



ISSN 1991-8542 (Print)

ISSN 2712-8938 (Online)

ВЕСТНИК
САМАРСКОГО
ГОСУДАРСТВЕННОГО
ТЕХНИЧЕСКОГО
УНИВЕРСИТЕТА

Серия
«ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ»

2021 Т. 29. № 4

ISSN 1991-8542 (Print)

ISSN 2712-8938 (Online)

**Вестник
Самарского
Государственного
Технического
Университета**

НАУЧНОЕ ИЗДАНИЕ

Издается с августа 1993 г.

Выходит 4 раза в год

Серия

«ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ»

2021. Том 29. № 4

Учредитель – ФГБОУ ВО «Самарский государственный технический университет»

Главный редактор серии Ю.Э. Плешивцева (д.т.н., проф.)

Отв. секретарь серии О.С. Афанасьева

Редакционная коллегия:

А.М. Абакумов (д.т.н., проф.)

В.И. Батищев (д.т.н., проф.)

С.Ю. Боровик (д.т.н.)

Л.С. Казаринов (д.т.н., проф.)

О.С. Колосов (д.т.н., проф.)

П.К. Кузнецов (д.т.н., проф.)

В.И. Лачин (д.т.н., проф.)

М.Ю. Лившиц (д.т.н., проф.)

С.П. Орлов (д.т.н., проф.)

Л.Д. Певзнер (д.т.н., проф.)

Э.Я. Рапопорт (д.т.н., проф.)

Е. Ваакe (проф., Германия)

S. Luri (проф., Италия)

V. Naske (проф., Германия)

M. Forzan (проф., Италия)

НАУЧНОЕ ИЗДАНИЕ

Вестник Самарского государственного технического университета
Серия «Технические науки» (2021. Том 29. № 4)

Учредитель – ФГБОУ ВО «Самарский государственный технический университет» 443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244, Главный корпус

Редактор Г.В. Загребина
Компьютерная верстка О.С. Афанасьева

Свидетельство о регистрации
ПИ №ФС 77-64449 от 31.12.2015.

Подписано в печать 28.12.21
Выход в свет 04.03.22

Адрес редакции и издателя:
ФГБОУ ВО «Самарский
государственный
технический университет»
443100, г. Самара,
ул. Молодогвардейская, 244
Главный корпус

Формат 70 × 108 ¹/₁₆.
Усл. печ. л. 22,2 п.л.
Уч.-изд. л. 21,7 п.л.
Тираж 60 экз. Рег. № 211/21
Заказ № 80

Телефон: (846) 337 04 43
E-mail: vest_teh@samgtu.ru
Факс: (846) 278 44 40

Отпечатано в типографии Самарского
государственного технического университета
Адрес типографии:
443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244.
Корпус 8

Журнал включен в Российский индекс научного цитирования (РИНЦ).

Журнал включен 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 следующим группам научных специальностей: 05.13.00 – Информатика, вычислительная техника и управление; 05.11.00 – Приборостроение, метрология и информационно-измерительные приборы и системы; 05.09.00 – Электротехника.

Полнотекстовый доступ к статьям журнала осуществляется на сайте научной электронной библиотеки eLIBRARY.RU (<http://elibrary.ru>)
и на сайте <https://journals.eco-vector.com/1991-8542/>

Подписной индекс в каталоге «Роспечать» 18106
ISSN 1991-8542

© Авторы, 2021

© Самарский государственный
технический университет, 2021

ФЗ № 436-ФЗ	Издание не подлежит маркировке в соответствии с п. 1 ч. 2 ст. 1
----------------	--

Цена свободная

ISSN 1991-8542 (Print)

ISSN 2712-8938 (Online)

Vestnik of
Samara
State
Technical
University

SCIENTIFIC JOURNAL

Published since August 1993

Four Issues a Year

Technical Sciences Series

2021. Vol. 29. Issue 4

Founder – Samara State Technical University

Editor-in-Chief of Series Y.E. Pleshivtseva (Dr. Techn. Sci., Prof.)

Execute Secretary of Series O.S. Afanaseva

Editorial board

A.M. Abakumov (Dr. Techn. Sci., Prof.)

E. Baake (Prof. Leibniz University of Hannover, Germany)

V.I. Batishchev (Dr. Techn. Sci., Prof.)

S.Y. Borovik (Dr. Techn. Sci.)

M. Forzan (Prof., University of Padua, Italy)

L.S. Kazarinov (Dr. Techn. Sci., Prof., South Ural State University)

O.S. Kolosov (Dr. Techn. Sci., Prof., Moscow Power Engineering Institute)

P.K. Kuznetsov P. K. (Dr. Techn. Sci., Prof.)

V.I. Lachin (Dr. Techn. Sci., Prof., South-Russian State Technical University (NPI))

M.Y. Livshits (Dr. Techn. Sci., Prof.)

S. Lupi (Prof., University of Padua, Italy)

B. Nacke (Prof., Leibniz University of Hannover, Germany)

S.P. Orlov (Dr. Techn. Sci., Prof.)

L.D. Pevzner (Dr. Techn. Sci., Prof., Moscow State Mining University)

E.Y. Rapoport (Dr. Techn. Sci., Prof.)

Edited by G. V. Zagrebina
Compiled and typeset by O. S. Afanaseva

The Editorial Board Address:

Dept. of Applied Mathematic and Computer Science
Samara State Technical University
244, Molodogvardeyskaya st., Samara, 443100, Russian Federation

Phone: +7(846) 337 04 43

E-mail: vest_teh@samgtu.ru

Printed at the Samara State Technical University Press

The journal is included in the Russian Science Citation Index.

The journal is included in VINITI (<http://www.viniti.ru>)_abstracts databases.

The full-text electronic version of journal is hosted by the web-site of scientific electronic library eLIBRARY.RU and by the site SamGTU (<http://vestnik-teh.samgtu.ru>) and by the site <https://journals.eco-vector.com/1991-8542/>

The subscription index in Rospechat catalogue 18106

ISSN 1991-8542

СОДЕРЖАНИЕ

Информатика, вычислительная техника и управление

<i>Бородулин Б.Б.</i> Алгоритм автоматической компенсации термодформаций теплонагруженных несущих конструкций.....	6
<i>Лысов В.Е., Синюков А.П.</i> Адаптивная система автоматического управления процессом тонкой вытяжки	20
<i>Михеев С.А.</i> Система поддержания эффективной осевой нагрузки на долото при бурении скважин	32
<i>Романова А.С., Микушин М.Б., Воеводин А.Ю.</i> Анализ энергоемкости гальванического комплекса машиностроительного производства.....	44

Электротехника

<i>Андреев А.А.</i> Анализ существующих разновидностей защит от однофазных замыканий на землю и условия их применения	56
<i>Базаров А.А., Данилушкин А.И.</i> Способ выравнивания графика нагрузки мощных индукционных установок	71
<i>Котенев В.И., Котенев А.В., Стулов А.Д.</i> Система автоматического управления коэффициентом реактивной мощности системы электропитания промышленного предприятия	86
<i>Осипов В.С.</i> Метод расчета коэффициента искажения синусоидальности кривой напряжения, создаваемого трехфазными выпрямителями.....	99
<i>Стариков А.В., Табачникова Т.В., Казанцев А.А., Косорлуков И.А.</i> Алгоритм расчета оптимальной величины напряжения промышленной подстанции	116

Информатика, вычислительная техника и управление

УДК 681.5

АЛГОРИТМ АВТОМАТИЧЕСКОЙ КОМПЕНСАЦИИ ТЕРМОДЕФОРМАЦИЙ ТЕПЛОАГРУЖЕННЫХ НЕСУЩИХ КОНСТРУКЦИЙ*

Б.Б. Бородулин

Самарский государственный технический университет
Россия, 443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244

E-mail: borodulinbb@gmail.com

Аннотация. Рассматривается возможный алгоритм работы системы автоматического управления тепловыми режимами несущих конструкций информационно-измерительной системы автономных объектов. Термодеформационная компонента информационно-измерительной погрешности, являющаяся причиной искажения рабочей и служебной информации автономного объекта, уменьшается за счет компенсации термоградиента системой автоматического управления режимами работы распределенных управляемых теплоисточников. Система обеспечивает существенное снижение уровня термодеформационной погрешности измерений, причиной которой является деформация несущих конструкций из-за нестабильного и неравномерного тепловыделения информационно-измерительных приборов, размещенных на конструкции. Для компенсации термодеформаций в состав системы входят управляемые теплоисточники, с помощью которых компенсируются термоградиенты несущей конструкции, возникающие под воздействием тепловыделения приборов информационно-измерительной системы и внешнего теплового излучения на конструкцию. Предложен эффективный рациональный алгоритм управления, обеспечивающий компенсацию термоградиента несущей конструкции до допустимого уровня. Алгоритм управления и структура системы предназначены для реализации специальным программным обеспечением бортового компьютера.

Ключевые слова: автономные объекты (АО), компенсация термодеформаций, управляемые источники тепла, терморегулирование, автоматическое управление.

Введение

Автономные объекты (АО) находят широкое применение в различных областях: в космических исследованиях, авиационной отрасли, подводных исследованиях, автомобильном транспорте и т. д.

Так, например, автомобильная индустрия претерпевает существенную трансформацию: крупнейшие производители идут к созданию полностью авто-

* Бородулин Борис Борисович, аспирант кафедры управления и системного анализа теплоэнергетических и социотехнических комплексов.

номных транспортных средств. Одной из наиболее продвинутых компаний в области автопилотируемых автомобилей можно назвать Tesla. Она продает ряд электромобилей с такой функцией. Во время поездки система распознает сотни элементов: дорожную разметку и знаки, светофоры, пешеходов и другие автомобили, и даже смазываемый во время движения фон [1].

Разработки в этой области ведет BMW. Компания оснащает все свои электрические модели полностью автономными основными функциями с 2021 года. Седан 5-Series нового поколения с системой автономного управления BMW продемонстрировала в начале 2017 года. Позже на Мобильном конгрессе в Барселоне BMW показывала совместный с Ericsson и Intel проект автомобиля, подключенного к сети 5G.

В России и за рубежом ведутся интенсивные фундаментальные и прикладные работы по созданию обитаемых подводных аппаратов, способных решать поставленные задачи автономно. Кроме нашей страны, США, Канады, Великобритании и Франции, в конце 80-х годов XX века активизировали исследования в этой области Норвегия, Япония и Италия [2].

Автономные обитаемые подводные аппараты (АНПА) с различной степенью автоматизации предназначены для поиска и обследования подводных объектов, проведения гидрологических и океанологических исследований, использования в военных целях [3].

По своим функциональным возможностям АНПА предназначены для выполнения следующих подводно-технических работ:

- длительное маневрирование по заданной программе в водном пространстве с одновременным проведением разнообразных океанологических, гидрофизических, гидрографических и биологических исследований;
- проведение поиска и обследования затонувших объектов; оборудование районов донными маяками-ответчиками; обследование нижней кромки ледяных полей, оценка толщины и характера ледяного покрова, подледная гидрология;
- поиск полезных ископаемых на больших глубинах и предварительное определение химического состава геологических образований;
- обследование и обслуживание подводных кабельных линий, трубопроводов и других сооружений;
- поиск и идентификация объектов с заранее заданными свойствами; работа в агрессивных средах;
- выполнение специальных задач в интересах ВМС, таких как разведка, противолодочная и противоминная борьба, диверсионные акции, слежение.

К АО относятся также летательные аппараты (дроны), предназначенные для наблюдения и сбора информации.

Типичными представителями автономных объектов являются космические аппараты, именно в них в наиболее выраженной форме сосредоточены основные особенности АО.

Космические аппараты (КА) представляют собой сложные АО, функционирующие в особо тяжелых условиях работы. В частности, такими аппаратами являются спутники с телекоммуникационными системами, оснащенные оптическими измерительными приборами. При этом наличие экипажа на борту КА не уменьшает проблем, связанных с его автономностью, т. к. они определяются сложностью энергетических, материальных и информационных коммуникаций.

Функционирование бортовых систем АО в существенной степени зависит от качества информации, полученной путем измерений. Существенную долю в об-

щем количестве измерительной информации составляет информация, полученная от оптических ИС. Оптические системы (ОС) в КА широко используются в различных областях. В основном ОС используются в фоторазведке, астрономических и геодезических наблюдениях. В коммерческой сфере количество спутников зондирования растет. Космические снимки могут иметь низкое (более 10 м), среднее (от 10 до 2,5 м), высокое (от 2,5 до 1 м) и сверхвысокое (менее 1 м) разрешение. С увеличением разрешающей способности растут и весогабаритные показатели ОС КА, что увеличивает стоимость полученной с ее помощью информации, а значит, и ущерб от ее недостоверности [4]. Актуальность повышения качества оптико-электронных комплексов автономных объектов, в первую очередь космических аппаратов, постоянно растет, что связано в том числе с интенсивным их использованием в таких областях, как картографирование, создание геоинформационных систем и т. д. [5]. Эти наукоемкие направления обеспечивают перспективу стратегической интенсификации хозяйственной деятельности на многие годы. Развитие и эксплуатация оптико-электронных комплексов невозможны без повышения точности работы информационно-измерительных систем (ИИС), содержащих в своем составе оптические приборы. Существенной составляющей погрешности оптических измерений является термодеоформационная погрешность, причиной которой служит термодеоформация несущих конструкций ИИС из-за нестабильного и неравномерного температурного распределения в них. Температурные поля несущих конструкций неравномерны и нестабильны из-за нестационарных тепловыделений приборов ИИС [6], из-за воздействия излучения планет и звезд через соответствующие люки и отверстия космических аппаратов и т. п.

Для компенсации термодеоформаций разработана соответствующая система автоматического управления (САУ) тепловым режимом несущей конструкции, содержащая управляемые теплоисточники (УИТ), с помощью которых компенсируются термоградиенты несущей конструкции, возникающие под воздействием неравномерного тепловыделения ИИС и внешних теплоисточников [3, 7–9].

Рассмотрим алгоритм работы САУ на примере типовой несущей конструкции ИИС, имеющей форму прямоугольной призмы и выполненной из изотропного материала. С помощью соответствующей стандартизирующей функции [9–13]

$$\omega(x, y, z, \tau) = Q_{X_1}(0, y, z, \tau) + Q_{X_2}(R_x, y, z, \tau) + Q_{Y_1}(x, 0, z, \tau) + Q_{Y_2}(x, R_y, z, \tau) + Q_{Z_1}(x, y, 0, \tau) + Q_{Z_2}(x, y, R_z, \tau) \quad (1)$$

температурное распределение в несущей конструкции $T(x, y, z, \tau)$ можно представить в форме неоднородного дифференциального уравнения

$$\frac{\partial T(x, y, z, \tau)}{\partial \tau} - a \left[\frac{\partial^2 T(x, y, z, \tau)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T(x, y, z, \tau)}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T(x, y, z, \tau)}{\partial z^2} \right] = \omega(x, y, z, \tau), \quad \tau \in [0, \infty), \quad x \in [0, R_x], \quad y \in [0, R_y], \quad z \in [0, R_z] \quad (2)$$

с однородными краевыми условиями

$$\left. \frac{\partial T(x, y, z, \tau)}{\partial x} \right|_{x=0} = \left. \frac{\partial T(x, y, z, \tau)}{\partial y} \right|_{y=0} = \left. \frac{\partial T(x, y, z, \tau)}{\partial z} \right|_{z=0} = 0, \quad (3)$$

$$T(x, y, z, \tau)|_{\tau=0} = 0,$$

где $T(x, y, z, \tau)$ – относительная температура конструкции, a – коэффициент температуропроводности;

$$Q_{X_1}(0, y, z, \tau) = q_{X_1}(y, z, \tau) \cdot \delta(x),$$

$$Q_{X_2}(R_x, y, z, \tau) = q_{X_2}(y, z, \tau) \cdot \delta(x - R_x), \quad Q_{Y_1}(x, 0, z, \tau) = q_{Y_1}(x, z, \tau) \cdot \delta(y),$$

$$Q_{Y_2}(x, R_y, z, \tau) = q_{Y_2}(x, z, \tau) \cdot \delta(y - R_y),$$

$$Q_{Z_1}(x, y, 0, \tau) = [q_{Z_1}(x, y, \tau) + q_A(x, y, \tau) \cdot V_A(x, y)] \cdot \delta(z),$$

$$Q_{Z_2}(x, y, R_z, \tau) = [q_{Z_2}(x, y, \tau) + q_B(x, y, \tau) \cdot V_B(x, y)] \cdot \delta(z - R_z) - \text{тепловые потоки на соответствующие грани призмы; } R_x, R_y, R_z - \text{габариты призмы;}$$

$q_A(x, y, \tau)$, $q_B(x, y, \tau)$ – интенсивность тепловыделения управляемых и неуправляемых теплоисточников, расположенных на соответствующих гранях

$z = R_z$ и $z = 0$; $V_A(x, y) = \delta(x - x_A) \cdot \delta(y - y_A)$, $V_B(x, y) =$

$= \delta(x - x_B) \cdot \delta(y - y_B)$ – зоны воздействия концентрированных тепловых потоков соответствующих теплоисточников; $q_{X_1}(y, z, \tau)$, $q_{X_2}(y, z, \tau)$, $q_{Y_1}(x, z, \tau)$,

$q_{Y_2}(x, z, \tau)$, $q_{Z_1}(x, y, \tau)$, $q_{Z_2}(x, y, \tau)$ – интенсивность внешнего теплообмена на соответствующих гранях призмы; $\delta(\cdot)$ – дельта-функция Дирака.

Путем преобразования Лапласа соответствующей функции Грина краевой задачи (1), (2) удастся получить передаточные функции по каналам управления $q_A(x, y, z, \tau) - T(x, y, z, \tau)$ и возмущения $\{q_{X_1}, q_{X_2}, q_{Y_1}, q_{Y_2}, q_{Z_1}, q_{Z_2}, q_B\} - T(x, y, z, \tau)$ для объекта управления (1), (2) [14, 15].

На этой основе удастся решить задачу синтеза соответствующей системы автоматической стабилизации температурного поля конструкции с помощью дискретно распределенного управления $q_A(x, y, \tau)$. Методика синтеза базируется на конечномерной аппроксимации бесконечномерной трансформанты Лапласа соответствующей функции Грина и формулировке для синтеза регулятора на этой основе передаточной функции объекта с распределенными параметрами [10, 13, 14, 16–18].

На рис. 1 представлена обобщенная структура САУ температурным полем конструкции с помощью дискретно распределенных локальных регуляторов. Регулятор температуры каждой i -ой $T_i(\tau) = T(x_i, y_i, z_i, \tau) = \{T_i\}_1^N$ из N точек регулирования имеет пропорционально-интегральную структуру, совмещенную с релейной.

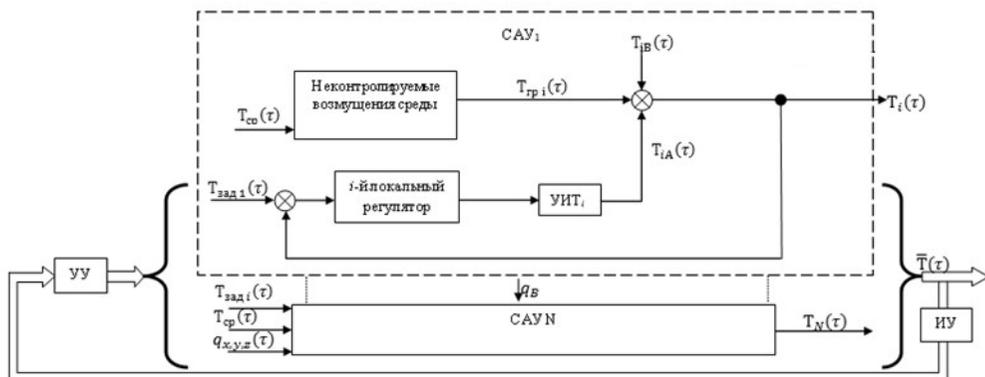


Рис. 1. Обобщенная структура САУ: УИТ – управляемый теплоисточник; $T_i(\tau)$ – температура в i -ой из N регулируемой точке; $T_{\text{зад } i}(\tau)$, $i = \overline{1, N}$ – заданная алгоритмом системы управляющего устройства температура в каждый из N регулируемых точек; $T_{\text{гр } i}(\tau)$ – средняя температура граней; $T_{\text{иА}}(\tau)$, $T_{\text{иВ}}(\tau)$ – компоненты температурного поля, обусловленные работой УИТ, неконтролируемыми возмущениями и тепловыделением измерительной аппаратуры; $T_{\text{сп}}(\tau)$ – температура окружающей конструкцию среды

Описание алгоритма работы САУ

Рациональный алгоритм (рис. 2) термоградиентной стабилизации конструкции совмещает релейный и пропорционально-интегрально-дифференциальный закон (ПИД-закон) регулирования распределения температуры по конструкции [14, 15, 19]. Основными преимуществами разработанного алгоритма являются:

- плавное изменение мощности нагревателей, что снижает риск образования термомодеформаций конструкции;
- повышение точности регулирования за счет исключения статической ошибки;
- снижение времени регулирования за счет наличия дифференциальной составляющей в законе регулирования, которая повышает скорость нарастания температуры.

Логика функционирования алгоритма основана на выработке задающего воздействия системе автоматического регулирования термоградиентной стабилизации конструкции, виртуальный регулятор которой реализует ПИД-закон регулирования. Задающее воздействие изменяется в зависимости от текущей максимальной температуры конструкции в условиях накладываемых ограничений на максимальную и минимальную назначенную температуру конструкции.

Управляющее воздействие, формируемое регулятором, подается на нагреватель дискретно в зависимости от значения мощности в текущий момент времени.

Входной информацией для работы алгоритма являются:

- номер шага работы $i = 1, 2, \dots, n$, где n – общее число шагов работы алгоритма (шаги по нагрузке или по времени);
- номер датчика или нагревателя конструкции $j = 1, 2, \dots, N$, где $N = 64$ – максимальное число датчиков или нагревателей конструкции;

– K_{pi} , K_{u_i} , T_{∂_i} – параметры настройки ПИД-регулятора, который задает закон изменения мощности нагревателя;

– мощности нагревателей на первом шаге $P_{1,j} = 0$.

Изначально заданные данные – диапазон изменения температуры конструкции от T_{\min} до T_{\max} .

Выходной информацией работы алгоритма являются:

– признак работоспособности датчика;

– признак работоспособности нагревателя.

Данные, получаемые в процессе опроса микроконтроллера:

– показания датчиков температуры $T_{i,j}$;

– текущие значения подключенной мощности нагревателей $P_{i,j}$.

Описание рационального алгоритма термобароградной стабилизации конструкции

1. Диагностика технических средств

1.1. Диагностика отказа датчика (рис. 3).

На каждом шаге работы алгоритма осуществляется диагностика отказов датчиков. Проверка датчика на отказ проводится путем выявления нулевого токового сигнала. Признаком отказа датчика является отсутствие токового сигнала, что может быть связано с обрывом линии связи или неисправностью датчика. Если признак отказа датчика выявлен, то соответствующая пара нагревателей принудительно отключается.

1.2. Диагностика отказа нагревателя.

На каждом шаге работы алгоритма осуществляется диагностика отказов нагревателей. Проверка нагревателя на отказ проводится путем опроса нулевого. Признаком отказа нагревателя является отсутствие токового сигнала, что может быть связано с обрывом линии связи или неисправностью нагревателя. Если признак отказа нагревателя выявлен, то соответствующая пара нагревателей принудительно отключается.

1.3. Диагностика отказа измерительного канала.

На каждом шаге работы алгоритма осуществляется диагностика отказов измерительного канала. Если обнаружен признак отказа (обрыв линии связи или КЗ), то соответствующий управляющий канал с нагревателями отключается.

Как только признак отказа датчика, нагревателя, измерительного или управляющего канала будет устранен, производится соответствующее включение в алгоритм нагревателей и управляющего канала.

2. Опрос всех датчиков и определение максимальной температуры конструкции на текущем шаге

2.1. На этом шаге происходит считывание показания датчика $T_{i,j}$, запись этой информации в память микроконтроллера.

2.2. Проверка на выход из цикла опроса датчиков:

2.2.1. Если $j = N$, то осуществляется переход к шагу 2.3 алгоритма.

2.2.2. Если $j < N$, то $j = j + 1$ и осуществляется переход к шагу 2.1 алгоритма.

2.3. Выбор среди этих показаний максимальной температуры на текущем шаге работы алгоритма T_i^{\max} .

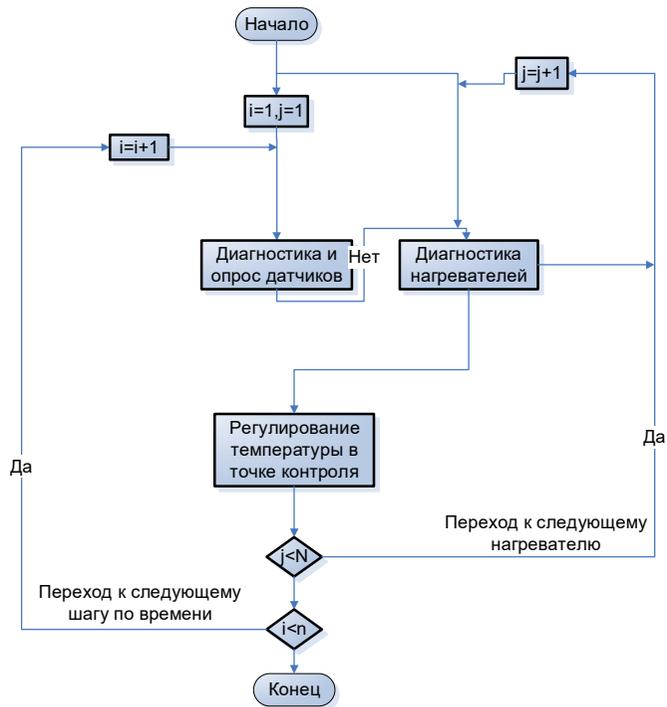


Рис. 2. Общая схема работы алгоритма

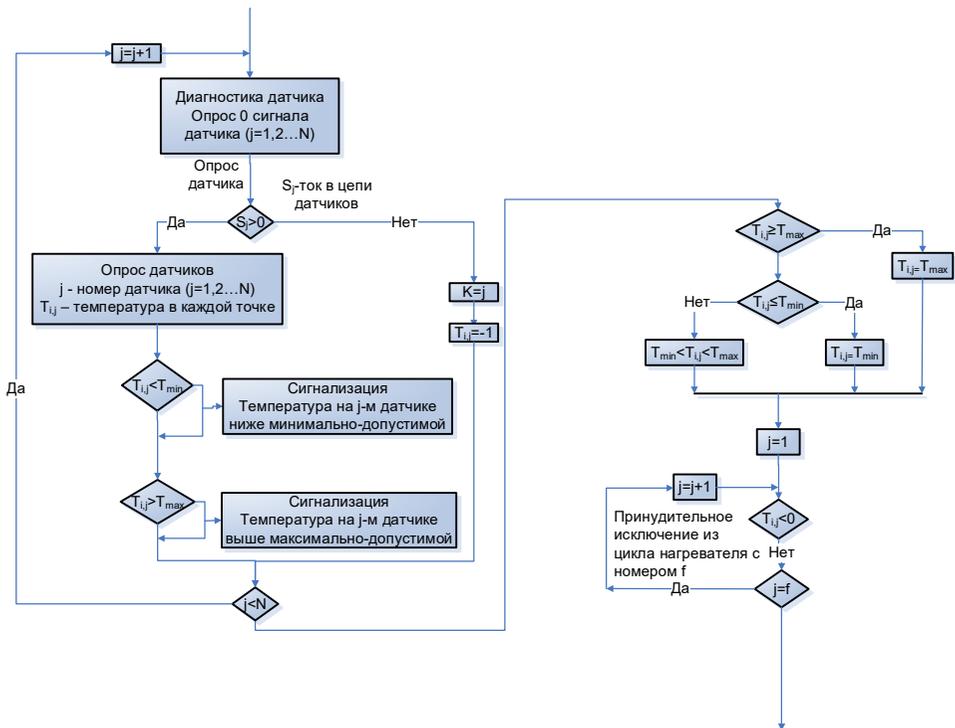


Рис. 3. Схема алгоритма диагностики датчиков

3. Выработка задающего воздействия

3.1. Если $T_i^{\max} > T_{\max}$, то заданная температура на текущем шаге принимается равной максимальной назначенной температуре $T_{зад_i} = T_{\max}$.

3.2. Если $T_i^{\max} < T_{\min}$, то заданная температура на текущем шаге принимается равной минимальной назначенной температуре $T_{зад_i} = T_{\min}$.

3.3. Если $T_{\min} < T_i^{\max} < T_{\max}$, то заданная температура на текущем шаге принимается равной текущей максимальной температуре конструкции $T_{зад_i} = T_i^{\max}$.

4. Формирование управляющих воздействий

4.1. Если текущая температура в датчике $T_{\min} \leq T_{i,j} \leq T_{\max}$, то мощность соответствующего нагревателя на $i+1$ -ом шаге формируется по ПИД-закону:

$$P_{i+1,j} = K_j (T_{зад_i} - T_{i,j}) + \frac{1}{A \cdot T_u} \text{Integrator}_{i,j} (T_{зад_i}, T_{i,j}, \tau_i, \tau_{i-1}) + A \cdot T_d \frac{T_{i-1,j} - T_{i,j}}{\tau_i - \tau_{i-1}}, \quad (4)$$

$$\text{Integrator}_{i,j} (T_{зад_i}, T_{i,j}, \tau_i, \tau_{i-1}) = \sum_{i=1}^n [(T_{зад_i} - T_{i,j}) (\tau_i - \tau_{i-1})], \quad (5)$$

где t_i – текущее время работы алгоритма; A – масштабный коэффициент, который устраняет негативное влияние на работу алгоритма большого шага дискретизации по времени (установка необходима, только если время опроса датчиков и выработка управляющих воздействий превышает 5 секунд), значение коэффициента выбирается в зависимости от шага дискретизации по времени; $\text{Integrator}_{i,j} (T_{зад_i}, T_{i,j}, \tau_i, \tau_{i-1})$ – интегратор.

4.2. Если текущая температура в датчике $T_{i,j} < T_{\min}$, то мощность соответствующего нагревателя на $i+1$ -ом шаге устанавливается равной $P_{i+1,j} = P_{\max}$ и интегратор (5) в (4) принудительно устанавливается равным $\text{Integrator}_{i+1,j} (T_{зад_i}, T_{i,j}, \tau_i, \tau_{i-1}) = 0$.

4.3. Если текущая температура в датчике $T_{i,j} > T_{\max}$, то мощность соответствующего нагревателя на $i+1$ -ом шаге устанавливается равной $P_{i+1,j} = 0$ и интегратор (5) в (4) принудительно устанавливается равным $\text{Integrator}_{i+1,j} (T_{зад_i}, T_{i,j}, \tau_i, \tau_{i-1}) = 0$.

4.4. На управляющее воздействие в виде закона изменения мощности нагревателя накладывается ограничение на максимальное и минимальное значение, а также указанное значение мощности дискредитируется на 8 уровней. Схема алгоритма управления представлена на рис. 4.

$$\tilde{P}_{i+1,j} = \begin{cases} 3.5, & P_{i+1,j} \geq 3.5, \\ 3, & 3 \leq P_{i+1,j} < 3.5, \\ 2.5, & 2.5 \leq P_{i+1,j} < 3, \\ 2, & 2 \leq P_{i+1,j} < 2.5, \\ 1.5, & 1.5 \leq P_{i+1,j} < 2, \\ 1, & 1 \leq P_{i+1,j} < 1.5, \\ 0.5, & 0.5 \leq P_{i+1,j} < 1, \\ 0, & P_{i+1,j} < 0.5. \end{cases}$$

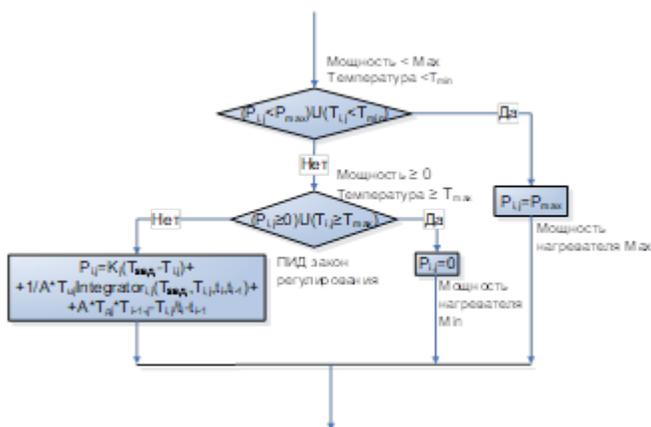


Рис. 4. Алгоритм управления

5. Проверка на достижение предельного числа опрашиваемых датчиков

5.1. Если $j = N$, то осуществляется переход к 7-му шагу алгоритма.

5.2. Если $j < N$, то осуществляется переход к 6-му шагу алгоритма.

6. Переход к следующему нагревателю $j = j + 1$. Переход к 4-му шагу.

7. Проверка на выход из алгоритма

7.1. Если $i < n$, то осуществляется переход к 1-му шагу работы алгоритма $i = i + 1$.

7.2. Если $i = n$, то осуществляется выход из алгоритма.

Заключение

На рис. 5, 6 и 7 представлены результаты конечно-элементного моделирования САУ в среде ANSYS при типовых для этого объекта возмущениях и учете конструктивных особенностей несущей конструкции ИИС.

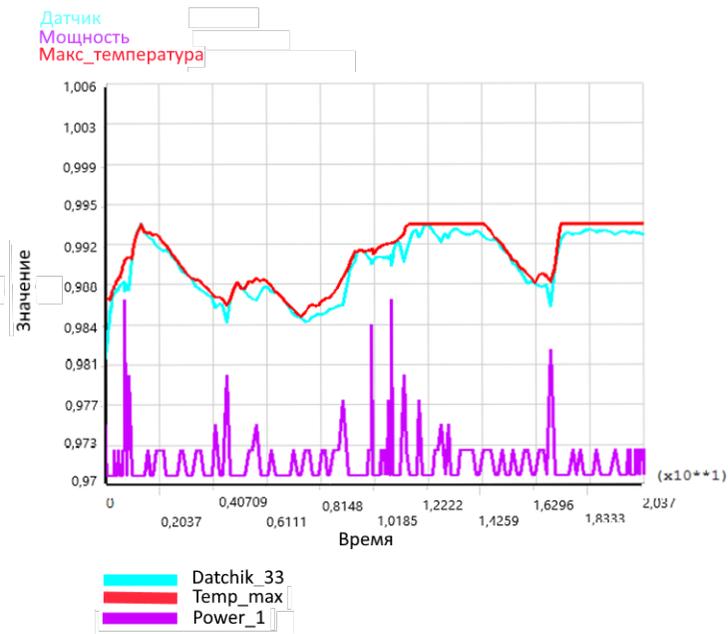


Рис. 5. Температура в контрольной точке 33, мощность нагревателя (Power_1) и текущая заданная максимальная температура конструкции (Temp_max) при рациональном алгоритме работы САУ термомонограднентной стабилизации конструкции

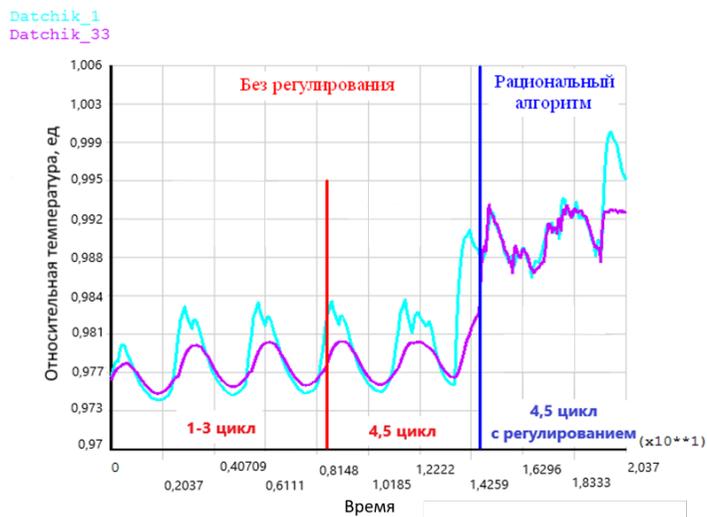


Рис. 6. Температура в контрольных точках 1 и 33 при рациональном алгоритме работы САУ

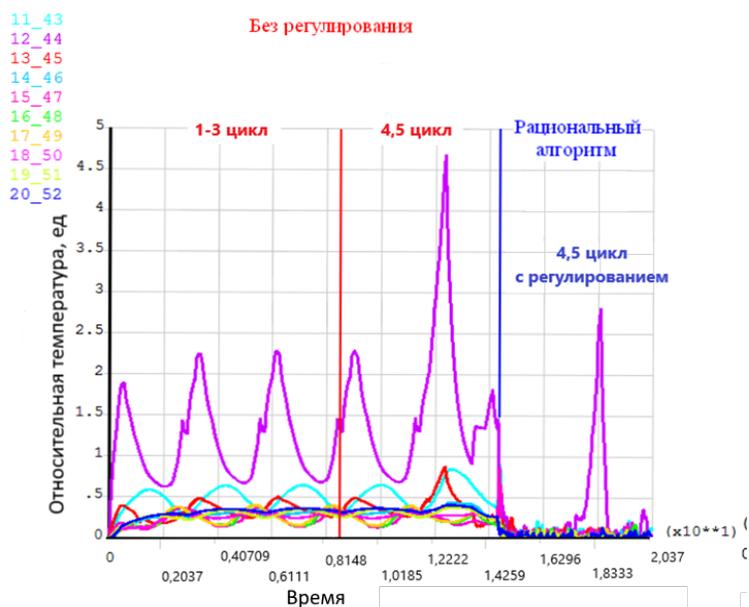


Рис. 7. Температура несущей конструкции в соответствующих контрольных точках до и после применения рационального алгоритма работы САУ: 11_43, 12_44, 13_45, 14_46, 15_47, 16_48, 17_49, 18_50, 19_51, 20_52 – номера соответствующих точек контроля на несущей конструкции

Таким образом, рациональный алгоритм термоградиентной стабилизации конструкции требует малого информационного ресурса памяти; кроме того, позволяет плавно регулировать мощность нагревателей, уменьшает время и повышает точность регулирования. К недостаткам рационального алгоритма относятся отсутствие непосредственного учета средней температуры по площади каркаса и отсутствие специального блока локального регулирования перепада температуры по толщине конструкции, который регулирует этот перепад в рамках общей температурной стабилизации всей конструкции.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Tesla показала мир «глазами» автопилота. – URL: <https://nplus1.ru/news/2016/11/21/world> (дата обращения: 21.11.2016).
2. Зраев Р.А. Техника покорения морских глубин. Необитаемые подводные аппараты вчера, сегодня и завтра // Молодой ученый. – 2016. – № 26 (130). – С. 37–39. — URL: <https://moluch.ru/archive/130/35877/> (дата обращения: 02.12.2021).
3. Бутковский А.Г. Теория оптимального управления системами с распределенными параметрами. – М.: Наука, 1965. – 474 с.
4. Космическая съемка. – URL: <https://sovzond.ru/products/spatial-data/satellites/> (дата обращения: 03.12.2021).
5. Borodulin B., Livshits M. Optimal control of temperature modes of the instrumental constructions of autonomous objects. In: EPJ Web of Conferences. Volume 110, Thermophysical Basis of Energy Technologies (2016).
6. Buttazzo G., Kogut P. Weak optimal controls in coefficients for linear elliptic problems. Rev. Mat. Complut. 24, 83–94 (2018).
7. Lions J. Control of Distributed Singular Systems. Gauthier-Villars, Paris, 1985. 552 p. (1985).
8. Di Loreto M., Damak S., Eberard D., Brun X. Approximation of linear distributed parameter systems by delay systems. Automatica, pp. 162–168. <https://doi.org/10.1016/j.automatica.2016.01.065> (2016).

