здесь и далее считаем, что постоянные времени T_1 и T_2 (фильтры в составе СУНДП) достаточно велики и не оказывают существенного влияния на установившийся динамический процесс, поэтому могут не учитываться в модели. При проектировании систем с повышенными требованиями к быстродействию их нужно учитывать.

Применим отображение, рассмотренное в [2], для системы ЧИМ с постоянной длительностью импульса, после модификации:

$$\begin{aligned} \mathbf{X}_k &= \Psi(\mathbf{X}_{k-1}) = \\ &= e^{A_1(\tau_k^* + \Delta\tau_k - \tau_{k-1})} e^{A_2(\tau_{k2} - \tau_{k1})} e^{A_1\tau_{k1}} \mathbf{X}_{k-1} + \\ &+ e^{A_1(\tau_k^* + \Delta\tau_k - \tau_{k-1})} e^{A_2(\tau_{k2} - \tau_{k1})} \left(e^{A_3\tau_{k1}} - \mathbf{E} \right) \mathbf{A}_1 \mathbf{B}_1 \mathbf{v}_1 + \\ &+ e^{A_1(\tau_k^* + \Delta\tau_k - \tau_{k-1})} \left[e^{A_2(\tau_{k2} - \tau_{k1})} - \mathbf{E} \right] \mathbf{A}_2 \mathbf{B}_2 \mathbf{v}_2 + \\ &+ \left(e^{A_1(\tau_k^* + \Delta\tau_k - \tau_{k-1})} - \mathbf{E} \right) \mathbf{A}_3 \mathbf{B}_3 \mathbf{v}_3, \end{aligned} \quad (2)$$

где \mathbf{X}_{k-1} – вектор фазовых переменных в дискретный момент времени T_{k-1} ; τ_k^* – длительность тактового ин-

тервала при деактивированной СУНДП; τ_{k1} – момент коммутации транзистора VT в локальном времени; τ_{k2} – момент коммутации диода VD ; $\Delta\tau_k$ – корректирующее приращение длительности тактового интервала τ_k на k -м тактовом интервале; \mathbf{A}_j – системная матрица; \mathbf{B}_j – матрица управления; \mathbf{v}_j – вектор управления; j – номер участка на тактовом интервале; $\mathbf{X}=[i_L \ u_c]^T=[x_1 \ x_2]^T$ – вектор фазовых переменных.

$$\mathbf{A}_1 = \mathbf{A}_2 = \begin{bmatrix} -\frac{R_L}{L} & -\frac{1}{L} \\ \frac{1}{C} & -\frac{1}{CR_n} \end{bmatrix}; \mathbf{A}_3 = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & -\frac{1}{CR_n} \end{bmatrix};$$

$$\mathbf{B}_1 = \mathbf{B}_2 = \mathbf{B}_3 = \begin{bmatrix} \frac{1}{L} & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}; \mathbf{E} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}; \mathbf{v}_1 = \begin{bmatrix} U_{вх} \\ 0 \end{bmatrix};$$

$$\mathbf{v}_2 = \mathbf{v}_3 = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix}.$$

В выражении (2) используется локальное время, где точкой отсчета является начало тактового интервала. Так, на k -м тактовом интервале локальное время определяется как [2]

$$\tau = t - T_{k-1},$$

где t – абсолютное время.

Как видно из (2), на каждой итерации отображения необходимо рассчитывать τ_{k1} , τ_{k2} и τ_k . Запишем уравнение многообразий переключения, которые характерны для системы, рассматриваемой в данной работе. Каждое уравнение многообразия переключения позволяет найти конкретный момент коммутации из перечисленных выше.

Для момента коммутации τ_{k1}

$$\alpha U_{yk} - \frac{U_{он}(\tau_{k1} + T_n)}{T_n} = 0.$$

Отсюда

$$\tau_{k1} = \frac{U_{yk} T_n}{U_{он}} - T_n, \quad (3)$$

$$U_{yk} = U_3 - \beta c_2^T \mathbf{X}_{k-1} + u_k, \quad (4)$$

где $c_2=[0, 1]$ – вектор выборки фазовой переменной u_c из вектора фазовых переменных \mathbf{X} .

Для момента коммутации τ_{k2}

$$c_1^T \mathbf{X}(\tau_{k2}) = 0, \quad (5)$$

где $c_1=[1, 0]$ – вектор выборки фазовой переменной i_L из вектора фазовых переменных \mathbf{X} ,

$$\mathbf{X}(\tau) = e^{\mathbf{A}_2(\tau-\tau_{k1})} \mathbf{X}_{k-1} + \left(e^{\mathbf{A}_2(\tau-\tau_{k1})} - \mathbf{E} \right) \mathbf{A}_2^{-1} \mathbf{B}_2 \mathbf{v}_2.$$

Уравнение (5) может быть решено только с использованием численных методов решения нелинейных уравнений.

Для момента коммутации τ_k справедливо уравнение

$$U_{yk} - \frac{U_{он} \tau_k}{T_n} = 0.$$

Отсюда

$$\tau_k = \frac{U_{yk} T_n}{U_{он}}. \quad (6)$$

РАСЧЕТ ПАРАМЕТРОВ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ

Уравнения (2) – (6) описывают динамические процессы в рассматриваемой системе. Далее рассмотрим основные выражения, описывающие установившийся режим, для чего используются средние значения переменных, указанных на рис. 1.

Найдем требуемое значение сигнала задания и коэффициента усиления пропорционального регулятора при известных диапазонах входного и выходного напряжений и сопротивления нагрузки. При работе в желаемом режиме после установления процесса коммутации силового ключа происходит с постоянной частотой, при этом длительность тактового интервала с учетом (6) рассчитывается по выражению

$$T = \frac{U_{уср} T_n}{U_{он}}, \quad (7)$$

где T – длительность тактового интервала в желаемом режиме; $U_{уср}$ – среднее значение сигнала управления.

Длительность импульса ЧИМ с учетом (7) определяется по выражению

$$T_{имп} = \frac{U_{уср} T_n}{U_{он}} - T_n. \quad (8)$$

Среднее значение коэффициента заполнения импульса ЧИМ в желаемом режиме определяется как

$$\Gamma = \frac{T_{имп}}{T} = \frac{\frac{U_{уср} T_n}{U_{он}} - T_n}{\frac{U_{уср} T_n}{U_{он}}} = 1 - \frac{T_n U_{он}}{U_{уср} T_n}. \quad (9)$$

С другой стороны, известно [6]

$$U_{вых} = U_{вх} \frac{R_n}{R_n + R_L} \Gamma.$$

Отсюда

$$\Gamma = \frac{U_{вых} (R_n + R_L)}{U_{вх} R_n}. \quad (10)$$

Приравниваем (9) и (10) и находим $U_{уср}$:

$$U_{уср} = \frac{T_n U_{он}}{T_n \left(1 - \frac{U_{вых} (R_n + R_L)}{R_n U_{вх}} \right)}. \quad (11)$$

В установившемся режиме $u_k=0$, тогда из (4)

$$U_{\text{ур}} = \alpha(U_3 - \beta U_{\text{вых}}). \quad (12)$$

Очевидно, что максимальное значение выходного напряжения $U_{\text{вых max}}$ наблюдается при максимальном входном напряжении $U_{\text{вх max}}$ и максимальном сопротивлении нагрузки $R_{\text{n max}}$. А минимальное значение выходного напряжения наблюдается при минимальных значениях входного напряжения и сопротивления нагрузки $U_{\text{вх min}}$ и $R_{\text{n min}}$. Задаваясь допустимыми $U_{\text{вых max}}$ и $U_{\text{вых min}}$ и приравнявая (11) и (12) можно составить систему нелинейных уравнений с двумя неизвестными U_3 и K :

$$\begin{cases} \alpha(U_3 - \beta U_{\text{вых max}}) = \frac{T_n U_{\text{он}}}{T_n \left(1 - \frac{U_{\text{вых max}}(R_{\text{n max}} + R_L)}{R_{\text{n max}} U_{\text{вх max}}}\right)}; \\ \alpha(U_3 - \beta U_{\text{вых min}}) = \frac{T_n U_{\text{он}}}{T_n \left(1 - \frac{U_{\text{вых min}}(R_{\text{n min}} + R_L)}{R_{\text{n min}} U_{\text{вх min}}}\right)} \end{cases} \quad (13)$$

Решая систему (13), находим

$$\begin{aligned} U_3 &= \frac{N}{P}; \\ N &= \beta R_L (D_{\text{min min}} U_{\text{вых max}}^2 - D_{\text{max max}} U_{\text{вых min}}^2) + \\ &+ \beta R_{\text{n min}} R_{\text{n max}} [U_{\text{вх min}} (U_{\text{вых max}}^2 - U_{\text{вх max}} \Delta U_{\text{вых}}) - \\ &- U_{\text{вх max}} U_{\text{вых min}}^2]; \\ P &= R_{\text{n min}} U_{\text{вх min}} U_{\text{вых max}} (R_L + R_{\text{n max}}) - \\ &- U_{\text{вх max}} R_{\text{n max}} U_{\text{вых min}} (R_L + R_{\text{n min}}); \\ \alpha &= \frac{D_{\text{max max}} T_n U_{\text{он}}}{Q}; \\ Q &= (U_3 - \beta U_{\text{вых max}})(R_L T_n U_{\text{вых max}} - D_{\text{max max}} T_n + \\ &+ R_{\text{n max}} T_n U_{\text{вых max}}), \end{aligned} \quad (14)$$

где $D_{\text{min min}} = R_{\text{n min}} U_{\text{вх min}}$; $D_{\text{max max}} = R_{\text{n max}} U_{\text{вх max}}$; $\Delta U_{\text{вых}} = U_{\text{вых max}} - U_{\text{вых min}}$.

На следующем этапе получим выражение для расчета коррекции Δu_n в n -м блоке СУНДП (рис. 1). Как известно [8], координаты неподвижной точки отображения Пуанкаре желаемого режима совпадают с координатами фазовых переменных в дискретные моменты времени (на рис. 3 отмечены красными точками). Очевидно, что они лежат вблизи средних значений фазовых переменных, но не всегда равны им [8].

Запишем выражения для определения координат неподвижной точки 1-цикла:

$$\begin{aligned} u_{13} &= x_{1\text{ср}}; \\ u_{23} &= x_{2\text{ср}} - \Delta u_2, \text{ при } u_{23} \geq 0, \end{aligned} \quad (16)$$

где $x_{1\text{ср}}$ – среднее значение тока дросселя; $x_{2\text{ср}}$ – среднее значение напряжения на конденсаторе.

Как следует из рис. 3, координата неподвижной точки 1-цикла, определяемая напряжением на конденсаторе, совпадает со средним значением этой фазовой переменной.

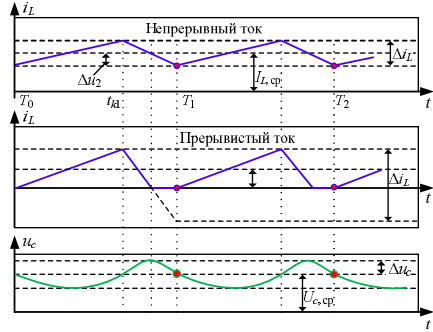


Рис. 3. Временные диаграммы фазовых переменных системы

Особенностью рассматриваемой системы является постоянно длительности паузы, что облегчает задачу поиска Δu_2 в (16). Как известно, на интервале паузы ЧИМ, когда силовой ключ закрыт, к дросселю прикладывается выходное напряжение и ток дросселя линейно спадает.

Значение, на которое уменьшается ток на интервале паузы ЧИМ, определяется как

$$\Delta i_L = \frac{U_{\text{вых}}}{L} T_n.$$

Таким образом, очевидно, что

$$\Delta u_2 = \frac{\Delta i_L}{2} = \frac{U_{\text{вых}}}{2L} T_n = K_i U_{\text{вых}}, \quad (17)$$

где K_i – коэффициент, определяемый неизменяемыми параметрами системы,

$$K_i = \frac{T_n}{2L}.$$

При работе в режиме прерывистого тока согласно (17) $\Delta u_2 > I_{L\text{ср}}$ (см. также рис. 3), что требует ограничения $u_{23} \geq 0$, как указано в (16). Таким образом, в этом режиме $u_{23} = 0$.

Очевидно, что вычисление координат неподвижной точки желаемого динамического режима по выражению (16) с учетом (17) легко может быть реализовано даже в аналоговой системе управления.

Для анализа устойчивости неподвижной точки желаемого динамического режима, как правило, используется первый метод Ляпунова, который связан с линеаризацией отображения Пуанкаре в малой окрестности неподвижной точки \mathbf{X}^* , которое имеет вид [9, 10]

$$\mathbf{\varepsilon}_k = \frac{d\Psi(\mathbf{X})}{d\mathbf{X}_{k-1}} \Big|_{\mathbf{X}=\mathbf{X}^*} \cdot \mathbf{\varepsilon}_{k-1} = \mathbf{M}_1 \mathbf{\varepsilon}_{k-1}, \quad (18)$$

где $\mathbf{\varepsilon}_k$ – вектор возмущения в k -й дискретный момент времени; \mathbf{M}_1 – матрица монодромии 1-цикла.

Как видно из (2), от коэффициентов K_n зависит приращение Δt_k . Таким образом, можно выбрать K_n ,

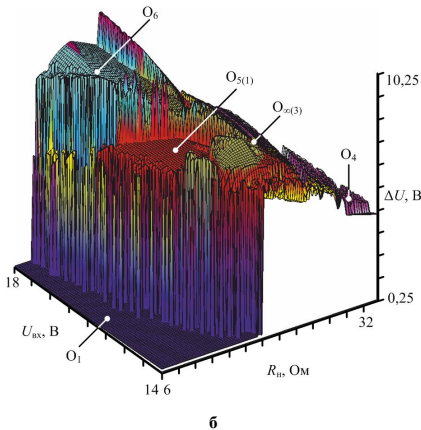
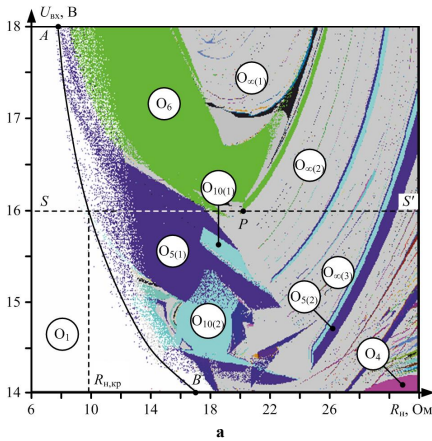


Рис. 5. Двухпараметрические диаграммы, характеризующие систему без СУНДП на основе МНЦ:
а – карта динамических режимов; б – диаграмма размаха колебаний

Также стоит заметить, что нежелательные колебания появляются при больших значениях сопротивления нагрузки R_n . Вблизи границы AB наблюдаются области мультистабильности, когда устойчивым являются как желаемый 1-цикл, так и 5-цикл ($O_{5(1)}$), что характерно для нелинейных систем.

Применение МНЦ обеспечило реализацию желаемого 1-цикла в выбранных диапазонах параметров системы (рис. 6). Здесь применялись следующие параметры СУНДП: постоянные времени фильтров $T_1=T_2=0,0005$ с, оптимальные коэффициенты $K_{p1}=2,23404$ и $K_{p2}=-0,0989914$, вычисленные с использованием численного метода оптимизации, упомянутого ранее. Как видно из рис. 6, карта динамических режимов на всей площади является областью существования 1-цикла, а размах колебаний уменьшился до 25 раз, что говорит об эффективности примененного подхода.

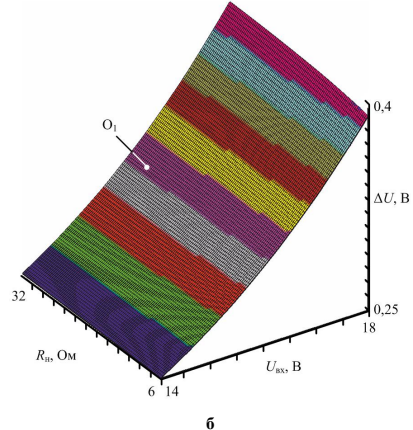
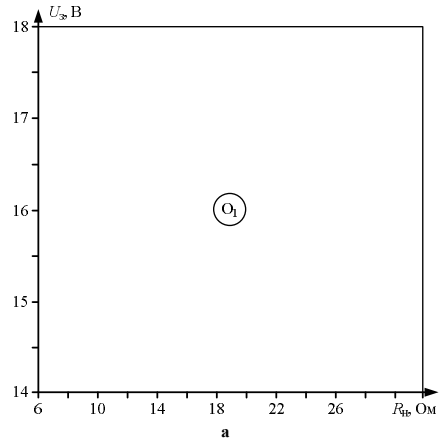


Рис. 6. Двухпараметрические диаграммы, характеризующие систему с СУНДП:
а – карта динамических режимов; б – диаграмма размаха колебаний

АНАЛИЗ ЧАСТОТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК РАЗОМКНУТОЙ СИСТЕМЫ НА ОСНОВЕ МАЛОСИГНАЛЬНОЙ СТРУКТУРНОЙ МОДЕЛИ

Частотные характеристики (рис. 7) были получены при $R_n=20$ Ом и $U_{вх}=16$ В (точка P на рис. 5). При рассмотрении будем использовать критерий устойчивости Найквиста и оценивать запас устойчивости по фазе, который определяется по выражению

$$\Delta\varphi = \varphi + 180^\circ,$$

где φ – фаза в градусах на частоте среза логарифмической амплитудно-частотной характеристики (ЛАЧХ).

Как видно из рис. 7, на высоких частотах логарифмическая фазочастотная характеристика (ЛФЧХ) исследуемой системы пересекает сверху вниз границу -180° , что обуславливается наличием УВХ в составе системы управления.