9. *Livshits M.Yu., Borodulin B.B., Nenashev A.V., Savelyeva Yu.O.* Автоматическая компенсация термодформаций несущих конструкций киберфизических информационно-измерительных систем // Математические методы в технологиях и технике – ММТТ. – 2021. – № 3. – С. 51–54.
10. *Pleshivtseva Y., Rapoport E.* Parametric optimization of systems with distributed parameters in problems with mixed constraints on the final states of the object of control. *J. Comput. Syst. Sci. Int.* 57, 723 (2018). <https://doi.org/10.1134/S1064230718050118>.
11. *Чичинадзе В.К.* Решение невыпуклых нелинейных задач оптимизации. – М.: Наука, 1983. – 256 с.
12. *Livshits M.Yu., Borodulin B.B.* Comparative analysis of optimal temperature distributions in the responsible sections of load bearing structures, *MATEC Web of Conferences*, 110, 01015 DOI:10.1051/mateconf/201711001015 2017 (2017).
13. *Ранопорт Э.Я.* Альтернативный метод в прикладных задачах оптимизации. – М.: Наука, 2000. – 335 с.
14. *Gogol I.V., Remizova O.A., Syrokvashin V.V., Fokin A.L.* Robust Autonomous Control of a Multiply Connected Technological Object with Input Delays. *Cyber-Physical Systems: Modelling and Intelligent Control, Studies in Systems, Decision and Control 338*. Springer International Publishing, 2021 https://doi.org/10.1007/978-3-030-66077-2_7.
15. *Livshits M.Yu., Borodulin B.B., Korshikov S.E.* Optimization of Temperature Distributions in Critical Cross-sections of Load-bearing Structures of Measurement Optical Systems of Autonomous Objects. *MATEC Web of Conferences. Thermophysical Basis of Energy Technologies (TBET-2016)*. 2017. Vol. 92, N. 01053. Doi: <http://dx.doi.org/10.1051/mateconf/20179201053>.
16. *Li R., Liu W., Ma H., Tang T.* Adaptive finite-element approximation for distributed elliptic optimal control problems. *SIAM J. Contr. Optim.*, 4, 1244–1265 (2003).
17. *Murat F., Tartar L.* On the control of the coefficients in partial equations. *SIAM J. Contr. Optim.*, 4, 1244–1265 (2003).
18. *Lian T., Fan Z., Li G.* Lagrange optimal controls and time optimal controls for composite fractional relaxation systems. *Adv Differ Equ.* 1, 233. <https://doi.org/10.1186/s13662-017-1299-7>. (2017).
19. *Livshits M.Yu., Borodulin B.B.* Optimal control of temperature modes of the instrumental constructions of autonomous objects. *EPJ Web of Conferences. Thermophysical Basis of Energy Technologies* 2015. 2016. Vol. 110. N. 01036. Doi: <http://dx.doi.org/10.1051/epjconf/201611001036>.

Статья поступила в редакцию 5 августа 2021 г.

ALGORITHM FOR AUTOMATIC COMPENSATION OF THERMAL DEFORMATIONS OF THERMALLY LOADED LOAD-BEARING STRUCTURES

B.B. Borodulin*

Samara State Technical University
244, Molodogvardeyskaya st., Samara, 443100, Russian Federation

E-mail: borodulinbb@gmail.com

Abstract. *The paper considers a possible algorithm for the automatic control system of the thermal modes of load-bearing structures of the information-measuring system of autonomous objects. Thermo-deformation component of information-measuring error, which is the cause of distortion of operating and service information of an autonomous object, is reduced due to compensation of thermogradient by automatic control system of operation modes of distributed controlled heat sources. The system provides a significant reduction in the level of thermal deformation error of measurements, the cause of which is the deformation of supporting structures due to unstable and uneven heat release of information-measuring instruments placed on the structure. To compensate for thermal deformations, the system includes controlled heat sources that compensate for the thermal gradients of the supporting structure arising under the influence of the information-measuring system instruments and external thermal radiation on the structure. An effective rational control algorithm, providing compensation of the thermal gradient of the load-bearing structure to an acceptable level, is proposed. The control algorithm and the system structure are designed to be implemented by special software of the on-board computer.*

Keywords: *autonomous object, thermal deformation compensation, controlled heat sources, thermal regime.*

REFERENCES

1. Tesla pokazala mir «glazami» avtopilota (Tesla showed the world "through the eyes" of the autopilot). <https://nplus1.ru/news/2016/11/21/world> (November 21, 2016). (in Russian).
2. Zraev R.A. Tehnika pokoreniya morskikh glubin. Neobitaemye podvodnye apparaty vchera, segodnya i zavtra (Techniques for conquering the sea depths. Unmanned submersibles yesterday, today and tomorrow). Molodoy ucheniy. 2016. № 26 (130). pp. 37–39. URL: <https://moluch.ru/archive/130/35877/> (accessed: 02.12.2021). (in Russian).
3. Butkovskii A. Theory of Optimal Control of Distributed-Parameter Systems. Moscow: Nauka. 1965. 474 p. (in Russian).
4. Kosmicheskaya s'yomka (Satellite imagery). <https://sovzond.ru/products/spatial-data/satellites/> (accessed: 03.12.2021). (in Russian).
5. Borodulin B.B., Livshits M.Yu. Optimal control of temperature modes of the instrumental constructions of autonomous objects. In: EPJ Web of Conferences. Volume 110, Thermophysical Basis of Energy Technologies (2016).
6. Lions J. Control of Distributed Singular Systems. Gauthier-Villars. Paris. 1985. 552 p. (1985).
7. Di Loreto M., Damak S., Eberard D., Brun X. Approximation of linear distributed parameter systems by delay systems. Automatica, pp. 162–168. <https://doi.org/10.1016/j.automatica.2016.01.065> (2016).
8. Livshits M.Yu., Borodulin B.B., Nenashchev A.V., Savelyeva Yu.O. Automatic compensation of thermal deformations of supporting structures of cyber-physical information-measuring systems. MMTT. 2021. № 3. pp. 51–54. (2021). (in Russian)

* Boris B. Borodulin, Postgraduate Student

9. *Pleshivtseva Y., Rapoport E.* Parametric optimization of systems with distributed parameters in problems with mixed constraints on the final states of the object of control. *J. Comput. Syst. Sci. Int.* 57, 723. <https://doi.org/10.1134/S1064230718050118>. (2018).
10. *Chichinadze V.* Solving non-convex nonlinear optimization problems. Nauka. Moscow. 1983. 256 p. (in Russian).
11. *Livshits M.Yu., Borodulin B.B.* Comparative analysis of optimal temperature distributions in the responsible sections of load bearing structures, MATEC Web of Conferences, 110, 01015 DOI:10.1051/mateconf/201711001015 2017 (2017).
12. *Rapoport E.* Alternance Method in Applied Optimization Problems. Moscow. Nauka. 2000. 335 p. (in Russian).
13. *Gogol I.V., Remizova O.A., Syrokvashin V.V., Fokin A.L.* Robust Autonomous Control of a Multiply Connected Technological Object with Input Delays. *Cyber-Physical Systems: Modelling and Intelligent Control, Studies in Systems, Decision and Control 338.* Springer International Publishing, 2021 https://doi.org/10.1007/978-3-030-66077-2_7.
14. *Livshits M.Yu., Borodulin B.B., Korshikov S.E.* Optimization of Temperature Distributions in Critical Cross-sections of Load-bearing Structures of Measurement Optical Systems of Autonomous Objects. MATEC Web of Conferences. Thermophysical Basis of Energy Technologies (TBET-2016). 2017. Vol. 92. N. 01053. Doi: <http://dx.doi.org/10.1051/mateconf/20179201053>.
15. *Li R., Liu W., Ma H., Tang T.* Adaptive finite-element approximation for distributed elliptic optimal control problems. *SIAM J. Contr. Optim.*, 4, 1244–1265 (2003).
16. *Murat F., Tartar L.* On the control of the coefficients in partial equations. *SIAM J. Contr. Optim.*, 4, 1244–1265 (2003).
17. *Lian T., Fan Z., Li G.* Lagrange optimal controls and time optimal controls for composite fractional relaxation systems. *Adv Differ Equ.* 1, 233. <https://doi.org/10.1186/s13662-017-1299-7>. (2017).
18. *Livshits M.Yu., Borodulin B.B.* Optimal control of temperature modes of the instrumental constructions of autonomous objects. EPJ Web of Conferences. Thermophysical Basis of Energy Technologies 2015. 2016. Vol. 110. N. 01036. Doi: <http://dx.doi.org/10.1051/epjconf/201611001036>.
19. *Buttazzo G., Kogut P.* Weak optimal controls in coefficients for linear elliptic problems. *Rev. Mat. Complut.* 24, 83–94 (2018).

УДК 621.3.07

АДАПТИВНАЯ СИСТЕМА АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ ПРОЦЕССОМ ТОНКОЙ ВЫТЯЖКИ**В.Е. Лысов, А.П. Синюков***Самарский государственный технический университет
Россия, 443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244

E-mail: epa@samgtu.ru

Аннотация. Рассмотрен технологический процесс глубокой вытяжки с учетом высокой степени деформации металла и малой толщины (0,5 мм) заготовки. С учетом высокой сложности процесса и невозможности его представления в аналитической форме в работе используется его представление в виде фазового портрета в плоскости усилия вытяжки и перемещения пуансона гидравлического пресса. Фазовые траектории в упомянутой плоскости определяют геометрические размеры изделия, характеризуют напряжения и деформацию в ходе процесса и определяют структуру алгоритма управления процессом. Рассматриваемая в работе цифровая позиционно-следающая система включает электромеханические, гидравлические, пневмоэлектрические и электронные звенья. Система обеспечивает прецизионное позиционирование пуансона гидравлического пресса с контролем и управлением его скорости перемещения. В работе предоставлена идеальная математическая модель процесса вытяжки. В результате сравнения фазовых траекторий модели и реального процесса выявляется возможная разность в силу действующих помех на реальном процессе. Полученная разность позволяет сформировать в системе дополнительное управляющее воздействие на контур управления скоростью пуансона с целью компенсировать возникшее рассогласование. Таким образом реализуется стабилизация усилия вытяжки в функции перемещения пуансона. В работе приводятся математические описания всех звеньев системы, предоставлены динамические характеристики процесса. В качестве возмущающих воздействий на процесс вытяжки рассмотрены: упрочнение металла, непостоянная сила трения, возникающая при прижиме заготовки, изменение усилия вытяжки при сопряжении частей заготовки, втягиваемой в матрицу, гофрообразование, утонение металла при переходе донной части к боковой стенке изделия. Упомянутые возмущения без рассматриваемой системы не в полной мере обеспечивали качество изделий. Вследствие возникающего брака имели место значительные производственные затраты. Материалы работы и численные данные звеньев системы технологического процесса получены на примере изготовления баллона автомобильного порошкового огнетушителя ОП-2(3)-АВСЕ, выпускавшегося на заводе «Сам ЗПО» (завод противопожарного оборудования).

Ключевые слова: глубокая вытяжка, передаточная функция, модель процесса, контур регулирования скорости перемещения пуансона, пневмопозиционер, запаздывание, коэффициент передачи звеньев системы.

* Лысов Владимир Ефимович, профессор кафедры «Электропривод и промышленная автоматика», доктор технических наук, профессор.

Синюков Андрей Павлович, магистрант.

Введение

Для деталей, изготавливаемых с помощью процесса глубокой вытяжки, используют листовый металл [1] с высокими пластическими свойствами: сталь с низким содержанием углерода, конструкционную сталь, разнообразные сплавы алюминия, латунь, медь и др. Реализацию процесса вытяжки производят в специальных штампах [2, 3].

С помощью вытяжки изготавливают разнообразные полые детали из заготовок плоского листового металла или полых тонкостенных заготовок, обычно не требующих дальнейшей обработки, кроме обрезки неровного края. К ним относятся:

- детали в форме тел вращения: днища разнообразных цилиндрических резервуаров, посуда из металла, корпуса осветительной арматуры и др.;
- коробчатые детали: топливные баки, бидоны для горюче-смазочных материалов, тара для продуктов консервного производства и пр.;
- детали с одной осью симметрии или ассиметричные: детали автомобилестроительного производства – крыша автомобиля, его двери, капот и пр.;
- цилиндрические детали, у которых толщина дна больше толщины стенок: артиллерийские гильзы, гильзы стрелкового оружия, металлическая посуда с толстым дном и пр.

Вышеуказанные детали могут принимать диаметр (или длину) – от нескольких миллиметров до нескольких метров и толщину стенки от десятых долей до десятков миллиметров.

В зависимости от высоты детали процесс вытяжки может осуществляться в один или несколько переходов. За первый переход плоскую заготовку вытягивают в полу, открытую с одного конца деталь или полуфабрикат (рис. 1, *а*); в дальнейших переходах увеличивается высота при одновременном уменьшении поперечных размеров полуфабрикатов, полученных на предыдущих переходах вытяжки (рис. 1, *б*).

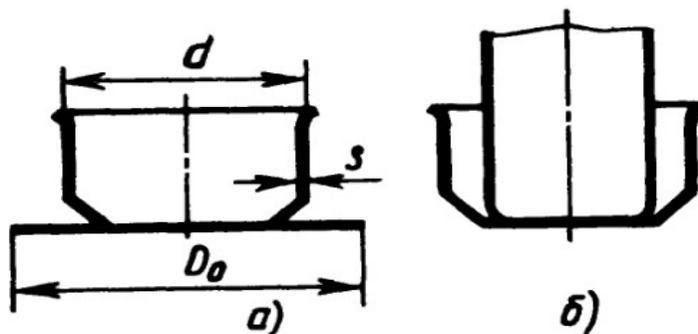


Рис. 1. Переходы вытяжки: *а* – первый; *б* – последующий

За один переход вытяжки можно получить детали, высота которых не превышает 0,7–0,8 диаметра. При вытяжке более высоких деталей нежелательные напряжения, возникающие в стенке, возрастают настолько, что может наступить отрыв дна. В связи с этим процесс вытяжки необходимо разделять на несколько переходов, что позволяет уменьшить радиальные растягивающие напряжения в стенках вытягиваемой детали.

Графическое представление процесса вытяжки

Степень качества полуфабриката в итоге определяется на втором переходе вытяжки. При глубокой вытяжке в месте перехода донной части к боковой стенке происходит утонение $10 \div 20\%$, у торца изделия утонение $10 \div 20\%$. Однако учитывая, что $S = 0,5$ мм, будем считать, что толщина утонения постоянна.

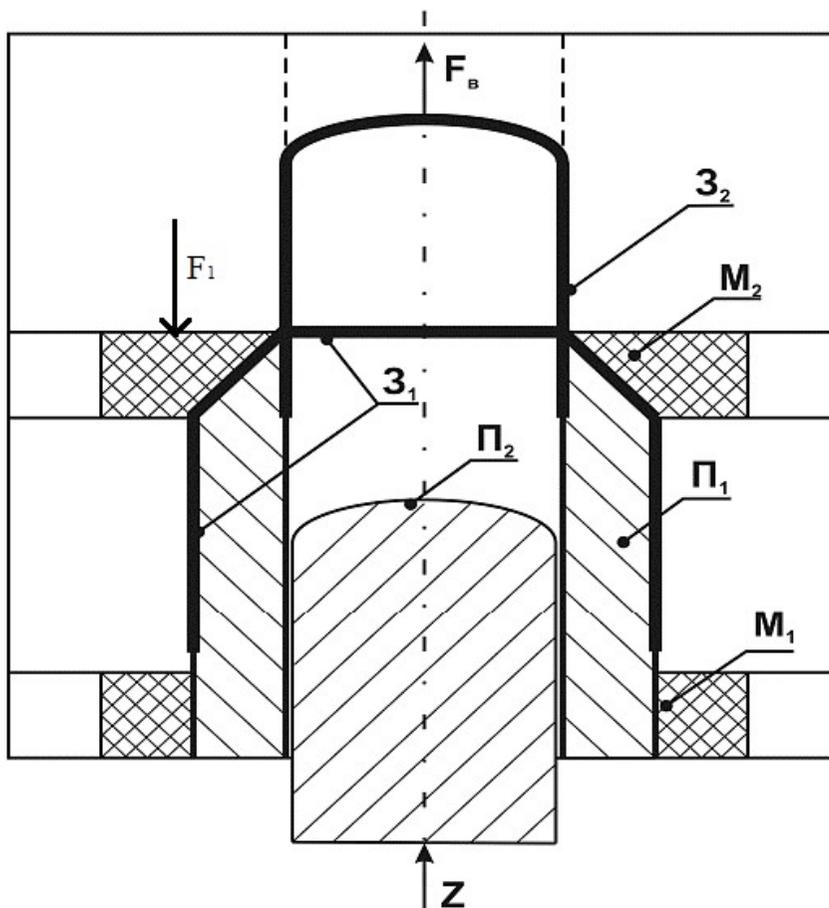


Рис. 2. Схема процесса вытяжки:

P_1 – пуансон первой вытяжки; P_2 – пуансон второй вытяжки; M_1 – матрица первой вытяжки; M_2 – матрица второй вытяжки; Z_1 – заготовка после первой вытяжки; Z_2 – заготовка после второй вытяжки; F_v – усилие вытяжки; Z – перемещение пуансона; F_1 – сила прижатия заготовки

Схематичное изображение второго перехода процесса вытяжки представлено на рис. 2. Заготовка в виде стакана Z после первого перехода расположена между поршнем P_1 и матрицей первого перехода M_1 и прижимается с силой F_1 . Воздействуя усилием F_v , исходящим от поршня P_2 в направлении Z , заготовка Z втягивается в матрицу M_2 , с помощью которой и формируются финальные размеры детали, а ход поршня P_2 по оси Z определяет высоту детали. Скорость движе-

ния поршня определяется объемом расхода гидравлической жидкости, подаваемой в цилиндр поршня P_2 .

В процессе вытяжки и деформации значительной степени с малой толщиной металла исходного материала возникает множество неблагоприятных напряжений. Для достижения высокой производительности и стабильного усилия вытяжки на предельно допустимом уровне необходимо стабилизировать величину усилия на втором переходе вытяжки.

Следует отметить, что в процессе вытяжки меняются механические свойства материала [3–5]. Эти изменения могут привести к возникновению недопустимых усилий вытяжки с постоянной скоростью и соответственно к браку – разрыву металла, появлению трещин и, следовательно, безвозвратной потере материала и другим затратам. С этой целью необходимо использовать [5] идентификацию процесса как объекта системы автоматического управления глубокой вытяжкой с представлением математической модели объекта и его структурной схемы.

В практике на характер распределения напряжений оказывает значительное влияние ряд факторов: силы трения, упрочнение металла, сопряжение и изгиб частей заготовки при втягивании ее в матрицу.

Использование математических моделей дает возможность исследовать протекание технологического процесса от упомянутых выше воздействий и определить меры компенсации. Кроме того, математическая модель помогает выделить доминирующие воздействия.

В силу сложности процесса [6] невозможно представить его в аналитической форме. Поэтому процесс представим в виде изображающей траектории в системе координат ZOF (рис. 3). Упомянутая плоскость определяет геометрию изделия, характеризует напряженно-деформированное состояние в ходе процесса и определяет структуру алгоритма управления процессом.

По оси Z откладывается перемещение пуансона пресса, по оси F – усилие вытяжки.

Описание участков диаграммы: Z_{xx} – участок прямого холостого хода, зависит от конструкции пресса; Z_2 – натягивание заготовки на дно пуансона и придание формы торцу детали; Z_3 – процесс начала втягивания пуансона с заготовкой в матрицу M_2 . Участок характеризуется резким увеличением усилия противодействия F_3 при малом перемещении пуансона. При втягивании пуансона на всю длину Z_4 матрицы происходит возрастание усилия до F_4 при сохранении предельно допустимого растягивающего напряжения. После прохождения матрицы M_2 усилие вытяжки возрастает незначительно – до величины F_5 на участке Z_5 . Участок Z_6 определяет разгрузку пуансона после останова до значения F_{xx} . Участок Z_7 описывает обратный ход пуансона в исходное положение. На диаграмме отмечены технологические допуски как по отклонению перемещения Z_i в виде ΔI_i , так и по отклонению усилия вытяжки ΔF_i . Чтобы обеспечить устойчивость и повторяемость процесса глубокой вытяжки, необходимо поддерживать расположение изображающей траектории каждой итерации процесса в границах, установленных согласно траектории в плоскости ZOF .

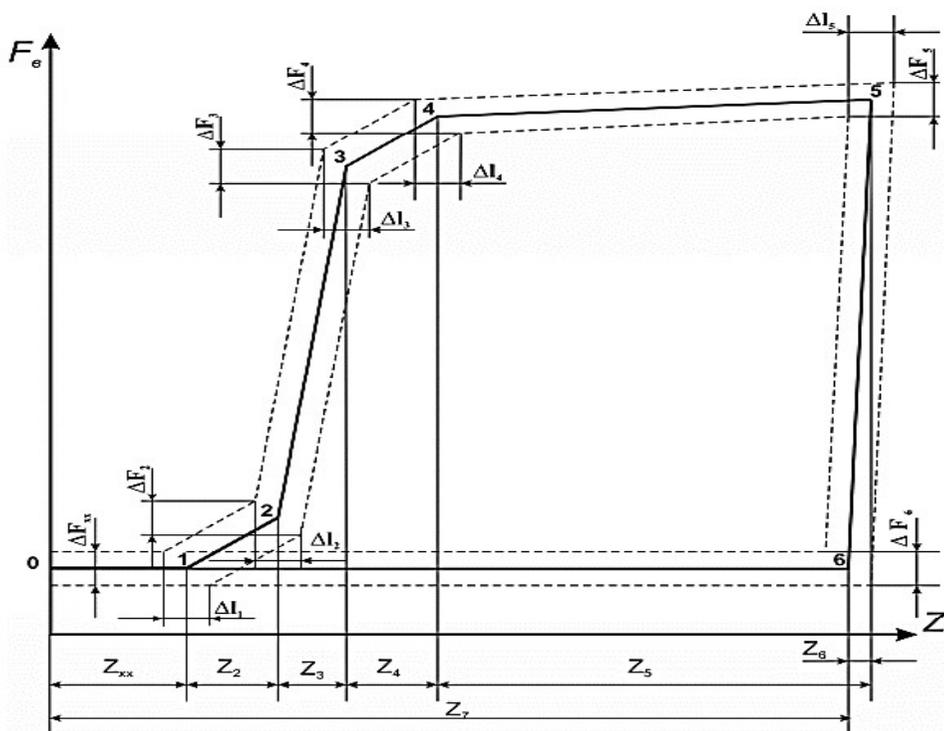


Рис. 3. Диаграмма формирования усилия вытяжки

Синтез системы автоматического управления процессом вытяжки

На основе описанных процессов составляется функциональная схема объекта управления процессом глубокой вытяжки совместно с электрогидропневматической аппаратурой, обеспечивающей реализацию процесса.

Основными факторами, которые могут оказывать влияние на динамику контура скорости, являются наличие электропневмопозиционера, а также влияние запаздывания и упругих деформаций заготовки на первом этапе вытяжки.

Оценка влияния динамики процесса от упомянутых выше факторов позволяет принять конструктивные меры для снижения их действия при реализации САУ.

На рис. 4 изображена функциональная схема контура скорости, где отмечен электропневмопозиционер. Он представлен в виде цилиндра 2, движение поршня в котором (X_{11}) определяется положением золотника 1. Применение золотниковых распределителей обусловлено линейной зависимостью между расходом гидравлической жидкости Q_1 и перемещением золотника (X_1).

Золотник смещается за счет электромеханического преобразователя, в составе которого – катушка управления 4, которая расположена на подвижном штоке 1 и на которую подается сигнал управления U_y , и катушка возбуждения 5 или постоянный магнит, размещенный на корпусе цилиндра.

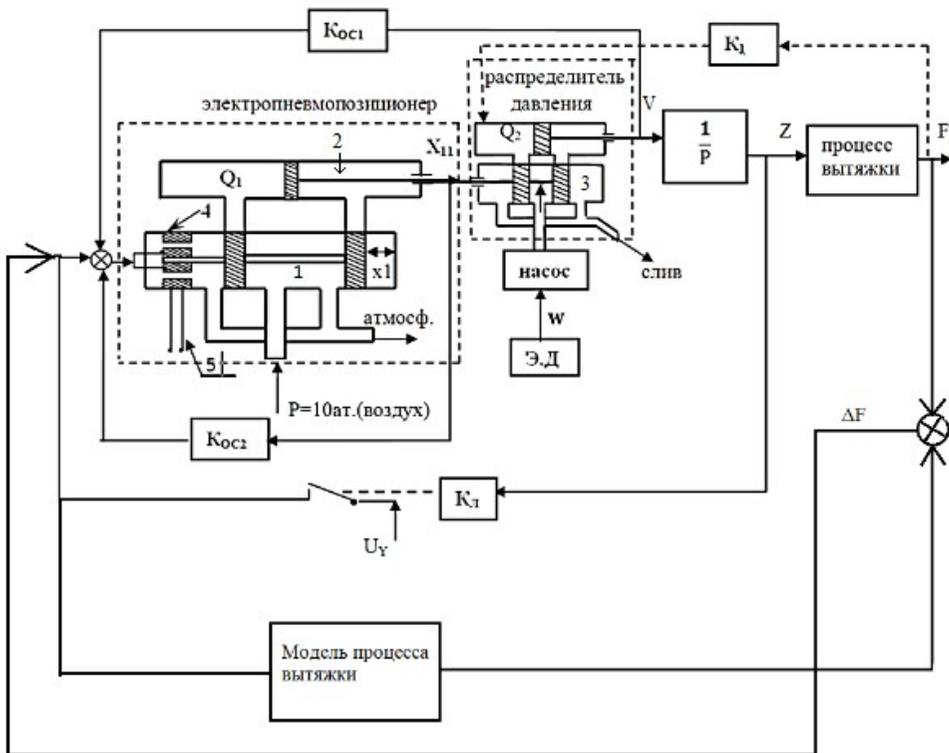


Рис. 4. Функциональная схема САУ процессом вытяжки

Движение поршня (X_{11}) приводит к перемещению золотника 3, который определяет расход гидравлической жидкости Q_2 в цилиндре перемещения штока пуансона и его скорость $V = \frac{dx}{dt}$. Для целей стабилизации установленного положения электропневмопозиционер снабжен обратной отрицательной связью по положению K_{oc2} .

Для стабилизации скорости движения пуансона применена обратная связь по скорости с коэффициентом передачи K_{oc1} . Для ограничения хода пуансона используется сравнение пройденного пути Z с заданным и при их равенстве происходит отключение сигнала задания.

Передаточная функция [7] электропневмопозиционера:

$$W_{EMP}(p) = \frac{X_1(p)}{U_Y(p)} = \frac{K_{EMP}}{T_S p + 1}. \quad (1)$$

В (1) принято: T_S – постоянная времени электропневмопозиционера; K_{EMP} – коэффициент передачи.

Передаточная функция, связывающая перемещение штока электропневмопозиционера с перемещением штока золотника 1:

$$W_1(p) = \frac{Q_2(p)}{x_1(p)} = \frac{K_1}{S_S p} = \frac{K_{11}}{p}, \quad (2)$$

где $K_{11} = \frac{K_1}{S_s}$.

В (2) обозначено: K_1 – коэффициент передачи, определяющий связь между расходом жидкости и перемещением штока золотника; S_s – площадь щели золотника.

Электропневмопозиционер имеет звено обратной связи для реализации целей стабилизации заданного. Поэтому передаточная функция представлена в виде колебательного звена:

$$W_p(p) = \frac{x_{11}(p)}{U_{oc}(p)} = \frac{1}{K_{oc2}} \frac{1}{T^2 p^2 + T_1 p + 1}. \quad (3)$$

В (3) принято: K_{oc2} – коэффициент обратной отрицательной связи по положению электропневмопозиционера; T^2 – постоянная времени; T_1 – механическая постоянная времени.

Таким образом, электропневмопозиционер представляет собой типовое колебательное звено. В этой связи необходимо оценить влияние динамики этого звена на работу САУ процессом вытяжки и возможность его учета при разработке модели адаптивной системы.

Передаточная функция, связывающая расход жидкости Q_2 в цилиндре распределителя давления [6] и скорость движения пуансона:

$$W_2(p) = \frac{V(p)}{x_{11}(p)} = K_3, \quad (4)$$

где K_3 – расход рабочей жидкости.

Передаточная функция, учитывающая влияние запаздывания, вносимого в контур скорости пуансона благодаря передаче рабочей жидкости по гибким шлангам:

$$W_\tau(p) = e^{-\tau p}. \quad (5)$$

Здесь τ – время запаздывания в гидравлической системе.

С учетом рассмотренных процессов в динамических звеньях полная структурная схема адаптивного управления процессом вытяжки изображена на рис. 5.

Расчет регулятора скорости

Расчет регуляторов осуществляется на основе теории систем подчиненного регулирования [8–10].

Настройка производится на технический оптимум:

$$W_{RS}(p) \cdot W_p(p) = \frac{1}{2T_\mu p (T_\mu p + 1)}. \quad (6)$$

Отсюда $W_{RS}(p) = \frac{1}{2T_\mu p (T_\mu p + 1) W_p(p)}$.

В (6) обозначено: T_μ – малая постоянная времени, определяемая совокупностью постоянных времени электропневмопреобразователя.

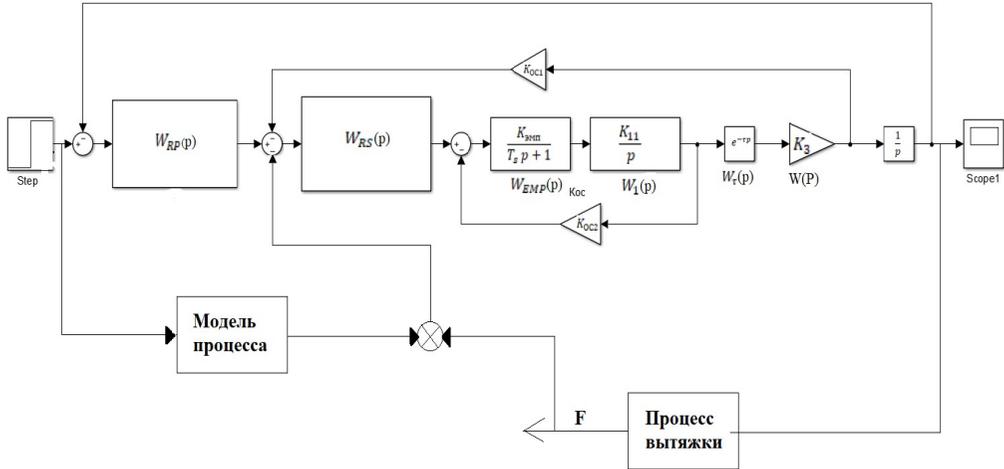


Рис. 5. Структурная схема

Расчет регулятора положения

Расчет регулятора положения ведется по формуле

$$W_{RP}(p) \cdot W_F(p) \cdot \frac{1}{p} = \frac{1}{4T_\mu p(2T_\mu p + 1)}, \quad (7)$$

$W_F(p)$ – передаточная функция замкнутого по скорости контура.

Из (7) следует:

$$W_{RP}(p) = \frac{p}{4T_\mu p(2T_\mu p + 1)W_F(p)}.$$

Из зависимости (7) следует, что полоса пропускания контура положения определяется малой постоянной времени T_μ .

Для реализации цифровой системы используем экстраполятор нулевого порядка [11], указанный на рис. 6 в виде звена Zero-Order Hold с периодом дискретности $T_0 = \frac{2\pi}{20\omega_c}$.

На рис. 6 представлена схема модели системы адаптивного управления при численных значениях промышленного пресса. Модель реального процесса представлена кусочно-линейными звеньями, отражающими усилия вытяжки в функции положения пуансона согласно диаграмме вытяжки.

Связь усилия и расхода будет осуществляться через коэффициент, равный 0.05. Моделирование проводилось в среде MATLAB Simulink. При моделировании значения передаточных функций были указаны на рис. 6.

При введении эквивалентной помехи, равной 500 кг, усилие остается стабильным (рис. 7).

Кривая графика скорости, в свою очередь, изменяется следующим образом (рис. 8).

По рис. 8 нужно отметить, что при внесении помехи происходит коррекция скорости, что позволяет достичь требуемых производственных параметров.

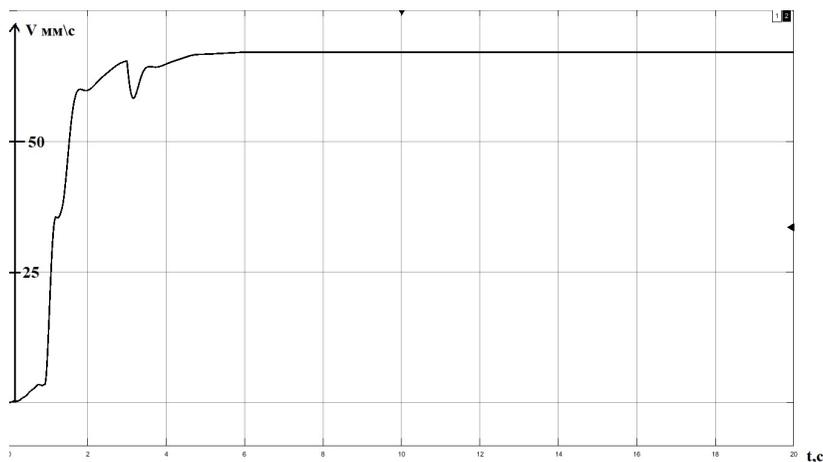


Рис. 8. Скорость вытяжки

Заключение

Показано, что для компенсации помех, возникающих в процессе глубокой вытяжки, наиболее целесообразной является разработка адаптивной САУ с моделью, которая обеспечивает инвариантность по отношению ко всем помехам.

Представлена методика синтеза САУ компенсации возмущающих воздействий, которая за счет разницы между предписанным значением усилия вытяжки и его реальным значением формирует управляющее воздействие в контур регулирования скорости движения пуансона. За счет регулирования скорости в процессе движения пуансона реализуется стабилизация усилия вытяжки.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Третьяков А.В., Зюзин В.И.* Механические свойства металлов и сплавов при обработке давлением. – М.: Машиностроение, 1973. – 224 с.
2. Ковка и штамповка: Справочник в 4 т. Т. 4. Листовая штамповка / Под ред. *А.Д. Матвеева*. – М.: Машиностроение, 1987. – 544 с.
3. *Кункин С.Н., Мамутов А.В., Мамутов В.С.* Технологические методы листовой штамповки: учеб. пособие. – СПб, 2018. – 52 с.
4. *Аверкиев Ю.А., Аверкиев А.Ю.* Технология холодной штамповки. – М.: Машиностроение, 1989. – 304 с.
5. *Корольков В.И., Зубарев В.Ю.* Технология изготовления металлических сильфонов ротационной вытяжкой // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – 2010. – Т. 12 (33). – № 1(2). – С. 353–356.
6. *Лысов В.Е., Каплун Е.С.* Структурно-графическое представление процесса глубокой вытяжки как объекта системы автоматического управления // Вестник Самарского государственного технического университета. Серия: Технические науки. – 2013. – № 1(37). – С. 209–214.
7. *Башта Т.М., Руднев С.С., Некрасов Б.Б. и др.* Гидравлика, гидромашины и гидроприводы. – М.: Альянс, 2011. – 423 с.
8. *Рапопорт Э.Я.* Системы подчиненного регулирования электроприводов постоянного тока: Конспект лекций. – Куйбышев, 1985. – 55 с.
9. *Анучин А.С.* Системы управления электроприводов. – М.: Изд. дом МЭИ, 2015. – 373 с.
10. *Лысов В.Е.* Теория автоматического управления. – М.: Машиностроение, 2010. – 500 с.
11. *Лысов В.Е., Сидоров И.С.* Анализ влияния частоты квантования цифрового регулятора положения позиционно-слеящего электропривода на динамические показатели качества управления // Мехатроника. Автоматизация. Управление. – 2016. – Т. 17. – № 10. – С. 685–689.

Статья поступила в редакцию 20 июля 2021 г.

ADAPTIVE SYSTEM FOR AUTOMATIC CONTROL OF THE FINE DRAWING PROCESS

*V.E. Lysov, A.P. Sinyukov**

Samara State Technical University
244, Molodogvardeyskaya st., Samara, 443100, Russian Federation

E-mail: epa@samgtu.ru

Abstract. *The paper considers the technological process of deep drawing, taking into account the high degree of deformation of the metal and the small thickness (0.5 mm) of the workpiece. Given the high complexity of the process and the impossibility of its representation in an analytical form, the paper uses its representation in the form of a phase portrait in the plane of the drawing force and movement of the hydraulic press punch. Phase trajectories in the mentioned plane determine the geometric dimensions of the product, characterize stresses and deformations during the process and determines the structure of the process control algorithm. The digital positional tracking system considered in the work includes electromechanical, hydraulic, pneumoelectric and electronic links. The system provides precision positioning of the hydraulic press punch with control and control of its movement speed. The paper provides an ideal mathematical model of the extraction process. As a result of comparing the phase trajectories of the model and the real process, a possible difference is revealed due to the interference in the real process. The resulting difference makes it possible to form an additional control effect on the punch speed control circuit in the system in order to compensate for the resulting misalignment. Thus, the stabilization of the drawing force in the function of the movement of the punch is realized. The paper provides mathematical descriptions of all parts of the system, provides dynamic characteristics of the process. As disturbing effects on the drawing process, the following are considered: metal hardening, the unstable friction force that occurs when the workpiece is pressed, the change in the drawing force when the parts of the workpiece are drawn into the matrix, corrugation, metal thinning during the transition of the bottom part to the side wall of the product. The mentioned disturbances without the system in question did not fully ensure the quality of the products. As a result of the resulting marriage, significant production costs took place. The materials of the work and numerical data of the links of the technological process system were obtained by the example of manufacturing a cylinder of an OP-2(3)-ABCE powder fire extinguisher produced at the ZPO plant Itself (fire fighting equipment plant).*

Keywords: *deep drawing, transfer function, process model, punch speed control circuit, pneumatic positioner, lag, transmission coefficient of system links.*

REFERENCES

1. *Tret'yakov A.V., Zyuzin V.I.* Mekhanicheskie svoystva metallov i splavov pri obrabotke davleniem. M.: Mashinostroenie, 1973. 224 s.
2. *Kovka i shtampovka. Spravochnik v 4-h tomah. T. 4. Listovaya shtampovka.* Pod red. *A.D. Matveeva.* M.: Mashinostroenie, 1987. 544 s.
3. *Kunin S.N., Mamutov A.V., Mamutov V.S.* Tekhnologicheskie metody listovoj shtampovki. SPb, 2018. 52 s.
4. *Averk'ev Yu.A., Averk'ev A.Yu.* Tekhnologiya holodnoj shtampovki. M.: Mashinostroenie, 1989. 304 s.

* *Vladimir E. Lysov (Dr. Sci. (Techn.)), Professor.
Andrey P. Sinyukov, Graduate Student.*

5. *Korol'kov V.I., Zubarev V.Yu.* Tekhnologiya izgotovleniya metallicheskih sil'fonov rotacionnoj vytyazhkoj // *Izvestiya Samarskogo nauchnogo centra Rossijskoj akademii nauk. Samara.* T. 12 (33), № 1(2), 2010. S. 353–356.
6. *Lysov V.E., Kaplun E.S.* Strukturno-graficheskoe predstavlenie processa glubokoj vytyazhki kak ob"ekta sistemy avtomaticheskogo upravleniya // *Vestnik SamGTU. Seriya tekhnicheskie nauki,* 2013. № 1(37). S. 209–214.
7. *Bashta T.M., Rudnev S.S., Nekrasov B.B.* Gidravlika, gidromashiny i gidroprivody. M.: Al'yans, 2011. 423 s.
8. *Rapoport E.Ya.* Sistemy podchinennogo regulirovaniya elektroprivodov postoyannogo toka. Konspekt lekcij. Kujbyshev, 1985. 55 s.
9. *Anuchin A.S.* Sistemy upravleniya elektroprivodov. M.: Izd. dom MEI, 2015. 373 s.
10. *Lysov V.E.* Teoriya avtomaticheskogo upravleniya. M.: Mashinostroenie, 2010. 500 s.
11. *Lysov V.E., Sidorov I.S.* Analiz vliyaniya chastoty kvanovaniya cifrovogo regulyatora polozeniya pozicionno-sledyashchego elektroprivoda na dinamicheskie pokazateli kachestva upravleniya // *Mekhatronika. Avtomatizaciya. Upravlenie.* 2016. 17(10). S. 685–689.

УДК 622.24

СИСТЕМА ПОДДЕРЖАНИЯ ЭФФЕКТИВНОЙ ОСЕВОЙ НАГРУЗКИ НА ДОЛОТО ПРИ БУРЕНИИ СКВАЖИН

*С.А. Михеев**

Самарский государственный технический университет
Россия, 443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244

E-mail: serzh.mixeew@yandex.ru

Аннотация. Разрушение горной породы на забое механическим способом невозможно без создания осевой нагрузки на долото. От правильного выбора значения и контроля данного параметра зависит эффективность всего процесса. Контроль осевой нагрузки на породоразрушающий инструмент – один из основных методов управления процессом разрушения горных пород при любом способе бурения. В связи с этим предложена система для автоматизации поиска эффективной осевой нагрузки на долото, позволяющая сократить время нахождения оптимальных значений. В основе работы системы лежит метод заторможенного барабана. Его суть заключается в поиске значений веса инструмента, соответствующих максимуму функции dP_{oc}/dt , т. е. максимуму механической скорости бурения. Представлены блок-схема системы и функциональная схема вычислительного блока. Приведены временные диаграммы колебаний осевой нагрузки на долото и появления сигналов на выходах блоков системы.

Ключевые слова: осевая нагрузка на долото, управление процессом глубокого бурения, повышение точности и надежности измерения.

Введение

В настоящее время бурение 90 % скважин выполняется вручную с использованием отечественных и зарубежных систем мониторинга в соответствии с проектом на строительство. Проектные режимы рассчитываются на основе данных по региону, поэтому не являются оптимальными для конкретной скважины, что может резко снижать (до 25 %) эффективность бурения [1].

При установленных для конкретного долбления типе долота, типе забойного двигателя, расходе промывочной жидкости, параметрах промывочной жидкости единственным регулируемым параметром, с помощью которого может быть осуществлен режим бурения, является нагрузка на долото [2].

Тесная связь осевой нагрузки и механической скорости бурения подтверждена во многих работах [1–9].

Для обеспечения наиболее эффективного объемного способа разрушения горных пород необходимо соблюдать условие

$$\frac{P_{oc}}{S_k} \geq G_{штз}, \quad (1)$$

* Михеев Сергей Андреевич, аспирант кафедры информационно-измерительной техники

где P_{oc} – осевая нагрузка на долото; S_k – площадь контакта долота с породой; $G_{шз}$ – твердость горных пород по штампу в забойных условиях.

С другой стороны, максимальная нагрузка на долото не должна превышать предельно допустимых значений, так как срок службы опор долота уменьшается с увеличением нагрузки.

В условиях бурения часто чередующихся пород с различными физико-механическими свойствами каждой литологической разности должна соответствовать строго определенная осевая нагрузка, отвечающая условию (1).

Однако при неизвестных значениях $G_{шз}$ и условном определении P_{oc} комплексом наземных установок, особенно в условиях наклонно-направленного бурения, реализовать критерий (1) крайне сложно.

В данных условиях единственным способом нахождения эффективных осевых нагрузок является применение метода заторможенного барабана лебедки (метод отсутствия подачи) [10–15]. Его суть заключается в поиске значений веса инструмента, соответствующих максимуму функции dP_{oc} / dt , т. е. максимуму механической скорости бурения.

В этом случае осевую нагрузку доводят до установленного значения, не превышающего допустимой величины для данного диаметра долота. В ходе углубления долота при заторможенном барабане лебедки вес на крюке возрастает, осевое усилие уменьшается. Тогда механическая скорость может быть найдена по формуле

$$V = \frac{L_0}{E_0 F} \frac{dP_{oc}}{dt}, \quad (2)$$

где L_0 – длина буровой колонны без учета деформаций под действием нагрузки; E_0 – модуль упругости материала труб; F – эквивалентное сечение труб.

Наибольшая скорость изменения осевой нагрузки dP_{oc} / dt соответствует максимуму механической скорости. Значение осевой нагрузки в этот момент принимается за $P_{эф}$. На рис. 1 представлен метод заторможенного барабана.

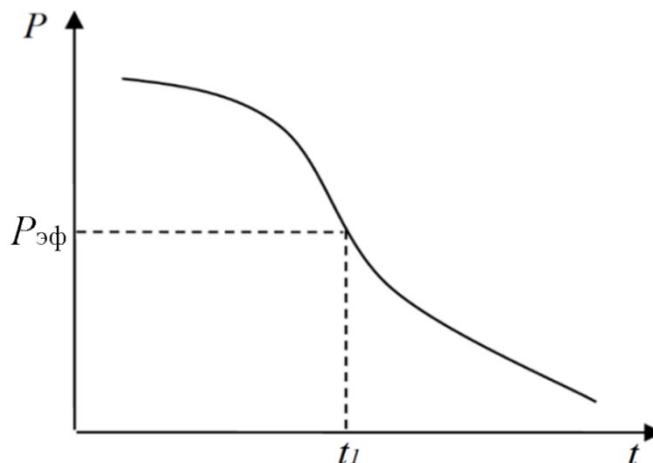


Рис. 1. Кривая поиска эффективной осевой нагрузки при остановленной подаче

Преимуществом такого метода оптимизации является возможность нахождения эффективной нагрузки на забой в реальных условиях бурения.

Минусом описанного способа является низкая скорость поиска оптимальных значений управляющих параметров (поиск $P_{эф}$ может достигать 20 минут).

Отсюда вытекают следующие недостатки:

- за время поиска $P_{эф}$ бурение не выполняется в оптимальном режиме;
- во время поиска может случиться значительный износ долота, и найденная осевая нагрузка больше не будет соответствовать расчетной комбинации «долото – порода», сложившейся на тот момент;
- при поиске продолжительностью 20 минут разбуриваемая порода может смениться и поиск нужно будет произвести еще раз.

На основании вышесказанного разработка системы, позволяющей сократить время поиска эффективной осевой нагрузки на долото, является актуальной.

Разработка системы

На рис. 2 представлена блок-схема системы. Система содержит датчик 1 осевой нагрузки, амплитудный дискриминатор 2, блок 3 вычитания, второй одновибратор 4, второй пороговый элемент 5, первый пороговый элемент 6, первый ключ 7, интегратор 8, первый одновибратор 9, второй ключ 10, вычислительный блок 11, индикатор 12.

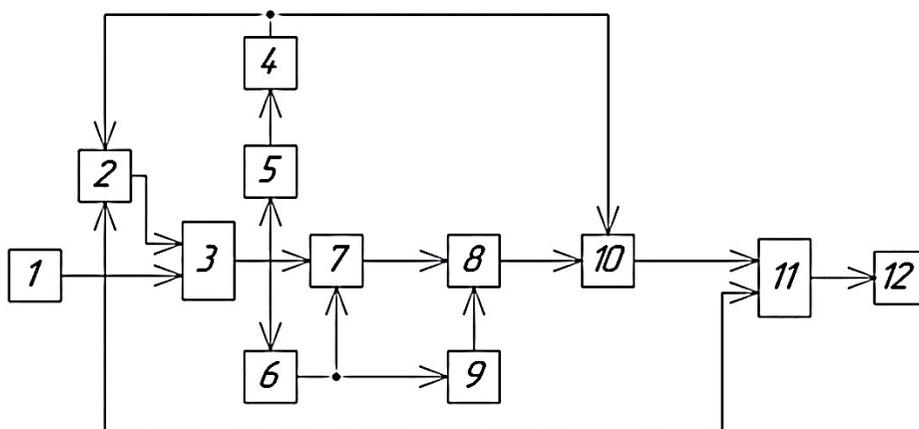


Рис. 2. Блок-схема системы

В зависимости от способа бурения (турбинный, роторный) система реализует различные критерии оценки эффективности нагрузки на долото. Так, в турбинном бурении поиск эффективной нагрузки $P_{эф}$ производится по критерию $\max \frac{dP}{dt}$ с интегральной оценкой информативного параметра $P(t)$. При этом система интегрирует осевую нагрузку на долото по времени на заданном интервале ее изменения ΔP (рис. 3), а поиск эффективной нагрузки $P_{эф}$ основан на сравнении двух соседних интегральных оценок, меньшая из которых расположена ближе к области по шкале осевых нагрузок. Например, сравнение интегральных оценок двух участков кривой $P(t)$ показывает, что

$$\int_{\Delta t_i} \Delta P(t) dt > \int_{\Delta t_{i+1}} \Delta P(t) dt. \quad (3)$$

Это значит, что для достижения области $P_{эф}$ необходимо двигаться в сторону уменьшения осевых нагрузок до момента, когда последующая интегральная оценка будет равна предыдущей. При дальнейшем уменьшении нагрузки на долото интегральная оценка начнет расти, последнее будет означать уход из области $P_{эф}$ в область $P < P_{эф}$.

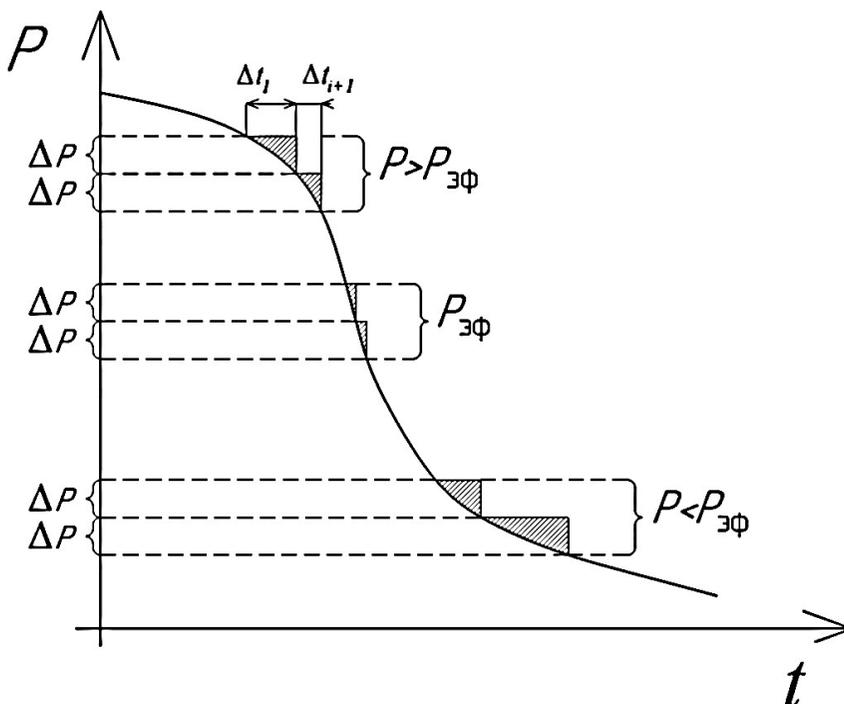


Рис. 3. Диаграмма изменения осевой нагрузки на долото в процессе разбуривания с остановленной подачей

В роторном бурении система реализует модифицированный критерий поиска $P_{эф}$ по максимуму удельной проходки $h_{уд}$, который в общем виде для режима разбуривания с остановленной подачей записывается в виде

$$h_{уд} = \frac{V_m}{P^\alpha}, \quad (4)$$

где V_m – механическая скорость бурения; α – эмпирический коэффициент.

Удельная проходка прямо пропорциональна скорости бурения и обратно пропорциональна скорости износа долота, которая является функцией осевой нагрузки.

Модифицированный критерий имеет вид

$$\zeta = \frac{\Delta P \cdot \Delta t}{[P_m - P(t)]^2}, \quad (5)$$

данное выражение стремится к минимуму ($\zeta \rightarrow \min$) и справедливо при $\Delta P = \text{const}$, здесь ΔP – величина изменения нагрузки на долото, на которую реагирует второй пороговый элемент; Δt – время разбуривания с остановленной

подачей, за которое осевая нагрузка на долото изменится на ΔP ; P_m – максимально допустимая нагрузка на долото.

В интеграторе формируется сигнал, пропорциональный величине

$$\frac{\Delta P \cdot \Delta t}{2} = \int_{\Delta t} \Delta P(t) dt. \quad (6)$$

Величина $[P_m - P(t)]$ формируется в вычислительном блоке путем подачи на его второй вход сигнала $P(t)$.

Как показано на рис. 4, изменение осевой нагрузки на долото во времени носит периодический характер.

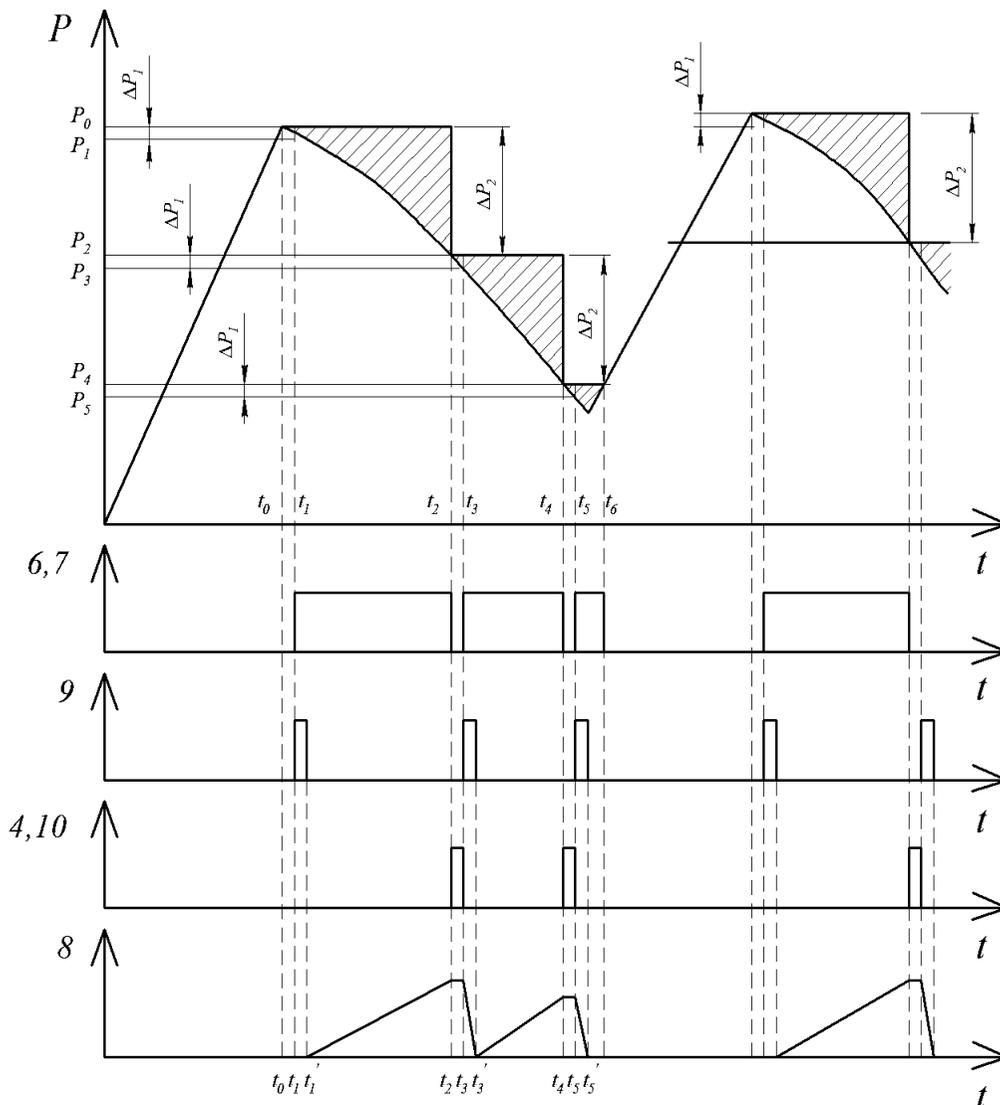


Рис. 4. Временные диаграммы колебаний осевой нагрузки на долото и появления сигналов на выходах блоков системы

В момент времени t_0 меняется направленность изменения осевой нагрузки на долото $P(t)$, она начинает уменьшаться.

В результате на выходе амплитудного дискриминатора сформируется постоянное напряжение P_0 (см. рис. 4). Появится и начнет расти разность между сигналами на первом и втором входах блока вычитания, на выходе которого формируется сигнал, пропорциональный этой разности.

При достижении упомянутой разности значения ΔP_1 сработает первый пороговый элемент, который откроет первый ключ и запустит первый одновибратор, который, в свою очередь, обнулит содержимое интегратора. После этого с момента времени t'_1 в интеграторе начнется процесс интегрирования и на его выходе будет формироваться сигнал, пропорциональный площади заштрихованной фигуры над участком кривой $P(t)$ с координатами (t_1, P_0, t_2, P_2) :

$$S_1 = \int_{t_1}^{t_2} \Delta P(t) dt. \quad (7)$$

При достижении разностью сигналов на входе блока вычитания величины ΔP_2 сработает второй пороговый элемент, который запустит второй одновибратор, который, в свою очередь, сбросит на ноль амплитудный дискриминатор и откроет второй ключ. В результате сигнал с выхода интегратора поступит в вычислительный блок, в амплитудном дискриминаторе появится новое значение P_2 , а пороговые элементы придут в исходное состояние. Описанный выше процесс повторится сначала, т. к. при достижении разностью сигналов на входах блока вычитания значения ΔP_1 сработает первый пороговый элемент, который, в свою очередь, обнулит содержимое интегратора. После этого в интеграторе начнется процесс интегрирования и на его выходе будет формироваться сигнал, пропорциональный (см. рис. 4) площади заштрихованной фигуры над участком кривой с координатами (t_3, P_2, t_4, P_4) :

$$S_2 = \int_{t_3}^{t_4} \Delta P(t) dt. \quad (8)$$

При достижении разностью сигналов на входе блока вычитания величины ΔP_2 сработает второй пороговый элемент, который запустит второй одновибратор, который, в свою очередь, сбросит на ноль амплитудный дискриминатор и откроет второй ключ. Через открытый второй ключ сигнал с выхода интегратора поступит в вычислительный блок.

При роторном бурении программа работы вычислительного блока включает в себя операции деления, в рассмотренном случае

$$\frac{S_2}{P_m - P_4}, \quad (9)$$

и сравнения частного от деления с ранее полученным результатом деления:

$$\frac{S_1}{P_m - P_2}. \quad (10)$$

Результат сравнения в виде разности R выводится на индикатор. По мере приближения к области оптимальных нагрузок на долото разность

$$R = \frac{S_1}{P_m - P_2} - \frac{S_2}{P_m - P_4} \quad (11)$$

будет уменьшаться. При прохождении через точку $P_{эф}$ эта разность сменит знак на противоположный. Смена знака R является признаком достижения области эффективных нагрузок на долото.

В соответствии с релейным режимом поддержания осевой нагрузки сигнал о новом нагружении долота может поступить в любой момент времени, не нарушив при этом работу системы. Так как сигнал на выходе блока вычитания из-за нарастания $P(t)$ станет равным нулю, все блоки системы придут в исходное состояние, минуя такт перезаписи содержимого интегратора в вычислительный блок.

При турбинном способе бурения программа работы вычислительного блока включает операцию сравнения двух последовательных интегральных оценок, например S_1 и S_2 , поступающих на первый вход вычислительного блока. На индикатор выводятся величина и знак разности, которые позволяют судить о том, в какой области осевых нагрузок происходит бурение.

В вычислительном блоке 11 (рис. 5) в первом блоке вычитания 14 реализуется функция $P_m - P(t)$, в делителе 15 осуществляется операция деления

$$\frac{S_i}{P_m - P(t_i)}, \quad (12)$$

триггер 16 управляет работой коммутатора 17, в блок памяти 18 заносятся значения

$$\frac{S_{i-1}}{P_m - P(t_{i-1})}, \quad (13)$$

во втором блоке вычитания 19 производится действие

$$\frac{S_{i-1}}{P_m - P(t_{i-1})} - \frac{S_i}{P_m - P(t_i)}. \quad (14)$$

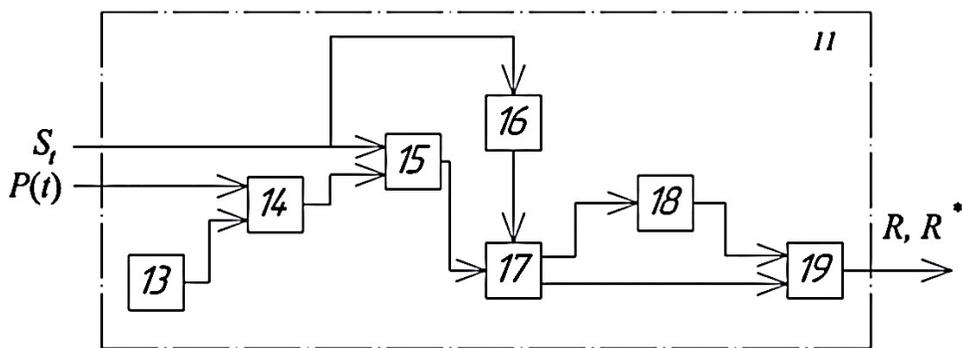


Рис. 5. Функциональная схема вычислительного блока

В зависимости от способа бурения и соответственно от критерия поиска эффективной нагрузки на долото в вычислительном блоке осуществляется операция

$$S_{2i-1} - S_{2i} \quad (15)$$

либо операция

$$\frac{S_{2i-1}}{P_m - P(t_{2i-1})} - \frac{S_{2i}}{P_m - P(t_{2i})}. \quad (16)$$

При этом в первом случае блоки 13, 14, 15 в вычислительном процессе не участвуют, а сигнал S_{i-1} поступает на входы коммутатора 17 и триггера 16, при этом триггер 16 переводит коммутатор 17 в состояние, когда его вход связан с его первым выходом, и сигнал S_{2i-1} поступает на вход блока памяти 18.

В результате прихода следующего сигнала S_i триггер 16 переведет коммутатор 17 в положение, когда его вход связан с его вторым выходом, в результате сигнал S_i поступит на второй вход второго блока вычитания 19, на первом входе которого присутствует сигнал S_{i-1} . Разность $R = S_{i-1} - S_i$ с выхода блока вычитания поступает на вход блока индикации.

Во втором случае в первых трех блоках 13, 14, 15 формируется сигнал $\frac{S_i}{P_m - P(t_i)}$: сигнал P_m с выхода задатчика установки 13 подается на второй вход первого блока вычитания 14, на первый вход которого подается сигнал $P(t)$, разность $P_m - P(t)$ с выхода первого блока вычитания поступает на второй вход делителя 15, на выходе которого с частотой поступления на его первый вход сигналов S_i формируется сигнал $\frac{S_i}{P_m - P(t_i)}$. На выходы коммутатора 17 подаются сигналы, распределяемые с помощью счетного триггера 16 следующим образом: на первый выход коммутатора 17 подаются сигналы $\frac{S_{i-1}}{P_m - P(t_{i-1})}$, а на второй выход – сигналы $\frac{S_i}{P_m - P(t_i)}$.

Разность

$$R^* = \frac{S_{i-1}}{P_m - P(t_{i-1})} - \frac{S_i}{P_m - P(t_i)} \quad (17)$$

формируется на выходе второго блока вычитания 19 и подается на вход блока индикации 12.

В итоге алгоритм работы системы заключается в следующем:

1. Задается шаг ΔP .
2. В процессе разбуривания происходит последовательное интегрирование осевой нагрузки с определенным шагом ΔP .
3. Поиск эффективной нагрузки $P_{эф}$ основан на сравнении двух соседних интегральных оценок, меньшая из которых расположена ближе к области по шкале осевых нагрузок.
4. В зависимости от способа бурения на индикатор выводится разность (11) либо разность (17). По мере приближения к области эффективных нагрузок на долото разность будет уменьшаться. При переходе через точку $P_{эф}$ эта разность изменит знак на противоположный. Смена знака R является признаком достижения области эффективных нагрузок на долото.

Шаг ΔP имеет большое значение. Чем он меньше, тем быстрее происходит разбуривание для установления области значений осевых нагрузок, в кото-

рой ведется бурение на данный момент, что дает возможность оперативно принимать решение об уменьшении или увеличении нагрузки в сторону $P_{эф}$. Это позволяет избежать недостатков метода заторможенного барабана.

Предварительные расчеты зависимости работоспособности системы от шага ΔP показали, что работоспособность сохраняется даже при наименьшем шаге изменения осевой нагрузки ΔP ($\Delta P = 0,25$ т; 0,5 т), то есть меньше времени потребуется на разбуривание и нахождение области эффективных значений.

Однако нужно учитывать погрешность измерения веса бурильного инструмента. Существующие гидравлические и электрические измерительные устройства позволяют определять значение веса бурильного инструмента Q и осевой нагрузки на долото P в лучшем случае с погрешностью 2,5 %, причем погрешность измерения увеличивается на 0,5 % при изменении окружающей температуры на каждые 10 °С. Например, при измерении гидравлическим индикатором веса (ГИВ-6) с трансформатором давления с максимальным усилием натяжения каната по паспорту 320 кН абсолютная погрешность будет составлять 0,8 т.

Так как осевая нагрузка на долото P создается частью веса колонны бурильных труб и определяется как разность веса бурильного инструмента Q_0 до начала бурения, когда долото не касается забоя скважины, и веса бурильного инструмента на крюке Q_1 в процессе бурения $P = Q_0 - Q_1$, то эффективность системы упирается в точность определения веса бурильного инструмента. Исходя из этого разработка методов повышения точности устройств измерения веса является предметом для дальнейших исследований.

Выводы

Разработанная система позволяет сократить время поиска эффективной осевой нагрузки на долото и избавиться от недостатков метода заторможенного барабана.

В системе применяется операция интегрирования, что позволяет повысить помехоустойчивость и точность всей измерительной схемы, так как операция интегрирования обладает фильтрующим свойством, освобождая измерительный сигнал от высокочастотных помех.

Также система может применяться для различных способов бурения (турбинный, роторный) и в зависимости от этого реализовывать различные критерии оценки эффективности нагрузки на долото.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Цуприков А.А.* Интеллектуальная система адаптивного управления технологическим процессом бурения нефтегазовых скважин: Дисс. ... д-ра техн. наук. – Краснодар: Кубанский гос. техн. ун-т, 2018. – 310 с.
2. *Лукьянов Э.Е.* Геолого-технологические и геофизические исследования в процессе бурения. – Новосибирск: Историческое наследие Сибири, 2009. – 752 с.
3. *Борзенко В.В., Некрасов С.А.* Оптимизация процесса бурения на основе полного факторного эксперимента // NOVAINFO.RU. – 2016. – № 50. – Т. 2. – С. 1–7. URL: <https://novainfo.ru/article/7613> (дата обращения: 20.06.2021).
4. *Бражников В.А., Фурнэ А.А.* Информационное обеспечение оптимального управления бурением скважин. – М.: Недра, 1989. – 206 с.
5. *Бродов Г.С., Шелковников И.Г., Егоров Э.К.* Технологические измерения и автоматизация процесса бурения. – СПб.: Санкт-Петербургский горный институт, 2004. – 105 с.
6. *Порцевский А.К., Ганджумян Р.А.* Оптимизация буровых и горно-разведочных работ,

- планирование эксперимента: Учеб. пособие. – М.: МГОУ, 2005. – 70 с.
7. *Ситников Н.Б.* Моделирование и оптимизация процесса бурения геологоразведочных скважин: Дисс. ... д-ра техн. наук. – Екатеринбург, 2000. – 350 с.
 8. *Цурпиков А.А.* Анализ математических моделей механической скорости проходки для оптимизации процесса бурения нефтегазовых скважин // Научный журнал КубГАУ. – 2015. – № 107(03). – С. 903–916.
 9. *Цурпиков А.А.* Математическая модель скорости проходки для оптимального управления бурением скважин // Научный журнал КубГАУ. – 2015. – № 107(03). – С. 916–926.
 10. *Асадчев А.С.* Разработка технологии бурения глубоких скважин гидравлическими забойными двигателями в условиях соленосных отложений: Дисс. ... канд. техн. наук. – М.: Российский гос. ун-т нефти и газа им. И.М. Губкина, 2012. – 253 с.
 11. *Грибанов М.В.* Совершенствование и реализация методик и программных средств по оптимизации параметров бурения скважин: Дисс. ... канд. техн. наук. – Ухта: Ухтинский гос. техн. ун-т, 2012. – 116 с.
 12. *Грибанов М.В.* Перспективы создания единой базы данных по буримости пород по группе месторождений с целью проектирования и оптимизации режимов бурения // Строительство нефтяных скважин на суше и на море. – 2009. – № 1. – С. 15–18.
 13. *Дробышевский В.Д., Асадчев А.С.* Определение оптимального режима бурения при инженерно-технологическом сопровождении промысловых испытаний новой техники // Современные проблемы машиноведения: материалы XII Международной научно-технической конференции. – Беларусь, Гомельский гос. техн. ун-т имени П.О. Сухого, 2018. – С. 307–309.
 14. *Струговец Е.Т., Лукуманов М.Г.* О поиске оптимальных нагрузок на долото при бурении забойными двигателями // НТВ Каротажник. – Тверь, 2005. – Вып. 5–6 (132–133). – С. 107–113.
 15. Патент России № 2642699, МПК E21B 44/02 (2006.01). Способ регулирования условий процесса бурения скважин / *Александров С.С.*; патентообладатель: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Уфимский государственный нефтяной технический университет». Заявл. 27.02.2017; опубл. 25.01.2018, Бюл. № 3.

Статья поступила в редакцию 24 июня 2021 г.

SYSTEM FOR MAINTAINING EFFECTIVE AXIAL LOAD ON THE BIT WHEN DRILLING WELLS

*S.A. Mikheev**

Samara State Technical University
244, Molodogvardeyskaya st., Samara, 443100, Russian Federation

E-mail: serzh.mixeew@yandex.ru

Abstract. *The destruction of rock at the bottom by mechanical means is impossible without creating an axial load on the chisel. The efficiency of the entire process depends on the correct choice of the value and control of this parameter. Control of the axial load on the rock-breaking tool is one of the main methods of controlling the process of rock destruction in any drilling method. In this regard, a device for automating the search for an effective axial load on the bit is proposed, which allows reducing the time to find the optimal values. The operation of the device is based on the method of a braked drum. Its essence is to find the values of the tool weight corresponding to the maximum of the dP_{oc}/dt function, i.e. the maximum of the mechanical drilling speed. The block diagram of the device and the functional diagram of the computing unit are presented. The time diagrams of fluctuations of the axial load on the chisel and the appearance of signals at the outputs of the device blocks are given.*

Keywords: *axial load on the bit, control of the deep drilling process, improving the accuracy and reliability of measurement.*

REFERENCES

1. *Tsuprikov A.A.* Intellektual'naya sistema adaptivnogo upravleniya tekhnologicheskimi processami bureniya neftegazovykh skvazhin: Diss. ... dokt. tekhn. nauk. – Krasnodar: Kubanskij gos. tekhn. un-t, 2018. – 310 p. (In Russian).
2. *Luk'yanov E.E.* Geologo-tekhnologicheskie i geofizicheskie issledovaniya v processe bureniya [Geological, technological and geophysical studies in the drilling process]. – Novosibirsk: Izdatel'skij Dom «Istoricheskoe nasledie Sibiri», 2009. – 752 p. (In Russian).
3. *Borzenko V.V., Nekrasov S.A.* Optimization of the drilling process based on a complete factor experiment // *NOVAINFO.RU*. – 2016. – № 50. – T. 2. – Pp. 1–7. <https://novainfo.ru/article/7613> (accessed June 20, 2021).
4. *Brazhnikov V.A., Furne A.A.* Informacionnoe obespechenie optimal'nogo upravleniya bureniem skvazhin [Information support for optimal well drilling management]. – Moscow: Nedra, 1989. – 206 p. (In Russian).
5. *Brodov G.S., Shelkovnikov I.G., Egorov E.K.* Tekhnologicheskie izmereniya i avtomatizaciya processa bureniya [Technological measurements and automation of the drilling process]. – Sankt-Petersburg. Sankt-Peterburgskij gornij institut, 2004. – 105 p. (In Russian).
6. *Porcevsckij A.K., Gandzhumyan R.A.* Optimizaciya burovnykh i gorno-razvedochnykh rabot, planirovanie eksperimenta [Optimization of drilling and exploration operations, planning of the experiment.]. Uchebnoe posobie. MGOU. – Moscow, 2005. – 70 p. (In Russian).
7. *Sitnikov N.B.* Modelirovanie i optimizaciya processa bureniya geologorazvedochnykh skvazhin: Diss. ... dokt. tekhn. nauk. – Ekaterinburg, 2000. – 350 p. (In Russian).
8. *Tsuprikov A.A.* Analysis of mathematical models of mechanical penetration rate to optimize the drilling process of oil and gas wells // *Nauchnyj zhurnal KubGAU*. – 2015. – № 107(03). – Pp. 903-916. (In Russian).
9. *Tsuprikov A.A.* Mathematical model of the penetration rate for optimal control of well drilling // *Nauchnyj zhurnal KubGAU*. – 2015. – № 107 (03). – Pp. 916–926. (In Russian).
10. *Asadchev A.S.* Razrabotka tekhnologii bureniya glubokih skvazhin gidravlicheskim zabojnymi dvigatelyami v usloviyah solenosnykh otlozhenij: Diss. ... kand. tekhn. nauk. – Moscow: Rossi-

* *Sergey A. Mikheev, Postgraduate Student*

- jskij gos. un-t nefii i gaza im. I.M. Gubkina, 2012. – 253 p. (In Russian).
11. *Gribanov M.V.* Sovershenstvovanie i realizaciya metodik i programmnyh sredstv po optimizacii parametrov bureniya skvazhin: Diss. ... kand. tekhn. nauk. – Uhta: Uhtinskij gos. tekhn. un-t, 2012. – 116 p. (In Russian).
 12. *Gribanov M.V.* Prospects for creating a unified database on the drillability of rocks for a group of deposits in order to design and optimize drilling modes // Stroitel'stvo neftyanyh skvazhin na sushe i na more. – 2009. – № 1. – Pp. 15–18. (In Russian).
 13. *Drobyshevskij V.D., Asadchev A.S.* Determination of the optimal drilling mode during engineering and technological support of field tests of new equipment // Sovremennye problemy mashinovedeniya: materialy XII Mezhdunarodnoj nauchno-tehnicheskoy konferencii. – Belarus', Gomel'skij gos. tekhn. un-t imeni P.O. Suhogo. – 2018. – Pp. 307–309. (In Russian).
 14. *Strugovec E.T., Lugumanov M.G.* On the search for optimal loads on the bit when drilling with downhole motors // NTV Karotazhnik. – Tver', 2005. – Vol. 5–6 (132–133). – Pp. 107–113. (In Russian).
 15. Patent of Russia 2642699, MPK E21B 44/02 (2006.01). A method for regulating the conditions of the well drilling process / *Aleksandrov S.S.*; patentoobladatel': Federal'noe gosudarstvennoe byudzhethoe obrazovatel'noe uchrezhdenie vysshego obrazovaniya "Ufimskij gosudarstvennyj neftyanoj tekhnicheskij universitet". – Zayavl. 27.02.2017; Publ. 25.01.2018, Buul. № 3 (In Russian).

УДК 621.311.1.004

**АНАЛИЗ ЭНЕРГОЕМКОСТИ ГАЛЬВАНИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА
МАШИНОСТРОИТЕЛЬНОГО ПРОИЗВОДСТВА*****А.С. Романова, М.Б. Микушин, А.Ю. Воеводин****Самарский государственный технический университет
Россия, 443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244

E-mail: alyona512@yandex.ru

Аннотация. Рассмотрены проблемы энергоэффективности продукции крупного машиностроительного предприятия, связанные с невозможностью регулирования паропотребления и сезонностью изменения энергопотребления. Проведен анализ потребления энергетических ресурсов типичным крупным машиностроительным предприятием мелкосерийного и единичного типа производства. Выявлены причины дополнительных затрат предприятия при централизованном пароснабжении, связанные с потерями конденсата. Установлено, что наиболее энергоемким является гальванический комплекс. Рассмотрены причины повышенной энергоемкости гальванического комплекса. Составлен энергобаланс технологического участка – гальванического комплекса, отражающий расчетные тепловые нагрузки при нагреве электролита и поддержании теплового режима в зависимости от времени работы ванн и массы обрабатываемых деталей с учетом особенностей работы технологического оборудования. Определены наиболее эффективные способы энергообеспечения в зависимости от коэффициента загрузки и используемого топливно-энергетического ресурса для двух типовых ванн гальванического комплекса. Рассмотрены три варианта технологического энергоснабжения в зависимости от коэффициента загрузки оборудования и технической возможности его параллельно-последовательного включения. Установлено, что при всех трех схемах подключения к альтернативным источникам теплоснабжения наблюдается повышение энергетической эффективности использования ТЭР, а также снижение затрат на энергообеспечение технологических процессов по сравнению с централизованным пароснабжением. Выявлено, что при организации работы технологического оборудования по параллельно-последовательной схеме обеспечивается равномерная эффективная загрузка парогенераторов и высокая энергетическая эффективность гальванического производства. Для энергообеспечения гальванического комплекса предложена комбинированная схема теплоснабжения локальными теплоисточниками от электросети и газовых парогенераторов с учетом наиболее полной их загрузки.

Ключевые слова: энергоемкость, энергоснабжение, тепловой баланс, гальванический комплекс, коэффициент загрузки, топливно-энергетический ресурс, себестоимость продукции.

*Романова Алена Сергеевна, аспирант кафедры управления и системного анализа теплоэнергетических и социотехнических комплексов.

Микушин Максим Борисович, студент.

Воеводин Александр Юрьевич, студент.

Введение

Удельная энергоёмкость продукции промышленных предприятий мелкосерийного и единичного производства машиностроительной отрасли в России велика по сравнению с энергоёмкостью продукции большинства развитых стран. Это объясняется тем, что крупные промышленные предприятия в СССР основное внимание уделяли надежности и бесперебойности производства [1]. Энергоёмкость продукции не учитывалась или учитывалась крайне редко. Многие такие предприятия были градообразующими и получали энергоресурсы от централизованного источника, что приводило к перерасходу энергии при мелкосерийном производстве из-за неритмичной работы оборудования.

Некогда надежная централизованная система энергообеспечения многих промышленных предприятий машиностроительной отрасли мелкосерийного производства из-за большой протяженности инженерных сетей имеет большие потери энергии, а также не является энергоэффективной в рыночных условиях экономики при неравномерной загрузке оборудования. При этом повышенные затраты на энергоресурсы влекут за собой увеличение себестоимости продукции и снижение конкурентоспособности [2, 3].

Для примера рассмотрим типичное предприятие мелкосерийного производства машиностроительной отрасли, где имеется полный цикл производства. В его состав входят комплексы: заготовительный, литейный, кузнечно-штамповочный, гальвано-термический, механосборочный, сборочный и испытательный. Основными потребителями топливно-энергетических ресурсов (ТЭР) являются элементы производственного оборудования (печи, прессы, станки, гальванические ванны и др.). Энергоснабжение производства осуществляется от централизованного энергоисточника. Энергия потребляется на отопление (горячая вода), освещение (электричество), обеспечение технологического процесса (газ, пар, электричество) и пр. Ниже приведены в процентном соотношении потребляемые ТЭР в тоннах условного топлива (т.у.т.) и в денежном эквиваленте (рис. 1 и 2 соответственно).

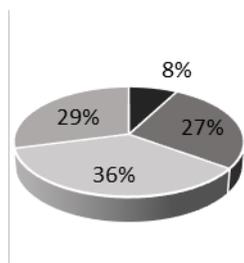


Рис. 1. Потребление ТЭР в т.у.т.:
■ – газ; ■ – пар; ■ – горячая вода;
■ – электроэнергия

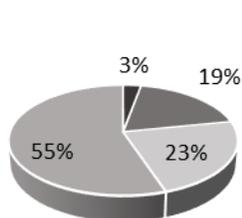


Рис. 2. Соотношение затрат на ТЭР, 2012–2017: ■ – газ; ■ – пар;
■ – горячая вода; ■ – электроэнергия

Сопоставление диаграмм (см. рис. 1, 2) демонстрирует, что тепловая энергия в горячей воде и паре имеет различную стоимость, так как при централизованном внешнем теплоснабжении паром предприятие несет дополнительные затраты из-за невозврата конденсата.

Общая характеристика гальванического комплекса

Гальванические покрытия являются одним из эффективных методов защиты деталей от коррозии, способствуют приданию поверхности деталей ряда ценных специальных свойств: повышенной твердости и износостойкости, высокой отражательной способности, улучшенных антифрикционных свойств, поверхностной электропроводности, облегчения паяемости. А также они применяются в качестве декоративных покрытий [4, 5].

В составе гальванического комплекса имеются ванны для нанесения покрытий, травления, изоляции, промывки и т. д., печи для нагрева и сушки деталей, галтовочные машины и пескоструйные камеры для подготовки деталей под нанесение покрытий и другое технологическое оборудование. Основной технологической единицей являются гальванические ванны.

На предприятиях мелкосерийного производства машиностроительной отрасли гальванический комплекс относится к наиболее энергоемким. При этом до 45 % всего пара, поступающего на производственную площадку, расходуется на обеспечение технологических процессов гальванического комплекса.

Повышенная энергоемкость гальванического производства объясняется тем, что процесс осаждения металла происходит при помощи электролиза, который осуществляется посредством электрической энергии и в большинстве случаев требует нагрева электролита.

Нагрев электролита осуществляется металлическими «змеевиками», расположенными на дне и внутренних поверхностях стенок ванн.

Существующая схема энергообеспечения в гальваническом комплексе не позволяет перекрывать паропровод, снижая или перекрывая потребление пара в перерывах между рабочими циклами оборудования, что не дает возможности регулировать паропотребление в зависимости от динамики производства продукции. Такая организация теплоснабжения в силу мелкосерийности производства и низкого коэффициента использования оборудования гальванического комплекса приводит к дополнительным энергозатратам.

Для снижения энергоемкости продукции рассмотрим способы энергообеспечения гальванического производства с учетом коэффициента загрузки оборудования для трех основных гальванических операций (рис. 3, 4). В качестве альтернативных источников энергоресурсов рассмотрим: электронагрев, газовый парогенератор и централизованное пароснабжение.