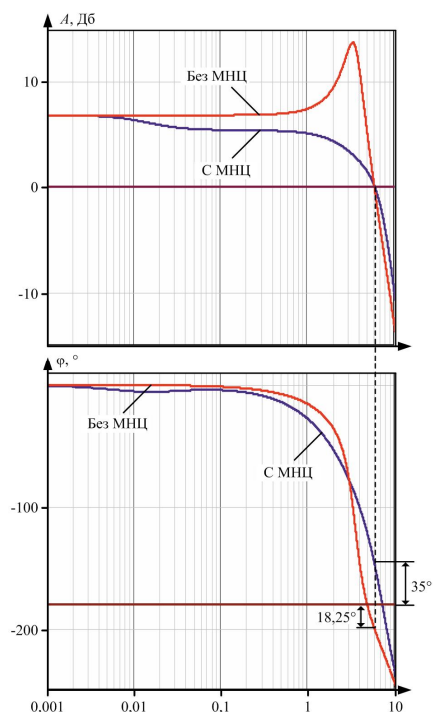


Рис. 7. Частотные характеристики разомкнутой системы

В моделях без учета УВХ ФЧХ асимптотически приближалась бы к -180° , что соответствует характеристике динамического звена второго порядка. В этом случае математическая модель системы будет устойчива при любом наборе параметров. Так что учет свойств УВХ в данном случае актуален. Также из рис. 7 видно, что в системе без использования СУНДП запас устойчивости по фазе составляет $-18,25^\circ$, то есть система неустойчива.

В табл. 1 приведена зависимость запаса устойчивости по фазе от сопротивления нагрузки при $U_{вх}=16$ В (сечение SS' на рис. 5, а). Из табл. 1 видно, что при $R_n=11$ Ом наблюдается граница устойчивости линеаризованной модели системы, когда запас устойчивости равен нулю. При $R_n < 11$ Ом система устойчива, поскольку $\Delta\varphi > 0$, а при $R_n > 11$ Ом система неустойчива, поскольку $\Delta\varphi < 0$.

Таблица 1
Запасы устойчивости по фазе разомкнутой системы при различных сопротивлениях нагрузки

Сопротивление нагрузки, Ом	Запас устойчивости по фазе, град
5	50,74
11	0
15	-14
22	-25
31	-31

Если же проанализировать сечение SS' на карте динамических режимов (см. рис. 5, а), то можно заметить, что нежелательные динамические режимы появляются при меньших значениях сопротивления нагрузки $R_{н.кр}=9,8$ Ом. Это объясняется тем, что карта динамических режимов строилась с использованием нелинейной динамической модели, которая учитывает весь спектр процессов, протекающих в системе.

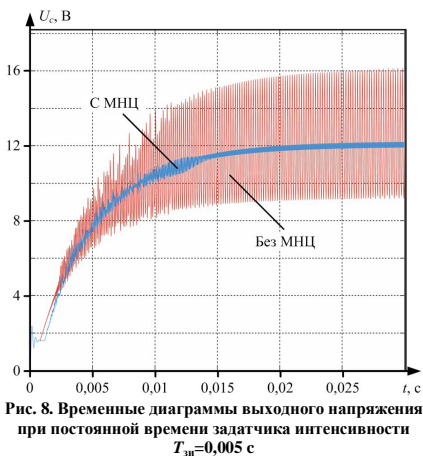
Более полные сведения представлены в табл. 2, где приведена зависимость границ устойчивости как неподвижной точки желаемого динамического режима, так и точки равновесия линейной динамической модели. Из табл. 2 видно, что практически во всем диапазоне изменения входного напряжения упомянутые критические значения не совпадают, что говорит об ограниченности возможностей линейных динамических моделей. В то же время в рассматриваемом случае различия не столь существенны, но с точки зрения теории нелинейных систем частный случай не может быть репрезентативен.

Применение МНЦ позволило исключить нежелательные колебания, существенно снизить размах выходного напряжения (рис. 8) и обеспечить запас устойчивости по фазе 35° (см. рис. 7). При этом стоит заметить, что использование СУНДП на основе МНЦ сохранило петлевой коэффициент усиления на постоянном токе равным 4,98 дБ, что говорит о том, что не ухудшилась статическая точность системы, которая обеспечивается выбранным коэффициентом пропорционального регулятора.

Таблица 2

Границы устойчивости системы при различных входных напряжениях

Входное напряжение $U_{вх}$, В	Граница устойчивости неподвижной точки желаемого режима, Ом	Граница устойчивости точки равновесия линейной динамической модели, Ом
14	16,9	17
15	11,4	13,3
16	10,6	9,1
17	8,1	8,7
18	7,28	7,58

Рис. 8. Временные диаграммы выходного напряжения при постоянной времени датчика интенсивности $T_{ин}=0,005$ с

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основании проведенных исследований можно сделать выводы:

1. При проектировании системы управления импульсных преобразователей напряжения целесообразно использовать нелинейные динамические модели, которые учитывают возможность возникновения нелинейных колебаний при определенных параметрах системы или параметрах внешних воздействий.

2. Специализированные методы управления нелинейными динамическими процессами импульсных преобразователей напряжения существенно расширяют инструментарий обеспечения устойчивости таких систем.

3. Предложена система управления непосредственным понижающим преобразователем напряжения с частотно-импульсной модуляцией, построенная с использованием метода направления на цель.

4. Получены расчетные выражения для выбора оптимальных параметров системы исходя из заданной статической точности поддержания выходного напряжения.

5. Показано, что при больших значениях коэффициента усиления пропорционального регулятора возникают нелинейные колебания с большой амплитудой.

6. Показано, что границы потери устойчивости неподвижной точки отображения Пуанкаре и границы потери устойчивости точки равновесия линеаризованной системы не совпадают.

7. Применение метода направления на цель позволило исключить нежелательные режимы и обеспечить устойчивость как малосигнальной модели системы, так и неподвижной точки желаемого динамического режима с точки зрения метода точечных отображений и первого метода Ляпунова. При этом применение СУНДП не изменило петлевой коэффициент усиления на постоянном токе, что обеспечивает заданную статическую точность системы.

8. Предлагаемая система управления нелинейными динамическими процессами может быть использована и при других типах регуляторов в качестве дополнительного инструментария улучшения динамики систем автоматического управления на основе импульсных преобразователей напряжения с частотно-импульсной модуляцией.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Михальченко С.Г., Бородин К.В. Динамические режимы функционирования преобразователя напряжения с частотно-импульсной модуляцией // Доклады Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники. 2012. № 1-1 (25). С. 278-287.

2. Andriyanov A.I. Controlling Nonlinear Dynamic Processes of a DC/DC Converter with Pulse-Frequency Modulation // International Multi-Conference on Engineering, Computer and Information Sciences. IEEE, 2022. Pp. 110-115. doi: 10.1109/SIBIRCON56155.2022.10016921
3. Бифуркационные явления в преобразователе напряжения с частотно-импульсным управлением для ветрогенераторной установки // С.Г. Михальченко, Г.Я. Михальченко, С.М. Семенов, П.С. Мещеряков, Н.А. Воронина, А.М. Зюзев // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2020. № 12(331). С. 215-225. doi: 10.18799/24131830/2020/12/2957
4. Татуйко П.С. Математическое описание режимов работы резонансного преобразователя напряжения с последовательным LC-резонансным контуром // Автоматизация и моделирование в проектировании и управлении. 2022. № 1(15). С. 73-79. doi: 10.30987/2658-6436-2022-1-73-79
5. Liu K.H., Oruganti R., Lee F.C.Y. Quasi-Resonant Converters. Topologies and Characteristics // IEEE Transactions on Power Electronics. 1987. No. 1(PE-2). Pp. 62-71. doi: 10.1109/TPEL.1987.4766333
6. Северис Р., Блум Г. Импульсные преобразователи постоянного напряжения для систем вторичного электропитания. М.: Энергоатомиздат, 1988. 294 с.
7. Белов Г.А. Теория импульсных преобразователей. Чебоксары: Изд-во Чуваш. ун-та, 2016. 330 с.
8. Андриянов А.И. Развитие теории управления нелинейными динамическими процессами импульсных систем электропитания: дис. ... докт. техн. наук. 05.09.12 / Андриянов Алексей Иванович. Чебоксары, 2022.
9. Баушев В.С., Жусубалиев Ж.Т. О недетерминированных режимах функционирования стабилизатора напряжения с широтно-импульсным регулированием // Электричество. 1992. № 8. С. 47-53.
10. Zhusubaliyev Zh.T., Mosekilde E. Bifurcations and chaos in piece-wise-smooth dynamical systems. Singapore: World Scientific Pub Co Inc, 2003. 376 p.
11. Instabilities in digitally controlled voltage-mode synchronous buck converter / D. Yu, H.H.C. lu, H. Chen, E. Rodriguez, A. Alarcon, A. El Aroudi // International Journal of Bifurcation and Chaos. 2012. No. 1(22). Pp. 1-12. doi: 10.1142/S0218127412500125
12. Battle C., Fossas E., Olivar G. Time-delay stabilization of the buck converter // Control of Oscillations and Chaos. IEEE, 1997. Vol. 3. Pp. 590-593. doi: 10.1109/COC.1997.626675
13. Dattani J., Blake J.C.H., Hilker F.M. Target-oriented chaos control // Physics Letters A. 2011. № 45(375). Pp. 3986-3992. doi: 10.1016/j.physleta.2011.08.066
14. Андриянов А.И. Расчет оптимальных параметров систем управления нелинейными динамическими процессами импульсных преобразователей напряжения // Автоматизация и моделирование в проектировании и управлении. 2022. № 4(18). С. 87-96. doi: 10.30987/2658-6436-2022-4-87-96
15. Astrom K.J., Wittenmark B. Computer Controlled Systems. New Jersey: Prentice-Hall, 2011. 576 p.

Поступила в редакцию 28 февраля 2023 г.

Принята к печати 22 марта 2023 г.

INFORMATION IN ENGLISH

CONTROL SYSTEM FOR DC/DC CONVERTER BASED ON PULSE-FREQUENCY MODULATION

Aleksey I. Andriyanov

D.Sc. (Engineering), Associate Professor, the Department of Electronics, Radio electronics and Electrotechnical Systems, Bryansk State Technical University, Bryansk, Russia, mail@ahaos.ru, <https://orcid.org/0000-0002-4083-040X>

Alexander A. Pugachev

D.Sc. (Engineering), Associate Professor, Professor, Head of the Department of Industrial Electronics and Electrical Engineering, Bryansk State Technical University, Bryansk, Russia, alexander-pugachev@rambler.ru, <https://orcid.org/0000-0002-1836-0923>

The paper considers a control system for a DC/DC converter with frequency-pulse modulation, which takes into account the possibility of undesired oscillations at the output associated with dynamic nonlinearities of the system. The device considered in the work is an automatic feedback control system based on a proportional controller, that is, it is the simplest system with droop. The structure of the control system is proposed, it includes an additional control system for nonlinear dynamic processes, built on the basis of the target-oriented control. This makes it possible to provide the desired dynamic mode when changing the system parameters or the parameters of external influences within a wide range. Calculation expressions are obtained for choosing the optimal parameters of the proportional controller and the reference signal to ensure the specified accuracy of maintaining the output voltage under changing load conditions. It is shown that high values of the P-controller gain in a system without control of nonlinear dynamic processes lead to the appearance of undesired dynamic modes, which can be eliminated only by reducing the specified coefficient, which leads to a drop in the static accuracy of a closed-loop automatic control system. The paper presents a nonlinear dynamic model of the system in the form of the Poincaré map and a small-signal structural model of the system based on the target-oriented control, which takes into account the discreteness of the control system due to the presence of sample-and-hold devices in it. Studies of systems without control of nonlinear dynamic processes and with their control based on the target-oriented control were carried out. It is shown that the small-signal structural model of the system makes it impossible to accurately determine the parametric boundaries of the system transition to undesired modes, which requires the use of nonlinear dynamic models to refine these boundaries. It is shown that the application of the target-oriented control makes it possible to exclude undesired oscillations and ensure the stability of the system without changing the coefficient of the proportional controller, which makes it possible to maintain static accuracy. The proposed approach to the construction of control systems for converters with frequency-pulse modulation can also be applied to other types of controllers in the main control loop in order to improve the system dynamics.

Keywords: buck converter, pulse-frequency modulation, proportional controller, small-signal structural model, nonlinear dynamics, nonlinear oscillations, desired dynamic mode, stability margin

REFERENCES

- Mikhalechenko S.G., Borodin K.V. Dynamic modes of functioning of the voltage converter with pulse-frequency modulation. *Doklady Tomskogo gosudarstvennogo universiteta sistem upravleniya i radioelektroniki* [Proceedings of TUSUR University], 2012, no. 1-1, pp. 278-287. (In Russian)
- Andriyanov A.I. Controlling Nonlinear Dynamic Processes of a DC/DC Converter with Pulse-Frequency Modulation. 2022 International Multi-Conference on Engineering, Computer and Information Sciences. IEEE, 2022. pp. 110-115. doi: 10.1109/SIBIRCON56155.2022.10016921
- Mikhalechenko S.G., Mikhalechenko G.Ya., Meshcheryakov P.S., Semenov S.M., Voronina N.A., Zluzev A.M. Bifurcation phenomena in voltage converter with frequency-pulse control for a wind generator. *Izvestiya Tomskogo politehnicheskogo universiteta. Inzhiniring georesursov*. [Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering], 2021, vol. 331, no. 12, pp. 215-225. (In Russian) doi: 10.18799/24131830/2020/12/2957
- Tatuyko P.S. Model of managing processes of engineering changes in products at an industrial enterprise. *Avtomatizatsiya i Modelirovanie v Proektirovanii i upravlenii* [Automation and Modeling in design and management], 2022, no. 1, pp. 73-79. (In Russian) doi: 10.30987/2658-6436-2022-1-73-79
- Liu K.H., Oruganti R., Lee F.C.Y. Quasi-Resonant Converters. Topologies and Characteristics. IEEE Transactions on Power Electronics, 1987, vol. PE-2, no. 1, pp. 62-71. doi: 10.1109/TPEL.1987.4766333
- Severns R., Bloom G. *Impul'snye preobrazovateli postoyannogo napryazheniya dlya sistem vtorichnogo elektropitaniya* [Switching DC voltage converters for secondary power supply systems]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1988. 294 p. (In Russian)
- Belov G.A. *Teoriya impul'snykh preobrazovateley* [Pulse converter theory]. Cheboksary, Chuvash State University Publ., 2016. 330 p. (In Russian)
- Andriyanov A.I. *Razvitiye teorii upravleniya nelinejnymi dinamicheskimi processami impul'snykh sistem elektropitaniya*. Doct. Diss. [Development of the theory of control of nonlinear dynamic processes of impulse power supply systems. Doct. Diss.]. Bryansk, 2022. 515 p. (In Russian)
- Baushev V.S., Zhusubaliyev Zh.T. Non-deterministic operating modes of voltage stabilizer with pulse-width regulation. *Elektrichestvo* [Elektrichestvo], 1992, no. 8, pp. 47-53. (In Russian)
- Zhusubaliyev Zh.T., Mosekilde E. Bifurcations and chaos in piecewise-smooth dynamical systems. Singapore, World Scientific Pub Co Inc., 2003. 376 p. doi: 10.1142/5313
- Yu D., lu H.C., Chen H., Rodriguez E., Alarcón E., El Aroudi A. Instabilities in digitally controlled voltage-mode synchronous buck converter. *International Journal of Bifurcation and Chaos*, 2012, vol. 22, no. 1, pp. 1-12. doi: 10.1142/S0218127412500125
- Battle C., Fossas E., Olivar G. Time-delay stabilization of the buck converter. *Control of Oscillations and Chaos*, 1997, vol. 3, pp. 590-593. doi: 10.1109/COC.1997.626675
- Dattani J., Blake J.C.H., Hilker F.M. Target-oriented chaos control. *Physics Letters A*, 2011, vol. 375, no. 45, pp. 3986-3992. doi: 10.1016/j.physleta.2011.08.066
- Andriyanov A.I. Calculation of optimal control system parameters for nonlinear dynamic processes of pulse voltage converters. *Avtomatizatsiya i Modelirovanie v Proektirovanii i upravlenii* [Automation and Modelling in Design and Management], 2022, no. 4(18), pp. 87-96. (In Russian) doi: 10.30987/2658-6436-2022-4-87-96
- Astrom K.J., Wittenmark B. *Computer Controlled Systems*, New Jersey, Prentice-Hall, 2011. 576 p. doi: 10.1007/978-94-015-7929-2
- Андрьянов А.И., Пугачев А.А. Система управления импульсным преобразователем напряжения с частотно-импульсной модуляцией// Электротехнические системы и комплексы. 2023. № 2(59). С. 55-64. [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2023-2\(59\)-55-64](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2023-2(59)-55-64)
- Andriyanov A.I., Pugachev A.A. Control System for DC/DC Converter Based on Pulse-Frequency Modulation. *Elektrrotehnicheskie sistemy i komplekсы* [Electrotechnical Systems and Complexes], 2023, no. 2(59), pp. 55-64. (In Russian). [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2023-2\(59\)-55-64](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2023-2(59)-55-64)

ИССЛЕДОВАНИЕ ПОВЕДЕНИЯ СПЕКТРОВ НАПРЯЖЕНИЯ ДВУХУРОВНЕВОГО АИН ПРИ ШИМ С УДАЛЕНИЕМ ВЫДЕЛЕННЫХ ГАРМОНИК

В настоящее время для автономных инверторов напряжения (АИН) широко применяются методы широтно-импульсной модуляции (ШИМ) с фиксированными интервалами следования импульсов в пределах опорной несущей частоты. К данным методам относятся хорошо известные синусоидальная ШИМ и пространственно-векторная ШИМ. Однако существует альтернативный метод ШИМ, при котором отдельные импульсы не ограничиваются периодом квантования опорного несущего сигнала, а могут изменяться по ширине и положению на полном периоде сигнала выходного напряжения АИН в рамках установленной симметрии. Данный метод в зарубежной литературе имеет название Programmed Pulse Pattern PWM – ШИМ с запрограммированной последовательностью импульсов (ЗПИ). В данной статье будет проведен анализ ЗПИ ШИМ с удалением выделенных гармоник (УВГ) для двухуровневых (2У) форм выходного напряжения АИН. УВГ является одним из самых ранних и распространенных способов реализации ШИМ с ЗПИ, который направлен на постепенное удаление гармоник низшего порядка в соответствии с заданным количеством переключений полупроводниковых модулей. В результате проведенных исследований были рассчитаны шесть ЗПИ с УВГ для обладающих четвертьволновой симметрией 2У форм напряжения АИН, начиная от 5-й и 7-й гармоник (при трёх переключениях) и заканчивая 35-й и 37-й гармониками (при тринадцати переключениях). Наборы ЗПИ были графически представлены в виде зависимости углов переключений полупроводниковых модулей АИН от коэффициента модуляции. В работе исследованы спектры и коэффициенты суммарных гармонических искажений до 50-й гармоники выходного напряжения АИН на интервале изменения коэффициента модуляции от 0 до 1,15 с шагом 0,01. Наиболее значимыми результатами проведённого исследования являются полученные зависимости индивидуальных гармонических составляющих от коэффициента модуляции. Проведённые исследования перспективны при разработке методов ЗПИ ШИМ с УВГ для силовых преобразователей с ограниченной частотой переключений полупроводниковых модулей, решения проблем обеспечения их электромагнитной совместимости, повышения энергоэффективности и оптимизации потерь мощности.