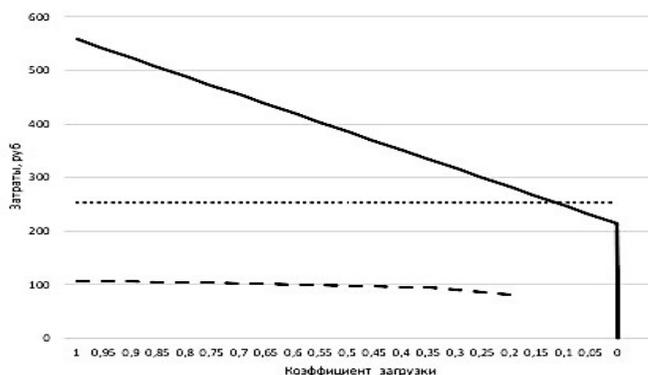


Рис. 3. Зависимость затрат на ТЭР от коэффициента загрузки оборудования ванн воска: — централизованное пароснабжение; — — — — газ; — — — — электрэнергия;

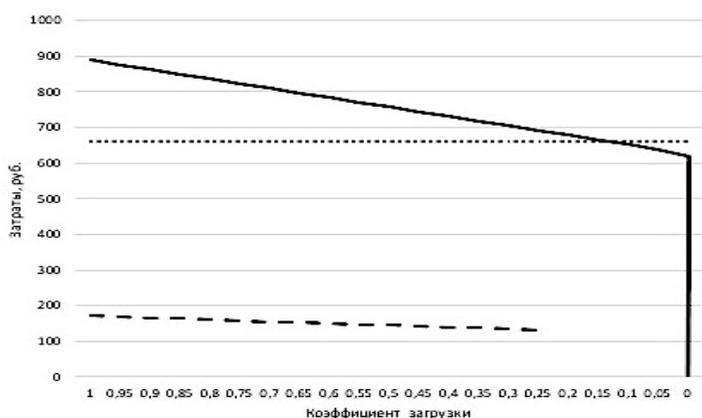


Рис. 4. Зависимость затрат на ТЭР от коэффициента загрузки оборудования ванн нанесения покрытий: – централизованное пароснабжение; — — — — — электроэнергия; — — — — — газ

Из графиков на рис. 3 и рис. 4 видно, что для группы ванн изоляции экономически выгоднее обеспечивать технологическое теплоснабжение при помощи электронагрева при загрузке менее 15 % процентов (см. рис. 3), для ванн нанесения покрытий – при загрузке менее 10 % (см. рис. 4).

При построении графиков учитывалось, что при снижении загрузки КПД парогенератора снижается, а при низкой загрузке (менее 20 %) парогенератор не эксплуатируется [6].

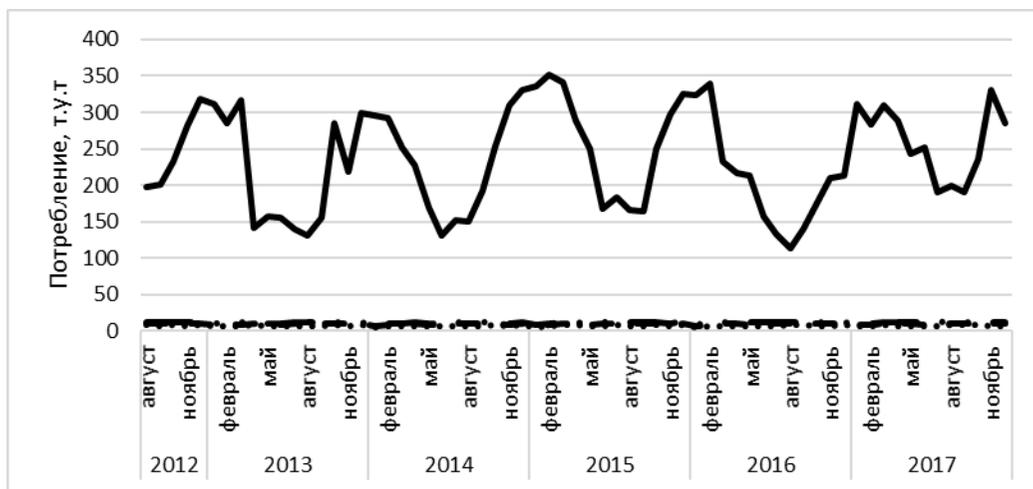


Рис. 5. Потребление ТЭР в т.у.т.: — — — — — централизованное пароснабжение; — — — — — вариант 1; — — — — — вариант 2 (параллельное включение оборудования); вариант 2 (параллельно-последовательное включение оборудования)

Из графика (рис. 5) видно, что энергопотребление при централизованном пароснабжении больше в холодный период года, меньше – в теплый, что обуслав-

ливается большими потерями тепла в окружающую среду. Эти сезонные энергопотери снижаются до минимума при снабжении энергоресурсами в рассчитываемых вариантах.

В табл. 1 приведены температурные параметры и коэффициенты загрузки при односменной и при круглосуточной работе оборудования гальванического участка.

Таблица 1

Характеристики режимов работы гальванических ванн

Наименование процесса	Номера ванн	Температура электролита, °С	Коэффициент загрузки (К) при 24-часовой работе	Коэффициент загрузки (К) при односменной работе
Химическое оксидирование	ХО-1	155–135	0,463	1,39
	ХО-2		0,461	1,382
Хромирование	Х-1	60–50	0,095	0,2862
	Х-2		0,074	0,2231
	Х-3		0,095	0,2862
	Х-4		0,074	0,2231
	Х-5		0,095	0,2862
	Х-6		0,074	0,2231
Лужение	Л-1	70–60	0,043	0,1286
Травление	Т-1	90–80	0,011	0,0329
Хромовокислое анодирование	ХА-1	40–36	0,038	0,114
Химическое никелирование	ХН-1	85–75	0,0006	0,0018
Снятие нагара	СН-1	80–60	0,899	2,696
Электрохим. обезжиривание	ЭО-1	80–60	–	0,0013
	ЭО-2		–	0,0001
	ЭО-3		–	0,0007
	ЭО-4		–	0,0007
	ЭО-5		–	0,0001
	ЭО-6		–	0,0007
	ЭО-7		–	0,0003
	ЭО-8		–	0,0007
Электрополирование	ЭП-1	80–60	0,0009	0,003
Никелирование	Н-1	60–30	0,123	0,37
Хроммолибденирование	ХМ-1	60–50	0,0114	0,034
Снятие спец. слоя	ССН-1	90–70	0,032	0,095
	ССН-2		0,026	0,076
Фосфатирование	Ф-1	95–80	0,0632	0,1897
	Ф-2		0,0626	0,1871
Универсальное фосфатирование	УВФ-1	90–70	0,0624	0,187
Снятие краски	СК-1	80–60	0,0234	0,07
Промывка	ГВ № 1-13	90–70	0,33	1
Снятие воска	СВ-1, СВ-2	100–90	0,108	0,324
Изоляция	И-1, И-2, И-3, И-4	90–80	0,15	0,45
Снятие изоляции	СИ-1	100–90	0,074	0,222
Обезжиривание	О-1	60–40	0,106	0,318

Из табл. 1 видно, что ванны имеют значительный разброс коэффициентов загрузки: 3 ванны работают с загрузкой в 24 часа – ванны № ХО-1, ХО-2 (химическое оксидирование) и ванна № СН-1 (снятие нагара), а ванны электрохимического обезжиривания при 8-часовой работе загружены менее 1 %.

Предлагаются два возможных варианта расстановки, режима работы гальванических ванн и подключения их к локальным источникам теплоснабжения в зависимости от температурного режима и коэффициента загрузки (рис. 6, 7). Первый вариант расстановки (см. рис. 6) выполнен с учетом температурных параметров и коэффициента загрузки ванн, с теплообеспечением одной группы от парогенератора и двух групп от теплоэлектронагревателей (ТЭНов). Второй вариант (см. рис. 7) выполнен с учетом последовательности гальванических процессов, их температурных параметров, коэффициента загрузки и возможности параллельно-последовательной работы для выравнивания загрузки парогенераторов.

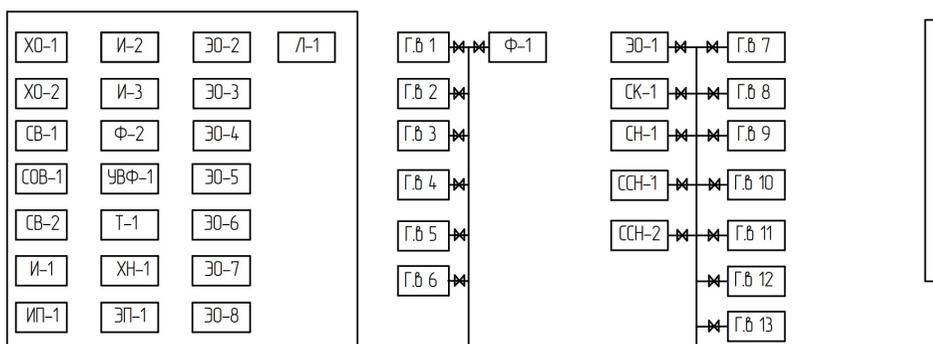


Рис. 6. Схема расстановки и подключения ванн. Вариант 1

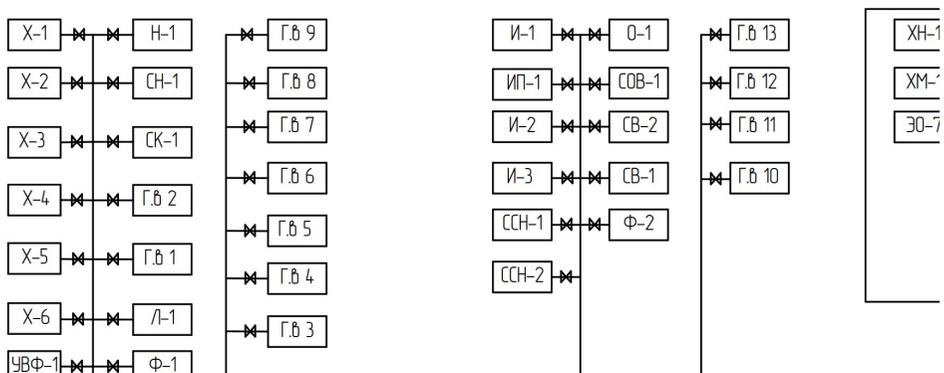


Рис.7. Схема расстановки и подключения ванн. Вариант 2

Энергетический баланс гальванических ванн

Для выбора мощности источника энергоснабжения и режима его работы необходимо определить тепловые нагрузки при энергоснабжении гальванических ванн, связанные с выводом на режим и его поддержанием, исходя из времени работы каждой ванны [10].

1. Количество теплоты на нагрев электролита вычисляется по (1). Q_H (Дж) складывается из количества теплоты Q_1 , необходимой для разогрева ванн до за-

данной по технологическим условиям температуры, и количества теплоты Q_2 для поддержания рабочей температуры ванны, т. е. компенсации тепловых потерь в окружающую среду (вычисляется по формуле (2)) [11]:

$$Q_H = Q_1 + Q_2 = (C_1 G_1 + C_2 G_2 + C_3 G_3) \cdot (t_k + t_H) + Q_2, \quad (1)$$

где C_1 , C_2 и C_3 – удельная теплоемкость электролита, материала ванны и футеровки (Дж/кг·°C); G_1 , G_2 и G_3 – масса электролита, материала корпуса ванны и футеровки соответственно (кг); t_k , t_H – конечная и начальная температуры электролита (°C).

2. Количество теплоты, затрачиваемое на компенсацию тепловых потерь в окружающую среду [7, 8]:

$$Q_2 = Q'_2 + Q''_2, \quad (2)$$

где Q'_2 – потери теплоты электролита через стенки (теплопроводностью, конвекцией, лучеиспусканием), Дж (см. формулу (3)); Q''_2 – потери теплоты на испарение жидкости с открытой поверхности, Дж (см. формулу (4)):

$$Q'_2 = k F_B T (t_k - t_H), \quad (3)$$

где F_B – площадь поверхности корпуса ванны, м²; T – время нагрева электролита до заданной температуры, с; $k = \frac{1}{R} = \frac{1}{\frac{1}{a_1} + \sum_{i=1}^n \left(\frac{S_i}{\mu_i} \right) + \frac{1}{a_2}}$ – коэффициент тепло-

передачи, $\frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{°C}}$; R – термическое сопротивление теплопередаче, $\frac{\text{м}^2 \cdot \text{°C}}{\text{Вт}}$; a_1

и a_2 – коэффициенты теплоотдачи на граничных поверхностях стенки соответственно с внутренней и наружной средами, $\frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{°C}}$; $\sum_{i=1}^n \left(\frac{S_i}{\mu_i} \right)$ – суммарное внут-

реннее термическое сопротивление теплопроводности слоев стенки, $\frac{\text{м}^2 \cdot \text{°C}}{\text{Вт}}$; S_i –

толщина i -го слоя стенки, м; μ_i – теплопроводность i -го слоя стенки, $\frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{°C}}$;

$$Q''_2 = (5,7 + 4,1\nu)(t_k - t_B) F_3 T_p, \quad (4)$$

где ν – скорость движения воздуха над поверхностью электролита, $\frac{\text{м}}{\text{с}}$; t_k – температура электролита, °C; t_B – температура воздуха над поверхностью электролита, °C; F_3 – площадь поверхности электролита, м²; T_p – время работы ванны, с.

Для ванн химической обработки при расчете расхода теплоты на поддержание температуры электролита в процессе работы дополнительно учитывается количество теплоты на нагрев вносимой детали:

$$Q_{\text{п}} = Q_2 + Q_M, \quad (5)$$

где $Q_M = c_M G(t_k - t_{HM})$ – количество теплоты, вносимое с загружаемым металлом, Дж; c_M – удельная теплоемкость загружаемого металла, $\frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot ^\circ\text{C}}$; G – масса загружаемых деталей, кг; t_{HM} – температура загружаемых деталей, $^\circ\text{C}$.

При расчете количества теплоты на поддержание температуры ванн промывки в горячей воде (см. формулу (6)) учтено, что для поддержания чистоты промывочной воды в ванну непрерывно поступает проточная вода:

$$Q_B = c_B G_B T(t_k - t_{HB}), \quad (6)$$

где c_B – удельная теплоемкость воды, $\frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot ^\circ\text{C}}$; G_B – массовый расход воды, $\frac{\text{кг}}{\text{с}}$; t_{HB} – температура холодной воды, $^\circ\text{C}$; T – время работы ванны, с.

Организация энергоснабжения гальванического производства

Суммарные показатели тепловых нагрузок для двух предлагаемых альтернативных централизованному пароснабжению вариантов расстановки ванн, второй из которых рассмотрен как с параллельным включением оборудования, так и с последовательным, приведены в табл. 2. Затраты на ТЭР учтены на период с августа 2012 по декабрь 2017 гг.

Таблица 2

Потребление ТЭР при альтернативных вариантах теплообеспечения и централизованного пароснабжения

Источник	Потребляемый ТЭР	Единицы измерения	Потребление ТЭР в натуральных единицах	Затраты, тыс. руб.	Суммарное потребление ТЭР по вариантам, т.у.т.
Вариант 1					
Парогенератор	Газ	тыс. м ³	243,767	1 506,25	–
Электрические ТЭНы гр. 1	Электричество	кВт/ч	2 438 283	8 124,02	–
Электрические ТЭНы гр. 2	Электричество	кВт/ч	1 469 728	4 890,22	–
			Итого	14520,5	761,99
Вариант 2 (с параллельным включением оборудования)					
Парогенератор 1	Газ	тыс. м ³	315,93	1 952,28	–
Парогенератор 2	Газ	тыс. м ³	94,84	586,05	–
Электрические ТЭНы	Электричество	кВт/ч	1247435,94	4155,45	–
			Итого	6 693,78	627,46
Вариант 2 (с параллельно-последовательным включением оборудования)					
Парогенератор 1	Газ	тыс. м ³	204,6	1264,44	–
Парогенератор 2	Газ	тыс. м ³	78,24	483,49	–
Электрические ТЭНы	Электричество	кВт/ч	1247435,94	4 155,45	–
			Итого	5 903,38	479,83

Базовый вариант (централизованное пароснабжение)					
Централизованное пароснабжение	Пар	Гкал	106 999	151973,66	15300,86

Из табл. 2 видно, что при организации энергообеспечения по вариантам 1 и 2 потребление энергии уменьшается по сравнению с базовым. Энергетическая эффективность обуславливается тем, что рассматриваемые варианты теплоснабжения зависят от коэффициента загрузки оборудования и по сравнению с централизованным пароснабжением имеют минимальные тепловые потери (см. рис. 7).

Экономический и энергетический эффект от внедрения альтернативных вариантов теплоснабжения гальванических ванн к базовому варианту составляет:

- при варианте 1 – 137 453,16 тыс. руб. и 14 538,80 т.у.т.;
- при варианте 2 (параллельное включение оборудования) – 145 279,88 тыс. руб. и 14 673,325 т.у.т.;
- при варианте 2 (параллельно-последовательное включение оборудования) – 146 070,28 тыс. руб. и 14 820,96 т.у.т.

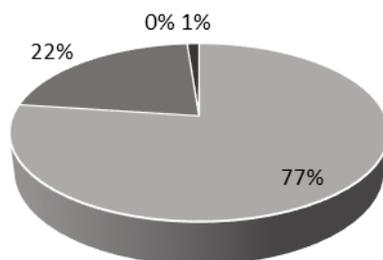


Рис. 8. Потребление ТЭР гальваническим комплексом при рациональной компоновке (вариант 2), т.у.т.: – горячая вода; – централизованное пароснабжение;

■ – газ; ■ – электроэнергия

Заключение

Централизованное пароснабжение гальванического производства неэффективно, т. к. низкий коэффициент загрузки приводит к нерациональному энергопотреблению. При организации теплоснабжения гальванического производства выявлено, что с учетом коэффициента загрузки наиболее эффективно запитывать ванны с низким коэффициентом (до 5 %) загрузки от гибко управляемых ТЭНов; остальные ванны – от газовых парогенераторов с учетом параллельно-последовательного их включения для более экономичной работы источника теплоснабжения. Также установлено, что при децентрализованном теплоснабжении сезонные тепловые потери минимальны, т. к. при этом теплообеспечение гальванического комплекса не имеет внешних сетей в отличие от централизованного пароснабжения и поэтому наиболее эффективно используются энергоресурсы для обеспечения технологического процесса (см. рис. 8).

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Мещерякова Т.С. Анализ энергозатрат промышленных предприятий в современных условиях // НП АВОК. Энергосбережение. – 2015. – № 4. – С. 36–42.

2. *Габдинова В.А.* Роль ресурсного потенциала в развитии региональной экономики и машиностроения // Сборник материалов IV Международной научно-практической конференции с онлайн-участием. Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева. – 2020. – С. 406–408.
3. *Kogan M.V., Mitchenko I.A.* Economic risk planning of the industrial enterprises // *European Journal of Economic Studies*. 2012. № 1 (1). P. 30–36.
4. Управление машиностроительным предприятием: учеб. пособие / У67 С.Г. Баранчикова [и др.]. – Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2015. – 252 с.
5. *Lishnskii G.Ya., Kachanova N.P., Raznorovich T.V., Grishin I.A.* Electrodeposition of chromium in pulsed current regimes // *Protection of Metals*. 1990. V. 26. № 1. P. 130 – 132.
6. Справочник по гальванопокрытиям в машиностроении / П.С. Мельников. – М.: Машиностроение, 1979. – 296 с., ил.
7. *Каданер Л.И.* Равномерность гальванических покрытий. – Харьков: Изд-во ХГУ, 1960. – 414 с.
8. *Романова А.С.* Энергоэффективная организация гальванического производства // Вестник Самарского государственного технического университета. Серия: Технические науки. – 2017. – № 3. – С. 110–116.
9. *Щепило Л.В.* Разработка и исследование энергетических схем предприятий по термической переработке отходов с парогазовым циклом энергопроизводства: автореф. дис. ... канд. техн. наук. – М.: Московский государственный университет инженерной экологии, 2005.
10. *Пеккер Я.Л.* Теплотехнические расчеты по приведенным характеристикам топлива. – М.: Энергия, 1977. – 256 с.
11. Расчет и конструирование устройств для нанесения гальванических покрытий / И.Ф. Плеханов. – М.: Машиностроение, 1988. – 224 с.: ил.
12. *Нащокин В.В.* Техническая термодинамика и теплопередача: учеб. пособие для вузов. – М.: Высшая школа, 1959. – 560 с.

Статья поступила в редакцию 11 августа 2021 г.

ANALYSIS OF THE ENERGY INTENSITY OF THE GALVANIC COMPLEX OF MACHINE-BUILDING PRODUCTION

A.S. Romanova, M.B. Mikushin, A.Yu. Voevodin *

Samara State Technical University
244, Molodogvardeyskaya st., Samara, 443100, Russian Federation

E-mail: alyona512@yandex.ru

Abstract. Considered are the problems of energy efficiency of products of a large machine-building enterprise associated with the impossibility of regulating steam consumption and the seasonality of changes in energy consumption. The analysis of the consumption of energy resources by a typical large machine-building enterprise of small-scale and unit-type production is carried out. The reasons for the additional costs of the enterprise with centralized steam supply associated with condensate losses have been identified. It has been established that the most power-consuming is the galvanic complex. The reasons for the increased energy consumption of the galvanic complex are considered. The energy balance of the technological section - the galvanic complex, was compiled, reflecting the calculated thermal loads when heating the electrolyte and maintaining the thermal regime, depending on the operating time of the baths and the mass of the processed parts, taking into account the peculiarities of the operation of technological equipment. The most effective methods of energy supply have been determined depending on the load factor and the fuel and energy resource used for two typical baths of the galvanic complex. Three options of technological power supply are considered, depending on the load factor of the equipment and the technical possibility of its parallel-sequential connection. It was found that with all three schemes for connecting to alternative sources of heat supply, there is an increase in the energy efficiency of the use of fuel and energy resources, as well as a decrease in the cost of energy supply of technological processes in comparison with centralized steam supply. It was revealed that when organizing the operation of technological equipment in a parallel-sequential scheme, uniform efficient loading of steam generators and high energy efficiency of galvanic production are ensured. For the power supply of the galvanic complex, a combined scheme of heat supply by local heat sources from the power grid and gas steam generators is proposed, taking into account their fullest load.

Keywords: energy intensity, power supply, heat balance, galvanic complex, load factor, fuel and energy resource, production cost.

REFERENCES

1. Meshcheryakova T.S. Analysis of energy consumption of industrial enterprises in modern conditions // NP AVOK. Energy saving. 2015. No. 4. S. 36–42.
2. Gabdinova V.A. Rol of resource potential in development of regional economy and mechanical engineering // the Collection of materials IV of the International scientific and practical conference with online participation / Kuzbass state technical university of name T.F. Gorbachev. 2020. P. 406–408.
3. Kogan M.V., Mitchenko I.A. Economic risk planning of the industrial enterprises / European Journal of Economic Studies. 2012. № 1 (1). P. 30–36.
4. Management of a machine-building enterprise: a textbook / U67 S.G. Baranchikova [and others]. Yekaterinburg: Publishing house of Ural. unta, 2015. 252 s.
5. Lishniskii G.Ya., Kachanova N.P., Raznorovich T.V., Grishin I.A. Eelectrodeposition of chromium in pulsed current regimes / Protection of Metals. 1990. T. 26. No. 1. P. 130–132.

* Alena S. Romanova, Postgraduate Student.
Maxim B. Mikushin, Student.
Alexander Yu. Voevodin, Student.

6. Reference book on electroplating in mechanical engineering / P.S. Melnikov. M.: Mechanical engineering, 1979. 296 p.
7. *Kadaner L.I.* Ravnornost of electroplated coatings. Kharkov: HGU publishing house, 1960. 414 pp.
8. *Romanova A.S.* The power effective organization galvanic Proizvodstva / Vestnik Samarskogo of the state technical university / Technical science. 2017. No. 3. P. 110–116.
9. *Schepillo L.V.* Development and research of energy schemes of enterprises for thermal processing of waste with a steam-gas cycle of energy production / dissertation author's abstract for the degree of candidate of technical sciences / Moscow State University of Environmental Engineering. M., 2005.
10. *Pekker Ya.L.* Heat technical calculations for the provided characteristics of fuel. M.: Energy, 1977. 256 pp.
11. Calculation and design of devices for applying electroplated coatings. I.F. Plekhanov. M.: Mashinostroenie, 1988. 224 p.
12. *Nashchokin V.V.* Technical thermodynamics and heat transfer: The manual for higher education institutions. M.: Higher school, 1959. 560 p.

Электротехника

УДК 621.3

АНАЛИЗ СУЩЕСТВУЮЩИХ РАЗНОВИДНОСТЕЙ ЗАЩИТ ОТ ОДНОФАЗНЫХ ЗАМЫКАНИЙ НА ЗЕМЛЮ И УСЛОВИЯ ИХ ПРИМЕНЕНИЯ

А.А. Андреев *

Тольяттинский государственный университет
Россия, 445020, г. Тольятти, ул. Белорусская, 14

E-mail: bikurina@yandex.ru

***Аннотация.** Проблема определения однофазного замыкания на землю в сетях с изолированным и компенсированным режимом нейтрали до сих пор актуальна. Согласно существующим данным по времени устранения данных технологических нарушений ставится под сомнение действенность существующих защит. Данный вопрос стоит особенно остро для электросетевых компаний, обслуживающих городские электрические сети, так как массовость линий, проложенных рядом друг с другом, и разнородный характер нагрузки делают режим сети неподходящим для использования современных защит. Поэтому для определения повреждения используются методы последовательного отключения и разделения сети на участки, которые применялись еще полвека назад. Следовательно, проведение анализа существующих защит от замыканий на землю поможет обозначить существующую проблему более четко, а также задаст вектор дальнейшим научным исследованиям в этой области. Сведения для данного метода берутся из теоретической и эмпирической информации опубликованных ранее работ. Рассмотрены, в частности, существующие разновидности защит от однофазных замыканий на землю. Произведен их анализ и условия применимости для электрохозяйства городских электрических сетей. В ходе анализа установлено, что существующие защиты от однофазных замыканий на землю позволяют уменьшить круг поиска ОЗЗ, но до сих пор не могут обеспечить абсолютной селективности для условий городских электрических сетей, выполненных кабельными линиями. Так как подобные электрические сети характерны для густонаселенных районов, то изложенная проблема актуальна и требует скорого решения.*

***Ключевые слова:** однофазные замыкания на землю, электроснабжение, изолированная нейтраль, компенсированная нейтраль, кабельные линии.*

Введение и литературный обзор

Эксплуатация электрооборудования может сопровождаться и сопровождается аварийными отключениями, возникающими вследствие технологических отказов, и плановыми отключениями, производящимися вследствие текущих ремонтов. Согласно статистическим данным по повреждаемости электрооборудо-

* Андреев Антон Андреевич, диспетчер электрических сетей АО «ССК», аспирант.

вания наиболее уязвимым элементом сети являются кабельные линии [1, 2]. Причинами повреждения данного элемента сети являются старение изоляции, заводские дефекты, человеческий фактор при проведении земляных работ, перегрузка кабеля. Из многолетних наблюдений повреждаемости кабельных сетей среднего напряжения [3] известно, что повреждения возникают с некоторой цикличностью. Это объясняется сезонными колебаниями природных условий. Таким образом, наиболее уязвимы к подобным перерывам электроснабжения потребители городских электрических сетей, так как их основное исполнение – кабельное. Это подтверждается статистическими данными по повреждаемости основных элементов электросети (см. таблицу).

Статистические данные по повреждаемости элементов городской электросети

Элементы городской электросети	Средняя повреждаемость	Длительность перерыва электроснабжения, ч	
		внезапный	плановый
Кабельные линии, км/год			
10 кВ	0,045	10	6
6 кВ	0,033	10	6
1 кВ	0,15	10	6
Воздушные линии, км/год			
6–10 кВ	0,2	2,5	12
1 кВ	0,3	2,5	6
Трансформаторы 6–10 кВ, трансформатор/год			
Воздушных сетей	0,01	10	8
Кабельных сетей	0,001	6	8
В целом (кабельных сетей)			
ТП	0,001	4	8
РП	0,015	6	12

По данным [3], повреждаемость кабельных линий увеличивается вследствие однофазных замыканий на землю.

В распределительных сетях среднего напряжения нейтраль трансформатора изолирована от земли либо заземлена через специальные дугогасящие устройства. Согласно известным общепринятым положениям, режим изолированной (компенсированной) нейтрали имеет неоспоримое преимущество – отсутствует короткозамкнутый контур через землю и нейтраль источника ЭДС при однофазных замыканиях. Следовательно, малый ток замыкания на землю позволяет продолжать работу сети без отключения потребителей. Данные следствия не только косвенно повышают надежность электроснабжения потребителей, сокращая перерыв электропотребления во время однофазных замыканий на землю (ОЗЗ), но и тем самым повышают ресурс силовых выключателей и снижают требования к заземляющим устройствам [4]. Однако режим работы сети с изолированной нейтралью имеет и целый ряд недостатков: повышенные требования к межфазной изоляции, феррорезонансные явления, дуговые перенапряжения и сложность построения селективных защит. Преобладание недостатков над преимуществами данного режима нейтрали отмечают многие авторы [5–8]. Данные недостатки вытекают из возможности работы сети с замыканием на землю через дугу, так

как физические характеристики электрической дуги носят случайный характер. Переходные процессы, возникающие во время ОЗЗ в сетях с изолированной нейтралью, зависят как от места замыкания, так и от продолжительности горения дуги [9]. Поэтому в ряде случаев наиболее распространенным решением проблемы является компенсация емкостного тока замыкания на землю с помощью дугогасящего реактора (ДГР). Применение ДГР позволяет ограничить возникающие перенапряжения на неповрежденных фазах сети и устранить скачки напряжения после погашения дуги. При автоматизированной подстройке индуктивности и отсутствии смещения нейтрали вероятность возникновения перенапряжений в несколько раз меньше, чем в сетях с изолированной нейтралью [4]. Но несмотря на это проблема определения отходящих присоединений с ОЗЗ сохраняется.

Исходя из опыта эксплуатации, а также теоретических сведений о существующих видах защит укрепляется предположение, что в настоящий момент отсутствуют защиты от ОЗЗ, обладающие должной селективностью. В работах многих авторов описываются возможности и перспективы применения резистивного заземления нейтрали [10–12], которое позволит повысить селективность защит и в последующем автоматизировать процесс поиска поврежденного присоединения. Однако достижение данных преимуществ возможно только при повышении тока ОЗЗ, что также повышает опасность поражения электрическим током живых организмов, находящихся вблизи места замыкания на землю [13, 14]. Вообще вопрос применения резистивного и комбинированного заземления нейтрали проработан слабо. Официальные документы и всероссийский стандарт, регламентирующий применение данного заземления, отсутствуют. Поэтому проблема селективности защит от ОЗЗ признается, но способы ее решения ограничены. Рекомендованные способы по внедрению и комбинированию нескольких видов защит не решают сформированную проблему, а лишь сглаживают ее последствия.

Материалы и методы

Городское электроснабжение представляет собой систему связанных между собой элементов генерации, передачи, преобразования и потребления электрической энергии. Как известно, любая распределительная сеть характеризуется массовостью и разветвленностью. Данные особенности свойственны городским электрическим сетям. К ним также относятся разделение сетей по принадлежности к обслуживаемым организациям, преобладание или полное выполнение сетей кабельными линиями, разный способ прокладки кабельных линий и так далее [15]. Приведенные свойства могут негативно воздействовать на эксплуатацию и обслуживание данных сетей, особенно при наложении таких факторов, как технологические отказы оборудования и аварийные ситуации [16].

В распределительных схемах городского электроснабжения центрами питания чаще всего являются районные понизительные подстанции, получающие электроэнергию напрямую с электростанции (рис. 1).

Как видно из рисунка, силовые трансформаторы (С1Т, С2Т) выполнены с расщепленной обмоткой низшего напряжения. Данный вид трансформаторов характерен для городских электрических сетей, так как необходимо ограничение токов короткого замыкания. Также преимуществом схем с несколькими системами шин является большая маневренность, что актуально для распределительных сетей среднего напряжения. После трансформирования напряжения электроэнергия распределяется по четырем секциям шин. Каждой секции шин соответ-

ствуют свои распределительные пункты (РП), получающие питание по двум вводам. Данная схема приведена в упрощенном виде с целью ограничения ее загромождения другими элементами электросети, а также для того, чтобы сделать акцент именно на конфигурации подобных схем.

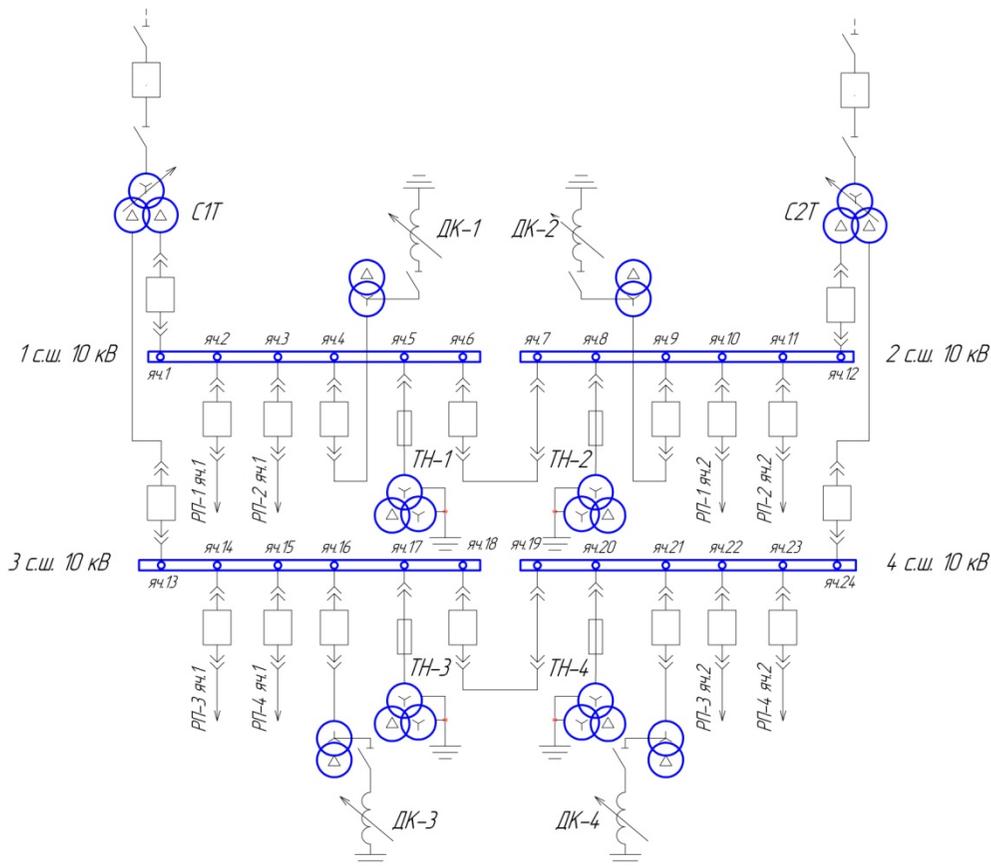


Рис. 1. Упрощенная схема районной понизительной подстанции

Далее от РП запитываются цепочки трансформаторных подстанций. Данный уровень электроснабжения также приведен в соответствующем упрощенном виде (рис. 2).

Конфигурация данной сети выполнена по двухлучевой схеме, что обеспечивает независимое питание потребителей по двум секциям шин. Данная структура характерна для потребителей первой и второй категории. Таким образом, каждая ТП подключена к секции РП. В свою очередь, данные двухтрансформаторные ТП осуществляют трансформирование напряжения до 0,4 кВ и распределение электроэнергии между потребителями. В этих схемах электрические параметры задаются с тем условием, чтобы была возможность параллельной работы трансформаторов и на районной понизительной подстанции, и на каждой ТП. Все линии электропередачи согласно условиям надежности и эстетичности мегаполисов выполнены кабельными линиями. В случае потери питания по одной из секций имеется возможность перевода нагрузки с одной секции шин на другую.

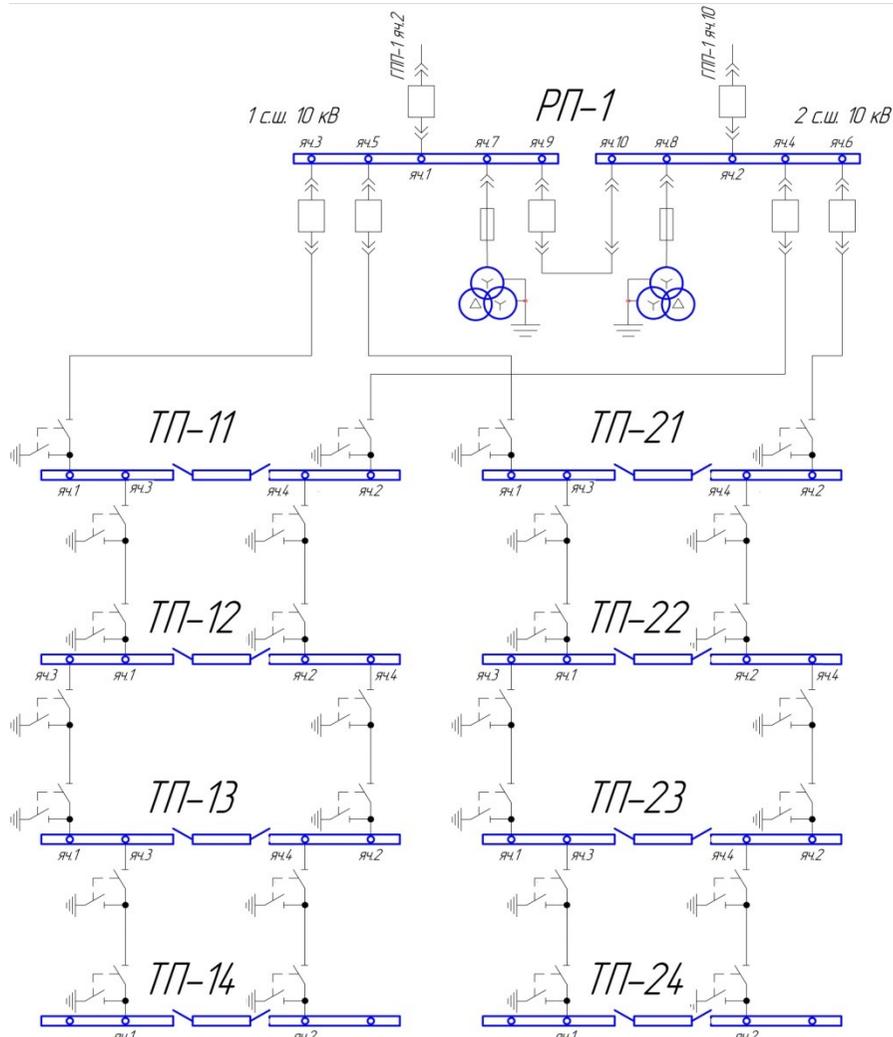


Рис. 2. Упрощенная схема РП с цепочками ТП

Также структура распределительной сети может быть кольцевой конфигурации. В этом случае от одной секции шин распределительного пункта запитана цепочка ТП и вторым концом она присоединена к другой секции шин РП. В нормальном режиме кольцо имеет разрыв на какой-либо ТП в цепочке. Этот разрыв необходим для обеспечения селективности защит и для обособленной работы каждой части цепи. Данная схема применяется для потребителей третьей категории. Поэтому двухлучевая конфигурация обладает приоритетом при выборе схемы в проектируемых городских системах электроснабжения.

Как было отмечено ранее, наиболее распространенным режимом работы нейтрали в городских электрических распределительных сетях является режим компенсированной нейтрали. Данный вид заземления позволяет продолжать работу сети в режиме однофазного замыкания на землю без отключения потребителей. Работа устройств компенсации обеспечивает оперативному персоналу больше времени на поиск и локализацию однофазного замыкания на землю. Од-

нако определение поврежденного кабельного участка не всегда может быть селективно осуществлено существующими защитами от ОЗЗ, поэтому применяются методы последовательного отключения потребителей. Таким образом, при продолжительной работе сети в режиме однофазного замыкания на землю не удастся оперативно определить линию с ОЗЗ. Поэтому объектом исследования являются существующие защиты от ОЗЗ в условиях городских распределительных кабельных сетей, работающих в режиме компенсированной нейтрали.

В качестве метода исследования описанного вопроса выбран анализ в совокупности с изучением и обобщением соответствующей информации. Использование данной методологической основы наиболее целесообразно для рассмотрения положительных и отрицательных сторон существующих защит от ОЗЗ и для их последующего оценивания в конкретных условиях. В ходе исследования используются сведения из теоретической и эмпирической информации опубликованных ранее работ.

Для проверки применимости отдельных видов защит к конкретным условиям эксплуатации рассмотрены защиты от ОЗЗ. Условия применимости будут формироваться относительно городских электрических сетей среднего напряжения с режимом компенсированной нейтрали, все линии которых выполнены кабелями. Существующие в России и за рубежом защиты разделяются на следующие разновидности.

1. *Защиты контроля изоляции сети на землю.* Данная защита основывается на измерении напряжения нулевой последовательности. В основном это осуществляется с помощью контроля изоляции обмоток трансформатора напряжения, которая образует фильтр напряжений нулевой последовательности. В нормальном режиме напряжение в данной обмотке близко к нулю. Возникновение замыкания фазы на землю приведет к появлению в данной обмотке напряжения, что сопровождается срабатыванием реле (рис. 3).