Ключевые слова: силовая преобразовательная техника, широтно-импульсная модуляция, запрограммированная последовательность импульсов, удаление выделенных гармоник, автономный инвертор напряжения

ВВЕДЕНИЕ

Метод ШИМ с запрограммированной последовательностью импульсов (ЗПИ) впервые был представлен в начале 1960-х годов, но массовое практическое применение его в то время было существенно ограничено из-за недостаточного развития микропроцессорной техники. После своего появления у данного метода сформировалась фундаментальная проблема, которая состоит в поиске «оптимальных» моментов формирования импульсов для подавления или полного исключения выбранных гармоник, определяемых на основе решений нелинейных трансцендентных уравнений. Под «оптимальными» ЗПИ понимаются рассчитанные в зависимости от установленного критерия оптимальности последовательности, которые минимизируют потери мощности и/или искажения форм сигналов преобразователя [1-3].

ШИМ на основе ЗПИ с удалением выделенных гармоник (УВГ) позволяет в процессе инвертирования генерировать широтно-импульсно модулированный сигнал с заранее заданным спектром гармоник при низкой частоте переключений полупроводниковых модулей автономного инвертора напряжения (АИН). Регулирование основной гармоники выходного напряжения преобразователя, подаваемой на нагрузку, осуществляется с помощью изменения моментов переключений полупроводниковых модулей [4, 5].

При написании статьи авторы опирались на исследования, представленные в книге авторов [6]. В отли-

чие от ранее полученных результатов, в данной статье будут рассчитаны шесть ЗПИ с УВГ для обладающих четвертьволновой симметрией 2У-форм напряжения АИН. Будут исследованы их спектры и коэффициенты суммарных гармонических искажений до 50-й гармоники выходного напряжения АИН на интервале изменения коэффициента модуляции от 0 до 1,15 с шагом 0,01. Наиболее значимым результатом проведённого исследования будут полученные зависимости индивидуальных гармонических составляющих от коэффициента модуляции.

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ 2У ФОРМЫ АИН

Существуют различные характеристики форм выходного напряжения АИН, среди которых выделяют: униполярные, биполярные, ступенчатые, многоуровневые, разноуровневые, симметричные, несимметричные и другие. 2У сигнал фазного напряжения фазной стойки трёхфазного АИН может изменяться произвольное количество раз N за период в моменты времени α_N , как показано на **рис. 1**.

Если $\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_N$ определяют моменты переключений N , то форма широтно-импульсно модулируемого сигнала выходного напряжения АИН $u(\omega t)$ может быть представлена рядом Фурье:

$$u(\omega t) = \sum_{n=1}^{\infty} (a_n \cos(n\omega t) + b_n \sin(n\omega t)), \quad (1)$$

где n – номер гармоники; ω – угловая частота; a_n и b_n – коэффициенты ряда Фурье.

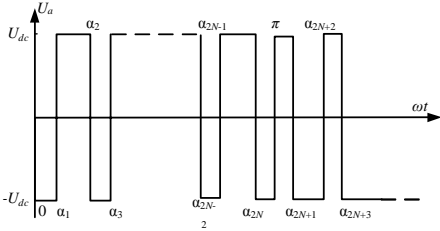


Рис. 1. Типовая форма 2У напряжения АИН

Принимая во внимание полуволновую симметрию, коэффициенты ряда Фурье опереются как

$$a_n = \frac{2}{\pi} \int_0^{\pi} u(\omega t) \sin(n\omega t) d(\omega t); \quad (2)$$

$$b_n = \frac{2}{\pi} \int_0^{\pi} u(\omega t) \cos(n\omega t) d(\omega t). \quad (3)$$

Для рис. 1, используя свойство полуволновой симметрии при нечётном количестве N , запишем уравнения (2) и (3) в виде

$$a_n = (-1) \frac{4U_{dc}}{\pi n} \left(1 + \sum_{k=1}^{2N} (-1)^k \cos(n\alpha_k) \right), \quad (4)$$

аналогично

$$b_n = (-1) \frac{4U_{dc}}{\pi n} \left(\sum_{k=1}^{2N} (-1)^k \sin(n\alpha_k) \right), \quad (5)$$

где k — порядковый номер угла переключения.

Выражения (4) и (5) образуют систему уравнений с $2N$ неизвестными. Следовательно, гармонические компоненты ряда Фурье a_n и b_n могут быть найдены при заданных значениях α_k для любого конкретного случая. Количество неизвестных можно уменьшить, если использовать четвертьволновую симметрию при условии

$$\alpha_k = \pi - \alpha_{2N-k+1}; \quad k = 1, 2, \dots, N. \quad (6)$$

Принимая во внимание (6), уравнение (4) приобретает вид

$$a_n = \frac{4U_{dc}}{\pi n} \left(-1 + 2 \sum_{k=1}^N (-1)^{k+1} \cos(n\alpha_k) \right). \quad (7)$$

Подставляя (7) в (1) и учитывая симметричную трёхфазную систему напряжений, получаем математическое выражение для описания выходного напряжения АИН, подаваемого на нагрузку в виде

$$u(\omega t) = \sum_{n=1,5,7,\dots}^{\infty} \left(\frac{4U_{dc}}{\pi n} \left(-1 + 2 \sum_{k=1}^N (-1)^{k+1} \cos(n\alpha_k) \right) \cos(n\omega t) \right). \quad (8)$$

Выражение (8) позволяет рассчитать спектры и коэффициенты суммарных гармонических искажений выходного напряжения 2У АИН при любых углах переключения α_N без имитационного моделирования силовой схемы [7].

ПОИСК УГЛОВ ПЕРЕКЛЮЧЕНИЙ ПРИ МЕТОДЕ ЗПИ ШИМ С УВГ. ОПИСАНИЕ МЕТОДА

ШИМ с УВГ является наиболее востребованным подходом к реализации ЗПИ. Поиск углов переключения для ШИМ с УВГ осуществляется с помощью решения системы нелинейных трансцендентных уравнений с количеством неизвестных, равных количеству выбранных для удаления гармоник, которые ограничиваются количеством переключений полупроводниковых модулей АИН [8]. Максимальное количество углов переключений N определяется в виде

$$N = \frac{f_{swave}}{f}, \quad (9)$$

где f_{swave} — средняя частота переключений ключей АИН; f — частота выходного напряжения АИН.

Количество удалённых гармоник q определяется по формуле

$$q = N - 1. \quad (10)$$

На основе выражений (6), (7) и (10) связь между углами переключений и гармоническим спектром сигнала записывается в виде

$$\begin{cases} -1 + 2 \sum_{k=1}^N (-1)^{k+1} \cos(\alpha_k) = \frac{\pi}{4} m = U_1; \\ \vdots \\ -1 + 2 \sum_{k=1}^N (-1)^{k+1} \cos(n\alpha_k) = 0 = U_n, \end{cases} \quad (11)$$

где U_1 — уровень основной гармоники; U_n — уровень n -й гармоники; U_{dc} — напряжение звена постоянного тока АИН; m — коэффициент модуляции.

Наиболее простым методом решения системы (11) является метод Ньютона, для которого найдены начальные значения на основе выражения [9, 10]

$$\begin{cases} \alpha_{2k-1}^0 = \frac{120^\circ k}{(N+1)} - \Delta\alpha; \\ \alpha_{2k}^0 = \frac{120^\circ k}{(N+1)} + \Delta\alpha; \\ \alpha_N^0 = 60^\circ - \Delta\alpha, \end{cases} \quad (12)$$

где N — количество углов переключений; k — порядковый номер угла переключения; $\Delta\alpha$ — начальное рассогласование углов переключений для достижения лучших результатов поиска.

Решение нелинейного уравнения с использованием метода Ньютона можно представить в виде поиска экстремумов функции в многомерном пространстве [6]. Для этого была построена матрица функций (13), по которой была найдена ошибка первого приближения

$$\Delta\alpha_0 = F_1(\alpha_1^0, \alpha_2^0, \dots, \alpha_N^0) - y_0,$$

где $\Delta\alpha_0$ — нулевой массив размерности N .

$$\frac{4U_{dc}}{\pi} \begin{bmatrix} \frac{1}{n_1} \left[-1 + 2 \sum_{k=1}^N (-1)^{k+1} \cos(n_1 \alpha_k) \right] \\ \frac{1}{n_2} \left[-1 + 2 \sum_{k=1}^N (-1)^{k+1} \cos(n_2 \alpha_k) \right] \\ \vdots \\ \frac{1}{n_N} \left[-1 + 2 \sum_{k=1}^N (-1)^{k+1} \cos(n_N \alpha_k) \right] \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F_1(\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_N) \\ F_2(\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_N) \\ \vdots \\ F_N(\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_N) \end{bmatrix} = F(\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_N). \quad (13)$$

Построение матрицы Якоби

$$Jacobi = \begin{pmatrix} \frac{\delta F(\alpha_1)}{\delta \alpha_1} & \dots & \frac{\delta F(\alpha_1)}{\delta \alpha_N} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\delta F(\alpha_N)}{\delta \alpha_1} & \dots & \frac{\delta F(\alpha_N)}{\delta \alpha_N} \end{pmatrix} \quad (14)$$

позволяет найти новое приближение

$$\Delta \alpha = \Delta \alpha_0 \cdot Jacobi^{-1} \quad (15)$$

и рассчитать новые значения углов переключений

$$(\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_N) = (\alpha_{1,0}, \alpha_{2,0}, \dots, \alpha_{N,0}) - \Delta \alpha. \quad (16)$$

В случае если углы не соответствуют заданным условиям, процесс пересчёта значений повторяется до их достижения. Чтобы избежать возможного попадания в локальный экстремум, который не удовлетворяет заданным условиям, алгоритм содержит ограничение на количество повторений цикла.

В результате построения алгоритма поиска углов переключений была разработана программа для ЭВМ, обеспечивающая поиск начальных приближений, расчёт углов переключений на всём диапазоне коэффициентов модуляции для 3, 5, 7, ..., 13 углов и построение идеальных форм напряжений АИН. Программа позволила сформировать, записать и проанализировать графики углов переключений и сформированных идеальных форм напряжений для последующего расчёта спектров и коэффициентов суммарных гармонических искажений.

Программа для ЭВМ реализована на базе российской платформы для моделирования SimInTech и представлена на рис. 2.

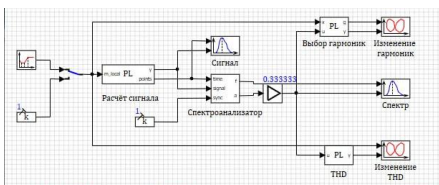


Рис. 2. Программа в среде SimInTech

Алгоритм поиска углов переключений представлен в виде блок-схемы на рис. 3.

Блоки «Кусочно-линейная» и «Константа» предназначены для задания коэффициента модуляции на вход системы. Переключение между данными блоками возможно с помощью блока «Ключ». Блок с подписью «Расчёт сигнала» рассчитывает углы переключений для различных коэффициентов модуляций с заранее заданным количеством углов переключений. На выходе данного блока формируются массивы данных с временными интервалами идеального 2У-сигнала напряжения АИН. В блоке с подписью «Сигнал» формируется график по заданным точкам. В блоке с подписью «Спектроанализатор» формируется спектр сигнала для 50-ти гармоник. Блок «Константа» преобразует значения выходного гармонического сигнала в проценты. Блок с подписью «Выбор гармоник» запоминает значения указанных гармоник для различных коэффициентов модуляции. Блок с подписью «THD» рассчитывает коэффициенты суммарных гармонических искажений сигнала, основываясь на значениях спектра. Блоки с подписями «Изменение гармоник», «Спектр» и «Изменение THD» формируют графики рассчитанных гармоник, спектров и THD соответственно.

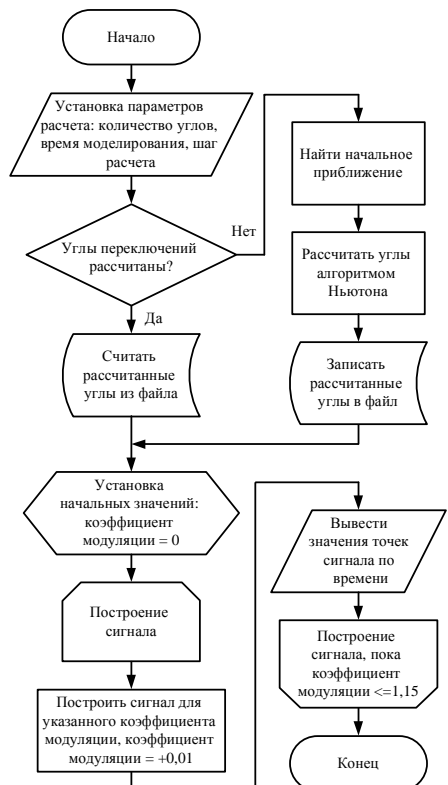
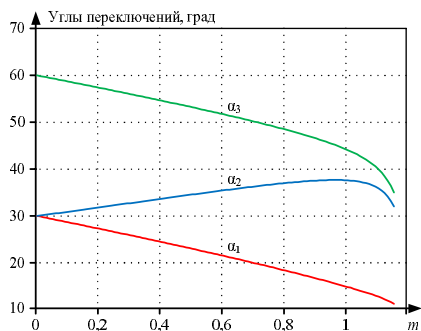


Рис. 3. Алгоритм работы программы на ЭВМ для расчёта углов переключений

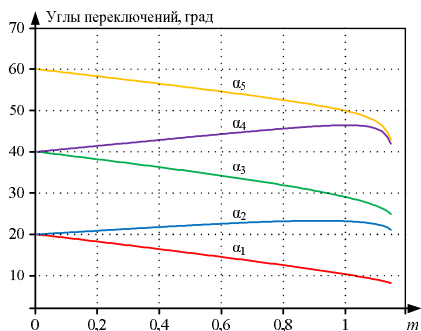
РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И АНАЛИЗ

Для обладающих четвертьволновой симметрией 2У-форм напряжения АИН с помощью разработанной программы на интервале изменения коэффициента модуляции от 0 до 1,15 с шагом 0,01 были рассчитаны углы переключений (рис. 4), спектры (рис. 5) и коэф-

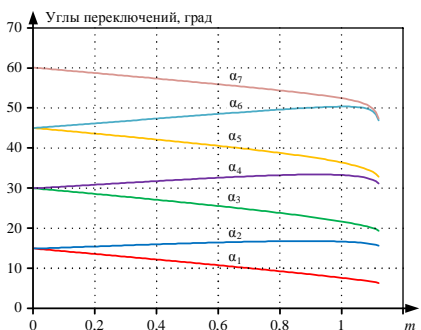
фициенты суммарных гармонических искажений (рис. 6) до 50-й гармоники для шести ЗПИ с УВГ: №1 – 5 и 7; №2 – 5, 7, 11 и 13; №3 – 5, 7, 11, 13, 17 и 19; №4 – 5, 7, 11, 13, 17, 19; 23 и 25; №5 – 5, 7, 11, 13, 17, 19; 23, 25; 29 и 31; №6 – 5, 7, 11, 13, 17, 19; 23, 25; 29, 31, 35 и 37.