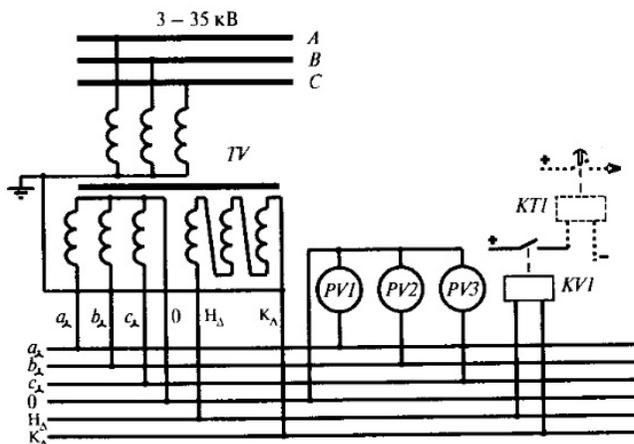


Рис. 3. Принципиальная схема трансформатора напряжения с обмоткой контроля изоляции

Также фиксация поврежденной фазы осуществляется по показаниям вольтметров. В случае замыкания на землю напряжение в поврежденной фазе будет близко к нулю, а в неповрежденной увеличится до соответствующих линейных значений. Также для сетей, где выполняется компенсация емкостных токов на

землю, возможно подключение указательного реле к сигнальной обмотке соответствующего устройства компенсации.

Данный вид защиты достаточно дешев и распространен. По некоторым данным, около 80 % всех подстанций России имеют в своем арсенале только трансформаторы напряжения с обмоткой контроля изоляции. Этот вид защиты обладает достаточно важным преимуществом в достоверности своих показаний, так как в напряжении нулевой последовательности значительно меньше высокочастотных составляющих, что важно при замыканиях через перемежающуюся дугу. Однако подобные устройства довольно условно называются защитами, так как они только сигнализируют о наличии замыкания на данной секции. Подобную защиту возможно выполнить с действием на отключение, но лишь в том случае, когда от секции шин подключено одно отходящее присоединение и нет сомнений в том, что повреждено именно оно. При нескольких присоединениях реле напряжения в обмотке контроля изоляции будет в рабочем положении до тех пор, пока замыкание на землю не устранится [17–19]. Это возможно сделать с помощью метода последовательного отключения, выполнение которого также сомнительно в отдельных случаях. Даже исходя из приведенной ранее упрощенной электрической схемы для того, чтобы определить замыкание на какой-либо отходящей линии, существует момент, когда необходимо проверить все четыре РП, на каждой из которых запитано по две цепочки ТП. Подобные проверки приведут к кратковременному, но все же отключению всех потребителей секции, на которой зафиксировано замыкание. Таким образом, подобные защиты достаточно надежны, но абсолютно неселективны для подстанций с двумя и более отходящими присоединениями.

2. Ненаправленные токовые защиты нулевой последовательности. Данные защиты основаны на измерении тока нулевой последовательности. Измерения производятся в зависимости от типа линии либо с помощью трансформаторов тока, соединенных в фильтр токов нулевой последовательности, либо с помощью трансформаторов тока нулевой последовательности (рис. 4).

При повреждении в линии величина удельного емкостного тока замыкания на землю определяется как

$$I_{0C}^{(1)} = 3\omega C_0 U_\phi,$$

где ω – циклическая частота; U_ϕ – фазное напряжение сети; C_0 – электрическая фазная емкость.

Чувствительность данных защит производится по расчетам величины

$$k_u = \frac{I_{C\Sigma} - I_{C\text{фиод.}}}{I_{C3}} \geq 1,25.$$

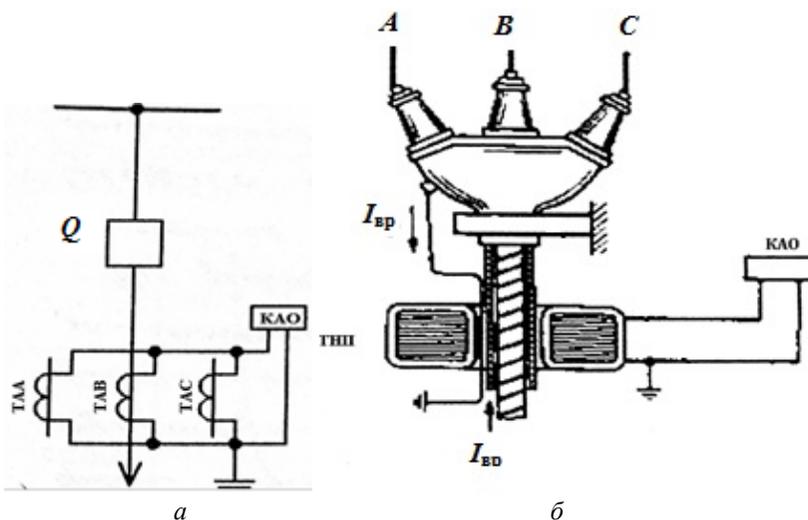


Рис. 4. Ненаправленная токовая защита:
 а – с фильтром нулевой последовательности;
 б – с трансформатором тока нулевой последовательности

При этом собственный емкостной ток кабельной линии

$$I_{C\text{фиод.}} = I_{0C}^{(1)} \cdot l.$$

Ток срабатывания защиты определяется как

$$I_{сз.} = K_H \cdot K_{бр} \cdot I_{C\text{фиод.}},$$

где K_H – коэффициент надежности; $K_{бр}$ – коэффициент броска емкостного тока.

Расчет коэффициента чувствительности данной защиты во многом зависит от суммарного емкостного тока сети ($I_{C\Sigma}$). Если данная величина будет значительно больше емкостного тока защищаемой линии ($I_{C\text{фиод.}}$), то условие чувствительности будет выполняться. Так как суммарный емкостной ток пропорционален количеству кабельных линий, то защита будет более селективной на подстанции с большим количеством отходящих присоединений. Следовательно, для подстанций с малым емкостным током чувствительности данной защиты может оказаться недостаточно. Также данную защиту необходимо отстраивать от тока небаланса, возникающего из-за неодинаковых характеристик трансформаторов тока нулевой последовательности.

Согласно [20, 21], подобные защиты эффективны в сетях с большим количеством отходящих присоединений, каждое из которых имеет малый емкостной ток. Под это описание подходят цеха с большим количеством высоковольтных двигателей, подключенных через короткие кабели. Структура и характер эксплуатации городских электрических сетей не подходят под данное описание. Данные сети также характеризуются непостоянными параметрами емкости вследствие частых переключений по отношению к первичной схеме. Поэтому данная защита не может обеспечить селективность в подобных условиях.

3. *Направленные токовые защиты нулевой последовательности.* Принципиальное отличие направленных защит от ненаправленных заключается в том, что направленные включают в себя реле направление мощности. Так как емкостные

токи «стекают» в точку замыкания, то по положительному направлению мощности возможно определить именно то присоединение, которое находится на повреждении. Емкостной ток остальных присоединений будет иметь противоположное направление, поэтому отсутствует необходимость отстройки от суммарного емкостного тока. Наиболее распространенным типом этих защит являются ЗЗП-1М и ЗЗН. Для выбранных нами условий применяются защиты ЗЗП-1М, так как ЗЗН предназначена для сетей без компенсации емкостного тока.

Исходя из сведений, представленных в [22], граничным условием селективного срабатывания ЗЗП-1М является суммарный емкостной ток 0,5–0,6 А. Для этого суммарная протяженность неповрежденных линий должна быть не менее 20–25 км. Это условие выполняется в городских электрических сетях, но в случае, когда схема приведена к нормальному виду. Поэтому вероятность соблюдения этого условия будет также определяться количеством отходящих присоединений. Также при замыканиях через перемежающуюся дугу с появлением высших гармоник возможны неселективные срабатывания. Отстроить данные защиты довольно сложно, так как до сих пор не существует однозначной методики по подбору уставок. Поэтому границы применимости данных защит от замыканий на землю до сих пор узкие.

4. Защиты нулевой последовательности на токах высших гармоник. Этот вид защиты основан на регистрации токов высших гармоник в сети. Так как ОЗЗ сопровождаются повышением содержания высших гармоник, особенно в поврежденной линии, то метод их регистрирования позволил бы решить проблему поиска повреждения. Данные процессы характерны для сетей всех видов заземления нейтралей [23]. Соответствующий вид защиты подразделяется на защиты, реагирующие на абсолютные значения токов высших гармоник, в которых фактические гармонические составляющие сравниваются с уставкой, и защиты, реагирующие на относительное значение, в которых замеры производятся в данный момент времени. Реализация данного вида защиты распространена в основном в совокупности, так как это наиболее надежно и целесообразно. То есть при ОЗЗ срабатывает защита абсолютного замера и на данных фидерах выпадают соответствующие блинкера. Далее возможно на этих фидерах производить относительный замер с фиксацией измеряемого тока, и присоединение с наибольшим током утечки окажется с ОЗЗ. Для городских электрических сетей распространен подобный алгоритм, а также используется совмещение данного вида защиты с защитами контроля изоляции сети.

С помощью устройств избирательной сигнализации, таких как УСЗ-2/2 и УСЗ-3М, производится измерение токов высших гармоник соответствующих фидеров. Измерения осуществляются посредством трансформаторов тока нулевой последовательности (рис. 5).

Таким образом, оперативный персонал последовательно измеряет токи высших гармоник на фидерах соответствующей секции и выделяет присоединение, где ток наибольший. Также существуют устройства, которые автоматически определяют присоединение с наибольшим током высших гармоник и передают данную информацию в диспетчерский пункт.

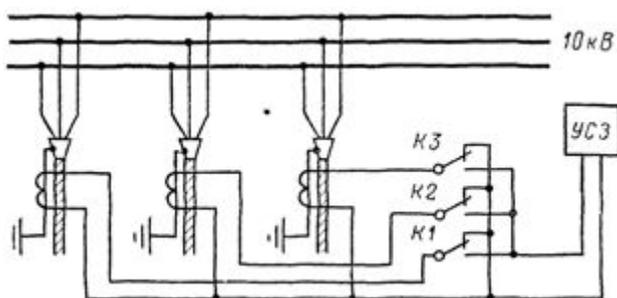


Рис. 5. Подключение УСЗ к трансформатору тока нулевой последовательности

Несмотря на сложность реализации, данные защиты обладают достаточно высокой селективностью, но тем не менее защиты, реагирующие на абсолютное значение высших гармоник, чаще всего срабатывают неселективно. Производя же замер только на присоединениях со сработавшей защитой, нельзя однозначно утверждать, что присоединение с наибольшим током утечки – это присоединение с ОЗЗ. Перемежающаяся дуга может иметь различные параметры в каждый момент времени, следовательно, защита лишь ограничивает круг поиска, но не дает абсолютно селективного срабатывания.

5. *Защита с использованием наложенных токов.* Принцип данного вида защиты основан на введении высокочастотного сигнала в сеть и регистрации его отражения. Отсутствие возвращенного сигнала говорит о том, что существует замыкание. При этом, зная длину линии и токовременные характеристики, возможно зафиксировать расстояние до места пробоя [24, 25]. Частота наложенного тока может быть как выше промышленной, так и ниже. Однако высокие частоты могут присутствовать в сети и в нормальном режиме, чему способствуют нелинейные нагрузки. Так как количество подобных потребителей электроэнергии довольно велико, то применение наложенного тока высокой частоты ограничивается. Использование токов пониженной частоты решает данную проблему, но для их создания требуется специальное устройство, подключенное к нейтрали сети. Для обеспечения должного уровня низкочастотного сигнала требуется применение генераторов большой мощности. Это приводит к усложнению схемы первичной коммутации. В разветвленных сетях с несколькими секциями и соответствующими несколькими ДГР реализация этого решения полностью нецелесообразна. Также не исключаются сложности отстройки данного сигнала от гармонических составляющих при внешних ОЗЗ [26].

Появление защит с использованием наложенных токов не нашло широкого применения. Наличие нелинейных нагрузок ограничивает применение высокочастотных сигналов для обнаружения ОЗЗ. Способ применения наложенного тока пониженной частоты реализовать технически сложно и в некоторых случаях нецелесообразно. Поэтому применение данного вида защит в настоящее время для городских электрических сетей неактуально.

6. *Централизованные защиты от ОЗЗ.* Данные защиты можно отнести также к отдельному виду, так как в их основу заложен принцип централизации данных об ОЗЗ. В качестве сравниваемых физических величин чаще всего используются токи нулевой последовательности всех отходящих присоединений. Так как современные микропроцессорные системы позволяют обрабатывать до 48 каналов одновременно, то измеряемые характеристики емкостного тока актуальны практически в каждый момент времени, что позволяет обеспечивать селективное сра-

батывание [27]. Также в качестве входной информации могут быть использованы: активная мощность нулевой последовательности, величина наложенного тока, токи высших гармоник. Таким образом, централизованная защита выявляет линию с замыканием на основе измеряемых характеристик ОЗЗ. То есть она может включать в себя комбинацию вышеизложенных индивидуальных защит и, производя моментальное вычисление сравниваемых параметров ОЗЗ, осуществлять срабатывание на сигнал либо на отключение.

Однако несмотря на то, что централизованная защита является передовой разработкой в выявлении ОЗЗ, основана она на индивидуальных защитах, которые не лишены недостатков. Например, при сравнении мощностей нулевой последовательности велика вероятность неселективного срабатывания, так как требуется достаточно большая активная составляющая тока утечки. Этого можно добиться в сети с резистивным заземлением нейтрали, возможность применения которого описана выше. Использовать в качестве входной информации наложенный ток также нецелесообразно в подавляющей части распределительных сетей. Это объясняется изложенными выше недостатками, характерными для защит с использованием наложенных токов. Наиболее целесообразной и эффективной защитой для городских электрических сетей является защита на высших гармониках. Моментальное сравнение токов высших гармоник на отходящих присоединениях способствует повышению селективности данной защиты [27]. Однако, как было рассмотрено ранее, суммарная емкость линии часто меняется вследствие оперативных переключений. Следовательно, электрические параметры дугового замыкания непостоянны. Поэтому по величине тока высших гармоник нельзя однозначно определить присоединение с ОЗЗ. Таким образом, централизованные защиты нельзя назвать универсальными; несмотря на точность и быстроту их логического аппарата, они могут обладать недостатками соответствующих индивидуальных защит.

Результаты и обсуждение

Представленные виды защит от ОЗЗ рассмотрены в своем принципиальном исполнении, без конкретизирования отдельных устройств. Для выбора того или иного вида защиты необходимо учитывать режим заземления нейтрали, электрические параметры потребителей, количество отходящих присоединений на подстанции, разветвленность сети, нагрузку и виды ЛЭП. В качестве условий применения были выбраны городские электрические сети с соответствующим большим количеством отходящих присоединений, выполненных в основном кабельными линиями. Многие авторы, рассматривающие подобный вопрос, признают проблему неселективности и предлагают решить ее путем применения резистивного заземления нейтрали. Но на сегодняшний момент государственным стандартом не регламентируется применение данного способа, который имеет как преимущества, так и недостатки. Также подобное решение требует изменения режима нейтрали сети. Поэтому внимание разработчиков и компаний уделяется больше усовершенствованию самих защит. Но несмотря на точность измерений современных защит, выполненных на микропроцессорной компонентной базе, их принцип действия остается прежним. То есть повышение селективности не может достичь значений, нужных для абсолютно достоверного срабатывания. Этому способствуют не только скачкообразные электрические параметры дуги, но и состояние схемы в момент замыкания. В ходе проведенного анализа было установлено, что существующие защиты от ОЗЗ позволяют уменьшить круг поиска

ОЗЗ, но до сих пор они не могут обеспечить абсолютной селективности. Конечно, это не относится к частным случаям, когда количество присоединений секции мало и схема электроснабжения в большинстве своем находится в нормальном оперативном состоянии. Но в сетях, которые включают в себя большое количество отходящих присоединений, где линии выполнены кабелями, проложенными рядом друг с другом, где схемы электроснабжения часто меняются, защиты от ОЗЗ не справляются полностью со своей прямой задачей.

Заключение

В настоящий момент проблема определения поврежденного отходящего присоединения во время однофазного замыкания на землю остается актуальной. В ходе анализа установлено, что городские электрические сети, характеризующиеся большой протяженностью линий и их массовостью, могут использовать в качестве достоверной защиты только трансформаторы напряжения с измерительной обмоткой контроля изоляции. Так как этот способ абсолютно неселективен по отношению к отходящим присоединениям данной секции, то его применение происходит в сочетании с другими защитами. Наиболее подходящими при этом для городских электрических сетей являются защиты на высших гармониках. Хотя подобные комбинации и не обеспечивают абсолютно достоверного срабатывания, но их применение заметно уменьшает время поиска ОЗЗ. Поэтому объединение и централизация данных видов защит могут быть перспективными при решении проблемы селективности защит от ОЗЗ.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Кашеваров С.Г.* Повреждение линий электропередачи и обзор новых технических и организационных решений по их ограничению // Современное состояние и перспективы развития технических наук: Сборник статей Международной научно-практической конференции. – Уфа: РИО МЦИИ Омега Сайнс, 2015. – С. 58.
2. *Шалин А.И.* Замыкания на землю в сетях 6–35 кВ. Достоинства и недостатки различных защит // Новости ЭлектроТехники. – 2005. – № 3 (33).
3. *Невретдинов Ю.М., Фастий Г.П., Данилин А.Н. и др.* Исследования опасности однофазных замыканий в сети 35 кВ Мурманского региона // Труды Кольского научного центра РАН. Энергетика. – 2016. – Вып. 12. – С. 7–15.
4. *Шалин А.И., Целебровский Ю.В., Щеглов А.М.* Особенности резистивного заземления в городских сетях 10 кВ // Ограничение перенапряжений и режимы заземления нейтрали сетей 6–35 кВ: Труды Второй всероссийской научно-технической конференции. – Новосибирск, 2002. – С. 63–68.
5. *Обабков В.К.* Многокритериальность показателя эффективности функционирования сетей 6–35 кВ и проблема оптимизации режимов заземления нейтрали // Режимы заземления нейтрали сетей 3–6–10–35 кВ: Доклады научно-технической конференции. – Новосибирск, 2000. – С. 33–41.
6. *Zhang H.A.* Segmented Network Method Based Faulted Line Selection Strategy for Single-Phase Earth Fault in Small Current Grounding Distribution Network. 2017 International Conference on Computer Systems, Electronics and Control (ICCSEC), Dalian, 2017, pp. 1582–1588.
7. *Burkhardt E., Hilbrich D., Offermann N. et al.* The Short-term Isolated Star Point Grounding to Detect Earth Faults in Compensated Networks. The Concept. 2020. 55th International Universities Power Engineering Conference (UPEC), Torino, Italy, 2020, pp. 1–5.
8. *Назарычев А.Н., Тутенков С.С., Пугачев А.А.* Комплексные инновационные решения по заземлению нейтрали в сетях 6–35 кВ // Электроэнергия. Передача и распределение. – 2016. – № 3(36). – С. 40–46.
9. *Filippov S.P., Dilman M.D., Ilyushin P.V.* Distributed Generation of Electricity and Sustainable Regional Growth // Thermal Engineering. 2019. V. 66(12), pp. 869–880.
10. *Абдуллин Л.И., Ваганов Г.В., Чернова Н.В. и др.* Влияние параллельно работающих фидеров на резонансные частоты воздушной линии при однофазном замыкании на землю // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. – 2018. – Т. 20. – № 1–2. – С. 54–61.

11. Куликова Н.А., Титоренко О.М., Тяпкина В.А. Резистивное заземление нейтрали – способ повышения надежности работ электрических сетей 6–35 кВ // Энергетические установки и технологии. – 2018. – Т. 4. – № 2.
12. Рыжкова Е.Н., Кудрин Б.И., Фомин М.А. Экономическая эффективность перевода сетей электроснабжения 6–35 кВ в режим управляемого резистивного заземления // Вестник МЭИ. – 201. – № 3.
13. Целебровский Ю.В. Нормативное обеспечение режима нейтрали в электрических сетях // Режимы заземления нейтрали сетей 3–6–10–35 кВ: Доклады научно-технической конференции. – Новосибирск, 2000. – С. 3–6.
14. Борухман В.А. Об эксплуатации селективных защит от замыканий на землю в сетях 6–10 кВ и мероприятиях по их совершенствованию // Энергетик. – 2000. – № 1. – С. 20–22.
15. Федотов А.И., Васанов Г.В., Абдуллазянов А.Ф., Шаряпов А.М. Цифровая система мониторинга повреждений на линиях электропередачи // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. – 2021. – № 23(1). – С. 146–155.
16. Мышкина Л.С. Малая генерация – средство повышения живучести энергосистемы // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. – 2017. – Т. 19. – № 1–2. – С. 23–30.
17. Bouziane B., Elmaouhab A. et al. Smart Grid Reliability Using Reliable Block Diagram Case Study: Adrar's Isolated Network of Algeria // 2019 International Conference on Power Generation Systems and Renewable Energy Technologies (PGSRET): proc. Istanbul, Turkey 26–27 august 2019. – IEEE, 2019. <https://doi.org/10.1109/PGSRET.2019.8882711>.
18. Guillen D., Olivares-Galvan J.C., Escarela-Perez R. et al. Diagnosis of interturn faults of single-distribution transformers under controlled conditions during energization // Measurement. 2019. V. 141. pp. 24–36.
19. Mejia-Barron A., Valtierra-Rodriguez M., Granados-Lieberman D. et al. The application of EMD-based methods for diagnosis of winding faults in a transformer using transient and steady state currents // Measurement. 2018. V. 117. pp. 371–379.
20. Манилов А.М. Способ обеспечения чувствительности защит от однофазных замыканий на землю в сети 6–10 кВ // Энергоэксперт. – 2011. – № 4.
21. Шалин А.И. Замыкания на землю в сетях 6–35 кВ. Случаи неправильных действий защит // Новости ЭлектроТехники. – 2005. – № 2 (32).
22. Титенков С.С., Пугачев А.А. Режимы заземления нейтрали в сетях 6–35 кВ и организация релейной защиты от однофазных замыканий на землю // Энергоэксперт. – 2010. – № 2.
23. Закарюкин В.П., Крюков А.В., Алексеенко Е.А. Анализ применимости упрощенных моделей внешней сети для определения токов короткого замыкания в системах тягового электроснабжения железных дорог // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. – 2017. – № 19 (11–12). – С. 12–20.
24. Лыкин А.В., Уткин Е.А. Распределительные электрические сети 10/0,4 кВ с максимальным приближением трансформаторных подстанций к потребителям // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. – 2019. – № 21 (3). – С. 46–54.
25. Powering. Reliable. Future. Yesterday, today and tomorrow. RWE Annual Report (2017). Essen, Germany: RWE Aktiengesellschaft.
26. Minullin R.G., Piskovatskiy Y.V., Kasimov V.A. Model and Experimental Detection of Single Phase-to-Earth Faults of Overhead Conductors in 6-10 Kv Distribution Circuits by a Location Method. 2020 International Ural Conference on Electrical Power Engineering (UralCon), Chelyabinsk, Russia, 2020, pp. 411–415.
27. Горюнов В.А. Однофазное замыкание на землю. Можно ли решить проблему? // Новости ЭлектроТехники. – 2017. – № 2 (104).

Статья поступила в редакцию 11 октября 2021 г.

ANALYSIS OF EXISTING TYPES OF PROTECTION AGAINST SINGLE-PHASE EARTH FAULTS AND THEIR APPLICATION CONDITIONS

*A.A. Andreev**

Togliatti State University
14, Belorusskaya st., Tolyatti, 445020, Russian Federation
E-mail: bikurina@yandex.ru

Abstract. *Currently, the problem of determining a single-phase earth fault in networks with isolated and compensated neutral mode is still relevant. According to the existing data, according to the time of elimination of these technological violations, the conclusion arises, according to which the effectiveness of existing protections is called into question. This issue is particularly acute for electric grid companies that serve urban electric networks, since the mass of lines laid next to each other and the heterogeneous nature of the load makes the network mode not suitable for the use of modern protections. Therefore, as a definition of damage, the method of sequential disconnection and the method of dividing the network into sections, which were used half a century ago, are used. Therefore, the analysis of the existing earth fault protection will help to identify the existing problem more clearly, as well as set the direction for further scientific research in this area. The methodological basis, in this article, is the analysis. The information for this method is taken from the theoretical and empirical information of previously published works. In particular, the existing types of protection against single-phase earth faults are considered. Their analysis and conditions of applicability for the electric economy of urban electric networks are made. In the course of the analysis, it was found that the existing protection against single-phase earth faults can reduce the search range of OZZ, but, so far, they can not provide absolute selectivity for the conditions of urban electrical networks made by cable lines. Since such electrical networks are typical for densely populated areas, the above problem is relevant and requires a quick solution.*

Keywords: *single-phase earth faults, power supply, isolated neutral, compensated neutral, cable lines.*

REFERENCES

1. *Kashevarov S.G.* Damage to power transmission lines and review of new technical and organizational solutions for their limitation // The current state and prospects for the development of technical sciences: A collection of articles of the International Scientific and Practical Conference. Ufa: RIO MTII Omega Sciences, 2015. p. 58
2. *Shalin A.I.* Earth closures in 6–35 kV networks. Advantages and disadvantages of various protections // News of Electrical Engineering, 2005. № 3 (33).
3. *Nevretdinov Yu.M., Fasti G.P., Danilin A.N., et al.* Studies of the danger of single-phase short circuits in the 35 kV network of the Murmansk region // Proceedings of the Kola Scientific Center of the Russian Academy of Sciences. Power engineering, 2016. Issue 12. p. 7–15.
4. *Shalin A.I., Tselebrovsky Yu.V., Shcheglov A.M.* Features of resistive grounding in urban networks of 10 kV // Limiting overvoltage and modes of grounding neutral networks of 6–35 kV: Proceedings of the Second All-Russian Scientific and Technical Conference. Novosibirsk, 2002. p. 63–68.
5. *Obabkov V.K.* Multicriteriality of the indicator of the efficiency of the functioning of networks of 6–35 kV and the problem of optimizing the modes of neutral grounding // Modes of neutral grounding of 3–6–10–35 kV networks: Reports of the scientific and technical conference. Novosibirsk, 2000. pp. 33–41.

* *Anton A. Andreev, Postgraduate Student*

6. *Zhang H.A.* Segmented Network Method Based Faulted Line Selection Strategy for Single-Phase Earth Fault in Small Current Grounding Distribution Network. 2017 International Conference on Computer Systems, Electronics and Control (ICCSEC), Dalian, 2017, pp. 1582–1588.
7. *Burkhardt E., Hilbrich D., Offermann N., et al.* The Short-term Isolated Star Point Grounding to Detect Earth Faults in Compensated Networks. The Concept. 2020. 55th International Universities Power Engineering Conference (UPEC), Torino, Italy, 2020, pp. 1–5.
8. *Nazarychev A.N., Titenkov S.S., Pugachev A.A.* Complex innovative solutions for neutral grounding in networks of 6–35 kV // *Electric Power. Transmission and distribution.* 2016. No. 3(36). pp. 40–46.
9. *Filippov S.P., Dilman M.D., Ilyushin P.V.* Distributed Generation of Electricity and Sustainable Regional Growth // *Thermal Engineering.* 2019. V. 66 (12), pp. 869–880.
10. *Abdullin L.L., Vagapov G.V., Chernova N.V., et al.* Effect of parallel feeders on the resonant frequencies of the overhead line during a single-phase ground fault // *News of higher educational institutions. Energy problems.* 2018. Vol. 20. no. 1–2. pp. 54–61.
11. *Kulikova N.A., Titorenko O.M., Tyapkina V.A.* Resistive neutral grounding – a method for improving the reliability of electrical networks of 6–35 kV // *Power plants and Technologies.* 2018. vol. 4. No. 2.
12. *Ryzhkova E.N., Kudrin B.I., Fomin M.A.* Economic efficiency of transferring 6–35 kV power supply networks to the controlled resistive grounding mode. *Bulletin of the MEI.* No. 3. 2013.
13. *Tselebrovsky Yu.V.* Normative support of the neutral mode in electric networks // *Modes of grounding of the neutral of networks 3–6–10–35 kV: Reports of the scientific and technical conference.* Novosibirsk, 2000. p. 3–6.
14. *Borukhman V.A.* On the operation of selective earth fault protection in 6–10 kV networks and measures for their improvement // *Energetik.* 2000. No. 1. pp. 20–22.
15. *Fedotov A.I., Vagapov G.V., Abdullazyanov A.F., Sharipov A.M.* Digital system for monitoring damage on power transmission lines // *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy.* Energy problems. 2021. No. 23(1). P. 146–155.
16. *Myshkina L.S.* Malaya generatsiya – a means of increasing the survivability of the energy system. *Izvestiya vysshnykh uchebnykh zavedeniy.* Energy problems. 2017. Vol. 19, no. 1–2. p. 23–30.
17. *Bouziane B., Elmaouhab A., et al.* Smart Grid Reliability Using Reliable Block Diagram Case Study: Adrar’s Isolated Network of Algeria // 2019 International Conference on Power Generation Systems and Renewable Energy Technologies (PGSRET): proc. Istanbul, Turkey 26–27 august 2019. IEEE, 2019. <https://doi.org/10.1109/PGSRET.2019.8882711>.
18. *Guillen D., Olivares-Galvan J.C., Escarela-Perez R. et al.* Diagnosis of interturn faults of single-distribution transformers under controlled conditions during energization // *Measurement.* 2019. V. 141. pp. 24–36.
19. *Mejia-Barron A., Valtierra-Rodriguez M., Granados-Lieberman D. et al.* The application of EMD-based methods for diagnosis of winding faults in a transformer using transient and steady state currents // *Measurement.* 2018. V. 117. pp. 371–379.
20. *Manilov A.M.* A method for ensuring the sensitivity of protections against single-phase earth faults in a 6–10 kV network // *Energexpert.* 2011. No. 4.
21. *Shalin A.I.* Earth closures in 6–35 kV networks. Cases of incorrect actions of protection // *News of Electrical Engineering.* 2005. № 2 (32).
22. *Titenkov S.S., Pugachev A.A.* Neutral grounding modes in 6–35 kV networks and the organization of relay protection against single-phase earth faults // *Energexpert.* 2010. No. 2.
23. *Zakaryukin V.P., Kryukov A.V., Alekseenko E.A.* Analysis of the applicability of simplified models of the external network for determining short-circuit currents in traction power supply systems of railways. *Energy problems.* 2017. No. 19 (11–12). P. 12–20.
24. *Lykin A.V., Utkin E.A.* Distribution electric networks of 10/0.4 kV with the maximum approximation of transformer substations to consumers // *News of higher educational institutions. Energy problems.* 2019. No. 21(3). P. 46–54.
25. *Powering. Reliable. Future. Yesterday, today and tomorrow.* RWE Annual Report (2017). Essen, Germany: RWE Aktiengesellschaft.
26. *Minullin R.G., Piskovatskiy Y.V., Kasimov V.A.* Model and Experimental Detection of Single Phase-to-Earth Faults of Overhead Conductors in 6–10 Kv Distribution Circuits by a Location Method. 2020 International Ural Conference on Electrical Power Engineering (UralCon), Chelyabinsk, Russia, 2020, pp. 411–415.
27. *Goryunov V.A.* Single-phase earth fault. Is it possible to solve the problem? // *Electrical Engineering News.* 2017. No. 2 (104).

УДК 621.365.511

СПОСОБ ВЫРАВНИВАНИЯ ГРАФИКА НАГРУЗКИ МОЩНЫХ ИНДУКЦИОННЫХ УСТАНОВОК

А.А. Базаров, А.И. Данилушкин *

Самарский государственный технический университет
Россия, 443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244

E-mail: aleksbazarov@yandex.ru, aidanilushkin@mail.ru

Аннотация. Рассмотрены вопросы выравнивания нагрузки в цеховой системе электроснабжения, содержащей мощные электротермические установки. При эксплуатации индукционных многосекционных установок методического действия происходит циклическое изменение параметров нагрузки со значительными вариациями тока и коэффициента мощности. Наибольшие отклонения указанных параметров имеют место в переходных режимах, при пуске нагревателя или при смене номенклатуры заготовок. Показано, что при изменении нагрузки в пусковых режимах приращение мощности и снижение коэффициента мощности могут привести к недопустимым перегрузкам источника питания по току. Корректировка в процессе пуска значений токов секций и коэффициента мощности позволяет уменьшить колебания тока, обеспечить более гладкую диаграмму мощности и исключить перегрузку источника питания. Реализовать коррекцию тока и коэффициента мощности возможно при использовании полупроводниковых преобразователей частоты в каждой секции. Такой подход позволяет предотвратить снижение показателей качества напряжения и уменьшить возможные отклонения в распределении температуры по объему заготовок. В работе по результатам расчета параметров секций нагревателя в переходных режимах определены диапазоны изменения мощности, напряжения, тока и частоты, соответствующие возможностям используемых в данных установках полупроводниковых преобразователей частоты. Предложенный алгоритм пуска обеспечивает наименьшие из всех возможных вариантов колебания мощности.

Ключевые слова: индукционный нагрев, температурное распределение, нестационарные режимы, моделирование, алгоритмы управления, регулирование мощности.

Мощные индукционные установки создают значительные возмущения для системы электроснабжения в нестационарных режимах. Особенно ярко это проявляется при периодическом режиме нагрева. Однако и для более спокойного методического нагрева характерны переходные режимы при очередной выгрузке

* Базаров Александр Александрович, профессор кафедры электроснабжения промышленных предприятий, доктор технических наук, доцент.

Данилушкин Александр Иванович, профессор кафедры электроснабжения промышленных предприятий, доктор технических наук, профессор.

разогретых заготовок с одновременной загрузкой холодных. Такие операции сопровождаются скачкообразным уменьшением удельного электрического сопротивления по всей длине загрузки.

Вопросы режима работы потребителей электроэнергии постоянно находят отражение в трудах специалистов, так как это влияет на эффективность функционирования и производительность производственных объектов [1–6]. Здесь одинаково важны прогнозирование и оптимизация энергопотребления [1–3], а также оценка технических и экономических затрат на решение вопросов, связанных с повышением качества напряжения [4–9]. Широкое распространение преобразовательной техники создает проблемы с генерацией высших гармоник в сети [11–14].

Появление новых возможностей у систем управления качеством электроэнергии позволяет эффективнее решать вопросы мониторинга и регулирования [15, 16].

Электротехнологические процессы и установки всегда представляли сложную нагрузку для системы электроснабжения.

Особенностями таких потребителей являются наличие высших гармоник в диаграмме тока (дуговые печи, сварка, электролизное производство), резкопеременный характер работы (дуговые печи), низкий коэффициент мощности (индукционный нагрев). Использование полупроводниковой преобразовательной техники частично сглаживает некоторые проблемы, но наличие высших гармоник не устраняется [17–21].

При разработке технологического процесса индукционного нагрева используются современные средства, позволяющие определить параметры установки и алгоритм управления [22–26].

Для управления системой индукционного нагрева возможно применение замкнутых систем регулирования или программного управления. В работе рассматриваются возможности системы программного управления в процессе выхода на установившийся режим и поддержания заданных параметров. Процессы индукционного нагрева могут быть исследованы на базе мультифизических моделей, но некоторые вопросы рассматриваются отдельно, например определение параметров индуктора и настройка колебательных контуров.

Расчет параметров секций индукторов и определение частоты напряжения при настройке контура на резонанс токов

Процесс нагрева в системе «методический нагреватель – загрузка» осуществляется при дискретном во времени перемещении заготовок. Рассматриваемая индукционная система состоит из шести секций длиной 1100 мм. С учетом межсекционной изоляции общая длина нагревателя составляет 6740 мм. В индукторе одновременно находятся семь заготовок длиной 700 мм диаметром 1075 мм. Суммарная мощность нагревателя 2400 кВт. Требуемая по технологии прессования температура заготовок на выходе из нагревателя составляет 500 °С при допустимом отклонении ± 30 °С.

При дискретном перемещении происходит циклическое изменение параметров системы. Из-за низкого естественного коэффициента мощности индуктора отклонения параметров индуктора в процессе перемещения заготовок с одной позиции на другую приводят к значительному увеличению тока, потребляемого контуром, что может привести к перегрузке источников питания. Чтобы не завышать мощность источников питания, необходимо производить настройку час-

тоты для выполнения равенства емкостного тока конденсаторной батареи и реактивной составляющей тока индуктора. Вариант с регулированием емкости конденсаторной батареи уступает по качеству регулирования, так как требуется большое число коммутирующих элементов, а шаг дискретизации ограничен минимальным значением емкости подстроечного конденсатора.

Использование в качестве автономных источников питания транзисторных преобразователей частоты наряду с автоматической настройкой контура в резонанс дополнительно позволяет решить проблему симметрирования нагрузки между фазами, так как каждый преобразователь подключен к трехфазной сети.

Увеличение температуры в каждой заготовке в процессе нагрева приводит к росту удельного сопротивления, что сказывается на глубине проникновения тока и отражается на величине индуктивности заготовки. Таким образом, одновременно происходит изменение мощности тепловыделения в заготовке и импеданса секции индуктора.

Схема расположения цилиндрических заготовок в многосекционном индукционном нагревателе методического нагрева представлена на рис. 1. Нагреватель состоит из шести секций. Заготовки, находящиеся в нагревателе, перемещаются дискретно. Между индуктором и заготовкой предусмотрена тепловая изоляция.



Рис. 1. Расположение заготовок и секций индуктора

Температурный режим заготовок для каждой секции нагревателя в зависимости от марки сплава приведен в табл. 1. Нумерация секций нагревателя принята от выхода ко входу.

Таблица 1

Температурный режим заготовок, град.

Температура нагрева заготовок	Индуктор 1	Индуктор 2	Индуктор 3	Индуктор 4	Индуктор 5	Индуктор 6
460–510	500	465	460	350	250	150
410–460	450	420	410	320	230	130
360–410	400	375	360	270	190	100

Мультифизическая нелинейная модель

Модели электромагнитной и тепловой задач формулируются в виде дифференциальных уравнений в частных производных:

$$\nabla^2 \{\bar{A}\} - j\omega\sigma(T)\{\bar{A}\} - \{\bar{J}\} = 0; \quad (1)$$

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} - \nabla \cdot (-k \nabla T) - \rho C_p \mathbf{u} \cdot \nabla T = Q. \quad (2)$$

Здесь: \bar{A} – векторный магнитный потенциал; σ – удельная электропроводность материала; \bar{J} – вектор плотности тока; ρ – плотность материала; C_p – удельная теплоемкость; k – коэффициент теплопроводности; \mathbf{u} – вектор скорости перемещения заготовок; Q – плотность мощности тепловыделения.

Уравнения (1), (2) дополняются граничными условиями.

Для электромагнитной задачи (1) в качестве граничных условий принимается равенство нулю векторного магнитного потенциала на границе расчетной области:

$$A_\varphi = A_{0\varphi}. \quad (3)$$

На линии осевой симметрии граничное условие задается в виде равенства нулю производной функции магнитного потенциала.

Для тепловой задачи в соответствии с геометрической моделью, изображенной на рис. 1, рассматриваются два варианта теплообмена: для торцевой поверхности заготовки плотность теплового потока определяется соотношением

$$k \frac{\partial T}{\partial n} = \varepsilon \sigma_0 (T_3^4 - T_{oc}^4) + h (T_3 - T_{oc}). \quad (4)$$

Влияние потоков с поверхности футеровки практически отсутствует, так как заглубление заготовки в индуктор мало.

Теплообмен боковой поверхности заготовок с поверхностью футеровки осуществляется в основном за счет потоков излучения:

$$k \frac{\partial T}{\partial n} = \varepsilon \sigma_0 (T_3^4 - T_{\phi 1}^4). \quad (5)$$

В уравнениях (1), (2) правая часть содержит источники тепла. Связь между процессами обеспечивается через электропроводность в уравнении (1), зависящую от температуры, и через источники тепла в уравнении (2). После преобразований исходные уравнения (1) – (5) приводятся к конечному виду систем алгебраических уравнений, которые для совместной задачи объединяются:

$$\begin{cases} [\tilde{K}_I] \{T\} = \{Q_I\}; \\ [\tilde{K}_T] \{T\} = \{Q_T\}. \end{cases} \quad (6)$$

Система алгебраических уравнений (6) для нестационарной нелинейной задачи требует многократного решения на каждом шаге по времени.

При задании свойств областей в электромагнитной задаче для заготовок используется аппроксимирующее выражение для расчета электропроводности с подобранными параметрами, соответствующими свойствам сплава Д16:

$$g = 2 \cdot 10^7 (1 - (T - 273) \cdot 0,001) \text{ См}. \quad (7)$$

При нагреве автоматически производится пересчет электропроводности в зависимости от температуры T , определяемой в тепловой задаче.

По результатам расчета параметров индуктора в диапазоне заданных для каждой секции температур в заготовках, находящихся в индукторе, определены значения мощности, напряжения, тока, позволяющие оценить параметры индуктора.

Согласно заданному по длине индуктора распределению температуры в заготовках выполнен расчет параметров секций индуктора для значений тока (на-

пряжения) и частоты, соответствующих возможностям преобразователя частоты мощностью 400 кВт. Для сравнения расчеты сделаны для начального и конечного значений температуры заготовки в каждой секции.

В работе рассматривается процесс пуска нагревателя при нагреве заготовок из сплава Д16. Температурный режим для каждой секции приведен в табл. 1. Размеры заготовки: диаметр 1075 мм, длина 900 мм. Размеры секции нагревателя: диаметр 1175 мм, длина 1100 мм.