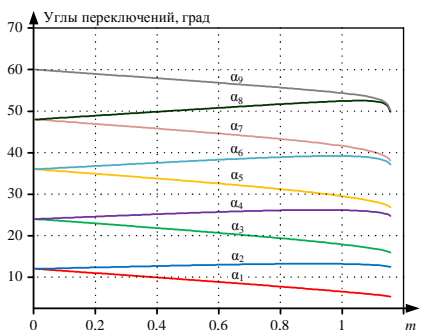
а



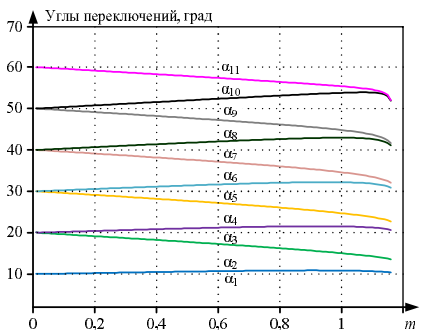
б



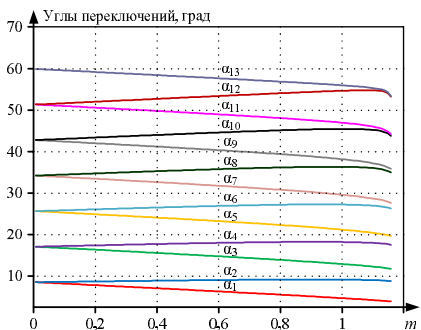
в



г



д



е

Рис. 4. Углы переключений ЗПИ с УВГ при 2У-форм напряжения АИН:

а) №1 – 5 и 7; б) №2 – 5, 7, 11 и 13; в) №3 – 5, 7, 11, 13, 17 и 19; г) №4 – 5, 7, 11, 13, 17, 19; 23 и 25; д) №5 – 5, 7, 11, 13, 17, 19; 23, 25; 29 и 31; е) №6 – 5, 7, 11, 13, 17, 19; 23, 25; 29, 31, 35 и 37

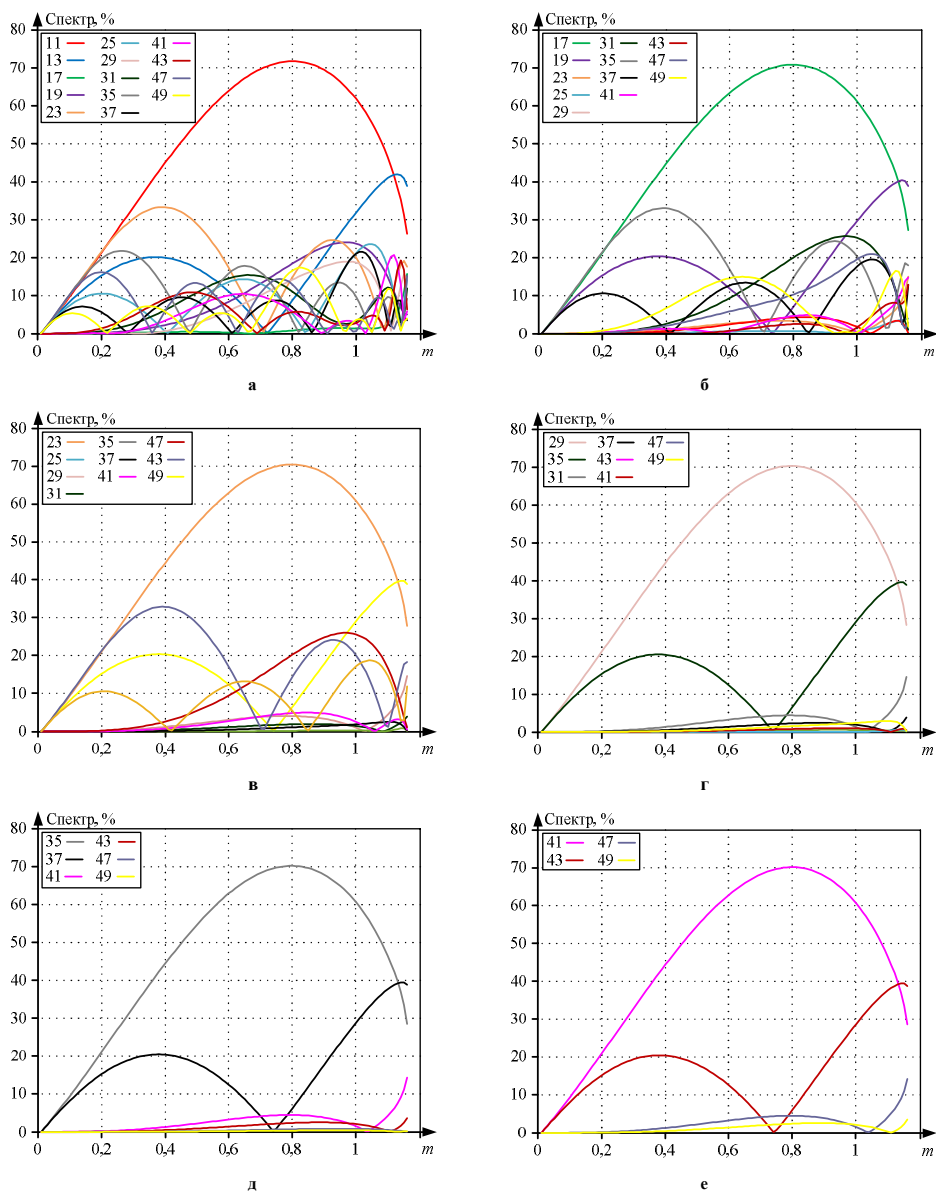


Рис. 5. Спектры 2У-форм напряжения АНН при ЗПИ с УВГ:

а) №1 – 5 и 7; б) №2 – 5, 7, 11 и 13; в) №3 – 5, 7, 11, 13, 17 и 19; г) №4 – 5, 7, 11, 13, 17, 19, 23 и 25;
 д) №5 – 5, 7, 11, 13, 17, 19, 23, 25, 29 и 31; е) №6 – 5, 7, 11, 13, 17, 19, 23, 25, 29, 31, 35 и 37

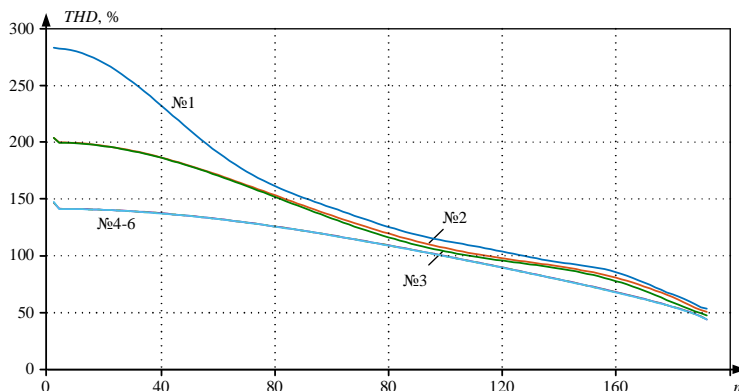


Рис. 6. Коэффициенты суммарных гармонических искажений 2У-форм напряжения АИН при ЗПИ с УВГ: №1 – 5 и 7; №2 – 5, 7, 11 и 13; №3 – 5, 7, 11, 13, 17 и 19; №4 – 5, 7, 11, 13, 17, 19; 23 и 25; №5 – 5, 7, 11, 13, 17, 19; 23, 25; 29 и 31; №6 – 5, 7, 11, 13, 17, 19; 23, 25; 29, 31, 35 и 37

Рассчитанные углы переключений на рис. 4 для шести 2У-форм напряжения АИН при ЗПИ с УВГ с четвертьволновой симметрией обладают плавностью и линейностью с нисходящим и восходящим трендами на полном диапазоне изменения коэффициента модуляции. Таким образом, при правильных начальных углах алгоритм поиска метод Ньютона позволяет найти все необходимые решения функции (11) без разрывов и резких переходов.

Анализ полученных результатов на рис. 5 показал, что наибольшее влияние в спектре 2У выходного напряжения АИН при ЗПИ ШИМ с УВГ имеет та гармоника, которая является первой после последней удаленной (нечётной и не кратной трём). Например, при ЗПИ №1 при удалении 5-й и 7-й гармоник наибольшее влияние оказывает 11-я гармоника, а при ЗПИ №2 при удалении 5, 7, 11 и 13-й гармоник наибольшее влияние оказывает 17-я гармоника и т.д. Кроме того, было обнаружено, что уровни данных гармоник совпадают по величине при одних и тех же значениях коэффициентов модуляции. Например, 11-я гармоника у ЗПИ №1 с удалением 5-й и 7-й гармоник, 17-я гармоника у ЗПИ №2 с удалением 5, 7, 11 и 13-й гармоник и т.д., имеют максимумы при коэффициенте модуляции 0,8.

Следующим интересным наблюдением на рис. 5 является поведение второй гармоники после последней удаленной (нечётной и не кратной трём). Например, 13-я гармоника у ЗПИ №1 с удалением 5-й и 7-й гармоник, 19-я гармоника у ЗПИ №2 с удалением 5, 7, 11 и 13-й гармоник и т.д. Показано, что при коэффициенте модуляции в районе 0,75 данные гармоники полностью удаляются из спектра напряжения АИН.

Анализ зависимостей коэффициентов суммарных гармонических искажений (THD_{50}) от коэффициента модуляции на рис. 6 выявил интересный факт, который показывает, что THD являются одинаковыми у ЗПИ №2 и 3 и у ЗПИ №4-6. Таким образом, можно сделать вывод, что THD не является определяющим параметром качества выходного напряжения АИН при ЗПИ с УВГ. Также видно, что с увеличением коэффициента модуляции значения THD в рассматриваемых ЗПИ с УВГ снижается, а их разница нивелируется.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. В результате проведенных исследований на интервале изменения коэффициента модуляции от 0 до 1,15 с шагом 0,01 найдены углы переключений для шести обладающих четвертьволновой симметрией 2У-форм напряжения АИН при ЗПИ с УВГ: 5 и 7; 5, 7, 11 и 13; 5, 7, 11, 13, 17 и 19; 5, 7, 11, 13, 17, 19; 23 и 25; 5, 7, 11, 13, 17, 19; 23, 25; 29 и 31; 5, 7, 11, 13, 17, 19; 23, 25; 29, 31, 35 и 37. Все зависимости углов переключений от коэффициента модуляции облают плавными нисходящими и восходящими трендами. Полученные результаты могут быть использованы на практике в алгоритмах ШИМ АИН или активного выпрямителя напряжения.

2. Получены спектры до 50-й гармоники выходного напряжения АИН на интервале изменения коэффициента модуляции от 0 до 1,15 с шагом 0,01 при шести ЗПИ с УВГ. В результате исследования показано, каким образом меняются уровни каждой гармоники. Опираясь на полученные результаты, определено влияние каждой последующей гармоники в диапазоне коэффициента модуляции при конкретно взятой ЗПИ с УВГ. Полученные результаты могут быть использованы для выбора пассивных фильтров, а также определению наиболее опасных зон влияния резонанса в электрической цепи.

3. Получены результаты расчёта коэффициентов суммарных гармонических искажений до 50-й гармоники для шести ЗПИ с УВГ. Анализ полученных результатов позволяет сделать вывод, что с увеличением коэффициента модуляции значения THD в рассматриваемых ЗПИ с УВГ снижается, а их разница нивелируется.

4. Проведенные исследования перспективны при разработке методов ЗПИ ШИМ с УВГ для силовых преобразователей с ограниченной частотой переключений полупроводниковых модулей, решении проблем обеспечения их электромагнитной совместимости, повышении энергоэффективности и оптимизации потерь мощности.

*Работа выполнена при финансовой поддержке
Гранта Президента Российской Федерации для мо-
лодых ученых – кандидатов наук МК-3803.2022.4.*

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Dahidah M.S.A., Konstantinou G., Agelidis V.G. A review of multilevel selective harmonic elimination PWM: Formulations, solving algorithms, implementation and applications // IEEE Transactions on Power Electronics. 2015. Vol. 30. No. 8. Pp. 4091-4106. doi: 10.1109/TPEL.2014.2355226
2. Agelidis V.G., Balouktsis A., Balouktsis I. On applying a minimization technique to the harmonic elimination PWM control: The bipolar waveform // IEEE Transactions on Power Electronics. 2004. Vol. 2. No. 2. Pp. 41-44. doi: 10.1109/LPEL.2004.831157
3. Multiple sets of solutions for harmonic elimination PWM bipolar waveforms: Analysis and experimental verification / V.G. Agelidis, A. Balouktsis, I. Balouktsis, C. Cossar // IEEE Transactions on Power Electronics. 2006. Vol. 21. No. 2. Pp. 415-421. doi: 10.1109/TPEL.2005.869752
4. Digital implementation of selective harmonic elimination techniques in modular current source rectifier / J.I. Guzman, P.E. Melin, J.R. Espinoza, L.A. Moran, C.R. Baier, J.A. Munoz, G.A. Guinez // IEEE Transactions on Industrial Informatics. 2013. Vol. 9. No. 2. Pp. 1167-1177. doi: 10.1109/TII.2012.2210232

5. Enjeti P.N., Lindsay J.F. Solving nonlinear equations of harmonic elimination PWM in power control // IEEE Electronics Letters. 1987. Vol. 23. No. 12. Pp. 656-657. doi: 10.1049/el:19870469
6. Holmes D.G., Lipo T.A. Pulse Width Modulation for Power Converters: Principles and Practice. Wiley-IEEE Press, 2003. 744 p.
7. Konstantinou G., Agelidis V.G. Bipolar switching waveform: Novel solution sets to the selective harmonic elimination problem // IEEE International Conference on Industrial Technology. IEEE, 2010. Pp. 696-701. doi: 10.1109/ICIT.2010.5472718
8. Цзин Тао. Разработка методов расчёта и алгоритма смены предварительно запрограммированных широкоимпульсно модулируемых последовательностей переключений полупроводниковых модулей трёхфазного трёхуровневого активного выпрямителя напряжения с фиксирующими диодами: дис. ... канд. техн. наук. 05.09.12 / Цзин Тао. Челябинск, 2021.
9. Jessy Ançay Selective Harmonic Elimination for medium voltage drives // Официальный сайт «Imperix Ltd», URL: <https://imperix.com/doc/implementation/selective-harmonic-elimination> (дата обращения 27.04.2023)
10. Jessy Ançay PP-PWM – Programmed Patterns PWM // Официальный сайт «Imperix Ltd», URL: <https://imperix.com/doc/software/programmed-pattern-pwm> (дата обращения 27.04.2023)

Поступила в редакцию 30 марта 2023 г.

Принята к печати 04 мая 2023 г.

INFORMATION IN ENGLISH

TWO-LEVEL OUTPUT VOLTAGE WAVEFORMS OF VSI BASED ON SELECTIVE HARMONIC ELIMINATION PWM

Aleksandr S. Maklakov

Ph.D. (Engineering), Associate Professor, Senior Researcher, Research and Innovation Services, South Ural State University, Chelyabinsk, Russia, alexandr.maklakov.ru@ieee.org, <https://orcid.org/0000-0001-7950-708X>

Alexey A. Antonenko

Postgraduate Student, Department of Automation and Control, Moscow Polytechnic University, Moscow, Russia, alexei-antonenko1999@yandex.com, <https://orcid.org/0009-0006-5779-1052>

Currently, pulse-width modulation (PWM) methods based on fixed carrier signals are widely used for voltage source inverters (VSI). These methods include the well-known sinusoidal PWM (SPWM) and space vector PWM (SVPWM). However, there is an alternative PWM method, in which individual pulses are not limited by the sample period of the reference carrier signal, but it can vary in width and position over the full period of the VSI output voltage signal within the symmetry. This method in international literature is referred to as Programmed Pulse Pattern PWM (PPWM). In this article, an analysis of the PPWM with selective harmonic elimination (SHE) for two-level (2L) forms of the VSI output voltage will be carried out. SHE is one of the earliest and most common ways to implement PPWM, which is aimed at removing lower order harmonics in accordance with a given number of switching. As a result of the research, six PPWM SHE were calculated for 2L quarter-wave symmetry VSI voltage forms (from the 5th and 7th harmonics to the 35th and 37th harmonics). The PPWM patterns were graphically presented by the dependences of the angles and a modulation index. The spectra and the total harmonic distortion coefficients up to the 50th harmonic of the VSI output voltage were obtained in the modulation index range from 0 to 1.15 with a step of 0.01. The most significant results of the conducted research are the obtained dependences of individual harmonic components on the modulation index. The research results have

perspectives to develop PPWM with SHE methods for power converters to limit switching frequency of semiconductor modules, solve the electromagnetic compatibility problems, increase energy efficiency and optimize power losses.

Keywords: power converters, pulse-width modulation, programmed pulse pattern, selective harmonic elimination, voltage source inverter

REFERENCES

1. Dahidah M.S.A., Konstantinou G., Agelidis V.G. A review of multilevel selective harmonic elimination PWM: Formulations, solving algorithms, implementation and applications. IEEE Transactions on Power Electronics. 2015, vol. 30(8), pp. 4091–4106. doi:10.1109/TPEL.2014.2355226
2. Agelidis V.G., Balouktsis A., Balouktsis I. On applying a minimization technique to the harmonic elimination PWM control: The bipolar waveform. IEEE Transactions on Power Electronics. 2004, vol. 2(3), pp. 41–44. doi: 10.1109/LPEL.2004.831157
3. Agelidis V.G., Balouktsis A., Balouktsis I., Cossar C. Multiple sets of solutions for harmonic elimination PWM bipolar waveforms: Analysis and experimental verification. IEEE Transactions on Power Electronics. 2006, vol. 21(2), pp. 415–421. doi:10.1109/TPEL.2005.869752
4. Guzman J.I., Melin P.E., Espinoza J.R., Moran L.A.,

- Baier C.R., Munoz J.A., Guínez G.A. Digital implementation of selective harmonic elimination techniques in modular current source rectifier. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*. 2013, vol. 9(2), pp. 1167-1177. doi: 10.1109/TII.2012.2210232
 5. Enjeti P.N., Lindsay J.F. Solving nonlinear equations of harmonic elimination PWM in power control. *IEEE Electronics Letters*. 1987, vol. 23(12), pp. 656-657. doi:10.1109/TPEL.2014.2355226
 6. Holmes D.G., Lipo T.A. *Pulse Width Modulation for Power Converters: Principles and Practice*. Wiley-IEEE Press, 2003. 744 p.
 7. Konstantinou G., Agelidis V. G. Bipolar switching waveform: Novel solution sets to the selective harmonic elimination problem. *International Conference on Industrial Technology*. IEEE, 2010, pp. 696-701. doi:10.1109/ICIT.2010.5472718
 8. Jing T. *Razrabotka metodov rascheta i algoritma smeny predvaritelno zaprogramirovannykh shirotno-impulсно moduliruemyykh posledovatelnoyey pereklyucheniyy poluprovodnikovyykh module tryekhfaznogo tryekhurovnevoego aktivnogo vypryamitelya napryazheniya s fiksiruyushchimi diodami*. Kand. Diss. [Development of calculation methods and algorithm for changing preprogrammed pulse width modulation switching patterns of semiconductor modules for three-phase three-level neutral-point clamped active front end. Kand. Diss.]. Chelyabinsk, 2021.
 9. Jessy Ançay. Selective Harmonic Elimination for medium voltage drives. Available at: <https://imperix.com/doc/implementation/selective-harmonic-elimination> (accessed 27 April 2023)
 10. Jessy Ançay. PP-PWM – Programmed Patterns PWM. Available at: <https://imperix.com/doc/software/programmed-pattern-pwm> (accessed 27 April 2023)
- Маклаков А.С., Антоненко А.С. Исследование поведения спектров напряжения двухуровневого АИН при ШИМ с удалением выделенных гармоник // *Электротехнические системы и комплексы*. 2023. № 2(59). С. 65-72. [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2023-2\(59\)-65-72](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2023-2(59)-65-72)
- Maklakov A.S., Antonenko A.A. Two-level Output Voltage Waveforms of VSI based on Selective Harmonic Elimination PWM. *Elektrotehnicheskie sistemy i komplekсы* [Electrotechnical Systems and Complexes], 2023, no. 2(59), pp. 65-72. (In Russian). [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2023-2\(59\)-65-72](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2023-2(59)-65-72)

МОНИТОРИНГ, КОНТРОЛЬ И ДИАГНОСТИКА ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЯ

УДК 620.179.143

[https://doi.org/10.18503/2311-8318-2023-2\(59\)-73-83](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2023-2(59)-73-83)

Брякин И.В.¹, Бочкарев И.В.²

¹ Институт машиноведения и автоматизации Национальной академии наук Кыргызской Республики, Бишкек

² Кыргызский государственный технический университет им. И. Раззакова, Бишкек

ФЕРРОЗОНД С МУЛЬТИФАКТОРНЫМ РЕЖИМОМ ВОЗБУЖДЕНИЯ

Рассмотрены системы возбуждения известных ферроиндукционных преобразователей (ФИП). Предложен вариант ФИП с новым мультифакторным способом возбуждения, основанным на совместном действии электромагнитно-акустического (ЭМА) и магнитомодуляционного (ММЭ) эффектов. Описан вариант конструктивного решения феррозондового датчика (ФД), реализующего предложенный способ возбуждения. Подробно рассмотрены физические процессы, положенные в основу данного технического решения. Показано, что в предложенном датчике одновременно реализуются пять режимов функционирования, сопровождаемые соответствующими физическими эффектами: 1) режим мостового индуктивно-емкостного делителя напряжения; 2) режим ЭМА-преобразователя, реализующего процесс возникновения пространственно-периодических акустических волн; 3) режим μ -преобразования за счет ЭМА-эффекта; 4) режим индуктора, при котором измерительные катушки помимо своего прямого назначения дополнительно выполняют функции элементов формирования возбуждающего магнитного поля; 5) режим μ -преобразования за счет ММЭ. Проведенный анализ возникающих физических эффектов и их аналитическое описание показали, что предлагаемый ФД с мультифакторным режимом возбуждения обладает следующими преимуществами: 1) существенным конструктивным упрощением, которое связано с тем, что измерительные катушки совмещают такие две функции, как генерация переменного магнитного поля возбуждения и регистрация информационного сигнала; 2) повышенной помехозащищенностью за счет использования измерительных катушек в качестве плечевых элементов емкостно-индуктивного измерительного моста с разностным сигналом его измерительной диагонали, что обеспечивает компенсацию синфазных составляющих помехи и последствий температурного дрейфа; 3) повышенной чувствительностью без ухудшения точности преобразования за счет использования различных физических эффектов при резонансном воздействии соответствующими физическими полями; 4) пониженным энергопотреблением.

Ключевые слова: ферроиндукционный преобразователь, феррозондовый датчик, электромагнитное поле, электромагнитно-акустический эффект, акустические волны, напряженность переменного магнитного поля, вихревые токи, модуляция магнитной проницаемости

ВВЕДЕНИЕ

В состав измерительных приборов и систем, предназначенных для получения сведений о физических параметрах объекта измерений, входят различные типы преобразователей. Так, в магнитной дефектоскопии для выявления подповерхностных дефектов, при аэромагнитных исследованиях земной коры, при поиске и локации скрытых подповерхностных объектов, при геофизических исследованиях для измерений напряженности и магнитной индукции магнитного поля Земли, в исследованиях магнитных полей космического пространства, а также для решения большого количества других задач используют ферроиндукционные (ферромодуляционные) преобразователи. Очевидно, что значимость и важность таких измерений определяют наличие большого многообразия способов и средств магнитометрии [1-6]. При этом, вследствие целого ряда положительных качеств, широкое распространение имеют ФИП, содержащие в своем составе феррозондовый датчик [7-10]. Например, феррозондовый метод неразрушающего контроля основан на обнаружении феррозондовым датчиком магнитных полей рассеяния, возникающих в зоне подповерхностных дефектов, и предназначен для выявления в контролируемом объекте наличия трещин, раковин и т.п. [11].

ФД по сравнению с другими датчиками имеют ряд преимуществ, а именно: небольшие габариты и потребляемую мощность, высокие чувствительность и

надежность работы, стойкость к внешним воздействиям и др. Поэтому ФИП на базе ФД находятся в процессе постоянных исследований, направленных на совершенствование их основного функционального элемента – ФД [12-16]. Следовательно, задача совершенствования ФД для прецизионных ФИП является актуальной, а исследования в данной области имеют важное научно-техническое и практическое значение.

АНАЛИЗ ПРИНЦИПОВ ПОСТРОЕНИЯ ФЕРРОИНДУКЦИОННЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ

ФИП представляют собой достаточно сложную электромагнитную систему, содержащую в качестве основных рабочих узлов ферромагнитный элемент (сердечник) и одну или несколько обмоток, выполняющих функции возбуждающих или измерительных элементов. Сердечники выполняются из магнитомягкого материала – пермаллоя и имеют большое количество конструктивных модификаций: с различным количеством и конфигурацией стержней; с разомкнутыми и замкнутыми сердечниками; в виде напыления и т.д.

Чувствительным элементом в ФИП является ферромагнитный сердечник. Обычно используются активные ФИП, в которых используют соответствующие узлы для возбуждения магнитного поля. Работа таких ФИП основана на изменении под воздействием измеряемого магнитного поля магнитной проницаемости μ ферромагнитного сердечника, возбуждаемого переменным магнитным полем с постоянной напряженностью. Указанные изменения отражаются в наведенной

в измерительной обмотке ЭДС, которая и является выходным информационным сигналом.

В общем случае ФИП различаются способом возбуждения ферромагнитного сердечника. Поэтому, прежде чем перейти к рассмотрению особенностей разработанного способа возбуждения ФД, кратко рассмотрим особенности известных типов преобразователей.

Известны три основных способа возбуждения сердечника ФИП: 1 – механическое; 2 – тепловое; 3 – магнитное [1]. Конструктивно указанные способы возбуждения реализуются следующим образом.

Работа ФИП первого типа основана на применении *механического элемента возбуждения*, например кварцевой пластинки, которая под действием подаваемого на нее электрического напряжения резонансной частоты периодически изменяет свои линейные размеры (обратный пьезоэлектрический эффект) и воздействует тем самым на контактируемый с ней ферромагнитный сердечник. Это приводит к периодическому изменению магнитной проницаемости сердечника. Поскольку на сердечник воздействует также измеряемое магнитное поле, то наводимая ЭДС в измерительной катушке будет прямо пропорциональна индукции B измеряемого поля. Однако при явной простоте реализации данный способ возбуждения преобразователя обеспечивает невысокую чувствительность за счет незначительного диапазона изменения магнитной проницаемости.

ФИП второго типа с *тепловым возбуждением* содержит в качестве элемента возбуждения тепловой инжектор с малой тепловой инерционностью, к которому прижат ферромагнитный элемент, выполненный из материала с низкой точкой Кюри. По инжектору одновременно пропускают постоянный и переменный ток, обеспечивая тем самым пульсацию температуры пластинки вблизи точки Кюри и, соответственно, пульсацию ее магнитной проницаемости. При дополнительном воздействии на сердечник внешнего контролируемого магнитного поля ЭДС, наводимая в измерительной катушке, будет пропорциональна этому полю. Поскольку пульсации магнитной проницаемости вблизи точки Кюри имеют значительную глубину модуляции, то ФИП с тепловым способом возбуждения имеет более высокую чувствительность, чем с механическим, и может использоваться для измерения слабых магнитных полей [17]. Однако для таких ФИП требуются материалы со специфическими свойствами, что усложняет их изготовление но и обуславливает значительную зависимость точности их работы от внешних условий.

ФИП третьего типа с *магнитным возбуждением*, которые получили название «феррозонд», реализуют нелинейную зависимость $\mu = f(H)$, характерную для ферромагнитных материалов. Конструктивно они содержат стержень из магнитоякого ферромагнитного материала, на котором расположена катушка возбуждения, обеспечивающая периодические изменения его магнитной проницаемости.

Изменяющийся магнитный поток наводит в измерительной катушке ЭДС, причем в случае отсутствия внешнего измеряемого поля ЭДС будет изменяться по гармоническому закону, а при его появлении величина и гармонический состав ЭДС изменятся и появятся четные гармоники с величиной, прямо пропорциональной напряженности измеряемого поля. За счет

этого на выводах измерительной катушки появляется информационный сигнал в виде напряжения, который содержит целый комплекс данных об измеряемом магнитном поле: амплитуду, частоту и направление действия вектора напряженности. Именно эти свойства являются преимуществом феррозондов по сравнению с ФИП, использующими другие способы возбуждения.

Для всех трех типов ФИП в соответствии с законом электромагнитной индукции для ЭДС, индуцированной в измерительной обмотке, справедливо уравнение [1, 18]:

$$\begin{aligned} e &= -w s_i i_w^0 \frac{d}{dt} \mathbf{B}(t) = \\ &= -w s_i i_w^0 \frac{d}{dt} [\hat{\mu}^*(t) \mathbf{H}_0], \end{aligned} \quad (1)$$

где i_w^0 – единичный вектор, совпадающий с плоскостью витков обмотки; w – число витков измерительной обмотки; s_i – площадь поперечного сечения сердечника в направлении i_w^0 ; $\hat{\mu}^*(t)$ – тензор относительной магнитной проницаемости материала сердечника; \mathbf{B} и \mathbf{H}_0 – векторы индукции и напряженности измеряемого магнитного поля.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Предлагается *ФИП* с новым способом мультифакторного возбуждения, основанным на электромагнитно-акустическом и магнитомодуляционном эффектах. Вариант конструктивного решения нового типа феррозондового датчика представлен на **рис. 1, а**.

Полуэлементы 1 и 2 ФД изготовлены из электропроводящего феррита, например марганецникелевого, с удельным электрическим сопротивлением $\rho \leq 50$ Ом·см. Электрод 8 выполнен из электропроводящего материала (медь, алюминий и т.п.) в виде тонкостенной цилиндрической трубки с продольной прорезью по всей ее длине (**рис 1, б**) и является общим элементом возбуждения для ИК₁ и ИК₂. Особенностью данного типа ФД является применение в качестве сигнальных выходов ИК₁ и ИК₂ (относительно «корпуса») разноименных выводов их электрических обмоток, что, в свою очередь, является одним из основных условий для нормального функционирования рассматриваемого варианта ФД.

Следует отметить, что продольный разрез боковой поверхности цилиндрического электрода 8 по всей его длине предотвращает эффект возможной экранировки первого и второго полуэлементов ФД от воздействия переменного возбуждающего магнитного поля. Иными словами, данная особенность конструктивного исполнения цилиндрического электрода 8 препятствует индуцированию в нем вихревых токов Фуко, наличие которых могло бы привести к возникновению паразитного вторичного переменного магнитного поля, нарушающего нормальный режим функционирования ФД.

Если рассматривать магнитную проницаемость μ в качестве частного параметра материала полуэлементов ФД, на который оказывается несколько воздействий, то в этом случае основным воздействием можно считать магнитное поле возбуждения, а дополнительным – акустическое поле, являющееся проявлением ЭМА-эффекта.

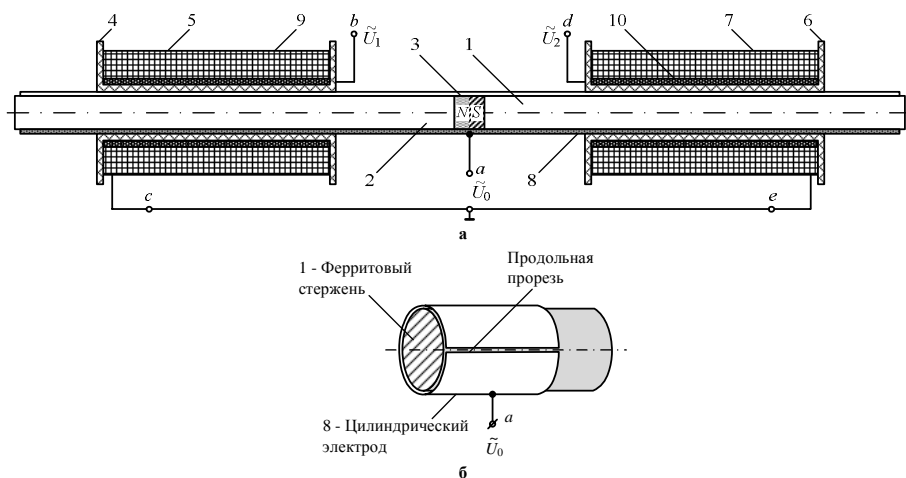


Рис. 1. Вариант конструктивного решения ФД (а) и его функциональных элементов (б):

1 и 2 – первый и второй полуэлементы (структурные элементы) ФД; 3 – постоянный магнит ПМ; 4 и 6 – диэлектрические каркасы соответственно первой и второй измерительных катушек (ИК₁ и ИК₂); 5 и 7 – электрические обмотки соответственно ИК₁ и ИК₂; 8 – цилиндрический электрод (ЦЭ); 9 и 10 – первые нижние ряды проводочных обмоток соответственно ИК₁ и ИК₂; «а» – клемма подключения напряжения возбуждения U_0 относительно «корпуса»; «б» и «д» – клеммы подключения выходных сигналов соответственно ИК₁ и ИК₂ относительно «корпуса»

Предлагаемый вариант ФД является по существу параметрическим модулятором, где модуляция измеряемой величины (постоянное магнитное поле) осуществляется за счет двухфакторного воздействия на частный параметр.

Рассматриваемый вариант ФД, как и любой другой технический объект, представляет собой сложную иерархическую систему, характеризующуюся множеством структурных элементов и связями между ними. Функционирование подобной системы основывается на проявлении множества взаимосвязанных физических эффектов, совокупность которых фактически является физической схемой ФД. Обобщенная физическая схема, лежащая в основе функционирования предлагаемого ФД, представлена на рис. 2. Данная физическая схема ФД дает полное представление о том, какие заданные входные параметры преобразуются в заданные выходные параметры, то есть отражает рабочую функцию ФД, а схемы отдельных физических эффектов раскрывают физическую основу ФД и показывают функциональные взаимосвязи между его структурными элементами.

Для большего понимания сути предлагаемого технического решения более подробно рассмотрим используемый эффект ЭМА-преобразования. Установлено, что в широком диапазоне частот, магнитных полей и температур прослеживаются различные механизмы бесконтактного преобразования электромагнитных и звуковых волн на границе металлических материалов, объединяемые общим понятием ЭМА-преобразования [19]. Суть подобного преобразования состоит в том, что в среде, не обладающей ни пьезоэлектрическими, ни магнитоstrictionными свойствами, под действием падающей электромагнитной волны возбуждаются

ультразвуковые волны той же или кратной частоты.

Следует подчеркнуть, что принципиальное значение имеет наличие границы раздела сред, как места сосредоточения источника возбуждения. При этом в преобразовании участвуют подсистемы ферромагнетика различной физической природы: электрическая, магнитная, магнитоупругая и упругая. Этим объясняется чувствительность ЭМА-преобразования к различным изменениям, происходящим в исследуемых образцах.

Воспользуемся резонансной методикой ЭМА-преобразования, при которой используются образцы простой формы (например, цилиндры), в которых с помощью проходных катушек в режиме непрерывной генерации устанавливаются резонансы стоячих волн, а подмагничивающее поле создается постоянным магнитом [20].

Основными параметрами резонансного ЭМА-преобразования, несущими информацию о структурных изменениях и о напряженно-деформированном состоянии, являются:

- 1 – амплитуда принятого сигнала после двойного преобразования, прямо пропорциональная динамической магнитострикции;
- 2 – частота акустического резонанса, прямо пропорциональная скорости;
- 3 – акустическая добротность.

Прямым ЭМА-преобразованием принято считать преобразование электромагнитных волн в упругие колебания, а обратным явлением будет преобразование упругих волн в электромагнитные волны. Причем преобразование «электромагнитное поле – упругие колебания – электромагнитное поле» можно считать двойным ЭМА-преобразованием [21].

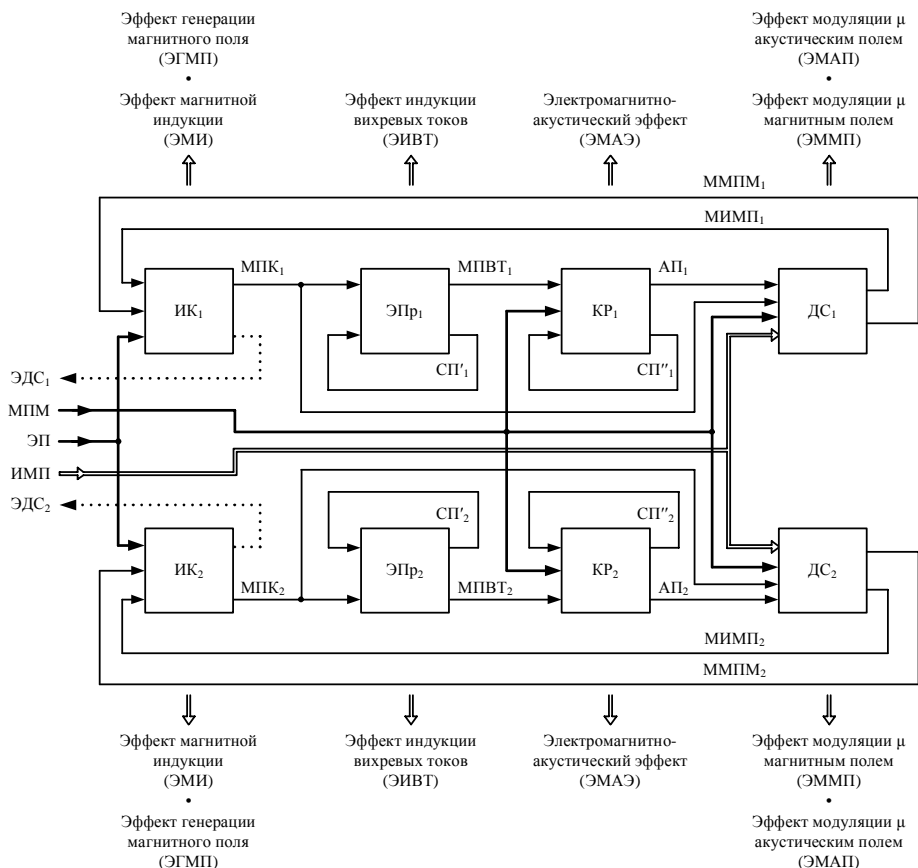


Рис. 2. Физическая схема ФД:

ИК₁ и ИК₂ – измерительные катушки соответственно первого и второго полуэлементов ФД; ЭП₁ и ЭП₂ – электроны проводимости ферритов соответственно первого и второго полуэлементов ФД; КР₁ и КР₂ – кристаллическая решетка материала соответственно первого и второго полуэлементов ФД; ДС₁ и ДС₂ – доменные системы материала соответственно первого и второго полуэлементов ФД; ЭДС₁ и ЭДС₂ – электродвижущие силы соответственно ИК₁ и ИК₂; ММП – магнитное поле постоянного магнита; ИМП – измеряемое постоянное магнитное поле; ЭП – переменное электрическое поле, создаваемое на ЦЭ разностью потенциалов между клеммой подключения напряжения возбуждения и «корпусом»; МПК₁ и МПК₂ – магнитные поля, индуцированные токами возбуждения ИК₁ и ИК₂ в соответствующих полуэлементах ФД; СП₁, СП'₁, СП₂, СП'₂ – силовые поля разного уровня, проявляющиеся в качестве физических эффектов в кристаллических структурах соответственно первого и второго полуэлементов ФД; МПВТ₁ и МПВТ₂ – магнитные поля, создаваемые вихревыми токами соответственно в первом и втором полуэлементах ФД; АП₁ и АП₂ – акустические поля, возбуждаемые в кристаллических структурах соответственно первого и второго полуэлементов ФД

Обратный эффект, то есть прием акустических сигналов с помощью ЭМА-преобразования, осуществляется благодаря возникновению ЭДС в обмотке катушки, которая подвергается электромагнитным излучениям свободных электронов материала ферритовых сердечников ФС₁ и ФС₂ под действием акустических волн.