Конечная температура заготовки на выходе из индуктора принята равной 500 градусам, что соответствует первому варианту в табл. 1. Число заготовок в индукторе согласно рис. 1 равно семи, так как их длина меньше длины секции. Изначально все секции пустые, и напряжение на них не подано. Заготовки загружаются по очереди, начиная с седьмой. После включения шестой секции и нагрева седьмой заготовки до заданной температуры, равной 150 градусам, происходит перемещение заготовки на одну позицию, а ее место занимает очередная загружаемая в индуктор. Одновременно происходит включение пятой секции. Время нагрева заготовки в неподвижном состоянии на каждой позиции в индукторе обозначено как время интервала. Эта величина не изменяется в процессе пуска и при переходе к установившемуся режиму. Корректировка происходит только в случае изменения типа заготовок.

Требуемое распределение температуры в заготовке на выходе из индуктора может быть достигнуто при различной длительности интервала нагрева. Это отражается на общем времени нагрева одной заготовки, но может быть обосновано при необходимости смены типа заготовок. В рассматриваемой работе величина интервала нагрева для большей части расчетов принята равной 1000 с.

Результаты расчетов представлены в табл. 2. В процессе нагрева изменяются параметры секций, в том числе и коэффициент мощности. Собственная частота контура нагрузки становится отличной от частоты источника питания. Самые большие отклонения частоты от исходного значения, равного 50 Гц, не превышают 0,7 Гц для пятой и шестой секций индуктора. В связи с небольшим диапазоном температур токи секций индуктора и коэффициенты мощности при подборе частоты изменяются мало. Однако в абсолютном выражении приращение токов достигает 850А для шестой секции, что для преобразователя частоты является недопустимой перегрузкой.

При моделировании электротепловой задачи предусмотрена процедура дискретного перемещения заготовок. Так как используемое программное обеспечение не позволяет осуществить полноценное движение, то выполнена имитация движения с переносом физических свойств и значений температуры от одних подобластей к другим. Кроме того, используется дискретное изменение теплопроводности контактных слоев, а также «включение» или «отключение» источников тепловыделения в заготовке с помощью встроенных функций, являющихся аппроксимацией ступенчатой функции (функции Хевисайда).

При моделировании пуска нагревателя предусмотрено несколько этапов. Во время пуска установившееся распределение температуры и распределение значений теплофизических свойств заготовок достигается только после прохождения заготовкой всех секций, то есть через семь интервалов. До этого момента времени наблюдаются отклонения параметров индуктора, которые нужно компенсировать. Для этого в определенные моменты времени производится коррекция токов в секциях индуктора. По мере заполнения секций индуктора новыми заготовками происходит перераспределение плотности тока и удельной мощно-

сти тепловыделения по длине. Кроме того, тепловой контакт соседних заготовок в условиях изменяющихся распределений температуры в каждой заготовке приводит к локальным изменениям температуры. Для получения требуемых распределений температуры нужно изменять мощности секций.

Таблица 2

Параметры секций индуктора при определении резонансных частот

№	$T, ^\circ\text{C}$	$I_{\text{н}}, \text{kA}$	$P_{\text{н}}, \text{kBT}$	$U_{\text{н}}, \text{B}$	S, kBA	$Q_{\text{н}}, \text{kBAr}$	$F, \text{Гц}$	C, Φ	$\cos \varphi$
1	20	14,51	341,6	350	5079	5067	50	0,132	0,073
	100	14,48	354,3	350	5068	5056	49,75	0,132	0,07
2	20	15	374,2	350	5250	5237	50	0,138	0,071
	200	14,93	383,5	350	5208	5194	49,9	0,138	0,074
3	20	14,5	343,7	337,5	4894	4882	50	0,138	0,07
	300	14,9	397,7	350	5215	5200	49,6	0,138	0,076
4	20	14,61	349	340	4967	4955	50	0,138	0,07
	400	14,82	408,6	350	5187	5171	49,5	0,138	0,079
5	20	14,61	348,9	340	4967	4955	50	0,138	0,07
	450	14,36	395,7	340	4882	4866	49,3	0,138	0,081
6	20	13,75	312,8	340	4675	4665	50	0,13	0,067
	500	13,51	357,8	340	4593	4579	49,3	0,13	0,078

Ниже приведены диаграммы температуры на поверхности и осевой линии загрузки для момента времени 7000 с (рис. 2), а также временные диаграммы удельной мощности в заготовках (рис. 3), найденные в результате моделирования с изменяемыми значениями токов секций индуктора.

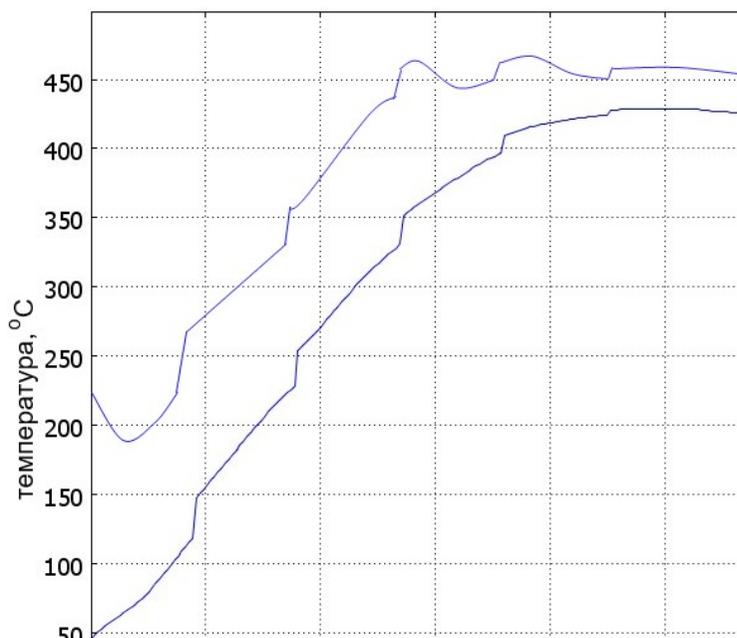


Рис. 2. Диаграммы температуры на поверхности (1) и оси (2) загрузки в момент времени 7000 с

В результате коррекции для четвертой секции индуктора плотность тока снижается на 5 % в момент времени 4000 с:

$$J = (1 - 0.05 \cdot H(t - 4000)) \cdot 21 \cdot 10^6 \text{ A/m}^2;$$

в пятой секции плотность тока снижается на 5 % в момент времени 4000 с, на 25 % снижается в момент времени 5000 с:

$$J = (1 - 0.05 \cdot H(t - 4000) - 0.25 \cdot H(t - 5000)) \cdot 20 \cdot 10^6 \text{ A/m}^2;$$

в шестой секции плотность тока снижается на 5 % в момент времени 4000 с, на 25 % снижается в момент времени 5000 с, на 10 % снижается в момент времени 6000 с:

$$J = (1 - 0.05 \cdot H(t - 4000) - 0.25 \cdot H(t - 5000) - 0.1 \cdot H(t - 6000)) \cdot 19 \cdot 10^6 \text{ A/m}^2.$$

Здесь: H – ступенчатая функция (функция Хевисайда).

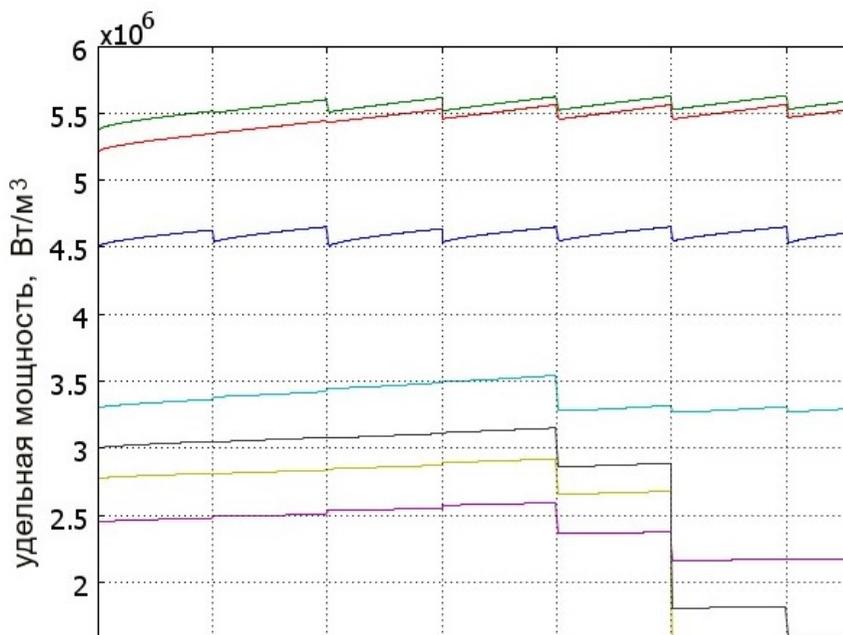


Рис. 3. Временные диаграммы удельной мощности:
1 – первая заготовка; 2 – вторая заготовка; 3 – третья заготовка; 4 – четвертая заготовка; 5 – пятая заготовка; 6 – шестая заготовка; 7 – седьмая заготовка

В тепловой задаче для регулирования температуры результат расчета мощности тепловыделения, импортированный из электромагнитной задачи, используется в соответствии с алгоритмом изменения мощности, обусловленным перемещением заготовок через индуктор. Для n -й заготовки:

$$Q_n = Q_{n0} \left(H(t - t_n) - H(t - t_f) \right).$$

Здесь: Q_{n0} – объемная плотность мощности тепловыделения в n -й заготовке; t_n – момент включения источника в n -й заготовке; t_f – момент отключения источника в n -й заготовке.

Диаграммы температуры на поверхности и осевой линии (см. рис. 2), характеризующие распределение температуры в загрузке в момент времени 7000 с,

показывают, что значение перепада температуры между поверхностью и осевой линией не превышает 30 градусов для шестой заготовки.

Достижение полученных перепадов температуры оказалось возможным после коррекции тока в отдельных секциях, начиная с момента времени $t = 4000$ с. Временные диаграммы удельной мощности, приведенные на рис. 3, показывают вызванное этой коррекцией соответствующее ступенчатое снижение мощности тепловыделения в заготовках 4–7.

Усложнение алгоритма задания токов секций сокращает время выхода на заданный режим нагрева.

При выбранном варианте параметров индуктора определены значения тепловых потерь в катушках секций нагревателя и мощности тепловыделения в заготовках (табл. 3).

Таблица 3

Мощности секций индуктора и заготовок

№ инд	1	2	3	4	5	6		Сумма
$\Delta P_{\text{инд}}$, кВт	155	146	143	141	139	141		865
№ заг	1	2	3	4	5	6	7	
$P_{\text{заг}}$, кВт	179	160	166	175	184	195	217	1278

Распределение температуры в загрузке после нагрева в течение 7000 с представлено на рис. 4. Из рисунка видно, что градиент температуры по сечению заготовок ярко проявляется в первых заготовках, а затем снижается.

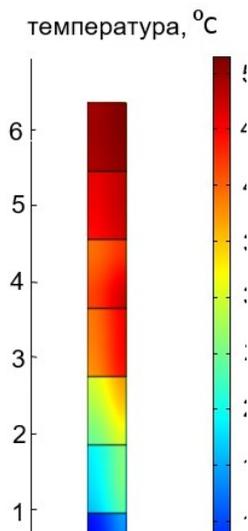


Рис. 4. Распределение температуры в загрузке в момент времени 7000 с

Более полная информация о температуре в загрузке представлена на рис. 5. На временных диаграммах отражено изменение температуры поверхности в средней части по длине заготовок. Номером 7 обозначена заготовка на входе в индуктор. Температура заготовки увеличивается к моменту перехода на другую позицию в пределах от 20 до 150 градусов. Температура в заготовке под номе-

ром 1 достигает заданной величины только в момент, когда она дошла до последней позиции. Такой алгоритм разогрева предусматривает последовательную загрузку заготовок в пустой индуктор. Это исключает недогрев, но усложняет процедуру включения секций, так как необходимо заранее рассчитать позицию каждой вновь загружаемой заготовки с учетом перемещения уже находящихся в индукторе.

Выполненные расчеты обеспечили подбор значений токов секций индуктора, при которых диаграммы температуры в заготовках имеют требуемые значения.

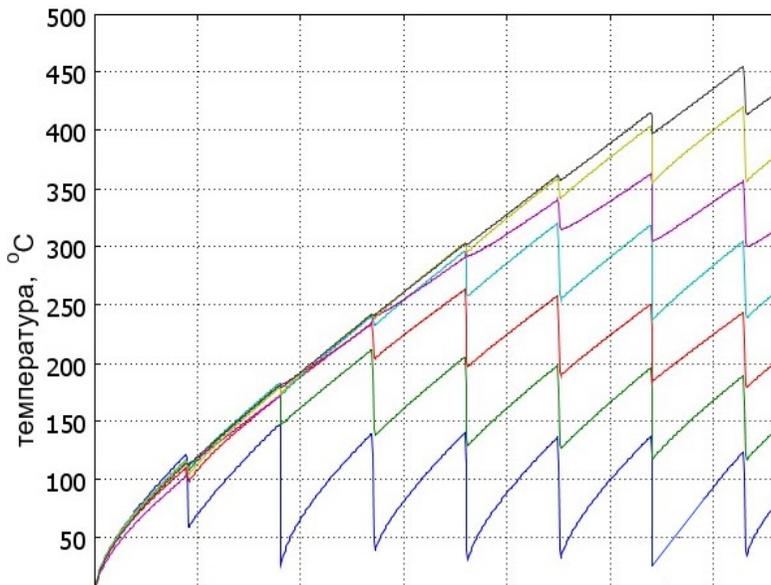


Рис. 5. Временные диаграммы температуры на поверхности заготовок: 1 – седьмая заготовка; 2 – шестая заготовка; 3 – пятая заготовка; 4 – четвертая заготовка; 5 – третья заготовка; 6 – вторая заготовка; 7 – первая заготовка

Диаграммы температуры имеют пилообразную форму. Особенностью является то, что максимальное значение температуры в заготовке на выходе из индуктора подвержено небольшим колебаниям. Это связано с тем, что параметры заготовок, находящихся одновременно в разных секциях, подвергаются воздействию электромагнитных полей разной мощности. Как ранее отмечалось, токи секций определялись исходя из условия достижения заданного распределения температуры по длине. Использование более точной настройки параметров секций обеспечивает достижение заданного распределения температуры в заготовке на выходе из индуктора при темпе выдачи одна заготовка за 1000 секунд (интервал нагрева 1000 с).

После выхода на установившийся режим мощности в двух заготовках на входе равны 170 кВт, в следующих мощность составляет 136 кВт, 108 кВт, 92 кВт и в двух последних 78 кВт.

Приведенные выше расчеты при определении мощностей и токов секций показали возможность получения заданного распределения температуры в заготовке на выходе из индуктора при интервале нагрева, равном 1000 с. В процессе

пуска выполнено несколько корректировок значений, что незначительно усложняет алгоритм.

Альтернативным вариантом пуска является работа всех секций при задании одинаковых токов во всех секциях. Более ограниченные возможности этого режима позволили получить заданное распределение температуры при значении интервала нагрева, равном 1400 секунд, что снижает производительность установки. При меньшем значении интервала нагрева в момент выхода заготовки из индуктора температуры на поверхности и на осевой линии отличаются на 75–105 градусов. Даже учитывая время транспортировки к прессу, такой перепад снизить до приемлемого значения сложно.

Для темпа выдачи 1400 с построены временные диаграммы удельной мощности в средней части каждой находящейся в нагревателе заготовки (рис. 6). Рассчитанные и корректируемые в процессе пуска значения токов секций обеспечивают более гладкий вид диаграммы мощности в заготовках при пуске и последующем установившемся режиме (квазиустановившемся, так как циклически изменяются температура и параметры). Форма диаграмм для каждой секции иллюстрирует изменение удельной мощности. Отличие от диаграммы температуры состоит в том, что выход на квазиустановившийся режим для каждой заготовки зависит от расстояния до выхода из индуктора. В заготовке с номером 1, находящейся на выходе, переходный процесс самый растянутый во времени. После выхода на квазиустановившийся режим колебания мощности составляют около 2 %. В то же время с момента включения до выхода на установившийся режим значения мощности в разных заготовках изменяются в пределах 7 %.

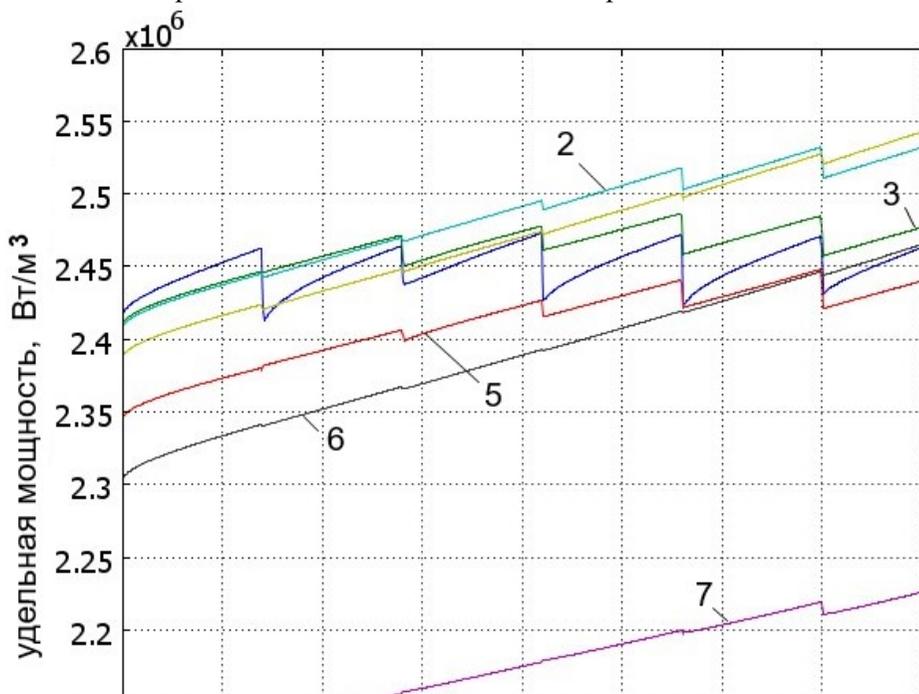


Рис. 6. Временные диаграммы удельной мощности в средней по длине заготовки координате с интервалом выдачи 1400 с

После выхода на установившийся режим мощности в заготовках на входе циклически изменяются в диапазоне 74–78 кВт, в заготовках 3–6 в диапазоне 73–76 кВт, в последней колеблются в пределах от 65 до 70 кВт.

Полученные диаграммы мощности характеризуют данную установку как спокойную нагрузку с практически постоянным графиком. При таком графике нагрузки в системе электроснабжения не возникает проблем с уровнем напряжения на шинах подстанции. Вопрос с поддержанием коэффициента мощности на заданном уровне решается в самой индукционной установке за счет подстройки частоты. Необходимо отметить, что возможности транзисторных преобразователей частоты позволяют решать более сложные задачи. Например, можно обеспечить плавный переход с одного типа заготовок на другой без вспомогательных операций и «ложных слитков». Однако при смене номенклатуры заготовок с применением системы регулирования мощности значительно возрастает разница между их максимальным и минимальным значениями, что приводит к существенно переменному графику нагрузки.

Выводы

В процессе эксплуатации мощных многосекционных индукционных установок методического действия наряду с квазиустановившимся режимом нагрева заготовок одного типогабарита имеют место нестационарные режимы, обусловленные первоначальным пуском нагревателя, сменой номенклатуры заготовок или сменой темпа нагрева. В нестационарных режимах основным требованием является переход на квазиустановившийся режим с минимальными потерями темпа и минимальными энергозатратами на нагрев некондиционных заготовок. Нестационарные режимы сопровождаются существенными колебаниями мощности на секциях индуктора, что может привести к значительным колебаниям напряжения в системе электроснабжения цеха. Кроме того, при питании секций от автономных регулируемых источников изменение параметров нагрузки в переходных режимах приводит к резким скачкам тока, которые могут превышать перегрузочную способность источника питания. Предложенная в работе методика позволяет рассчитать электрические параметры индукционной системы в процессе выхода на установившийся режим нагрева, которые удовлетворяют как технологическим требованиям по температурным кондициям, так и требованиям электромагнитной совместимости с системой электроснабжения с учетом предельных возможностей регулируемых источников питания. Методика позволяет рассчитать параметры управления как в режиме программного управления, так и с использованием замкнутой системы регулирования. Приведенные в статье расчеты параметров в процессе пуска нагревателя, состоящего из шести секций, показали, что при удовлетворении всех технологических требований с учетом ограничений на предельные возможности источников питания колебания мощности нагревателя находятся в пределах 2 % от установившегося режима, что положительно сказывается на режиме работы системы электроснабжения цеха.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Шутов Е.А., Бабинович Д.Е., Турукина Т.Е.* Прогнозирование потребления электрической энергии на объектах водоснабжения // Энергетик. – 2016. – № 1. – С. 7–10.
2. *Фролова Я.А., Русина А.Г., Армеев Д.В.* Оптимизация режимов энергосистем с распределенной генерацией в режиме on-line // Новое в российской электроэнергетике. – 2017. – № 11. – С. 34–41.
3. *Кубарьков Ю.П., Кулаев И.С., Алехин Р.А.* Оптимизация уровня напряжения в активно-адаптивных сетях с распределенной генерацией // Вестник Самарского государственного технического университета. Серия: Технические науки. – 2018. – № 3 (59). – С. 154–164.
4. *Сарваров А.С., Шевырёв Ю.В., Фёдоров О.В.* Оценка эффективности затрат на повышение энергетических показателей в сетях с полупроводниковыми преобразователями // Вестник

- Южно-Уральского государственного университета. Серия: Энергетика. – 2015. – Т. 15. – № 3. – С. 11–19. DOI: 10.14529/power150302.
5. *Веприцкий Д.В., Юдаев И.В.* Определение наивыгоднейшего режима нагрузки участка сети с преобразователями частоты // *Инновации в сельском хозяйстве.* – 2015. – № 4 (14). – С. 8–13.
 6. *Тяпин А.А., Головенко Е.А., Кинев Е.С., Ефимов С.Н.* Симметрирование однофазной индукционной установки в трехфазной сети // *Электрооборудование: Эксплуатация и ремонт.* – М.: Панорама, 2020. – № 6. – С. 36–49.
 7. *Шевырева Н.Ю., Шевырёв Ю.В., Пичуев А.В.* Актуальные аспекты обеспечения качества электроэнергии на открытых горных работах // *Пром-Инжиниринг: труды VI Всероссийской научно-технической конференции.* – Челябинск, 2020. – С. 246–251.
 8. *Шевырёв Ю.В., Шевырева Н.Ю.* Улучшение формы напряжения в системах электроснабжения предприятий минерально-сырьевого комплекса с активным выпрямителем // *Горный журнал.* – 2019. – № 1. – С. 66–69. DOI: 10.17580/gzh.2019.01.14.
 9. *Жилин Е.В.* Повышение показателей качества электроэнергии и уменьшения дополнительных потерь энергии в системах электроснабжения индивидуального жилищного строительства // *Сборник тезисов участников форума «Наука будущего – наука молодым».* – 2017. – С. 200–202.
 10. *Кудряшев Г.С., Третьяков А.Н.* Эффективность снижения уровня несинусоидальности напряжения на сельскохозяйственных предприятиях Иркутской области // *Вестник Алтайского государственного аграрного университета.* – 2021. – № 6 (200). – С. 121–128.
 11. *Зинин Ю., Мульменко М.* Современные тиристорные преобразователи частоты «Параллель» для установок индукционного нагрева металлов // *Силовая электроника.* – 2015. – Т. 3. – № 54. – С. 64–71.
 12. *Чупин Е.С., Григорьев М.А.* Высокоэффективные многоуровневые преобразователи частоты объектов металлургического производства // *Электротехника.* – 2019. – № 5. – С. 21–26.
 13. *Апет А.А., Крубцова А.А., Ложкин И.А., Енин С.С.* Исследование качества электрической энергии при работе диодных и транзисторных выпрямителей // *Энергетические и электротехнические системы: международный сборник научных трудов.* Под ред. С.И. Лукьянова, Н.В. Швидченко. – Магнитогорск, 2015. – С. 92–101.
 14. *Старцев А.П.* Влияние пульсации выходного напряжения высокочастотного преобразователя частоты с непосредственной связью на характеристики асинхронного электродвигателя // *Энергетика. Инновационные направления в энергетике. CALS-технологии в энергетике.* – 2015. – Т. 1. – С. 133–143.
 15. *Скорняков В.А., Федяев А.А., Сергеевичев А.В., Федяев А.А.* Рациональная компенсация реактивной мощности потребителей деревообрабатывающих производств // *Системы. Методы. Технологии.* – 2017. – № 1 (33). – С. 73–77. DOI: 10.18324/2077-5415-2017-1-73-77.
 16. *Большев В.Е., Виноградов А.В.* Моделирование электрической сети с системой мониторинга качества электроэнергии и надежности электроснабжения // *Электротехнологии и электрооборудование в АПК.* – 2019. – № 2 (35). – С. 3–10.
 17. *Крюков О.В.* Параметры применения преобразователей частоты для регулирования производительности // *Электротехника: сетевой электронный научный журнал.* – 2016. – Т. 3. – № 2. – С. 43–49.
 18. *Шестаков А.В.* Моделирование и гармонический анализ импульсного напряжения при синусоидальной широтно-импульсной модуляции // *Общество. Наука. Инновации (НИК-2018): Сборник статей XVIII Всероссийской научно-практической конференции: в 3 т.* Вятский государственный университет. – 2018. – С. 1137–1144.
 19. *Пустоветов М.Ю.* Математическое моделирование тока, потребляемого преобразователем частоты при включении // *Современные инновационные технологии подготовки инженерных кадров для горной промышленности и транспорта.* – 2017. – № 1 (4). – С. 313–324.
 20. *Мещеряков В.Н., Конаев Ю.П., Ласточкин Д.В.* Анализ инверторов тока и напряжения с системами релейного управления // *Вести высших учебных заведений Черноземья.* – 2016. – № 2 (44). – С. 13–18.
 21. *Артохов И.И., Краснова Н.Д., Русяева М.Ю.* Система электроснабжения промышленного предприятия с промежуточным звеном постоянного тока // *Энергетические системы: Сборник трудов II Международной научно-технической конференции.* Отв. ред. П.А. Трубаев. – 2017. – С. 150–154.
 22. *Демидович В.Б., Растворова И.И.* Моделирование индукционного нагрева легких сплавов перед обработкой давлением. – СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2015. – 158 с.

23. Прахт В.А., Сарапулов Ф.Н., Дмитриевский В.А., Гоман В.В. Компьютерное моделирование установки индукционного нагрева цилиндрических заготовок // Дистанционное и виртуальное обучение. – 2009. – № 9. – С. 17–21.
24. Демидович В.Б., Растворова И.И. Методика оптимизации индукционных установок для градиентного нагрева заготовок перед прессованием // Индукционный нагрев. – 2013. – № 3. – С. 4–7.
25. Бондаренко Д.Н., Чмиленко Ф.В., Парменов В.Е. Алгоритм частотного регулирования транзисторного инвертора для индукционного нагрева // Известия СПбГЭТУ «ЛЭТИ». – 2019. – № 4. – С. 85–93.
26. Базаров А.А., Данилушкин А.И., Животягин Д.А. Система методического индукционного нагрева цилиндрических заготовок из сплавов алюминия // Вестник Самарского государственного технического университета. Серия: Технические науки. – 2020. – Вып. 28. № 2. – С. 97–110. doi: 10.14498/tech.2020.2.7

Статья поступила в редакцию 8 августа 2021 г.

METHOD FOR ALIGNING THE LOAD GRAPH POWERFUL INDUCTION PLANTS

*A.A. Bazarov, A.I. Danilushkin**

Samara State Technical University
244, Molodogvardeyskaya st., Samara, 443100, Russian Federation

E-mail: aleksbazarov@yandex.ru, aidanilushkin@mail.ru

Abstract. *The paper deals with the issues of load balancing in the shop power supply system containing powerful electrothermal installations. There is a cyclical change in load parameters with significant variations in current and power factor during operating multi-section induction installations of methodical action. The largest deviations of these parameters occur in transient modes at heater start or at changing the billets nomenclature. It is shown that when the load changes in starting modes, an increase in power and a decrease in the power factor can lead to unacceptable current overloads of the power supply. Correction during start-up of section currents and power factor allows us to reduce current fluctuations, to provide a smoother power diagram and eliminate power supply overload. It is possible to implement current and power factor correction using semiconductor frequency converters in each section. This approach prevents decreasing the voltage quality indicators and reduces possible deviations of the billets temperature distribution. The parameters of the heater sections in transient modes are calculated. The ranges of power, voltage, current and frequency variation are determined, corresponding to the capabilities of semiconductor frequency converters used in these installations. The proposed start-up algorithm provides the smallest of all possible power fluctuations.*

Keywords: *induction heating, temperature distribution, non-stationary modes, modeling, control algorithms, power regulation*

REFERENCES

1. *Shutov Ye.A., Babinovich D.Ye., Turukina T.Ye.* Prognozirovanie potrebleniya elektricheskoy energii na ob''ektakh vodosnabzheniya // Energetik. 2016. No. 1. S. 7–10.
2. *Frolova Ya.A., Rusina A.G., Armejev D.V.* Optimizatsiya rejimov energosisten s raspredelennoy generatsiyey v rejime on-line // Novoye v rossiyskoy elektroenergetike. 2017. No. 11. S. 34–41.
3. *Kubar'kov Yu.P., Kulayev I.S., Alekhin R.A.* Optimizatsiya urovney napryajeniya v aktivno-adaptivnykh setyakh s raspredelennoy generatsiyey // Vestnik Samarskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya: Tekhnicheskiye nauki. 2018. No. 3 (59). S. 154–164.
4. *Sarvarov A.S., Shevyrev Yu.V., Fedorov O.V.* Otsenka effektivnosti zatrat na povysheniye energeticheskikh pokazateley v setyakh s poluprovodnikovymi preobrazovatelyami // Vestnik Yuzhno-Ural'skogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Energetika. 2015. T. 15. no. 3. S. 11–19.
5. *Vepritskiy D.V., Yudaev I.V.* Opredelenie naivyygodneyshego rejima nagruzki uchastka seti s preobrazovatelem chastoty // Innovatsii v selskom khozyaystve. 2015. No. 4 (14). S. 8–13.
6. *Tyapin A.A., Golovenko Ye.A., Kinev Ye.S., Yefimov S.N.* Simmetrirovaniye odnofaznoy induktsionnoy ustanovki v trekhfaznoy seti // Elektrooborudovaniye: Eksploatatsiya I remont. Izd. "Panorama" Moskva. No. 6, 2020. S. 36–49.
7. *Shevyreva N.Yu., Shevyrev Yu.V., Pichuyev A.V.* Aktualnyye aspekty obespecheniya kachestva elektroenergii na otkrytykh gornyykh pabotakh // Prom-Inzhiniring. Trudy VI Vserossiyskoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii. Chelyabinsk, 2020. S. 246–251.
8. *Shevyrev Yu.V., Shevyreva N.Yu.* Uluchsheniye formy napryajeniya v sistemakh elektrosnabzheniya predpriyatiy mineralno-syr'evogo kompleksa s aktivnym vypryamitelem // Gornyy jurnal. 2019. No. 1. S. 66–69. DOI: 10.17580/gzh.2019.01.14.

* *Alexander A. Bazarov (Dr. Sci. (Techn.)), Professor*
Alexander I. Danilushkin (Dr. Sci. (Techn.)), Professor

9. *Jilin Ye.V.* Povysheniye pokazately kachestva elektroenergii v sistemakh elektrosnabjeniya individual'nogo jilishchnogo stroitel'stva // Sbornik tezisov uchastnikov foruma "Nauka budushchego – nauka molodykh". 2017. S. 200–202.
10. *Kudryashev G.S., Tret'yakov A.N.* Effektivnost snigeniya urovnya nesinusoidal'nosti napryajeniya na sel'skokhozyaystvennykh predpriyatiyakh Irkutskoy oblasti // Vestnik Altayskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta. 2021. No. 6 (200). S. 121–128.
11. *Zinin Yu., Mul'menko M.* Sovremennyye tiristornyye preobrazovateli chastity "Parallel" dlya ustanovok induktsionnogo nagreva metalla // Silovaya elektronika. Tom: 3. No. 54. 2015 g. S. 64–71.
12. *Chupin Ye.S., Grigor'ev M.A.* Vysoeffektivnyye mnogourovnevnyye preobrazovateli chastity ob"ektov metallurgicheskogo proizvodstva // Elektrotehnika. 2019. No. 5. S. 21–26.
13. *Apet A.A., Krubtsova A.A., Lojkin I.A., Yenin S.S.* Issledovaniye kachestva elektricheskoy energii pri rabote diodnykh I tranzistornykh vypryamiteley // Energeticheskiye I elektrotekhnicheskiye sistemy. Mejdunarodnyy sbornik nauchnykh trudov. Pod red. S.I. Luk'yanova, N.V. Shvidchenko. Magnitogorsk, 2015. S. 92–101.
14. *Startsev A.P.* Vliyaniye pul'satsii vykhodnogo napryajeniya vysokochastotnogo preobrazovatelya chastoty s neposredstvennoy svyaz'yu na kharakteristiki asinkhronnogo elektrodvigatelya // Energetika. Innovatsionnoye napravlenie v energetike. CALS-tehnologii v energetike. 2015. T. 1. S. 133–143.
15. *Skornyakov V.A., Fedyayev A.A., Sereyevichev A.V., Fedyayev Ar.A.* Ratsional'naya kompensatsiya reaktivnoy moshchnosti potrebiteley derevoobrabatvyayushchikh proizvodstv // Sistemy. Metody. Tekhnologii. 2017. No. 1 (33). DOI: 10.18324/2077-5415-2017-1-73-77.
16. *Bol'shev V.Ye., Vinogradov A.V.* Modelirovaniye elektricheskoy seti s sistemoy monitoring kachestva elektroenergii I nadejnosti elektrosnabjeniya // Elektritekhnologiya I elektrooborudovaniye v APK. 2019. No. 2 (35). S. 3–10.
17. *Krukov O.V.* Parametry primeneniya preobrazovatelya chastity dlya regulirovaniya proizvoditel'nosti // Elektrotehnika: setvoy elektronnyy nauchnyy jurnal. 2016. T. 3. No. 2. S. 43–49.
18. *Shestakov A.V.* Modelirovanie I garmonicheskii analiz impulsnogo napryajeniya pri sinusoidal'noy shirotno-impul'snoy modulyatsii // Obshchestvo. Nauka. Innovatsii (NPK-2018). Sbornik ctatey XVIII Vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii: v 3 tomakh. Vyatskiy gosudarstvennyy universitet. 2018. S. 1137–1144.
19. *Pustovetov M.Yu.* Matematicheskoe modelirovanie toka, potrebyaemogo preobrazovatelem chastity pri vkluchenii // Sovremennyye innovatsionnyye tekhnologii podgotovki inzhenernykh kadrov dlya gornoy promyshlennosti I transporta. 2017. No. 1 (4). S. 313–324.
20. *Meshcheryakov V.N., Kopaev Yu.P.* Analiz invertorov toka I napryajeniya s sistemami reyleynogo upravleniya // Vesti vyshikh uchebnykh zavedeniy Chernozem'ya. 2016. No. 2 (44). S. 13–18.
21. *Artyukhov I.I., Krasnjva N.D., Rusyaeva M.Yu.* Sistema elektrosnabjeniya promyshlennogo predpriyatiya s promejutochnym zvenom postoyannogo toka // Energenicheskie sistemy. Sbornik trudov II Mejdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii. Otvetstvennyy redactor P.A. Trubaev. 2017. S. 150–154.
22. *Demidovich V.B., Rastvorova I.I.* Modelirovanie induktsionnogo nagreva legkikh splavov pered obrabotkoy davleniem. Spb. Izd-vo SPbGETU "LETI", 2015. 158 s.
23. *Prakht V.A., Sarapulov F.N., Dmitrievskiy V.A., Goman V.V.* Komp'uternoe modelirovanie ustanovki induktsionnogo nagreva tsilindricheskikh zagotovok // Distsionnoe I virtual'noe obuchenie, nj. 9, 2009. S. 17–21.
24. *Demidovich V.B., Rastvorova I.I.* Metodika optsimizatsii induktsionnykh ustanovok dlya gradientnogo nagreva zagotovok pered pressovaniem // Induktsionnyy nagrev. 2003. No. 3. S. 4–7.
25. *Bondarenko D.N., Chmilenko F.V., Parmenov V.E.* Algoritm chastotnogo regulirovaniya tranzistornogo invertora dlya induktsionnogo nagreva // Izvesiya SPbGETU "LETI". 2019. Nu. 4. S. 85–93.
26. *Bazarov A.A., Danilushkin A.I., Jivotyagin D.A.* Sistema metodicheskogo induktsionnogo nagreva tsilindricheskikh zagotovok ix splavov aluminiya // Vestnik SamGTU. "Tekhnicheskie nauki". Vyp. 28. No. 2. 2020. S. 97–110. doi: 10.14498/tech.2020.2.7

УДК 621.3.07

СИСТЕМА АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ КОЭФФИЦИЕНТОМ РЕАКТИВНОЙ МОЩНОСТИ СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ПРОМЫШЛЕННОГО ПРЕДПРИЯТИЯ*

В.И. Котенев, А.В. Котенев, А.Д. Стулов

Самарский государственный технический университет
Россия, 443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244

E-mail: ads260391@mail.ru

Аннотация. Рассмотрено управление коэффициентом реактивной мощности системы электроснабжения промышленного предприятия, в состав которой входят: электроприемники с асинхронной нагрузкой, цеховые трансформаторные подстанции с регулируемыми конденсаторными установками и без них, а также главная понизительная подстанция с запитанными от нее синхронными двигателями. Предложено рассматривать электроприемники с конденсаторными установками и трансформаторной подстанцией как объект управления коэффициентом реактивной мощности, на базе которой построена соответствующая система автоматического управления (САУ). Рассмотрена САУ с алгоритмом, сформированным в функции активной и реактивной мощности электроприемников. Разработана САУ коэффициентом реактивной мощности системы электроснабжения всего предприятия с цеховыми комбинированными нагрузками. Дана методика расчета мощности конденсаторных установок цеховых подстанций. Применение данной системы управления позволит выполнить нормативные требования по обеспечению предельных значений коэффициентов реактивной мощности и тем самым уменьшить потери при транспортировке электроэнергии и повысить пропускную способность электрической сети.

Ключевые слова: система управления, электроснабжение, реактивная мощность, асинхронные двигатели, синхронные двигатели, конденсаторные установки.

Введение

Разработка более совершенных САУ реактивной мощностью системы электроснабжения (СЭС) промышленных предприятий относится к решению актуальных проблем в энергетике, так как их внедрение в промышленное производство значительно уменьшает потери по пути транспортирования электрической энергии от поставщика к потребителю и позволяет обеспечить передачу электроэнергии с заданным значением коэффициента реактивной мощности.

* Котенев Виктор Иванович, профессор кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий», доктор технических наук, профессор.

Котенев Александр Викторович, доцент кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий», кандидат технических наук, доцент.

Стулов Александр Дмитриевич, аспирант.

Степень разработанности проблемы

Проблеме разработки более совершенных САУ реактивной мощностью уделяется большое внимание в отечественных [1–8] и зарубежных печатных изданиях [9–22].

Известны системы управления, в которых регулирование реактивной мощности осуществляется изменением напряжения возбуждения синхронных двигателей или за счет переключения секций конденсаторных установок на постоянство $\cos \varphi$ в узле нагрузки.

Первый недостаток таких систем управления – они менее удобны в эксплуатации, так как расчет за потребленную активную электрическую энергию производится с учетом предельных значений коэффициента реактивной мощности (КРМ) – $\operatorname{tg} \varphi_{\text{пр}}$ [1], а не $\cos \varphi_{\text{пр}}$.

Предельные значения КРМ в часы больших суточных нагрузок (БСН) электрической сети установлены в зависимости от номинального напряжения сети $U_{\text{н}}$, к которой подключен потребитель. При $U_{\text{н}} = (6 - 35) \text{кВ}$ величина $\operatorname{tg} \varphi_{\text{пр}} = 0.4$.

Значение КРМ, генерируемой в часы малых суточных нагрузок (МСН) электрической сети, устанавливается равным нулю для всех напряжений.

Повышающий коэффициент к тарифу за потребленную активную электрическую энергию определяются из соотношения [1]

$$K = 1 + 0.2d_{\text{с}} (\operatorname{tg} \varphi_{\text{бф}} - \operatorname{tg} \varphi_{\text{мф}}) - 0.2(1 - d_{\text{с}}) \operatorname{tg} \varphi_{\text{мф}},$$

где $\operatorname{tg} \varphi_{\text{бф}}$, $\operatorname{tg} \varphi_{\text{мф}}$ – средние значения фактических КРМ в часы БСН и МСН, которые определяются приборами учета; $d_{\text{с}}$ – отношение электрической энергии, потребленной в часы БСН, к общему объему электроэнергии за весь расчетный период.

Второй недостаток – реактивной мощности синхронных двигателей может оказаться недостаточно для компенсации реактивной мощности в узле нагрузки. В этом случае дополнительно устанавливаются конденсаторные батареи на подстанциях или непосредственно у электроприемников.

Постановка задачи

Цель работы – построение структуры САУ коэффициентом реактивной мощности СЭС предприятия и разработка методики расчета мощности компенсирующих устройств цеховых подстанций, которой с учетом реактивной мощности синхронных двигателей достаточно для обеспечения предельного КРМ в часы БСН электрической сети.

Функциональная схема

Функциональная схема САУ коэффициентом реактивной мощности существующей СЭС предприятия показана на рис. 1.

Обозначения на схеме: $T_1 \div T_n$ – трансформаторы цеховых подстанций; T_{l+1} – трансформатор главной понизительной подстанции; ДМ – датчики активной и реактивной мощности; АД₁ ÷ АД_(n+m) – асинхронные двигатели; RQ – регуляторы реактивной мощности; СД – синхронный двигатель; n – число конденса-

торных установок; m – число приемников без конденсаторных установок, $l = n + m$.

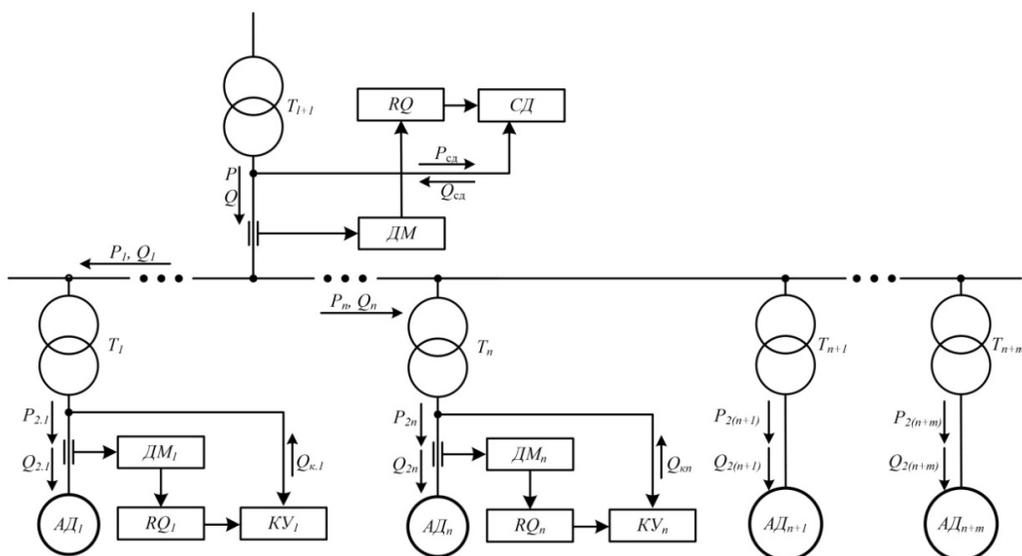


Рис. 1. Функциональная схема САУ коэффициентом реактивной мощности СЭС предприятия

Математическая модель трансформатора как элемента САУ коэффициентом реактивной мощности системы электроснабжения

Потери активной мощности в i -м трансформаторе состоят из постоянных потерь в стали P_{ci} и переменных потерь P_{vi} в его обмотках [7, 8]:

$$P_{vi} = \frac{P_{2i}^2 + Q_{3i}^2}{U_{ni}^2} R_{ii}. \quad (1)$$

Реактивная мощность

$$Q_{3i} = Q_{2i} - Q_{li}$$

это реактивная мощность потребителей i -го цеха при работе в режиме максимальной нагрузки. Реактивная мощность конденсаторной установки или синхронного двигателя – Q_{li} .

Активная P_{2i} и реактивная Q_{2i} мощности асинхронных двигателей равны средним значениям, если они получены из графиков нагрузок и равны расчетным значениям $P_{2i} = P_{pi}$, $Q_{2i} = Q_{pi}$ – если они получены из аналитических расчетов.

Активное сопротивление трансформатора [7]

$$R_{ii} = \frac{p_{ki} U_{ni}^2}{S_{mi}^2}, \quad (2)$$

где p_{ki} – потери короткого замыкания; U_{ni} , S_{mi} – номинальные значения напряжения и полной мощности трансформатора.

Потери активной мощности согласно (1) и (2) составляют

$$P_{vi} = a_{li} (P_{2i}^2 + Q_{3i}^2), \quad (3)$$

где

$$a_{1i} = \frac{P_{ki}}{S_{mi}^2}. \quad (4)$$

Потери реактивной мощности в i -м трансформаторе также состоят из постоянных потерь $Q_{\mu i}$ от намагничивания магнитопровода и переменных Q_{vi} , обусловленных рассеянием магнитного потока.

Потери от намагничивания [7]

$$Q_{\mu i} = \frac{I_{xi} \% S_{mi}}{100},$$

где $I_{xi} \%$ – относительная величина тока холостого хода в %.

Переменные потери [7]

$$Q_{vi} = \frac{P_{2i}^2 + Q_{3i}^2}{U_n^2} x_{ii}. \quad (5)$$

Индуктивное сопротивление трансформатора

$$x_{ii} = \sqrt{z_{ii}^2 - R_{ii}^2} = \frac{U_{ni}^2}{S_{mi}} \sqrt{\left(\frac{u_k \%}{100}\right)^2 - \frac{P_{ki}^2}{S_{mi}^2}}, \quad (6)$$

где $u_k \%$ – напряжение короткого замыкания в процентах от номинального значения; z_{ii} – полное сопротивление трансформатора.

Из совместного рассмотрения (5), (6) получено

$$Q_{vi} = a_{2i} (P_{2i}^2 + Q_{3i}^2), \quad (7)$$

где

$$a_{2i} = \frac{1}{S_{mi}} \sqrt{\left(\frac{u_k \%}{100}\right)^2 - \frac{P_{ki}^2}{S_{mi}^2}}.$$

Во многих работах принимают

$$x_{ii} = z_{ii},$$

тогда

$$a_{2i} = \frac{u_k \%}{100 S_{mi}}. \quad (8)$$

В этом случае погрешность вычисления Q_{vi} не превышает 1,8 % у трансформаторов ТМ-1600 и 0,2 % у трансформаторов ТМ-10000.

Коэффициент реактивной мощности цеховой трансформаторной подстанции на стороне высшего напряжения

$$\operatorname{tg} \varphi_{vi} = \frac{Q_{\Sigma i}}{P_{\Sigma i}} = \frac{Q_{2i} - Q_{1i} + Q_{\mu i} + Q_{vi}}{P_{2i} + P_{ci} + P_{vi}}. \quad (9)$$

Структурная схема силового трансформатора – элемента системы электро-снабжения как объекта управления величиной $tg\varphi_{vi}$ или реактивной мощностью $Q_{\Sigma i}$, построенной по выражениям (3) – (9), – показана на рис. 2.

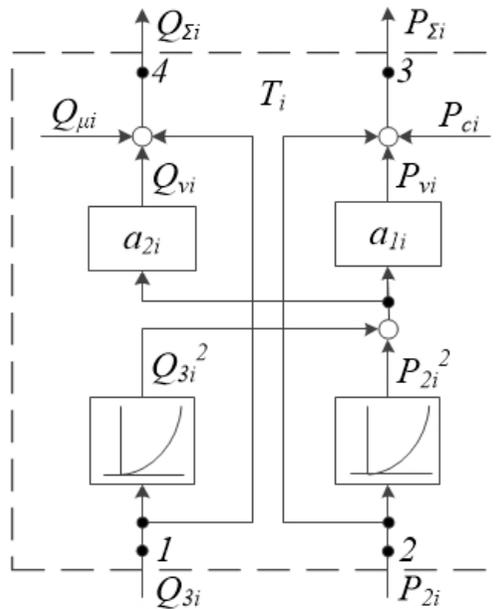


Рис. 2. Структурная схема трансформатора как элемента СЭС при управлении ее коэффициентом реактивной мощности

САУ величиной $tg\varphi_i$ на стороне низшего напряжения силового трансформатора подстанции

Структурная схема системы управления КРМ $tg\varphi_i$ с алгоритмом, сформированным в функции активной и реактивной мощности электроприемников, представлена на рис. 3. На этой схеме ЭУМ_i и ЭД_i – элементы умножения и деления соответственно.

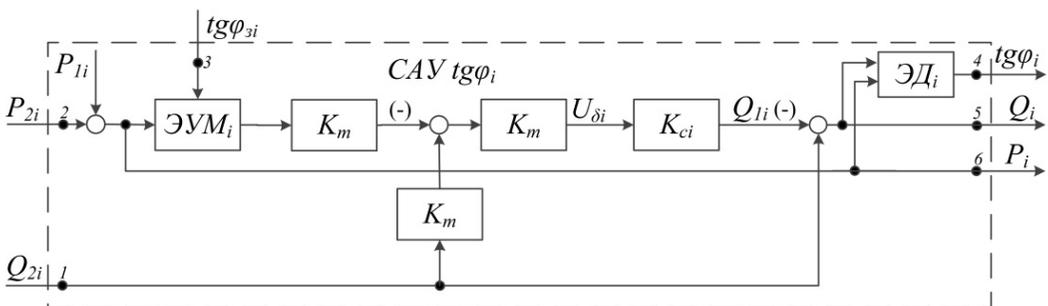


Рис. 3. САУ коэффициентом реактивной мощности $tg\varphi_i$

Алгоритм управления системы

$$U_{\delta i} = K_m Q_{2i} - K_m (P_{1i} + P_{2i}) \operatorname{tg} \varphi_{3i}, \quad (10)$$

где K_m – коэффициент передачи датчиков активной и реактивной мощности; $\operatorname{tg} \varphi_{3i}$ – заданное значение коэффициента реактивной мощности на стороне низшего напряжения трансформатора; Q_{1i} – реактивная мощность конденсаторной установки или синхронного двигателя.

Величина

$$Q_{1i} = K_{ci} U_{\delta i}. \quad (11)$$

Коэффициент передачи замкнутой САУ, состоящей из регулятора, синхронного двигателя или конденсаторной установки и датчика реактивной мощности, составляет

$$K_{ci} = K_m^{-1}. \quad (12)$$

Текущее значение коэффициента реактивной мощности

$$\operatorname{tg} \varphi_i = \frac{Q_{2i} - Q_{1i}}{P_{1i} + P_{2i}} \quad (13)$$

инвариантно к отклонениям P_{1i} , P_{2i} , Q_{2i} , так как величина

$$\operatorname{tg} \varphi_{ni} = \frac{Q_{2i} - K_{ci} U_{\delta}}{P_{1i} + P_{2i}} = \frac{Q_{2i} - K_m^{-1} (K_m Q_{2i} - (P_{1i} + P_{2i}) K_m \operatorname{tg} \varphi_{3i})}{P_{1i} + P_{2i}} = \operatorname{tg} \varphi_{3i}.$$

САУ коэффициентом реактивной мощности системы электроснабжения промышленного предприятия

Функциональная схема данной системы управления показана на рис. 1, а ее структурная схема – на рис. 4.

Обозначения на схеме: САУ $\operatorname{tg} \varphi_1 \div$ САУ $\operatorname{tg} \varphi_n$ – типовые САУ, структурные схемы которых показаны на рис. 3; Σ_1 , Σ_2 – элементы суммирования входных переменных; САУ $\operatorname{tg} \varphi_{(l+1)}$ – система автоматического управления коэффициентом реактивной мощности на стороне низшего напряжения трансформаторов ГПП; $l = n + m$ – число цеховых трансформаторов с конденсаторными установками и без них.

Определение мощности цеховых электроприемников без конденсаторных установок при известном максимальном значении реактивной мощности синхронных электродвигателей

Суммарные значения реактивной мощности цеховых электроприемников (ЭП) с учетом потерь мощности в цеховых трансформаторах:

– ЭП с конденсаторными установками

$$Q_{\Sigma}' = \sum_{i=1}^n Q_i' = \sum_{i=1}^n \left(P_{pi} \operatorname{tg} \varphi_3 + \frac{(1 + \operatorname{tg}^2 \varphi_3) U_{ki} P_{pi}^2}{S_{mi}^2} + Q_{ui} \right),$$

$$P_{\Sigma}' = \sum_{i=1}^n P_i' = \sum_{i=1}^n \left(P_{pi} + \frac{(1 + \operatorname{tg}^2 \varphi_3) P_{ki} P_{pi}^2}{S_{mi}^2} + P_{ci} \right);$$

– ЭП без конденсаторных установок

$$Q_{\Sigma}'' = \sum_{i=n+1}^m Q_i'' = \sum_{i=n+1}^m \left(Q_{pi} + \frac{U_{ki} (P_{pi}^2 + Q_{pi}^2)}{S_{mi}} + Q_{\mu i} \right),$$

$$P_{\Sigma}'' = \sum_{i=n+1}^m P_i'' = \sum_{i=n+1}^m \left(P_{pi} + \frac{P_{ki} (P_{pi}^2 + Q_{pi}^2)}{S_{mi}^2} + P_{ci} \right).$$

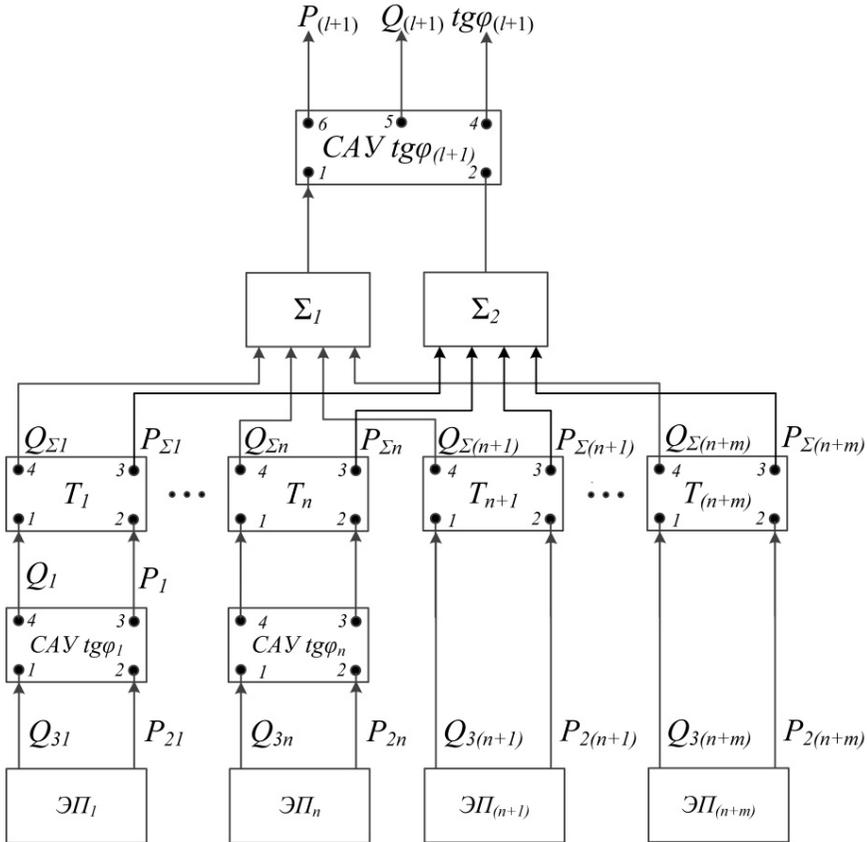


Рис. 4. САУ коэффициентом реактивной мощности СЭС предприятия

Суммарные нагрузки с учетом потерь мощности в цеховых трансформаторах:

$$P_{\Sigma} = P_{\Sigma}' + P_{\Sigma}'';$$

$$Q_{\Sigma} = Q_{\Sigma}' + Q_{\Sigma}''.$$

Потери мощности в трансформаторах ГПП:

- постоянные – $P_{c(l+1)}, Q_{\mu(l+1)}$;
- переменные

$$P_{v(l+1)} = \frac{(1 + \operatorname{tg}^2 \varphi_3) P_{k(l+1)} P_\Sigma^2}{S_{l(l+1)}^2},$$

$$Q_{v(l+1)} = \frac{(1 + \operatorname{tg}^2 \varphi_3) U_{ki} P_\Sigma^2}{S_{l(l+1)}}.$$

Коэффициент реактивной мощности на стороне высшего напряжения трансформаторов ГПП

$$\operatorname{tg} \varphi_{(l+1)} = \frac{Q_\Sigma + Q_{v(l+1)} + Q_{\mu(l+1)} - Q_{\text{сд}}}{P_\Sigma + P_{\text{сд}} + P_{c(l+1)} + P_{v(l+1)}}.$$

Значение реактивной мощности синхронных двигателей $Q_{\text{сд}}$, при котором выполняется равенство $\operatorname{tg} \varphi_{(l+1)} = \operatorname{tg} \varphi_3$, составляет

$$Q_{\text{сд}} = Q_\Sigma + Q_{v(l+1)} + Q_{\mu(l+1)} - (P_\Sigma + P_{\text{сд}} + P_{c(l+1)} + P_{v(l+1)}) \operatorname{tg} \varphi_3, \quad (14)$$

где $\operatorname{tg} \varphi_3$ – заданное значение коэффициента реактивной мощности.

Изменяя число цехов без конденсаторных установок (параметры P_Σ , Q_Σ) в (14), определяют $Q_{\text{сд}}$, которое должно быть не более максимального значения реактивной мощности синхронного двигателя $Q_{\text{сдм}}$. Это означает, что синхронный двигатель должен быть полностью загружен, но не перегружен реактивной мощностью, так как удельные затраты на генерацию им реактивной мощности более чем в два раза ниже по сравнению с конденсаторными установками напряжением $U_{\text{н}} = 380 \text{ В}$ [8]. Мощность $Q_{\text{сд}}$ будет соответствовать максимальному числу цеховых трансформаторных подстанций без конденсаторных установок в системе автоматической стабилизации коэффициента реактивной мощности ЭЭС предприятия на уровне $\operatorname{tg} \varphi_3$.

В таблице приведены результаты расчетов для предприятия с синхронным двигателем марки СТД-1250 ($Q_{\text{сдм}} = 670 \text{ кВАр}$ при загрузке $K_3 = 0,95$) и девятью цехами.

Обозначения величин в таблице: ТМ-1600, ТМН-400 – тип трансформаторов; P_{2i} , Q_{2i} – расчетные мощности цехов; P_{ci} , $Q_{\mu i}$ – постоянные потери в трансформаторах; Q_{ki} – мощность конденсаторных установок; P'_{vi} , Q'_{vi} – переменные потери в цеховых трансформаторах с конденсаторными установками; P'_i , Q'_i – значения суммарных мощностей в каждом i -том цехе с конденсаторными установками; P''_{vi} , Q''_{vi} – переменные потери в трансформаторах подстанций без конденсаторных установок; P_{10} , Q_{10} – суммарные нагрузки всех цехов.

Последовательность вычислительных операций методики расчета мощности конденсаторных установок цеховых трансформаторных подстанций дана в крайнем левом столбце таблицы. Она начинается с определения P_{pi} и Q_{pi} и заканчивается вычислением реактивной мощности $Q_{\text{сд}} = 650 \text{ кВАр}$ и мощности конденса-

торных установок $Q_{\text{кв}} = 2792 \text{кВАр}$, при которых осуществляется стабилизация КРМ на уровне $\text{tg} \varphi_3 = 0,4$ в часы БСН электрической сети.

**Результаты расчетов для предприятия с синхронным двигателем марки
СТД-1250 и девятью цехами**

Номер цеха	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Тип трансформатора	ТМ-1600	ТМ-1600	ТМ-1600	ТМ-1600	ТМ-1600	ТМ-400	ТМ-400	ТН-400	ТМ-400
P_{pi} , кВт	760	718	770	770	610	162	180	195	170
Q_{pi} , кВАр	780	955	715	715	790	215	210	180	230
P_{ci} , кВт	3,3	3,3	3,3	3,3	3,3	1,05	1,05	1,05	1,05
$Q_{\mu i}$, кВАр	20,8	20,8	20,8	20,8	20,8	8,4	8,4	8,4	8,4
$Q_{ki} = Q_{pi} - P_{pi} \text{tg} \varphi_{pi}$, кВАр	476	668	407	407	546	150	138	—	—
$P'_{vi} = (1 + \text{tg}^2 \varphi_{pi}) P_{ci} \frac{P_{ci}^2}{S_{mi}^2}$, кВт	4,3	3,9	4,4	4,4	2,8	1,7	1,3	—	—
$Q'_{vi} = (1 + \text{tg}^2 \varphi_{pi}) U_{ki} \frac{P_{ci}^2}{S_{mi}^2}$, кВАр	23	26	29,6	29,6	18,6	4,2	5	—	—
$P'_i = P_{pi} + P_{ci} + P'_{vi}$, кВт	767,6	725,2	777,7	777,7	616,1	165,9	182	—	—
$Q'_i = Q_{pi} - Q_{ki} + Q_{\mu i} + Q'_{vi}$, кВАр	347,8	333,8	358,4	358,4	283,4	227,6	85,4	—	—
$P''_{vi} = P_{ci} \frac{P_{pi}^2 + Q_{pi}^2}{S_{mi}^2}$, кВт	—	—	—	—	—	—	—	2,4	2,8
$Q''_{vi} = U_{ki} \frac{P_{pi}^2 + Q_{pi}^2}{S_{mi}^2}$, кВАр	—	—	—	—	—	—	—	9,7	11,2
$P''_i = P_{pi} + P_{ci} + P''_{vi}$, кВт	—	—	—	—	—	—	—	198,4	173,8
$Q''_i = Q_{pi} + Q_{\mu i} + Q''_{vi}$, кВАр	—	—	—	—	—	—	—	198,1	249,6
$P_{10} = \sum_{i=1}^7 P'_i + P'_8 + P''_9 + P_{ca} = 4012 + 198,4 + 173,8 + 1250 = 5634$, кВт									
$Q_{10} = \sum_{i=1}^7 Q'_i + Q''_8 + Q''_9 = 1994,8 + 198,1 + 249,6 = 2443$, кВАр									
$Q_{ca} = Q_{10} + Q_{\mu 10} + Q_{v10} - (P_{10} + P_{c10} + P_{v10}) \text{tg} \varphi_3 = 2443 + 80 + 397 - (5634 + 14,5 + 24,5) 0,4 = 650$,									
$Q_{\text{кв}} = \sum_{i=1}^7 Q_{ki} = 2792$, кВАр									

Заклучение

Разработана математическая модель системы электроснабжения, состоящей из электроприемников с преимущественно асинхронной нагрузкой, цеховых трансформаторных подстанций с конденсаторными установками, главной пони-

зительной подстанции с синхронным двигателем как объекта управления коэффициентом реактивной мощности. На базе этой модели построена соответствующая система автоматического управления всего предприятия.

Предложена методика расчета мощности конденсаторных установок в системе автоматической стабилизации коэффициента реактивной мощности СЭС предприятия на уровне $\text{tg}\varphi_3$.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Железко Ю.С. Потери электроэнергии. Реактивная мощность. Качество электроэнергии. – М.: ЭНАС, 2009.
2. Шварц Г.Р., Абакумов А.М., Мигачева Л.А., Рассказов Ф.Н., Кузнецов П.К. Применение современного электропривода переменного тока в технологиях газовой и нефтяной промышленности. – М.: Машиностроение–1, 2008.
3. Кирилин И.В., Козлов П.М. Выбор средств управления реактивной мощностью в системах электроснабжения предприятия цветной металлургии // Промышленная энергетика. – 2010. – № 8. – С. 46–52.
4. Петелин Д.П. Автоматическое управление синхронным электрическим приводом. – М.: Энергия, 1968.
5. Еришов С.В., Карницкий В.Ю. Разработка адаптивного регулирования компенсации реактивной мощности // Новости Тульского государственного университета: Технические науки. – 2014. – № 8. – С. 32–39.
6. Пантелеев В. И., Филатов А.Н. Управление режимами реактивной мощности и напряжения промышленного предприятия. – Красноярск: Красноярский государственный технический университет, 2005.
7. Липкин Б.Ю. Электроснабжение промышленных предприятий и установок. – М.: Высшая школа, 1990.
8. Кабышев А.В. Компенсация реактивной мощности в электроустановках промышленных предприятий. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2012.
9. Fei Wang Y., Xin Yuan Y., Chen J., Jian Cheng Q. A dynamic reactive power compensation method of super high-power and high-voltage motor. Applied Mechanics and Materials, 2014, Vol. 602-605. Pp. 2828–2831.
10. Khabdullin A., Khabdullin A., Khabdullina Z., Khabdullina G. Mathematical model of synchronous motors for static characteristics power loss. Energy Procedia, 2016. Vol. 95. Pp. 487–490.
11. Jun Liu H., Long Wang J., Di Bao F. Modeling of the three-phase asynchronous motor based on MATLAB/Simulink. Applied Mechanics and Materials, 2013. Vol. 313–314. Pp. 1042–1045.
12. Guimarães J.M.C., Bernardes J.V., Hermeto A.E., Bortoni E.D.C. Parameter determination of asynchronous machines from manufacturer data sheet, IEEE Transactions on Energy Conversion, 2014. Vol. 29. Pp. 689–697.
13. Cheng Q.J., Chen J., Yuan Y.X., Zhou X.S., Deng S.J. Research on a dynamic reactive power compensation method of composite power load, Applied Mechanics and Materials, 2014. Vol. 602–605. Pp. 2840–2843.
14. Joshi B.S., Mahela O.P., Ola S.R. Reactive power flow control using Static VAR Compensator to improve voltage stability in transmission system, in 2016 International Conference on Recent Advances and Innovations in Engineering (ICRAIE), 2016.
15. Campaner R., Chiandone M., Sulligoi G., Milano F. Automatic voltage and reactive power control in distribution systems: Dynamic coupling analysis, in 2016 IEEE International Conference on Renewable Energy Research and Applications (ICRERA), 2016.
16. Hongbo L., Biping G., Wangjun Z., Xinyi S., Haobin Y., Guangyu H. Study on reactive power optimal control of distribution systems based on hybrid control theory, in CIGRE 2010 Proceedings, 2010.
17. Lakra N.S., Prakash P., Jha R.C. Power quality improvement of distribution system by reactive power compensation, in 2017 International Conference on Power and Embedded Drive Control (ICPEDC), 2017.
18. Zhou X., Ma Y., Gao Z., Zhang S. Reactive power compensation in motor, in 2017 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation (ICMA), 2017.

19. *Kotenev V.I., Kochetkov V.V., Elkin D.A.* The reactive power control of the power system load node at the voltage instability of the power supply, in 2017 International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON), 2017.
20. *Kotenev V.I., Kotenev A.V., Kochetkov V.V., Elkin D.A.* Electrical engineering unit for the reactive power control of the load bus at the voltage instability. *Journal of Physics: Conference series*, 2018, Vol. 944.
21. *Kotenev V.I., Kotenev A.V., Stulov A.D.* "Controlling the Reactive Power Factor of a Combined Load Power Supply System and the Correction of Program as a Function of Current Power Consumption," 2020 International Ural Conference on Electrical Power Engineering (Ural-Con), 2020, pp. 171–176. doi: 10.1109/UralCon49858.2020.9216286.
22. *Kotenev V.I., Stulov A.D.* "Controlling the Reactive Power of the Enterprise's Power Supply System with the Task Correction According to the Current Calculation Meter Readings," 2021 International Ural Conference on Electrical Power Engineering (UralCon), 2021, pp. 152–156. doi: 10.1109/UralCon52005.2021.9559543.

Статья поступила в редакцию 14 июля 2021 г.

AUTOMATIC CONTROL SYSTEM OF THE REACTIVE POWER FACTOR OF THE POWER SUPPLY SYSTEM OF THE INDUSTRIAL ENTERPRISE

*V.I. Kotenev, A.V. Kotenev, A.D. Stulov**

Samara State Technical University
244, Molodogvardeyskaya st., Samara, 443100, Russian Federation
E-mail: ads260391@mail.ru

Abstract. Considered is the control of the reactive power factor of the power supply system of an industrial enterprise, which includes: electrical receivers with asynchronous load; workshop transformer substations with and without regulated capacitor units, as well as the main step-down substation with synchronous motors powered from it. It is proposed to consider electrical receivers with capacitor units and a transformer substation as an object of reactive power factor control, on the basis of which the corresponding automatic control system (ACS) is built. An ACS with an algorithm formed as a function of active and reactive power of electrical receivers is considered. The ACS was developed by the reactive power factor of the power supply system of the entire enterprise with shop combined loads. A method is given for calculating the capacity of capacitor units of shop substations. The use of this control system will allow meeting the regulatory requirements for ensuring the limiting values of the reactive power coefficients and thereby reducing losses during the transportation of electricity and increasing the throughput of the electrical network.

Keywords: Control system, power supply, reactive power, asynchronous, synchronous, motors, capacitor units.

REFERENCES

1. Zhelezko Yu.S. Loss of electricity. Reactive power. Power quality. M.: ENAS, 2009.
2. Schwartz G.R., Abakumov A.M., Migacheva L.A., Rasskazov F.N., Kuznetsov P.K. Application of a modern AC drive in gas and oil industry technologies. M.: Mechanical Engineering-1, 2008.
3. Kirilin I.V., Kozlov P.M. Selection of reactive power control means in power supply systems of a non-ferrous metallurgy enterprise. Industrial energy. 2010. 8. Pp. 46–52.
4. Petelin D.P. Automatic control of a synchronous electric drive. M.: Energy, 1968.
5. Ershov S.V., Karnitskiy V.Yu. Development of adaptive regulation of reactive power compensation. Tula State University News: Engineering Science. 2014. No 8. Pp. 32–39.
6. Pantelev V.I., Filatov A.N. Management of reactive power and voltage modes of an industrial enterprise. Krasnoyarsk: Krasnoyarsk State Technical University, 2005.
7. Lipkin B.Yu. Power supply for industrial enterprises and installations. M.: Higher School, 1990.
8. Kabyshev A.V. Compensation of reactive power in electrical installations of industrial enterprises. Tomsk Polytechnic University Publishing House, 2012.
9. Fei Wang Y., Xin Yuan Y., Chen J., Jian Cheng Q. A dynamic reactive power compensation method of super high-power and high-voltage motor. Applied Mechanics and Materials, 2014. Vol. 602–605. Pp. 2828–2831.
10. Khabdullin A., Khabdullin A., Khabdullina Z., Khabdullina G. Mathematical model of synchronous motors for static characteristics power loss. Energy Procedia, 2016. Vol. 95. Pp. 487–490.
11. Jun Liu H., Long Wang J., Di Bao F. Modeling of the three-phase asynchronous motor based on MATLAB/Simulink. Applied Mechanics and Materials, 2013. Vol. 313–314. Pp. 1042–1045.

* Viktor I. Kotenev (Dr. Sci. (Techn.)), Professor.
Alexander V. Kotenev (Ph. D. (Techn.)), Associate Professor.
Alexander D. Stulov, Postgraduate Student.

12. *Guimarães J.M.C., Bernardes J.V., Hermeto A.E., Bortoni E.D.C.* Parameter determination of asynchronous machines from manufacturer data sheet, *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 2014. Vol. 29. Pp. 689–697.
13. *Cheng Q.J., Chen J., Yuan Y.X., Zhou X.S., Deng S.J.* Research on a dynamic reactive power compensation method of composite power load, *Applied Mechanics and Materials*, 2014. Vol. 602–605. Pp. 2840–2843.
14. *Joshi B.S., Mahela O.P., Ola S.R.* Reactive power flow control using Static VAR Compensator to improve voltage stability in transmission system, in *2016 International Conference on Recent Advances and Innovations in Engineering (ICRAIE)*, 2016.
15. *Campaner R., Chiandone M., Sulligoi G., Milano F.* Automatic voltage and reactive power control in distribution systems: Dynamic coupling analysis, in *2016 IEEE International Conference on Renewable Energy Research and Applications (ICRERA)*, 2016.
16. *Hongbo L., Biping G., Wangjun Z., Xinyi S., Haobin Y., Guangyu H.* Study on reactive power optimal control of distribution systems based on hybrid control theory, in *CICED 2010 Proceedings*, 2010.
17. *Lakra N.S., Prakash P., Jha R.C.* Power quality improvement of distribution system by reactive power compensation, in *2017 International Conference on Power and Embedded Drive Control (ICPEDC)*, 2017.
18. *Zhou X., Ma Y., Gao Z., Zhang S.* Reactive power compensation in motor, in *2017 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation (ICMA)*, 2017.
19. *Kotenev V.I., Kotenev A.V., Stulov A.D.* "Controlling the Reactive Power Factor of a Combined Load Power Supply System and the Correction of Program as a Function of Current Power Consumption," *2020 International Ural Conference on Electrical Power Engineering (UralCon)*, 2020. Pp. 171–176. doi: 10.1109/UralCon49858.2020.9216286.
20. *Kotenev V.I., Stulov A.D.* "Controlling the Reactive Power of the Enterprise's Power Supply System with the Task Correction According to the Current Calculation Meter Readings," *2021 International Ural Conference on Electrical Power Engineering (UralCon)*, 2021, pp. 152–156. doi: 10.1109/UralCon52005.2021.9559543.
21. *Kotenev V.I., Kochetkov V.V., Elkin D.A.* The reactive power control of the power system load node at the voltage instability of the power supply, in *2017 International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON)*, 2017.
22. *Kotenev V.I., Kotenev A.V., Kochetkov V.V., Elkin D.A.* Electrical engineering unit for the reactive power control of the load bus at the voltage instability. *Journal of Physics: Conference series*, 2018. Vol. 944.

УДК 621.311.1

**МЕТОД РАСЧЕТА КОЭФФИЦИЕНТА ИСКАЖЕНИЯ
СИНУСОИДАЛЬНОСТИ КРИВОЙ НАПРЯЖЕНИЯ,
СОЗДАВАЕМОГО ТРЕХФАЗНЫМИ ВЫПРЯМИТЕЛЯМИ****В.С. Осипов***Самарский государственный технический университет
Россия, 443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244

E-mail: osipov_4343@mail.ru

Аннотация. Существующие в различных источниках методики расчета представляют выпрямительные установки как источники высших гармоник. При этом действующее значение тока первичной обмотки трансформатора в виде прямоугольников разлагают в ряд Фурье и получают гармонические составляющие тока, кроме основной гармоники высшие 5, 7, 11, 13, 17, 19 и т. д. Амплитуды тока высших гармоник умножаются на соответствующие частотам индуктивные сопротивления питающей сети, результаты возводят в квадрат и суммируют. Очевидно, что все слагаемые – равной величины, так как при увеличении номера гармоники ее амплитуда уменьшается в n раз по сравнению с первой гармоникой, при этом во столько же раз увеличивается частота и индуктивное сопротивление. Коэффициент несинусоидальности K_u определяется как отношение корня квадратного из суммы к величине фазного напряжения. Недостатком определения K_u является некоторая произвольность в количестве учитываемых гармоник. Если принять, например, 9 гармоник, то получим $K_u = 7,22\%$; если 4 гармоники, то $K_u = 4,81\%$. При протекании тока первичной обмотки трансформатора амплитуда напряжения на шинах подстанции уменьшается всего на 1,9 В. При этом коэффициент несинусоидальности не может быть равен 7,22 %. Во всех литературных источниках при расчете гармоник тока не дается рекомендаций, на какие номера гармоник необходимо устанавливать на подстанции резонансные фильтры. Не случайно в новом ГОСТ–2013 вычисляют значение коэффициента искажения синусоидальности кривой напряжения $K_{(U)}$ в процентах как результат i -го наблюдения по формуле (то есть не производится вычисление по гармоникам тока). В данной работе производится другой подход к определению коэффициента искажения синусоидальности кривой напряжения. Выпрямительные установки не являются источниками гармоник, а представляют собой электроприемники с нелинейной характеристикой потребления электрического тока, при этом искажается форма кривой синусоиды питающего напряжения. Эта искаженная синусоида и является источником высших гармоник, которая в данной работе разлагается в ряд Фурье, при этом вычисление интегральных функций коэффициентов ряда Фурье производится в программе Mathcad. Решение произведено для трех схем выпрямителей. Определены гармоники для установки резонансных фильтров. В результате предлагается разработанная методика расчета высших гармоник напряжения и определения коэффициента искажения синусоидальности кривой напряжения на основании разложения в

* Осипов Вячеслав Семёнович, доцент кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий», кандидат технических наук.

ряд Фурье искаженной кривой синусоиды напряжения при работе трехфазных неуправляемых выпрямителей.

Ключевые слова: выпрямитель, коэффициент, несинусоидальность, ток, напряжение, высшие гармоники, ряд Фурье.

Разработка методики расчета высших гармоник и определения коэффициента искажения синусоидальности кривой напряжения является актуальной проблемой, так как существующие методики позволяют решить эту задачу с большой погрешностью. В цехах современных промышленных предприятий более половины электроэнергии используется в преобразованном виде (на металлургических заводах – более 90 %). Широко применяются вентильные преобразователи (ВП), различного рода преобразователи частоты [1, 2]. Такие нагрузки называют нелинейными, к их числу относятся в первую очередь различного рода ВП.

Эти нагрузки потребляют из сети ток, кривая которого оказывается несинусоидальной, в результате возникают нелинейные искажения кривой напряжения сети или, другими словами, несинусоидальные режимы.

Несинусоидальность напряжения и тока обуславливает дополнительные потери и нагрев, а также ускоренное старение изоляции электрооборудования [3], что подтверждается результатами диагностического обследования различного электроэнергетического оборудования: трансформаторов, кабельных линий, электродвигателей, компенсирующих конденсаторов. Кроме того, ВГ в СЭС промышленных предприятий вызывают нарушение работы и ложные срабатывания устройств релейной защиты и автоматики, приводят к сбоям в работе электронных систем управления и вычислительной техники, создают помехи в аппаратуре телемеханики и связи, искажают показания счетчиков электрической энергии. Прогрессирующее внедрение вентильных преобразователей создает **актуальность** решения проблемы высших гармоник в электрических сетях путем совершенствования расчета и создания устройств противодействия гармоникам. Коэффициент несинусоидальности является показателем качества электроэнергии.

Для уменьшения влияния высших гармоник применяют подключение преобразовательных устройств через фильтры высших гармоник [3–5] – это сетевые дроссели, линеаторы. Существует несколько схем, при помощи которых можно реализовать активную коррекцию коэффициента мощности, что приводит к уменьшению воздействия высших гармоник. Также применяются пассивные узкополосные и широкополосные фильтры [6–8], которые устанавливаются на шинах ТП. Во всех случаях необходимо знать амплитуду и номера гармоник.

Рассмотрим существующие методики расчета на конкретном примере схемы включения выпрямителя (расчетная схема на рис. 1).

Мощность короткого замыкания системы $S_k = 300$ мВА. Определяется сопротивление системы, приведенное к напряжению 0,4 кВ.

Индуктивное сопротивление

$$X_c = \frac{U_H^2}{S_k} = \frac{400^2}{300000000} = 0,00053 \text{ Ом.}$$

Сопротивление кабельной линии ААБ (3Х70+1Х35), $X_{уд} = 0,0612$ Ом/км, $R_{уд} = 0,447$ Ом/км, длина кабеля $l_k = 800$ м.

Сопротивления кабеля, приведенные к напряжению 0,4кВ:

$$R_K = R_{уд} \cdot l_K \cdot \left(\frac{0,4}{10}\right)^2 = 0,447 \cdot 0,8 \cdot \left(\frac{0,4}{10}\right)^2 = 0,000572 \text{ Ом},$$

$$X_K = X_{уд} \cdot l_K \cdot \left(\frac{0,4}{10}\right)^2 = 0,0612 \cdot 0,8 \cdot \left(\frac{0,4}{10}\right)^2 = 0,0000783 \text{ Ом}.$$

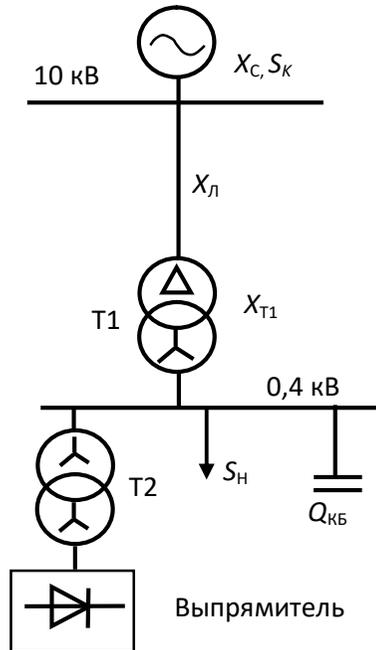


Рис. 1. Расчетная схема

Сопротивления трансформатора Т1 подстанции мощностью 630 кВА, приведенные к 0,4 кВ. Технические данные: $\Delta P_{XX} = 1,16$ кВт, $\Delta P_{K3} = 7,6$ кВт, $\Delta U_{K3} = 5,5$ %.