При этом в соответствии с теоремой взаимности акустические характеристики ЭМА-преобразователей при излучении и приеме оказываются идентичными. Например, избирательность волн и диаграммы направленности излучения ЭМА-преобразователей соответ-

ствуют таковым при их работе в качестве приемников.

Фактически в основе ЭМА-преобразования лежит явление взаимной трансформации упругих и электромагнитных полей.

Преобразование полей в твердых телах возможно за счет многих физических явлений, которые ответственны, например, за магнитострикцию, силу Лоренца, силу, обусловленную градиентом намагниченности. При этом уравнения электродинамики, описывающие силы Лоренца и намагничивание, вводятся и используются вместе со стандартной теорией упругости для

описания генерации и приема волн, а магнитострикция включается в модель с помощью соответствующих уравнений, которые связывают упругое поле с электромагнитным полем.

Обобщая, можно констатировать, что ЭМА-метод возбуждения и приема ультразвуковых колебаний основывается на трех эффектах взаимодействия электромагнитного поля с компонентами структуры материала объекта воздействия [22]:

1. Магнитострикция, представляющая собой физический эффект, при котором воздействие изменяющегося внешнего магнитного поля изменяет геометрические размеры ферромагнитных материалов. При этом обратный этому эффект принято считать магнитоупругостью.

2. Магнитное взаимодействие, возникающее, когда ферромагнитный материал и проводник с переменным электрическим током взаимно притягиваются и отталкиваются. Отталкивание и притяжение катушки приводят к обратному механическому воздействию на контролируемое изделие, в изделии возникают упругие колебания.

3. Электродинамическое взаимодействие, за счет которого в токопроводящем материале возбуждаются вихревые токи, которые взаимодействуют с постоянным магнитным полем и вызывают колебания, что, в свою очередь, приводит к возбуждению колебаний атомов, то есть кристаллической решетки материала (то есть появляются механические напряжения, которые приводят к возникновению упругих акустических колебаний).

В основе функционирования предлагаемого варианта ФД, определяемого прежде всего физическими свойствами самого материала полупризматических магнетометра, лежит электродинамическое взаимодействие. В этом случае пондеромоторные силы, возникающие при взаимодействии вихревых токов с первичным полем, и магнитные пондеромоторные силы, возникающие при взаимодействии первичного поля с ферромагнитным веществом, направлены встречно и при некоторых значениях параметров уравниваются. Изменением геометрии ФД и частоты электромагнитного поля можно смещать нулевую точку пондеромоторного взаимодействия. При этом в преобразовании участвуют такие подсистемы ферромагнетика различной физической природы, как электрическая, магнитная, магнитоупругая и упругая, что в конечном счете и объясняет высокую чувствительность ЭМА-преобразования к различным изменениям, происходящим в материале ΦC_1 и ΦC_2 .

Особенностью представленного варианта ФД является наличие пяти совмещенных режимов функционирования: 1 – режим мостового индуктивно-емкостного делителя напряжения; 2 – режим ЭМА-преобразователя (эмикона), реализующего процесс возникновения пространственно-периодических акустических волн; 3 – режим μ -преобразования за счет ЭМА-эффекта; 4 – режим индуктора, при котором измерительные катушки ИК₁ и ИК₂, помимо своего прямого назначения, дополнительно выполняют функции элементов формирования возбуждающего магнитного поля; 5 – режим μ -преобразования за счет магнитомодуляционного эффекта (ММЭ).

Рассмотрим в упрощенном виде основные особенности указанных режимов функционирования ФД:

1. Режим мостового индуктивно-емкостного делителя напряжения. Принципиальная электрическая схема замещения и включения рассматриваемого варианта ФД в рассматриваемом режиме функционирования представлены на рис. 3.

Для наглядности данный режим рассмотрим при условии $H_0 = 0$. В этом случае напряжение возбуждения $u_0 = U_{0\max} \sin \omega t$ (соответствующее комплексное значение \dot{U}_0) подается на электрические обмотки ИК₁ и ИК₂ соответственно через C'_{cb} и C''_{cb} , которые также являются электрическими параметрами ИК₁ и ИК₂, а выходные сигналы \dot{U}_1 и \dot{U}_2 снимаются с соответствующих входных концов электрических обмоток ИК₁ и ИК₂.

Будем считать, что при симметричном расположении ИК₁ и ИК₂ $R_1 = R_2 = R$; $L_1 = L_2 = L$; $C_1 = C_2 = C$; $C'_{cb} = C''_{cb} = C_{cb}$. Тогда с учетом того, что $\dot{Z}_{11} = R_1 + j\omega L_1$ и $\dot{Z}_{21} = R_2 + j\omega L_2$ – комплексные сопротивления соответственно ИК₁ и ИК₂; $\dot{Z}_{12} = -j/(\omega C_1)$ и $\dot{Z}_{22} = -j/(\omega C_2)$ – комплексное сопротивление межвитковых емкостей соответственно ИК₁ и ИК₂; $\dot{Z}_{13} = -j/(\omega C'_{cb})$ и $\dot{Z}_{23} = -j/(\omega C''_{cb})$ – комплексные сопротивления конденсаторов связи соответственно ИК₁ и ИК₂ для рассматриваемого типа ФД, будем иметь:

$$\begin{aligned} \dot{Z}_{11} &= \dot{Z}_{21}; \dot{Z}_{12} = \dot{Z}_{22}; \dot{Z}_{13} = \dot{Z}_{23}; \\ \omega &= \omega_p = \frac{1}{\sqrt{LC_{cb}}}, \end{aligned} \quad (2)$$

где $C_{cb} = 0,56 \cdot \ln(d_2/d_1)$; l – длина перекрываемой части обкладок конденсатора связи; d_1 и d_2 – соответственно диаметры внутренней и внешней обкладок конденсатора связи.

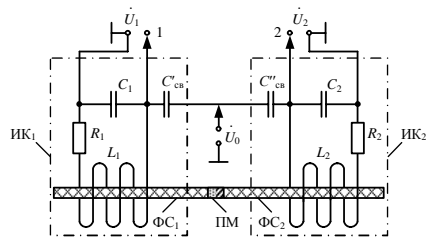


Рис. 3. Электрическая схема замещения и включения ФД для первого режима:

\dot{U}_0 – комплексная величина гармонического напряжения возбуждения измерительных катушек относительно «корпуса»; ΦC_1 и ΦC_2 – ферритовые сердечники полупризматических ФД, на которые воздействует измеряемое магнитное поле напряжением H_0 ; ПМ – постоянный магнит, создающий продольное магнитное поле в ΦC_1 и ΦC_2 с индукцией B_{cm} ; C_1 и C_2 – межвитковые емкости обмоток соответственно ИК₁ и ИК₂; R_1 и R_2 – активные сопротивления обмоток соответственно ИК₁ и ИК₂; L_1 и L_2 – индуктивности обмоток соответственно ИК₁ и ИК₂; C'_{cb} и C''_{cb} – конденсаторы связи соответственно ИК₁ и ИК₂, которые конструктивно являются конденсаторами с паразитными емкостями, образованными медным цилиндрическим электродом с коаксиально внутри расположенными ΦC_1 и ΦC_2 и первыми нижними рядами проводящих обмоток соответственно ИК₁ и ИК₂.

С учетом сделанных замечаний для выходных синфазных сигналов \dot{U}_1 и \dot{U}_2 соответственно с выходных концов измерительных катушек ИК₁ и ИК₂ (индуктивные элементы мостового делителя напряжения) будет справедливо равенство $\dot{U}_1 = \dot{U}_2$.

2. Режим ЭМА-преобразователя (эмикона). В этом режиме функционирования ФД протекающий через обмотку измерительных катушек ИК₁ и ИК₂ переменный электрический ток возбуждает на поверхности электропроводящего ферромагнетика вихревые токи, на которые при наличии статического магнитного поля соответствующей направленности воздействуют силы, передаваемые впоследствии на кристаллическую решетку через столкновения и другие взаимодействия. В качестве реакции на такие силы в структуре электропроводящего ферромагнетика возникают пространственно-периодические акустические волны.

3. Режим μ -преобразования за счет ЭМА-эффекта. Принципиальная электрическая схема замещения и включения предлагаемого варианта ФД для третьего режима функционирования представлена на рис. 4. В этом случае осуществляется механическое воздействие на доменную систему структуры материала сердечников полуэлементов ФД пространственно-периодическими акустическими волнами, фактически реализующими процесс модуляции магнитной проницаемости полуэлементов ФД. При этом следует отметить, что возникающие механические напряжения оказывают весьма значительное воздействие на состояние намагниченности. Поэтому при наличии измеряемого поля H_0 возникают соответствующие вариации этого поля, которые индуцируют в измерительных катушках ИК₁ и ИК₂ соответствующие парафазные акустомодуляционные ЭДС \dot{E}_{1AM} и $-\dot{E}_{2AM}$.

Для совмещенных во времени первого, второго и третьего режимов функционирования ФД, сопровождаемых соответствующими физическими эффектами, для разностного значения между $\dot{U}_{1\Sigma} = \dot{U}_1 + \dot{E}_{1AM}$ и $\dot{U}_{2\Sigma} = \dot{U}_2 - \dot{E}_{2AM}$ можем записать:

$$\begin{aligned} \Delta \dot{U}_{\Sigma} &= \dot{U}_{1\Sigma} - \dot{U}_{2\Sigma} = (\dot{U}_1 + \dot{E}_{1AM}) - (\dot{U}_2 - \dot{E}_{2AM}) = \\ &= \dot{E}_{1AM} + \dot{E}_{2AM}. \end{aligned} \quad (3)$$

С учетом того, что $|\dot{E}_{1AM}| = |\dot{E}_{2AM}| = |\dot{E}_{AM}|$, окончательно получим

$$\Delta \dot{U}_{\Sigma} = 2\dot{E}_{AM}. \quad (4)$$

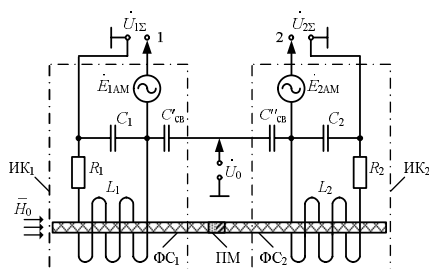


Рис. 4. Электрическая схема замещения и включения ФД для третьего режима

4. Режим индуктора, при котором протекающий через обмотки измерительных катушек ИК₁ и ИК₂ переменный электрический ток индуцирует в ферритовых сердечниках полуэлементов ФД вспомогательные магнитные поля (поля возбуждения).

5. Режим μ -преобразования за счет ММЭ. Принципиальная электрическая схема замещения и включения ФД для этого режима функционирования представлена на рис. 5.

При данном режиме функционирования ФД индуцированные в ферритовых сердечниках полуэлементов ФД вспомогательные магнитные поля осуществляют процесс модуляции магнитной проницаемости этих ферритовых сердечников, который, в свою очередь, при наличии измеряемого поля H_0 вызывает соответствующие вариации этого поля. При этом возникшие вариации измеряемого магнитного поля H_0 индуцируют в измерительных катушках ИК₁ и ИК₂ соответствующие парафазные магнитомодуляционные ЭДС \dot{E}_{1MM} и $-\dot{E}_{2MM}$.

Для совмещенных во времени первого, четвертого и пятого режимов функционирования ФД, сопровождаемых соответствующими физическими эффектами, разностное значение между $\dot{U}_{1\Sigma} = \dot{U}_1 + \dot{E}_{1MM}$ и $\dot{U}_{2\Sigma} = \dot{U}_2 - \dot{E}_{2MM}$ определится следующим выражением:

$$\begin{aligned} \Delta \dot{U}_{\Sigma} &= \dot{U}_{1\Sigma} - \dot{U}_{2\Sigma} = \\ &= (\dot{U}_1 + \dot{E}_{1MM}) - (\dot{U}_2 - \dot{E}_{2MM}) = \dot{E}_{1MM} + \dot{E}_{2MM}. \end{aligned} \quad (5)$$

С учетом того, что $|\dot{E}_{1MM}| = |\dot{E}_{2MM}| = |\dot{E}_{MM}|$, окончательно получим

$$\Delta \dot{U}_{\Sigma} = 2\dot{E}_{MM}. \quad (6)$$

Для совмещенных во времени всех пяти режимов функционирования ФД можем записать выражение вида

$$\Delta \dot{U}_{\Sigma} \doteq 2(E_{1AM} + E_{2AM}). \quad (7)$$

Рассмотрим более подробно суть процесса взаимодействия первичного электромагнитного поля со вторичным и преобразование энергии электромагнитного поля в энергию акустического поля.

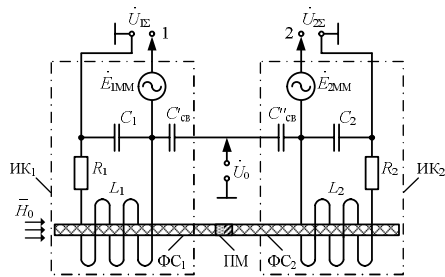


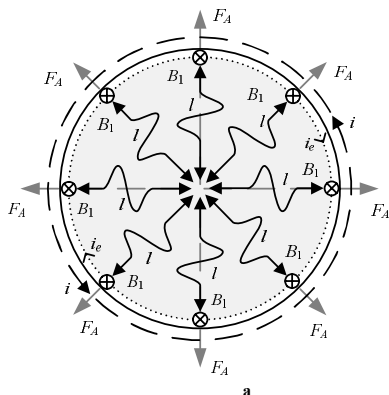
Рис. 5. Электрическая схема замещения и включения ФД для пятого режима

При размещении источника электромагнитного поля, например эмикона проходного типа, у поверхности произвольной электропроводящей среды в ней при наличии такого поля каждый электрон испытывает действие соответствующей силы, и все электроны, находящиеся внутри сферы Ферми, получают соответствующее ускорение в электропроводящей среде.

Такое направленное движение валентных электронов приводит к переносу заряда в твёрдом теле, то есть к электрическому вихревому току.

Следует отметить, что вихревые токи, наводимые в электропроводящей среде электромагнитным полем эмикона, отражают энергию обратно в эмикон, а распределение носителей заряда согласно классическому представлению, подчиняясь экспоненциальному закону, происходит от максимального поверхностного значения до минимального внутри электропроводящей среды, при этом с резкой частотной зависимостью. При этом электроны, движущиеся у поверхности электропроводящей среды и вносящие свой вклад в электрический вихревой ток, подвержены действию (силы Лоренца) магнитного поля эмикона, стремящегося отеснить электроны от поверхности.

В этом случае электронам легче изменить своё движение, если они находятся вблизи поверхности среды, по сравнению с электронами, находящимися в глубине этой среды. Поскольку носители всегда выбирают оптимальную траекторию (соответствующую условию минимальной энергии), то носители, образующие вихревой ток, под действием сил Лоренца перемещаются в глубь среды от поверхности, создавая зону у поверхности среды без носителей заряда. В этом случае само явление электромагнитной генерации звука в электропроводящих средах состоит в том, что переменное электромагнитное поле источника возбуждения взаимодействует с электронной системой электропроводящей среды, а возмущение электронов внешним электромагнитным воздействием, в свою очередь, приводит к движению упругой среды за счет взаимодействия электронов с решеткой и распространению возмущения в виде звуковых волн в глубь среды.



Особенности конструкции эмикона проходного типа представлены на рис. 6. Фактически на рис. 6 схематически показана конструкция и обособивается принцип действия проходного ЭМА-преобразователя радиальных продольных L -волн, где возбуждение продольных ультразвуковых волн осуществляется за счет электродинамического механизма.

Распространение преимущественно продольных волн достигается благодаря взаимной ориентации поля подмагничивания B_{CM} , направленного вдоль оси Z , и вихревых токов i_e , текущих по замкнутым контурам внешней поверхности соответственно FC_1 и FC_2 полуэлементов ФД. Для указанной конструкции проходного ЭМА-преобразователя характерно одновременное излучение упругих волн из каждой точки на поверхности FC_1 и FC_2 полуэлементов ФД, расположенной соответственно под ИК₁ и ИК₂. Таким образом, волны распространяются во всех радиальных направлениях в поперечном сечении объекта.

Модели процесса распространения продольных L -волн по сечению цилиндра на плоскости и в трехмерной постановке представлены соответственно на рис. 7, а и рис. 7, б.

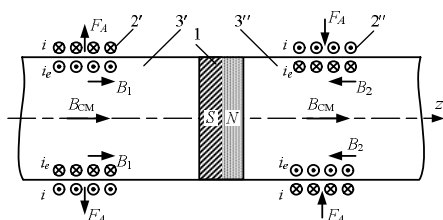


Рис. 6. Конструкция и принцип действия эмикона проходного типа:

1 – ПМ с осевой поляризацией (источник постоянного магнитного поля); 2' и 2'' – электрические обмотки соответственно ИК₁ и ИК₂; 3' и 3'' – соответственно FC_1 и FC_2 полуэлементов ФД; B_1 и B_2 – индукции переменного магнитного поля (поле возбуждения эмикона), наводимые соответственно токами возбуждения ИК₁ и ИК₂ эмикона в материале FC_1 и FC_2 полуэлементов ФД

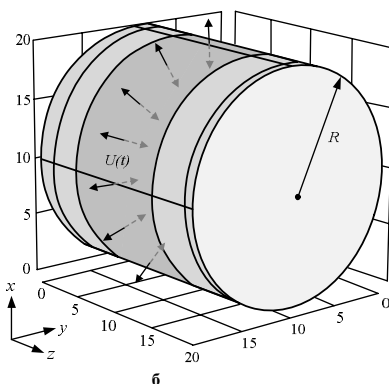


Рис. 7. Модели процесса распространения радиальных продольных L -волн по сечению цилиндра на плоскости (а) и в трехмерной постановке (б), мм

Преимущественное возбуждение одного типа волн определяется взаимной ориентацией поля подмагничивания с индукцией B_{CM} и вихревых токов i_e , текущих по периметру ферритовых стержней. Изменение линейных или объемных размеров элементарного объема под действием электромагнитного поля обусловлено магнитоэлектрическим взаимодействием.

Взаимодействие вихревых токов с индукцией поля подмагничивания B_{CM} , приводящее к появлению F_A (сила Ампера), обусловлено возникновением акустических колебаний при электродинамическом механизме [23, 24]:

$$F_A = i_e B_{CM} dl, \quad (8)$$

где i_e – вихревой ток участка длиной dl .

Упругие силы возникают в приповерхностном слое объекта контроля, определяемом глубиной скин-слоя δ :

$$\delta = \sqrt{\frac{2}{\omega \mu_0 \mu \sigma}}, \quad (9)$$

где $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м; μ – относительная магнитная проницаемость; ω – круговая частота колебаний; σ – электропроводность.

При подаче электрического напряжения высокой частоты $u_0(t) = U_{0m} \cos \omega_p t$ на цилиндрический электрод 8 (см. рис. 1) конденсатора связи $C_{св}$ в режиме последовательного резонанса ИК₁ ток через нее определится выражением

$$I_1(t) = \frac{u_0(t)}{R_1}. \quad (10)$$

Тогда напряженность переменного магнитного поля, создаваемую током возбуждения ИК₁, можно формализовать в следующем виде [25, 26]:

$$\begin{aligned} H_1(t) &= \frac{2\sqrt{2}w_1 U_{0m}}{l_1 R_1} \cos \omega_p t = \\ &= H_{1m} \cos \omega_p t, \end{aligned} \quad (11)$$

где $H_{1m} = 2\sqrt{2}w_1 U_{0m} / (l_1 R_1)$ – амплитуда напряженности магнитного поля, создаваемая током ИК₁.

В случае возбуждения как продольной, так и поперечной плоских монохроматических акустических волн уравнение вынужденных акустических колебаний, распространяющихся от границы раздела, может быть записано в виде [27, 28]

$$\frac{\partial^2 \xi}{\partial t^2} - v^2 \frac{\partial^2 \xi}{\partial z^2} = \frac{1}{\rho c} [\mathbf{j} \mathbf{H}_{CM}], \quad (12)$$

где \mathbf{H}_{CM} – векторная величина напряженности постоянного магнитного поля (магнитное поле ПМ); \mathbf{j} – векторная величина плотности переменного тока в скин-слое; ξ – вектор смещения; v – скорость акустической волны в материале ферритового стержня; ρ – удельная плотность материала ферритового стержня; c – скорость света.

Полагая, что переменное магнитное поле (поле

возбуждения эмикона) изменяется по закону $\exp[i(\omega t - kz)]$, для плотности переменного тока в скин-слое можем записать:

$$\mathbf{j}(z, t) = \frac{(1+i)c}{4\pi\delta} H_{1m} \exp\left[-(1+i)\frac{z}{\delta}\right] e^{i\omega t}, \quad (13)$$

где H_{1m} – амплитуда переменного магнитного поля; $\delta = c\sqrt{2\pi\omega\sigma}$; σ – проводимость металла; ω – циклическая частота.

На расстояниях, превышающих мощность скин-слоя, и с учетом (11) решение уравнения (12) примет вид

$$\xi_m = \frac{H_{CM} H_{1m}}{4\pi\rho v\omega\delta} \frac{1}{\sqrt{1+\beta^2}}, \quad (14)$$

где $\beta = q^2 \delta^2 / 2$; $q = 2\pi/\lambda$; λ – длина акустической волны.

Тогда для эффективности преобразования, определяемой отношением потоков энергии в упругой ($\rho \cdot v \cdot \omega^2 \cdot \xi^2$) и электромагнитных ($\omega \cdot \delta \cdot H_m^2 / 16\pi$) волнах на поверхности ферритового стержня, будет справедливо выражение вида

$$\tau = \frac{H_{CM} H_{1m}}{2\pi\rho v\omega\delta} \frac{1}{\sqrt{1+\beta^2}}. \quad (15)$$

В отношении режима μ -преобразования за счет ММЭ можно констатировать, что он, по своей сути, фактически является режимом функционирования феррозонда с продольным возбуждением. Поэтому в соответствии с существующей параметрической теорией феррозондов с продольным возбуждением, где используется разложение функции $B(H_z)$ при $H_z = H_1 + H_0$ в ряд Тейлора по малому воздействию, можем записать

$$B_0(t) = 2\mu_0 \mu^* [H_1(t)] H_0(t). \quad (16)$$

Следует отметить, что при заданной амплитуде поля возбуждения функция $\mu^* [H_1(t)]$ может рассматриваться как функция времени $\mu^*(t)$.

С учетом совместного модулирующего воздействия акустического и переменного магнитного полей на магнитную проницаемость материала ΦC_1 и ΦC_2 запишем следующее выражение:

$$\mu^* = F[\xi(t); H_1(t)].$$

Следует отметить, что для рассматриваемых физических процессов под модуляцией понимается изменение состояния параметра магнитной проницаемости материала ΦC_1 и ΦC_2 при воздействии физических полей.

Тогда в соответствии со сделанными замечаниями можем записать:

$$\mu^*(t) = \mu_p \left[1 + (m_{MM} + m_{AM}) \cos \omega_p t \right], \quad (17)$$

где $m_{AM} = \eta_{AM} \xi_m \mu_p^{-1}$ и $m_{MM} = \eta_{MM} H_{1m} \mu_p^{-1}$ – глубина соответственно акустической и магнитной модуляции; η_{AM} и η_{MM} – коэффициенты соответственно акустомагнит-

ного и магнитомодуляционного преобразований; ω_p – циклическая частота возбуждения процессов преобразования на совпадающих частотах электромеханического и магнитного резонансов.

Из выражения (16) и (17) следует, что измеряемое постоянное магнитное поле $H_0(t)$, направленное аксиально к ФС₁ и ФС₂, за счет параметрической модуляции осциллирующей магнитной проницаемостью ферромагнитного материала ФС₁ и ФС₂ трансформируется в переменное магнитное поле с соответствующей индукцией:

$$B_0(t) = 2\mu_0 \mu^*(t) H_0(t). \quad (18)$$

Вариации измеряемого магнитного поля, вызванные уже модулирующими процессами магнитной проницаемости, воздействуют на обмотки ИК₁ и ИК₂, индуцируя в них соответствующие ЭДС:

$$\begin{aligned} e_1(t) &= -s_1 w_1 \frac{dB_0(t)}{dt}; \\ e_2(t) &= -s_2 w_2 \frac{dB_0(t)}{dt}. \end{aligned} \quad (19)$$

Подставляя (18) в (19), для каждой из измерительных катушек получим:

$$\begin{aligned} e_1(t) &= -2s_1 w_1 \mu_0 \left[\mu^*(t) \frac{dH_0}{dt} + H_0(t) \frac{d\mu^*}{dt} \right] = \\ &= -2s_1 w_1 \mu_0 H_0 \frac{d\mu^*}{dt} = \\ &= 2s_1 w_1 \mu_0 \mu_p H_0 (m_{MM} + m_{AM}) \sin \omega_p t = \\ &= 2s_1 w_1 \mu_0 \omega_p H_0 (\eta_{AM} \zeta_m + \eta_{MM} H_{1m}) \sin \omega_p t; \end{aligned} \quad (20)$$

– для ИК₂

$$\begin{aligned} e_2(t) &= -2s_2 w_2 \mu_0 \left[\mu^*(t) \frac{dH_0}{dt} + H_0(t) \frac{d\mu^*}{dt} \right] = \\ &= -2s_2 w_2 \mu_0 H_0 \frac{d\mu^*}{dt} = \\ &= 2s_2 w_2 \mu_0 \omega_p H_0 (m_{MM} + m_{AM}) \sin \omega_p t = \\ &= 2s_2 w_2 \mu_0 \omega_p H_0 (\eta_{AM} \zeta_m + \eta_{MM} H_{1m}) \sin \omega_p t. \end{aligned} \quad (21)$$

Обобщая, и в соответствии с (6) для разностного сигнала с выхода ФД можем записать:

$$\begin{aligned} \Delta U_{\Sigma}(t) &= 4sw\mu_0\omega_p H_0 \times \\ &\times (\eta_{AM} \cdot \zeta_m + \eta_{MM} \cdot H_{1m}) \sin \omega_p t, \end{aligned} \quad (22)$$

где $s = s_1 = s_2$; $w = w_1 = w_2$.

В полученном аналитическом выражении (22) видна четкая реализация принципа суперпозиции в виде аддитивного модулирующего воздействия от проявления двух основных физических эффектов, инициируемых соответствующими активизирующими физическими полями, что, в свою очередь, говорит о повышении эффективности μ -преобразования в целом.

Проведенный анализ возможных физических эффектов и приведенные аналитические выражения (13), (15)–(17) и (21) доказывают состоятельность предложенных идей, реализуемых в формате рассматриваемого технического решения и определяющих конструктивные особенности его практической реализации.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Обобщая, можно констатировать, что по сравнению с классическим вариантом феррозонда с магнитным возбуждением предлагаемый способ возбуждения, основанный на мультифакторном режиме возбуждения, обладает следующими преимуществами:

1. Существенное конструктивное упрощение, которое связано с тем, что ИК₁ и ИК₂ совмещают такие две функции, как генерация переменного магнитного поля возбуждения и регистрация информационного сигнала.

2. Повышенная помехозащищенность за счет использования ИК₁ и ИК₂ в качестве плечевых элементов емкостно-индуктивного измерительного моста с разностным сигналом его измерительной диагонали (компенсация синфазных составляющих помехи и последствий температурного дрейфа).

3. Повышенная чувствительность без ухудшения точности преобразования, которая обеспечивается путем использования набора свойств структурных элементов материала ФС₁ и ФС₂ полуэлементов ФД, проявляемых в виде различных физических эффектов при резонансном воздействии соответствующими физическими полями.

4. Пониженное энергопотребление.

Наличие перечисленных выше признаков, обуславливающих преимущества предлагаемого варианта ФД по сравнению с существующими прототипами, говорит о реальных перспективах его самого широкого промышленного применения для решения различных задач контроля, диагностики и точного позиционирования.

Следует отметить, что конкретное численное сравнение возможностей предлагаемого способа с известными выходит за рамки данной статьи и является предметом дальнейших опытно-конструкторских работ. Здесь же ставилась задача показать и обосновать принципиально новые признаки мультифакторного способа возбуждения феррозондов, основанного на совместном использовании электромагнитно-акустического и магнитомодуляционного эффектов. При этом возможность реализации предложенного способа была экспериментально проверена на физической модели ФД.

Таким образом, на основе предлагаемого нового способа возбуждения феррозонда и варианта его технического осуществления открываются реальные перспективы для более детальных исследований в области прикладного комплексного использования различных видов μ -преобразования разработчиками магнитометрической аппаратуры, результаты которых могут найти свое эффективное применение при создании различных вариантов феррозондов на новых физических принципах функционирования.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Средства измерений параметров магнитного поля / Афанасьев Ю.В., Стуленцов Н.В., Хореев В.Н., Чечурина Е.Н., Щелкин А.П. Л.: Энергия, 1979. 320 с.
2. Ripka P. Magnetic Sensors and Magnetometers. Boston: Artech house, 2000. 494 p.
3. Щербakov Г.Н., Анцелиевич М.А. Новые методы обнаружения скрытых объектов: борьба с терроризмом, гуманитарное разминирование, защита информации, контроль подземных коммуникаций, археология, экология. М.: Эльф ИПР, 2011. 503 с.
4. Толмачев И.И. Магнитные методы контроля и диагностики. Томск: Изд-во ТПУ, 2008. 216 с.
5. Голев И.М., Никитина Е.А. Технические аспекты измерения магнитного поля Земли для решения задач воздушной навигации // Воздушно-космические силы. Теория и практика. 2017. № 1. С. 273-279.
6. Трёхкоординатный индукционный датчик переменного магнитного поля для магнитометрических систем локальной навигации / И.М. Голев, Т.И. Заенцева, Е.А. Никитина, И.О. Бакланов // Воздушно-космические силы. Теория и практика. 2019. № 12. С. 91-99.
7. Бараночников М.Л. Микромагнитозлектроника. М.: ДМК Пресс, 2002. Т.2. 691 с.
8. Lenz J.E., Edelstein A.S., Magnetic Sensors and Their Applications // IEEE Sensors Journal. 2006. No. 3(6). Pp. 631-649. doi: 10.1109/JSEN.2006.874493
9. Tumanski S. Modern magnetic field sensors – a review // Przegląd Elektrotechniczny. 2013. No. 89(10). Pp. 1-12.
10. Ripka P. Advances in Magnetic Field Sensors // IEEE Sensors Journal. 2010. No. 6(10). Pp. 1108-1116. doi: 10.1109/JSEN.2010.2043429
11. Брякин И.В. Магнитодинамический магнитометр для задач дефектоскопии // Мехатроника, автоматизация, управление. 2013. № 3(144). С. 35-41.
12. Брякин И.В. Магнитометр с тестовым алгоритмом функционирования // Мехатроника, автоматизация, управление. 2017. 18(1). С. 49-56. doi: 10.17587/mau.18.49-56
13. Can H., Topal U. Design of Ring Core Fluxgate Magnetometer as Attitude Control Sensor for Low and High Orbit Satellites // Journal of Superconductivity and Novel Magnetism March. 2015. No. 3(28). Pp. 1093-1096. doi: 10.1007/s10948-014-2788-5
14. Bryakin I.V., Bochkarev I.V., Khrashin R.R. Two-Axis Fluxgate Magnetometer with a New Principle of Excitation // International Russian Automation Conference (RusAuto-Con). IEEE, 2020. Pp. 693-698. doi: 10.1109/RusAutoCon49822.2020.9208228
15. Bochkarev I.V., Bryakin I.V., Khrashin V.R. Ferroprobe Magnetometer with Preset Excitation Field Induction Mode // International Ural Conference on Electrical Power Engineering (UralCon) IEEE, 2021. Pp. 31-36. doi: 10.1109/UralCon52005.2021.9559463
16. Пат. 2768528 Российская Федерация, МПК G 01 V 3/00. Способ возбуждения феррозондов и устройство модулятора для его реализации / Брякин И.В., Бочкарев И.В.; заявитель ГОУ ВПО «Кыргызско-Российский Славянский университет». № 2020133609, заявл. 12.10.2020, опубл. 24.03.2022.
17. Магнитные измерения / Гуржин С.Г., Жулев В.И., Лукьянов Ю.А., Никитин С.В. Рязань: РГРТУ, 2006. 72 с.
18. Брякин И.В., Денисов Г.С. Феррозондовый датчик с упругим возбуждением сердечника // Проблемы автоматизации и управления. 2017. №1(32). С. 50-59.
19. Сазонов Ю.И. Волновые электромагнитно-акустические явления в конденсированных средах. М.: Физматлит, 2007. 340 с.
20. Новацкий В. Электромагнитные эффекты в твердых телах. М.: Мир, 1986. 157 с.
21. Кузнецов А.П., Кузнецов С.П., Рыскин Н.М. Нелинейные колебания. М.: Физматлит, 2005. 292 с.
22. Сазонов Ю.И. Гидроакустические эмионы с активной диафрагмой // Прикладная математика и техническая физика. 2000. №2. С. 41-43.
23. Прянишников В.А. Теоретические основы электротехники. СПб.: Корона Принт, 2004. 368 с.
24. Аполлонский С.М. Теоретические основы электротехники. Электромагнитное поле. СПб.: Лань, 2018. 592 с.
25. Шенберг Д. Магнитные осцилляции в металлах. М.: Мир, 1986. 680 с.
26. Филиппов Б.Н., Танкеев А.П. Динамические эффекты в ферромагнетиках с доменной структурой. М.: Наука, 1987. 215 с.
27. Петрищев О.Н. Ультразвуковые магнитострикционные волноводные системы. К.: Изд-во Киев. ун-та, 1989. 132 с.
28. Гурбатов С.И., Руденко О.В., Санчев А.И. Волны и структуры в нелинейных средах без дисперсии. М.: Физматлит, 2008. 496 с.

Поступила в редакцию 06 февраля 2023 г.

Принята к печати 06 марта 2023 г.

INFORMATION IN ENGLISH

FERROPROBE WITH MULTIFACTOR EXCITATION MODE

Ivan V. Bryakin

D.Sc. (Engineering), Professor, Head of the Information and Measuring System Laboratory, Institute of Mechanical Engineering and Automation, National Academy of Sciences of the Kyrgyz Republic, Bishkek, Kyrgyz Republic, bivas2006@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0001-7463-8072>

Igor V. Bochkarev

D.Sc. (Engineering), Professor, Head of the Department, Department of Electrical Engineering, Power Faculty, Kyrgyz State Technical University named after I. Razzakov, Bishkek, Kyrgyz Republic, elmech@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-9873-9203>

Excitation systems of known ferro-induction converters (FIC) are considered. A variant of the FIC with a new excitation method based on electromagnetic-acoustic (EMA) and magneto-modulation (MME) effects is proposed. A variant of a constructive solution for a fluxgate sensor that implements the proposed excitation method is described. The physical processes underlying this technical solution are considered in detail. It is shown that in the proposed sensor, five operating modes are simultaneously implemented, accompanied by the corresponding

physical effects: 1) the mode of a bridge inductive-capacitive voltage divider; 2) the mode of the EMA transducer, which implements the emergence process of spatially periodic acoustic waves; 3) μ -transformation mode due to the EMA effect; 4) inductor mode, in which the measuring coils, in addition to their direct purpose, additionally perform the functions of elements for generating an exciting magnetic field; 5) μ -transformation mode due to MME. The analysis of the emerging physical effects and their analytical description showed that the proposed multifactor

excitation mode has the following advantages: 1) significant design simplification due to the fact that the measuring coils combine such functions as alternating magnetic field excitation and information signal recording; 2) increased noise immunity due to making use of measuring coils as upper arms of the inductive-capacitance measuring bridge with the difference signal of its measuring diagonal, which provides in-phase component noise compensation and the temperature drift consequences compensation; 3) hypersensitivity without deterioration in conversion accuracy due to making use of different physical effects during resonance action of corresponding physical fields; 4) lower power consumption.

Keywords: ferro-induction transducer, flux-gate sensor, electromagnetic field, electromagnet-acoustic effect, acoustic waves, alternating magnetic field strength, eddy currents, magnetic permeability modulation

REFERENCES

1. Afanasiev Yu.V., Studentsov N.V., Khoreev V.N. *Sredstva izmereniy parametrov magnitnogo polya* [Means of measuring the parameters of the magnetic field]. Leningrad, Energy Publ., 1979. 320 p. (In Russian)
2. Ripka P. *Magnetic Sensors and Magnetometers*. Boston, Artech house, 2000. 494 p.
3. Shcherbakov G. N., Antselevich M. A. *Novye metody obnaruzheniya skrytykh ob'ektov: borba s terrorizmom, gumanitarnoe razminirovaniye, zashchita informatsii, kontrol podzemnykh kommunikatsiy, arkhologiya, ekologiya* [New methods of detecting hidden objects: the fight against terrorism, humanitarian demining, information protection, control of underground utilities, archeology, ecology]. Moscow, Elf IPR Publ., 2011. 503 p. (In Russian)
4. Tolmachev I.I. *Magnitnye metody kontrolya i diagnostiki* [Magnetic methods of control and diagnostics]. Tomsk, TPU Publishing House, 2008. 216 p. (In Russian)
5. Golev I.M., Nikitina E.A. Technical aspects of measuring the earth's magnetic field for solving problems of air navigation. *Vozdushno-kosmicheskie sily. Teoriya i praktika* [Aerospace Forces. Theory and Practice], 2017, no. 1, pp. 273-277. (In Russian)
6. Golev I.M., Zaentseva T.I., Nikitina E.A., Baklanov I.O. Three-coordinate inductive alternating magnetic field sensor for magnetometric systems of local navigation. *Vozdushno-kosmicheskie sily. Teoriya i praktika* [Aerospace Forces. Theory and Practice], 2019, no. 12, pp. 91-99. (In Russian)
7. Baranochnikov M.L. *Mikromagnitoelektronika* [Micromagnetoelectronics. Moscow, DMK Press Publ., 2002, vol. 2, 691 p. (In Russian)
8. Lenz J. E., Edelstein A. S., *Magnetic Sensors and Their Applications*. IEEE Sensors Journal, 2006, vol. 6, no. 3, pp. 631-649. doi: 10.1109/JSEN.2006.874493
9. Tumanski S. Modern magnetic field sensors - a review. *Przeglad Elektrotechnicz.* 2013, no. 89(10), pp. 1-12.
10. Ripka P. Advances in Magnetic Field Sensors. *IEEE Sensors journal*, 2010, vol. 10, no. 6, pp. 1108-1116. doi: 10.1109/JSEN.2010.2043429.
11. Bryakin I.V. Magnetodynamic magnetometer for flaw detection problems. *Mekhatronika, avtomatizatsiya, upravlenie* [Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie], 2013, no. 3(144), pp. 35-41. (In Russian)
12. Bryakin I.V. Magnetometer with test operation algorithm. *Mekhatronika, avtomatizatsiya, upravlenie* [Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie], 2017, 18(1), pp. 49-56. (In Russian) doi: 10.17587/mau.18.49-56
13. Hava Can, Uğur Topal. Design of Ring Core Fluxgate Magnetometer as Attitude Control Sensor for Low and High Orbit Satellites. *Journal of Superconductivity and Novel Magnetism*. 2015, vol. 28, no. 3, pp.1093-1096. doi: 10.1007/s10948-014-2788-5
14. Bryakin I.V., Bochkarev I.V., Khramshin R.R. Two-Axis Fluxgate Magnetometer with a New Principle of Excitation. *International Russian Automation Conference (RusAuto-Con)*. IEEE, 2020, pp. 693-698. doi: 10.1109/RusAutoCon49822. 2020.9208228
15. Bochkarev I. V., Bryakin I. V., Khramshin V. R. Ferroprobe Magnetometer with Preset Excitation Field Induction Mode. *International Ural Conference on Electrical Power Engineering (UralCon)* IEEE, 2021, pp. 31-36. doi: 10.1109/UralCon52005.2021.9559463
16. Bryakin I.V., Bochkarev I.V. *Sposob vozbuзhdeniya ferrozondov i ustroystvo modulyatora dlya ego realizatsii* [The method of excitation of ferroprobes and the device of the modulator for its implementation]. Patent RF, no. 2768528, 2022.
17. Gurzhin S.G., Zhulev V.I., Lukyanov Yu.A., Nikitin S.V. *Magnitnye izmereniya* [Magnetic measurements]. Ryzan, RGRTU Publ., 2006. 72 p. (In Russian)
18. Bryakin I.V., Denisov G.S. Ferroprobe sensor with elastic excitation of the core. *Problemy avtomatiki i upravleniya* [Automation and control problems], 2017, no. 1(32), pp. 50-59. (In Russian)
19. Sazonov Yu.I. *Volnovyye elektromagnitno-akusticheskie yavleniya v kondensirovannykh sredakh* [Wave electromagnetic-acoustic phenomena in condensed media]. Moscow, Publishing House of Physical and Mathematical Literature, 2007. 340 p. (In Russian)
20. Novatsky V. *Elektromagnitnye efekty v tverdykh telakh* [Electromagnetic effects in solids]. Moscow, Mir Publ., 1986. 157 p. (In Russian)
21. Kuznetsov A.P., Kuznetsov S.P., Ryskin N.M. *Nelineynyye kolebaniya* [Nonlinear fluctuations]. Moscow, Fizmatlit Publ., 2005. 292 p. (In Russian)
22. Sazonov Yu.I. Hydroacoustic emicons with an active diaphragm. *Prikladnaya matematika i tekhnicheskaya fizika* [Journal of Applied Mechanics and Technical Physics], 2000, no. 2, pp. 41-43. (In Russian)
23. Pryanishnikov V.A. *Teoreticheskie osnovy elektrotekhniki* [Theoretical foundations of electrical engineering]. St. Petersburg, KORONA print Publ., 2004. 368 p. (In Russian)
24. Apollonsky S.M. *Teoreticheskie osnovy elektrotekhniki. Elektromagnitnoye pole* [Theoretical foundations of electrical engineering. Electromagnetic field]. St. Petersburg, Lan Publ., 2018. 592 p. (In Russian)
25. Shenberg D. *Magnitnye ostillyatsii v metallakh* [Magnetic oscillations in metals]. Moscow, Mir Publ., 1986. 680 p. (In Russian)
26. Filippov B.N., Tankeev A.P. *Dinamicheskie efekty v ferromagnetnykh s domennoy strukturoy* [Dynamic effects in ferromagnets with a domain structure]. Moscow, Nauka Publ., 1987. 215 p. (In Russian)
27. Petrishchev O. N. *Ultrazvukovyye magnitostriktionnyye volnovodnye sistemy* [Ultrasonic magnetostrictive waveguide systems]. Kyiv, Kyiv University Publ., 1989. 132 p. (In Russian)
28. Gurbatov S.I., Rudenko O.V., Saichev A.I. *Volny i struktury v nelineynykh sredakh bez dispersii* [Waves and structures in non-linear media without dispersion]. Moscow, Fizmatlit Publ., 2008. 496 p. (In Russian)

Брякин И.В., Бочкарев И.В. Феррозонд с мультифакторным режимом возбуждения // Электротехнические системы и комплексы. 2023. № 2(59). С. 73-83. [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2023-2\(59\)-73-83](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2023-2(59)-73-83)

Bryakin I.V., Bochkarev I.V. Ferroprobe with Multifactor Excitation Mode. *Elektrotekhnicheskie sistemy i komplekсы* [Electrotechnical Systems and Complexes], 2023, no. 2(59), pp. 73-83. (In Russian). [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2023-2\(59\)-73-83](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2023-2(59)-73-83)

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Абдулвелеев Ильяр Равильевич – канд. техн. наук, доцент, кафедра электроснабжения промышленных предприятий, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия, i.abdulvelееv@magtu.ru, <https://orcid.org/0000-0003-2748-6533>

Андреев Сергей Михайлович – д-р техн. наук, доцент, заведующий кафедрой, кафедра автоматизированных систем управления, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия, andreev.asc@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0003-0735-6723>

Андрянов Алексей Иванович – д-р техн. наук, доцент, кафедра электронных, радиоэлектронных и электротехнических систем, Брянский государственный технический университет, Брянск, Россия, mail@ahaos.ru, <https://orcid.org/0000-0002-4083-040X>

Антоненко Алексей Сергеевич – аспирант, кафедра автоматики и управления, Московский политехнический университет, Москва, Россия, alexei-antonenko1999@yandex.com, <https://orcid.org/0009-0006-5779-1052>

Бочкарев Алексей Андреевич – студент, кафедра автоматизированного электропривода и мехатроники, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия, analogsynth@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-8834-2384>

Бочкарев Игорь Викторович – д-р техн. наук, профессор, кафедра электромеханики, энергетический факультет, Кыргызский государственный технический университет имени И. Раззакова, elmech@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-9873-9203>

Брякин Иван Васильевич – д-р техн. наук, старший научный сотрудник, заведующий лабораторией информационно-измерительных систем, Институт машиноведения и автоматики, Национальная Академия Наук Кыргызской Республики, Бишкек, Кыргызстан, bivak2006@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0001-7463-8072>

Галицына Арина Михайловна – аспирант, кафедра механики и цифрового проектирования, Уфимский университет науки и технологий, Уфа, Россия, arina.galitsina@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0003-0501-7576>

Гибадуллин Арслан Илсурович – студент, кафедра автоматизированного электропривода и мехатроники, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия, gibadullin_arслан@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0005-1469-2612>

Евдокимов Александр Андреевич – канд. техн. наук, доцент, кафедра радиоэлектроники и электроэнергетики, Сургутский государственный университет Ханты-Мансийского автономного округа – Югры, Сургут, Россия, aleksandr-ae@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-7818-3351>

Иванов Евгений Федорович – аспирант, кафедра электроснабжения промышленных предприятий, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия, ivanov.ef@mmk.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5207-2810>

Корнилов Геннадий Петрович – д-р техн. наук, профессор, кафедра электроснабжения промышленных предприятий, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия, korn_mgn@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-2451-3850>

Лосев Федор Алексеевич – канд. техн. наук, доцент, кафедра электроэнергетики, Тюменский индустриальный университет, Тюмень, Россия, fedor_los@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-7437-5655>

Лымарь Алексей Борисович – старший преподаватель, кафедра автоматизированного электропривода и мехатроники, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия, lymar.alexei@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-2783-3662>

Маклаков Александр Сергеевич – канд. техн. наук, доцент, старший научный сотрудник, управление научной и инновационной деятельности, Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия, alexandr.maklakov.ru@ieee.org, <https://orcid.org/0000-0001-7950-708X>

Мальцев Александр Петрович – студент, кафедра автоматизированного электропривода и мехатроники, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия, Sasha-malcev-1996@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0008-8687-3051>

Меркулова Анастасия Петровна – инженер, кафедра механики и цифрового проектирования, Уфимский университет науки и технологий, Уфа, Россия, nastymerkulova@mail.ru

Месропян Арсен Владимирович – д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой, кафедра механики и цифрового проектирования, Уфимский университет науки и технологий, Уфа, Россия, avtm_74@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-7786-7209>

Одинцов Константин Эдуардович – канд. техн. наук, доцент, кафедра электроснабжения промышленных предприятий, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия, eltech_mgtu@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-0699-6016>

Омельченко Евгений Яковлевич – д-р техн. наук, доцент, профессор, кафедра автоматизированного электропривода и мехатроники, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия, momentum2@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-0547-485X>

Панова Евгения Александровна – канд. техн. наук, доцент, кафедра электроснабжения промышленных предприятий, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия, кафедра электроэнергетики, Тобольский индустриальный институт, филиал Тюменского индустриального университета, Россия, ea.panova@magtu.ru, <https://orcid.org/0000-0001-9392-3346>

Пугачев Александр Анатольевич – д-р техн. наук, доцент, профессор, заведующий кафедрой, кафедра промышленной электроники и электротехники, Брянский государственный технический университет, Брянск, Россия, alexander-pugachev@rambler.ru, <https://orcid.org/0000-0002-1836-0923>

Саттаров Роберт Радилович – д-р техн. наук, доцент, профессор, кафедра электротехники и электрооборудования предприятий, Уфимский государственный нефтяной технический университет, Уфа, Россия, Sattar.rb@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0001-9624-965X>

Сушкова Виктория Романовна – ассистент, кафедра электроэнергетики, Тюменский индустриальный университет, Тюмень, Россия, vikyantropova@yandex.ru

Хамитов Рустам Нуринович – д-р техн. наук, доцент, профессор, кафедра электроэнергетики, Тюменский индустриальный университет, Тюмень, Россия, кафедра электрической техники, Омский государственный технический университет, Омск, Россия, apple_27@mail.ru

Хисматуллин Арслан Илхамович – студент, кафедра электроснабжения промышленных предприятий, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия.

Христинич Алексей Романович – канд. техн. наук, доцент, кафедра систем обеспечения движения поездов, Красноярский институт железнодорожного транспорта, филиал ИрГУПС, Красноярск, Россия, lex_0986@mail.ru

Христинич Елена Витальевна – канд. техн. наук, доцент, кафедра теоретических основ электротехники, Красноярский государственный аграрный университет, Красноярск, Россия, ekhristinich@mail.ru

Христинич Роман Мирославович – д-р техн. наук, профессор, кафедра теоретических основ электротехники, Красноярский государственный аграрный университет, Красноярск, Россия, rkhrstinich@mail.ru

Чарыков Виктор Иванович – д-р техн. наук, профессор, структурное подразделение высшего образования, Курганский институт железнодорожного транспорта, Уральский государственный университет путей сообщения (филиал), Курган, Россия, Viktor52-CHIMESH@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-6434-3825>

Шабельник Юлия Андреевна – старший преподаватель, кафедра механики и цифрового проектирования, Уфимский университет науки и технологий, Уфа, Россия, shabelnik.yua@ugatu.su, <https://orcid.org/0009-0000-4923-0200>

Приглашаем Вас опубликовать статьи в журнале «*Электротехнические системы и комплексы*».

Журнал «Электротехнические системы и комплексы» основан в 1996 г. на базе международного сборника научных трудов, в котором публиковались статьи студентов, аспирантов и ученых как из России, так и из-за рубежа. Начиная с 2014 г. «Электротехнические системы и комплексы» выпускается как журнал с периодичностью четыре номера в год.

С 02.02.2016 г. журнал входит в Перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук.

По состоянию Перечня на 22.05.2023 г. журнал публикует работы по следующим научным специальностям:

- 1.2.2. Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ (технические науки)
- 2.3.1. Системный анализ, управление и обработка информации (технические)
- 2.3.3. Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами (технические науки)
- 2.4.1. Теоретическая и прикладная электротехника (технические науки)
- 2.4.2. Электротехнические комплексы и системы (технические науки)
- 2.4.3. Электроэнергетика (технические науки)
- 2.4.4. Электротехнология и электрофизика (технические науки)

По результатам экспертной оценки ВАК с **06.12.2022 г.** журнал отнесен к категории **К2**.

Журнал публикует научные работы по следующим рубрикам:

- теория и практика автоматизированного электропривода;
- электроэнергетика;
- промышленная электроника, автоматика и системы управления;
- электротехнологии в промышленности;
- информационное, математическое и программное обеспечение технических систем;
- мониторинг, контроль и диагностика электрооборудования.

Публикация статей является бесплатной.

Статьи, направленные в адрес журнала, проходят обязательное научное рецензирование и редактирование. Несоответствие материалов требованиям к статьям может служить поводом для отказа в публикации.

Статья должна быть набрана в шаблоне, который размещен на сайте журнала esik.magt.ru в разделе «Руководство для авторов». Там же находится инструкция по его заполнению, в которой приведены требования к оформлению статей.

Авторы статьи должны гарантировать, что их работа публикуется впервые. Если элементы рукописи ранее были опубликованы в другой работе (статье, монографии, автореферате и т.д.), в том числе на другом языке, авторы обязаны сослаться на более раннюю работу. При этом они обязаны указать, в чем существенное отличие новой работы от предыдущей и вместе с тем выявить ее связь с результатами исследований и выводами, представленными в предыдущей работе. Дословное копирование собственных работ или ее элементов более чем на 30% и их перефразирование не приемлемы!

Пакет подаваемых документов (отправляется по электронной почте ecis.red@gmail.com):

- рукопись, оформленная в соответствии с приведенными ниже требованиями;
- анкета (в электронном виде);
- экспертное заключение о возможности опубликования;
- лицензионный договор, подписанный одним автором от коллектива в двух экземплярах;
- согласие на обработку персональных данных на каждого автора.