Полное сопротивление, приведенное к 0,4 кВ:

$$Z_T = \frac{U_K \%}{100} \cdot \frac{U_H^2}{S_H} = \frac{5,5}{100} \cdot \frac{400^2}{630000} = 0,014 \text{ Ом}.$$

Активное сопротивление

$$R_T = \frac{\Delta P_{K3} U_H^2}{S_H^2} = \frac{7600 \cdot 400^2}{630000^2} = 0,00306 \text{ Ом},$$

$$X_T = \sqrt{Z_T^2 - R_T^2} = \sqrt{0,014^2 - 0,00306^2} = 0,01366 \text{ Ом}.$$

Суммарные сопротивления питающей сети:

$$R_{ПС} = 0,000572 + 0,00306 = 0,00363 \text{ Ом},$$

$$X_{ПС} = 0,00053 + 0,0000783 + 0,01366 = 0,0143 \text{ Ом}.$$

Трехфазная мостовая схема Ларионова

Расчет параметров трансформатора выпрямительной установки, соединение обмоток «звезда – звезда» (рис. 2).

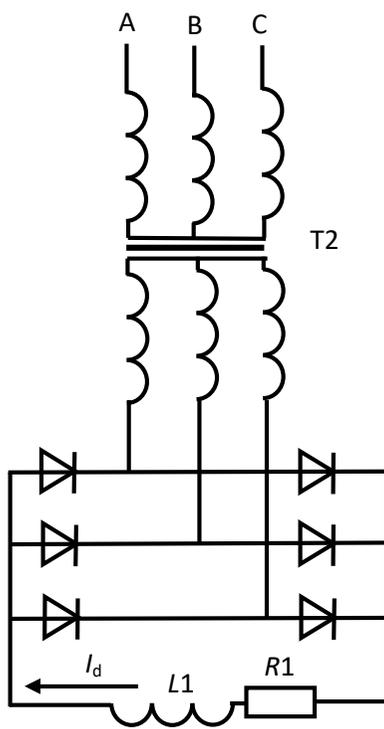


Рис. 2. Трансформатор «звезда – звезда» и выпрямитель по схеме Ларионова

Мощность трансформатора T2 (ТМ100/10) 100 кВа. Технические данные:

$$\Delta P_{XX} = 0,33 \text{ кВт}, \Delta P_{K3} = 1,97 \text{ кВт}, \Delta U_{K3} = 4,5 \%$$

Полное сопротивление трансформатора, приведенное к 0,4 кВ:

$$Z_T = \frac{U_K \%}{100} \cdot \frac{U_H^2}{S_H} = \frac{4,5}{100} \cdot \frac{400^2}{100000} = 0,072 \text{ Ом.}$$

Активное сопротивление

$$R_T = \frac{\Delta P_{K3} U_H^2}{S_H^2} = \frac{1970 \cdot 400^2}{100000^2} = 0,0315 \text{ Ом.}$$

Индуктивное сопротивление

$$X_T = \sqrt{Z_T^2 - R_T^2} = \sqrt{0,072^2 - 0,0315^2} = 0,06474 \text{ Ом.}$$

Постоянное выпрямленное напряжение $U_d = 48 \text{ В}$.

Выпрямленный ток $I_d = 1500 \text{ А}$. Мощность выпрямителя $P_B = 72 \text{ кВт}$.

Фазное напряжение вторичной обмотки трансформатора для выпрямителя [9, 10]:

$$U_{2\phi} = \frac{U_d}{2,34} = \frac{48}{2,34} = 20,51 \text{ В.}$$

Коэффициент трансформации:

$$K_T = \frac{U_{1\phi}}{U_{2\phi}} = \frac{220}{20,51} = 10,726.$$

Ток нагрузки из-за наличия в ней значительной индуктивности сглажен:

$$I_d = \frac{U_d}{R_d}.$$

Действующее значение тока вторичной обмотки трансформатора [9 – 11]:

$$I_{d2} = \sqrt{\frac{1}{2\pi} \left(2 \int_0^{\frac{2\pi}{3}} I_d^2 dv \right)} = \sqrt{\frac{2}{3}} I_d = 0,817 I_d = 0,817 \cdot 1500 = 1225,5 \text{ А.}$$

Действующее значение фазного тока первичной обмотки трансформатора [9] при соединении ее в «звезду»:

$$I_{d1} = \frac{I_{d2}}{K_T} = \frac{1225,5}{10,726} = 114,26 \text{ А.}$$

На рис. 3, *a* приведена диаграмма трехфазных напряжений. На рис. 3, *b* – диаграмма токов первичной обмотки трансформатора Т2 фазы А. Эти токи в виде периодической функции могут быть представлены в виде ряда Фурье [14–17]:

$$f(x) = \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} (a_n \cos nx + b_n \sin nx), \quad (1)$$

где коэффициенты ряда a_0 , a_n , b_n – действительные числа.

Коэффициенты ряда определяются по формулам:

$$a_0 = \frac{1}{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} f(x) dx, \quad (2)$$

$$a_n = \frac{1}{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} f(x) \cdot \cos nxdx, \quad (3)$$

$$b_n = \frac{1}{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} f(x) \cdot \sin nxdx, \quad (4)$$

$n = 1, 2, 3, \dots$ – номер гармоник.

Если функция нечетная (симметричная относительно абсцисс), то достаточно определить только коэффициент b_n ; если функция четная, то определяются коэффициенты a_0 , a_n ; если функция аморфная (не четная и не нечетная), то определяются все коэффициенты.

Если – нечетная периодическая функция с периодом 2π , удовлетворяющая условиям разложимости в ряд Фурье, то можно определять

$$b_n = \frac{2}{\pi} \int_0^{\pi} f(x) \cdot \sin nxdx \quad (5)$$

и разложение в ряд Фурье для нечетной функции имеет вид

$$f(x) = \sum_{m=1}^{\infty} b_m \sin mx. \quad (6)$$

Если разложить функцию тока I_{d1} первичной обмотки трансформатора в ряд Фурье [9, 18], то получим кроме первой, т. е. основной гармоники, высшие 5, 7, 11, 13, 17, 19 и т. д. гармонические составляющие ($n = 6k \pm 1$, где k – любое натуральное число, 6 – число пульсов схемы выпрямления за период).

ГОСТ–97 нормирует коэффициенты n -ой гармонической составляющей [1, 2, 19]

$$K_{U(n)} = \frac{U_n}{U_{НОМ}} \cdot 100. \quad (7)$$

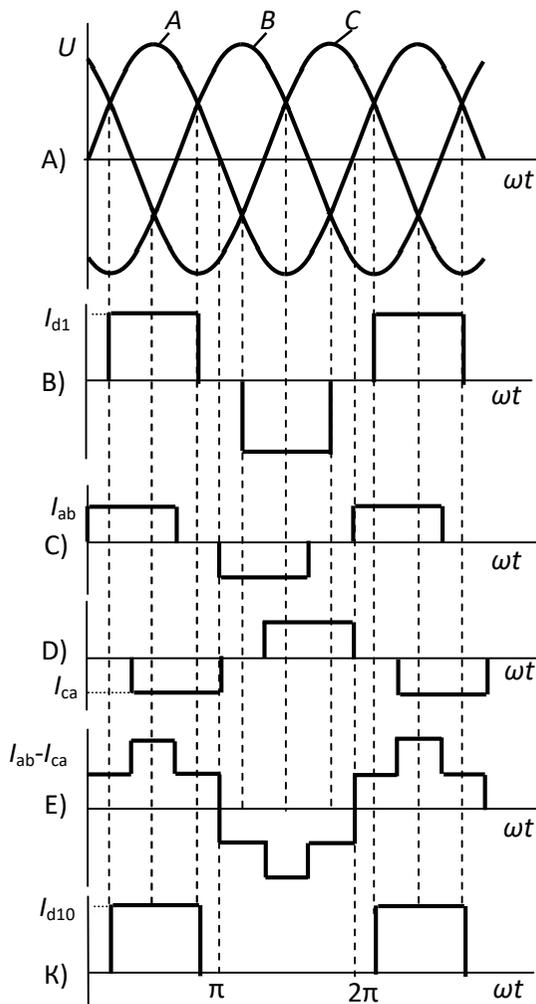


Рис. 3. Диаграммы напряжений и токов

Коэффициент несинусоидальности напряжения питающей сети определяется по формуле [1, 2, 19]

$$K_U = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{40} U_n^2} \cdot 100}{U_{НОМ}}, \quad (8)$$

где n – номер гармоники; U_n – падение напряжения в сопротивлении питающей сети от тока соответствующей гармоники.

В таблице 1 приводятся допустимые значения коэффициентов несинусоидальности.

Таблица 1

**Значения коэффициентов гармонических составляющих напряжения K_{Un} %
ГОСТ 32144—2013**

Нечетных не кратных трем		Нечетных кратных трем		Четных гармонических	
Порядок гармонической составляющей n	%	Порядок гармонической составляющей n	%	Порядок гармонической составляющей n	%
5	6	3	5	2	2
7	5	9	1,5	4	1
11	3,5	15	0,3	6	0,5
13	3	21	0,2	8	0,5
17	2	>21	0,2	10	0,5
19	1,5			12	0,2
23	1,5			>12	0,2
25	1,5				
>25	1,5				

В [19] приведен расчет коэффициента искажения синусоидальности кривой напряжения с учетом 5, 7, 11, 13 гармоник:

$$K_u = \frac{100\% \cdot \sqrt{\sum U_n^2}}{U_\Phi} = \frac{100\% \cdot \sqrt{7,74^2 + 7,74^2 + 7,74^2 + 7,74^2}}{220} = 7,04\%, \quad (9)$$

что меньше допустимых 8 %, определяемых ГОСТ–97 для напряжения 380 В.

В выражении (9) все слагаемые под корнем равны, так как при увеличении номера гармоники ее амплитуда уменьшается в n раз по сравнению с первой гармоникой, при этом во столько же раз увеличивается частота и индуктивное сопротивление $X_{\text{ПС}} = L\omega$ питающей сети. Однако в [19] наблюдаются ошибки, так как в (9) под корнем получены числа путем перемножения сопротивления $X_{\text{ПС}}$ на амплитуду тока гармоник. Целесообразнее умножить на действующее значение тока гармоники. Кроме того, для первой гармоники принято действующее, а не амплитудное значение тока первичной обмотки трансформатора.

Для правильного решения необходимо разложение в ряд Фурье функции тока (рис. 3, в). Разложение в ряд Фурье целесообразно выполнять с применением вычислительной техники, например в программе Mathcad [14].

На панели Mathcad размещаются: калькулятор, греческий алфавит, программирование и символьные операции. Затем записывается интеграл по выражению (5), нажимается \rightarrow (символьные), в следующей строке записывается $n = 1$ (первая гармоника), затем копируется первое выражение и нажимается $=$ на калькуляторе – получаем решение при ($x = \omega t$).

$$\frac{2}{\pi} \int_{\frac{1}{6}\pi}^{\frac{5}{6}\pi} (114) \sin(nx) dx \rightarrow \frac{228 \left(\cos\left(\frac{\pi n}{6}\right) - \cos\left(\frac{5\pi n}{6}\right) \right)}{\pi n},$$

$$n: = 1$$

$$\frac{2}{\pi} \int_{-\frac{\pi}{6}}^{\frac{5\pi}{6}} (114) \sin(nx) dx \rightarrow \frac{228\sqrt{3}}{\pi} = 125,703.$$

Таким образом, отношение амплитуды первой гармоники к действующему значению $125,7/114=1,103$. В результате получим формулу для определения коэффициента несинусоидальности с учетом действующих значений токов:

$$K_u = \frac{100\% \cdot 1,103 \cdot I_{d1} \cdot X_{\text{ПС}} \cdot \sqrt{V}}{\sqrt{2} \cdot U_{\Phi}}, \quad (10)$$

где V – количество учитываемых гармоник.

Подставляя значения в (10), получим $K_u = 7,22\%$ при $V = 9$ и $K_u = 4,81\%$ при $V = 4$.

Для проверки получим уменьшение амплитуды фазного напряжения:

$$\Delta U_{\Phi} = 311,1 \cdot 0,0722 = 22,46 \text{ В.}$$

В соответствии с выражением (1) после суммирования гармоник должны получить функцию, соответствующую рис. 3, в, для чего необходимо учитывать не менее 12 гармоник.

Недостатком определения K_u является некоторая произвольность в количестве учитываемых гармоник. А также во всех источниках при расчете гармоник тока не дается рекомендаций, на какие номера гармоник необходимо устанавливать на подстанции резонансные фильтры.

Не случайно в новом ГОСТ [20] вычисляются значение коэффициента искажения синусоидальности кривой напряжения $K_{(U)i}$ в процентах как результат i -го наблюдения по формуле (то есть не производится вычисление по гармоникам тока):

$$K_{U_i} = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{40} U_{(n)i}^2}}{U_{(1)i}} \cdot 100,$$

где $U_{(1)i}$ — действующее значение междуфазного (фазного) напряжения основной частоты для i -го наблюдения, В.

В данной работе производится другой подход к определению коэффициента искажения синусоидальности кривой напряжения. Выпрямительные установки не являются источниками гармоник, а представляют собой электроприемники с нелинейной характеристикой потребления электрического тока, при этом искажается форма кривой синусоиды питающего напряжения. Эта искаженная синусоида и является источником высших гармоник.

Полное сопротивление питающей сети:

$$Z_{\text{ПС}} = \sqrt{R_{\text{ПС}}^2 + X_{\text{ПС}}^2} = \sqrt{0,00363^2 + 0,0143^2} = 0,0148 \text{ Ом.}$$

Амплитуда фазного напряжения:

$$U_{m1} = \sqrt{2} \cdot 220 = 311,1 \text{ В.}$$

Величина амплитуды напряжения при протекании тока I_{d1} :

$$U_{m2} = U_{m1} - I_{d1} \cdot Z_{\text{ПС}} = 311,1 - 114,26 \cdot 0,0148 = 309,4 \text{ В.}$$

На рис. 4 показана расчетная графическая функция искаженной формы синусоиды. Это нечетная периодическая функция с периодом 2π , удовлетворяющая условиям разложимости в ряд Фурье по выражению (5). При этом определяются

коэффициенты разложения на отрезках b_{1n} ($0-\pi/6$), b_{2n} ($\pi/6-5/6 \pi$), b_{3n} ($5/6 \pi- \pi$), затем определяются значения суммы $b_n = b_{1n} + b_{2n} + b_{3n}$.

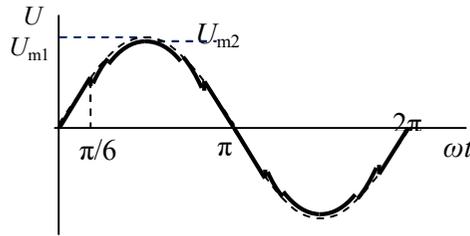


Рис. 4. Расчетная графическая функция

Решение интегральных функций производится в программе Mathcad. Например, решение для b_1 для гармоники $n = 5$:

$$b_1 := \frac{2}{\pi} \int_0^{\frac{1}{6}\pi} 311.1 \cdot \sin(x) \cdot \sin(nx) dx \rightarrow$$

$$\rightarrow \frac{2 \left(-\frac{311.1 \cdot \sin(-0.52n + 0.52)}{2n - 2} - \frac{311.1 \cdot \sin(0.52n + 0.52)}{2n - 2} \right)}{\pi},$$

$n := 5,$

$$b_1 := \frac{2}{\pi} \int_0^{\frac{1}{6}\pi} 311.1 \cdot \sin(x) \cdot \sin(nx) dx \rightarrow 21.44.$$

Аналогичные решения – для b_2, b_3 при варьировании номера гармоник, результаты представлены в табл. 2.

Таблица 2

Коэффициенты ряда Фурье для двенадцати гармоник

№ гарм.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
b_{1n}	8,97	16,5	21,44	23,1	21,44	16,98	10,72	3,93	-2,14	-6,5	-8,58	-8,31
b_{2n}	291,56	0	-42,65	0	-42,65	0	-21,32	0	4,26	0	17,06	0
b_{3n}	8,97	-16,5	21,44	-23,1	21,44	-16,98	10,72	-3,93	-2,14	6,5	-8,58	8,31
b_n	309,9	0	0,234	0	0,234	0	0,12	0	-0,02	0	0,1	0

Наибольшие гармоники – с номерами 3, 5, 7, 11, на эти гармоники можно устанавливать резонансные фильтры. Полученные результаты существенно отличаются от расчетов с использованием гармоник тока.

Коэффициент несинусоидальности в соответствии с выражением (8)

$$K_u = \frac{\sqrt{0,234^2 + 0,234^2 + 0,12^2 + 0,1^2}}{220} \cdot 100\% = 0.166\%.$$

Коэффициент несинусоидальности предлагается определять как отношение суммы действующих значений гармоник к фазному напряжению

$$K_u = \frac{(0,234 + 0,234 + 0,12 + 0,1) \cdot 1,1}{\sqrt{2} \cdot 220} \cdot 100\% = 0,22\%.$$

Соединение первичной обмотки трансформатора в треугольник (рис. 5) при тех же значениях параметров выпрямителя.

Действующие значения токов фаз первичной обмотки [13] равны:

$$I_{ab} = I_{ca} = I_{d1} = \frac{I_{d2}}{\sqrt{3}K_T} = \frac{1225,5}{\sqrt{3} \cdot 10,728} = 66,03\text{A},$$

так как у обмотки увеличивается число витков в $\sqrt{3}$ раза при напряжении 380 В.

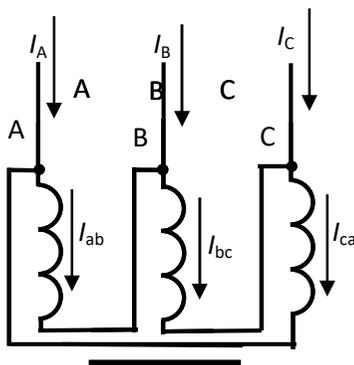


Рис. 5. Первичная обмотка в треугольник

На рис. 6 показана векторная диаграмма для определения тока из сети, например для фазы А:

$$\vec{I}_A = \vec{I}_{ab} - \vec{I}_{ca}.$$

Результирующий вектор I_A сдвинут по фазе на 30° относительно I_{ab} . Его величина определяется с учетом фазового сдвига:

$$I_{d1} = I_A = I_{ab} \cdot \cos 30^\circ + I_{ca} \cdot \cos 30^\circ = 2 \cdot 66,03 \cdot \cos 30^\circ = 114,36\text{A},$$

то есть из сети потребляется такой же ток по величине, как при трансформаторе с соединением «звезда – звезда».

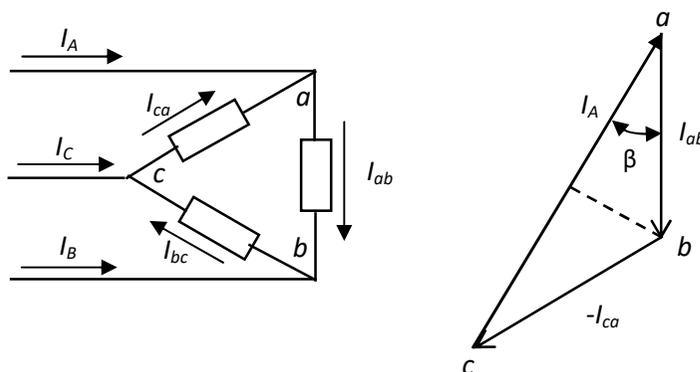


Рис. 6. Векторная диаграмма

При суммировании токов на графике (рис. 3, *c*, *d*, *e*) если прямоугольные формы не совпадают по фазе, то сила тока будет $I_{d1}/2 = I_A/2$. Это подтверждается [12] осциллограммами.

Расчетная графическая функция аналогична по форме (рис. 4) с изменением пределов интегрирования: $(0-1/3\pi)$, $(1/3\pi-2/3\pi)$, $(2/3\pi-\pi)$, при этом также изменяются амплитуды напряжений.

Величина амплитуды напряжения в пределах $(0-1/3\pi)$ и $(2/3\pi-\pi)$ при протекании тока I_{d1} :

$$U_{m2} = U_{m1} - I_{d1} \cdot Z_{\text{ПС}} = 311,1 - 114,26 \cdot 0,0148 = 309,4\text{В}.$$

Величина амплитуды напряжения в пределах $(1/3\pi-2/3\pi)$ при протекании тока $I_{d1}/2$:

$$U_{m3} = U_{m1} - \frac{I_{d1}}{2} \cdot Z_{\text{ПС}} = 311,1 - \frac{114,26}{2} \cdot 0,0148 = 310,25\text{В}.$$

Аналогичный расчет, как и в предыдущем случае, показывает, что номера гармоник будут такими же (см. табл. 2), амплитуда гармоник будет в два раза меньше.

Трехфазная нулевая схема

Фазное напряжение вторичной обмотки трансформатора для выпрямителя [9, 10] (рис. 7):

$$U_{2\phi} = \frac{U_d}{1,17} = \frac{48}{1,17} = 41,02\text{В}.$$

Коэффициент трансформации:

$$K_T = \frac{U_{1\phi}}{U_{2\phi}} = \frac{220}{41,02} = 5,36.$$

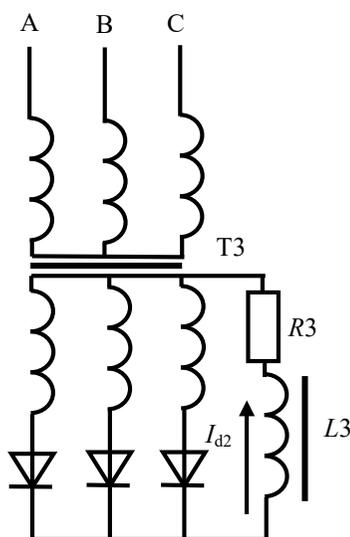


Рис. 7. Трехфазная нулевая схема

Действующее значение вторичного тока для трехфазной нулевой схемы с учетом диаграммы (рис. 3) [10, 11]:

$$I_{d2} = \sqrt{\frac{1}{2\pi} \left(\int_0^{\frac{2\pi}{3}} I_d^2 dv \right)} = \frac{I_d}{\sqrt{3}} = 867,05 \text{ A}.$$

Действующее значение первичного тока

$$I_{d10} = \frac{\sqrt{2}I_d}{3K_T} = \frac{\sqrt{2} \cdot 1500}{3 \cdot 5,36} = 131,52 \text{ A}.$$

Трансформатор ТЗ для трехфазной нулевой схемы должен быть мощнее в 1,3 раза, поэтому принят трансформатор ТЗ (ТМ160/10). Мощность трансформатора 160 кВа. Технические данные:

$$\Delta P_{\text{ХХ}}=0,51 \text{ кВт}, \Delta P_{\text{КЗ}}=2,65 \text{ кВт}, \Delta U_{\text{КЗ}}=4,5 \text{ \%}.$$

Полное сопротивление трансформатора, приведенное к 0,4 кВ:

$$Z_T = \frac{U_{\text{К}} \%}{100} \cdot \frac{U_{\text{Н}}^2}{S_{\text{Н}}} = \frac{4,5}{100} \cdot \frac{400^2}{160000} = 0,045 \text{ Ом}.$$

Активное сопротивление:

$$R_T = \frac{\Delta P_{\text{КЗ}} U_{\text{Н}}^2}{S_{\text{Н}}^2} = \frac{2650 \cdot 400^2}{160000^2} = 0,0166 \text{ Ом}.$$

Индуктивное сопротивление:

$$X_T = \sqrt{Z_T^2 - R_T^2} = \sqrt{0,045^2 - 0,0166^2} = 0,0418 \text{ Ом}.$$

Полное сопротивление питающей сети:

$$Z_{\text{ПС}} = \sqrt{R_{\text{ПС}}^2 + X_{\text{ПС}}^2} = \sqrt{0,00363^2 + 0,0143^2} = 0,0148 \text{ Ом}.$$

Амплитуда фазного напряжения:

$$U_{m1} = \sqrt{2} \cdot 220 = 311,1 \text{ В}.$$

Величина амплитуды напряжения при протекании тока I_{d10} :

$$U_{m20} = U_{m1} - I_{d10} \cdot Z_{\text{ПС}} = 311,1 - 131,52 \cdot 0,0148 = 309,2 \text{ В}.$$

На рис. 8 показана форма искажённой синусоиды, полученная расчётным путём с учетом всех коэффициентов Фурье (2) – (4). Расчет производится в программе Mathcad, как в предыдущем случае.

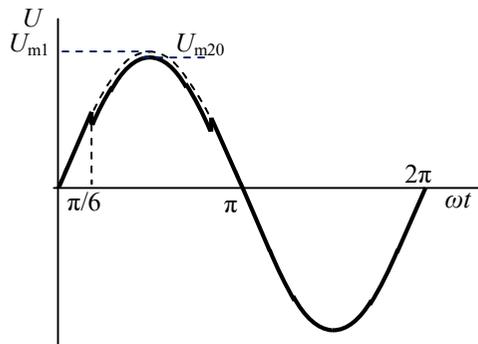


Рис. 8. Расчетная графическая функция 3-фазной нулевой схемы

Определение коэффициентов разложения a_0, b, a производится на отрезках с учетом амплитуды напряжений: $(0-\pi/6), (\pi/6-5/6 \pi), (5/6 \pi- \pi), (\pi -2\pi)$, затем определяются значения их суммы.

Например, для a_{10} :

$$a_{10} := \frac{1}{\pi} \int_0^{\frac{1}{6}\pi} 311.1 \cdot \sin(x) dx \rightarrow 13.27.$$

Для других отрезков получено $a_{20} = 140,47, a_{30} = 13,27, a_{40} = -198,05$. Сумма значений показывает величину постоянного смещения $\sum a_0 = 1,04$.

Определение коэффициентов производится аналогично, например для 1-й гармоники

$$b_1 := \frac{1}{\pi} \int_0^{\frac{1}{6}\pi} 311.1 \cdot \sin(x) \cdot \sin(nx) dx \rightarrow$$

$$\rightarrow \frac{311.1 \cdot \sin(0.52n - 0.52)}{2n - 2} - \frac{311.1 \cdot \sin(0.52n + 0.52)}{2n + 2},$$

$$n := 1,$$

$$b_1 := \frac{1}{\pi} \int_0^{\frac{1}{6}\pi} 311.1 \cdot \sin(x) \cdot \sin(nx) dx \rightarrow 4.49.$$

Данные расчетов сводятся в таблицу (табл. 3).

Таблица 3

Коэффициенты b синусных гармоник

№ гарм.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
b_1	4,49	8,25	10,72	11,55	10,72	8,49	5,36	1,96	-1,07	-3,25	-4,29	-4,15
b_2	145,68	0	-21,31	0	-21,31	0	-10,65	0	2,13	0	8,52	0
b_3	4,49	-8,25	10,72	-11,55	10,72	-8,49	5,36	-1,96	-1,07	3,25	-4,29	4,15
b_4	155,55	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Σb	310,16	0	0,13	0	0,13	0	0,07	0	-0,01	0	-0,06	0

Аналогично рассчитываются коэффициенты a (табл. 4):

$$a_1 := \frac{1}{\pi} \int_0^{\frac{1}{6}\pi} 311.1 \cdot \sin(x) \cdot \cos(nx) dx \rightarrow$$

$$\rightarrow \frac{5388.41 \cdot \cos(0.52n) + 311.1 \cdot n \cdot \sin(0.52n) - 6222}{\pi(20n^2 - 20)},$$

$$n := 1,$$

$$a_1 := \frac{1}{\pi} \int_0^{\frac{1}{6}\pi} 311.1 \cdot \sin(x) \cdot \cos(nx) dx \rightarrow 12.38.$$

Коэффициенты a косинусных гармоник

№ гарм.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
a_1	12,38	9,87	6,19	1,97	-2,06	-5,28	-7,22	-7,7	-6,81	-4,9	-2,48	-0,09
a_2	0	-85,24	0	-17,05	0	4,87	0	12,18	0	7,75	0	-1,19
a_3	-12,38	9,87	-6,19	1,97	2,06	-5,28	7,22	-7,7	6,81	-4,9	2,48	-0,09
a_4	0	66,02	0	13,2	0	5,66	0	3,14	0	2	0	1,38
Σa	0	0,52	0	0,09	0	-0,03	0	-0,08	0	-0,05	0	0,01

В трехфазной нулевой схеме спектр наибольших гармоник дополняется четными гармониками с номерами 2, 4, 6, 8, 10.

Определяется коэффициент несинусоидальности:

$$K_u = \frac{(0,13 + 0,13 + 0,07 + 0,06 + 0,52 + 0,09 + 0,08 + 0,05) \cdot 1,1}{\sqrt{2} \cdot 220} \cdot 100\% = 0,4\% .$$

Для проверки получим уменьшение амплитуды фазного напряжения $\Delta U_{\phi} = 311,1 \cdot 0,004 = 1,24$ В, что значительно меньше значений полученных из выражения (10) равных $\Delta U_{\phi} = 22,46$ В. Не может быть коэффициент несинусоидальности 7,22 %, когда при протекании тока первичной обмотки трансформатора амплитуда напряжения уменьшается всего на 1,9 В.

Таким образом, предлагается разработанная методика расчета высших гармоник напряжения и определения коэффициента искажения синусоидальности кривой напряжения на основании разложения в ряд Фурье искаженной кривой синусоиды напряжения при работе трехфазных неуправляемых выпрямителей.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Жежеленко И.В., Шидловский А.К., Пивняк Г.Г. и др. Электромагнитная совместимость потребителей: моногр. – М.: Машиностроение, 2012. – 351 с.
2. Жежеленко И.В. Высшие гармоники в системах электроснабжения промпредприятий. – 6-е изд., перераб. и доп. – М: Энергоатомиздат, 2010. – 375 с., ил.
3. Артюхов И.И., Сошинов А.Г., Бочкарева И.И. Электромагнитная совместимость и качество электроэнергии: учеб. пособие. – Волгоград: ИУНЛ ВолгГТУ, 2015. – 124 с.
4. Будко С.И., Малышев С.А., Осипов В.С. Плавное регулирование температуры нагрева печи сопротивления с применением фильтра lineator для подавления высших гармоник // Сборник научных статей по материалам V Международной научно-практической конференции. 11 мая 2021 г., г. Уфа. – Уфа: Изд. НИЦ Вестник науки, 2021. – 236 с.
5. Янченко С.А., Гужов С.В. Работоспособность и качество функционирования электротехнических комплексов и систем в режимах несинусоидальности напряжения: учеб. пособие. – М.: Изд-во МЭИ, 2016. – 44 с.
6. Зимин Р.Ю. Повышение качества электроэнергии в электротехнических комплексах предприятий нефтедобычи гибридными фильтрокомпенсирующими устройствами: Дис. ... канд. техн. наук. – СПб: Санкт-Петербургский горный университет, 2020.
7. Куско А., Томпсон М. Качество энергии в электрических сетях / пер. с англ. А.Н. Рабодзян. – М.: Додэка-XXI, 2008. – 336 с.: ил.
8. Козлов В.Г. Электромагнитная совместимость РЭС: Учеб. пособие. – Томск: Томский гос. ун-т систем управления и радиоэлектроники, 2009.
9. Васильев Б.В., Аристов Е.В., Хузин Р.А. Исследование характеристик трехфазного мостового тиристорного преобразователя: Метод. руководство по курсу «Элементы систем автоматики» Пермь: Пермский гос. техн. ун-т, 2006.
10. Бар В.И. Основы преобразовательной техники: Курс лекций. – Тольятти: Тольяттинский гос. ун-т, 2002.

11. *Гельман М.В., Дудкин М.М., Преображенский К.А.* Преобразовательная техника: учеб. пособие. – Челябинск: Изд. центр ЮУрГУ, 2009. – 425 с.
12. *Янченко С.А., Гужов С.В.* Работоспособность и качество функционирования электротехнических комплексов и систем в режимах несинусоидальности напряжения. – М.: Изд-во МЭИ, 2016.
13. *Нестеров С.А.* Шестифазные схемы выпрямления // *Электроника и информационные технологии.* – Саранск: Мордовский гос. ун-т им. Н.П. Огарева, 2009. – № 2 (7).
14. *Крючкова И.В.* Ряды и преобразование Фурье: метод. указания. – Оренбург: Оренбургский гос. ун-т, 2011. – 59 с.
15. *Егорова Г.Ф., Павлова Г.А., Мазуренко И.А.* Ряды Фурье: практикум по математическому анализу. – Самара: Самар. гос. техн. ун-т, 2011. – 46 с.
16. *Романова Л.Д., Шаркунова Т.А., Елисева Т.В.* Интегральные преобразования: учеб. пособие. – Пенза: Изд-во ПГУ, 2015. – 80 с.
17. *Лоссов К.И.* Ряды Фурье: учеб. пособие. – М.: МИИГАиК, 2014. – 41 с.
18. *Копьтин И.И.* Методика расчета показателей качества электрической энергии. – Курган: Курганский гос. ун-т, 2011.
19. ГОСТ 13109–97. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения.
20. ГОСТ 32144–2013. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. – М.: Стандартинформ, 2014.

Статья поступила в редакцию 26 июля 2021 г.

METHOD OF CALCULATING THE DISTORTION COEFFICIENT SINUSOIDALITY OF THE VOLTAGE CURVE CREATED BY THREE-PHASE STRAIGHT LINES

*V.S. Osipov**

Samara State Technical University
244, Molodogvardeyskaya st., Samara, 443100, Russian Federation
E-mail: osipov_4343@mail.ru

Abstract. *The existing calculation methods in various sources represent rectifier installations as sources of higher harmonics. In this case, the current value of the primary winding of the transformer in the form of rectangles is decomposed into a Fourier series and harmonic components of the current are obtained, except for the main harmonic higher 5, 7, 11, 13, 17, 19. The amplitudes of the current of the higher harmonics are multiplied by the inductive resistances of the supply network corresponding to the frequencies, the results are squared and summed up. Obviously, all terms are of equal magnitude, since with an increase in the harmonic number, its amplitude decreases by n times compared to the first harmonic, while the frequency and inductive resistance increase by the same number of times. The non-sinusoidal coefficient K_u is defined as the ratio of the square root of the sum to the magnitude of the phase voltage. The disadvantage of determining K_u is some arbitrariness in the number of harmonics taken into account. If we take, for example, 9 harmonics, we get $K_u = 7.22\%$, if 4 harmonics, then $K_u = 4.81\%$. When the current of the primary winding of the transformer flows, the voltage amplitude on the substation tires decreases by only 1.9 V. At the same time, the coefficient of non-sinusoidality cannot be equal to 7.22%. In all literature sources, when calculating current harmonics, there are no recommendations for which harmonic numbers should be installed at the substation resonant filters. It is no coincidence that in the new GOST-2013, the value of the distortion coefficient of the sinusoidal voltage curve $K(U)$ is calculated as a percentage as a result of the i -th observation according to the formula, (that is, no calculation is made by current harmonics). In this paper, another approach is made to determine the distortion coefficient of the sinusoidal voltage curve. Rectifier installations are not sources of harmonics, but are electrical receivers with a nonlinear characteristic of electric current consumption, while the shape of the sinusoid curve of the supply voltage is distorted. This distorted sine wave is the source of the higher harmonics, which in this paper is decomposed into a Fourier series, while the calculation of the integral functions of the coefficients of the Fourier series is performed in the Mathcad program. The solution is made for three rectifier circuits. Harmonics for the installation of resonant filters are determined. As a result, a developed method is proposed for calculating the higher voltage harmonics and determining the distortion coefficient of the sinusoidal voltage curve based on the Fourier series expansion of the distorted voltage sine curve during operation of three-phase uncontrolled rectifiers.*

Keywords: *rectifier, coefficient, non-sinusoidal, current, voltage, higher harmonics, Fourier series.*

* Vyacheslav S. Osipov (Ph. D. (Techn.), Associate Professor

REFERENCES

1. *Zhezhenko I.V., Shidlovsky A.K., Pivnyak G.G., etc.* Electromagnetic compatibility of consumers: monogr. M.: Mashinostroenie, 2012. 351 p.
2. *Zhezhenko I.V.* Higher harmonics in power supply systems of industrial enterprises 6th ed., reprint. and add. M: Energoatomizdat, 2010. 375 p.
3. *Artyukhov I.I., Soshinov A.G., Bochkareva I.I.* Electromagnetic compatibility and power quality: textbook. stipend. Volgograd: IUNL VolgSTU, 2015. 124 p.
4. *Budko S.I., Malyshev S.A., Osipov V.S.* Smooth regulation of the heating temperature of a resistance furnace using a lineator filter to suppress higher harmonics // Collection of scientific articles based on the materials of the V International Scientific and Practical Conference. May 11, 2021, Ufa. Ufa: Ed. SIC Bulletin of Science, 2021. 236 p.
5. *Yanchenko S.A., Guzhov S.V.* Efficiency and quality of functioning of electrical complexes and systems in modes of non-sinusoidal voltage: textbook. manual. M.: Publishing House of the MEI, 2016. 44 p.
6. *Zimin R.Yu.* Improving the quality of electricity in electrical complexes of oil production enterprises with hybrid filter-compensating devices: Dis. ... candidate of Technical Sciences. St. Petersburg: St. Petersburg Mining University, 2020.
7. *Cusco A., Thompson M.* Energy quality in electric networks / translated from English by A.N. Rabodzyan. M.: Dodeka-XXI, 2008. 336 p.
8. *Kozlov V.G.* Electromagnetic compatibility of RES: Textbook. Tomsk: Tomsk State University of Control Systems and Radio Electronics, 2009.
9. *Vasiliev B.V., Aristov E.V., Khuzin R.A.* Investigation of the characteristics of a three-phase bridge thyristor converter: Method. course guide "Elements of automation systems". Perm: Perm State Technical University. 2006.
10. *Bar V.I.* Fundamentals of transformative technology: A course of lectures. Tolyatti: Togliatti State University, 2002.
11. *Gelman M.V., Dudkin M.M., Preobrazhensky K.A.* Transformative technique: textbook. stipend. Chelyabinsk: Publishing House of the SUSU Center, 2009. 425 p.
12. *Yanchenko S.A., Guzhov S.V.* Operability and quality of functioning of electrical complexes and systems in non-sinusoidal voltage modes. M.: Publishing House of MEI, 2016.
13. *Nesterov S.A.* Six-phase rectification schemes // Electronics and information technology. Saransk: Mordovian State University named after N.P. Ogarev, 2009. № 2 (7).
14. *Kryuchkova I.V.* Series and Fourier transform: method. instructions. Orenburg: Orenburg State University, 2011. 59 p.
15. *Egorova G.F., Pavlova G.A., Mazurenko I.A.* Fourier series: a workshop on mathematical analysis. Samara: Samara State Technical University. 2011. 46 p.
16. *Romanova L.D., Sharkunova T.A., Eliseeva T.V.* Integral transformations: textbook. stipend. Penza: Publishing house of PSU, 2015. 80 p.
17. *Lossov K.I.* Fourier series: studies. manual. M.: MIIGAiK, 2014. 41 p.
18. *Kopytin I.I.* Methodology for calculating the quality indicators of electric energy. Kurgan: Kurgan State University, 2011.
19. GOST 13109-97. Electrical energy. Electromagnetic compatibility of technical means. Standards for the quality of electrical energy in general-purpose power supply systems.
20. GOST 32144-2013. Electrical energy. Electromagnetic compatibility of technical means. Standards of quality of electric energy in general-purpose power supply systems. M.: Standartinform, 2014.

УДК 621.3.078

**АЛГОРИТМ РАСЧЕТА ОПТИМАЛЬНОЙ ВЕЛИЧИНЫ
НАПРЯЖЕНИЯ ПРОМЫСЛОВОЙ ПОДСТАНЦИИ*****А.В. Стариков¹, Т.В. Табачникова², А.А. Казанцев¹, И.А. Косорлуков¹**¹Самарский государственный технический университет
Россия, 443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244²Альметьевский государственный нефтяной институт
Россия, 423450, Республика Татарстан, г. Альметьевск, ул. Ленина, 2

E-mail: star58@mail.ru, tvtab@mail.ru, kazantzev@63.ru, kosorlukov@gmail.com

Аннотация. Статья посвящена повышению энергетической эффективности механизированной добычи за счет выбора оптимального уровня напряжения на промышленной подстанции, обеспечивающего требуемый критерий оптимизации. Рассмотрена неразветвленная отходящая от промышленной подстанции линия, осуществляющая питание произвольного количества электротехнических комплексов добывающих скважин. Показано, что эти комплексы могут содержать как погружные центробежные насосы, так и штанговые скважинные насосные установки, приводимые в действие асинхронными двигателями. Математические модели электротехнических комплексов добывающих скважин являются нелинейными и описываются дифференциальными уравнениями высокого порядка. Поэтому задачу поиска оптимального уровня напряжения промышленной подстанции можно решить только с помощью численных методов. Разработан алгоритм расчета оптимальной величины напряжения, учитывающий технологические особенности механизированной добычи нефти. Он представляет собой поисковый алгоритм, содержащий три внутренних цикла: вариации напряжения на самом удаленном от промышленной подстанции асинхронном двигателе, перебора узлов отходящей линии и уравнивания напряжения в узлах при изменении нагрузки электротехнических комплексов добывающих скважин. Приведены известные аналитические выражения для расчета активной, реактивной и полной нагрузки повышающих и понижающих трансформаторов, применяемых в рассматриваемых электротехнических комплексах, а также потерь мощности на этих элементах и на воздушных и кабельных линиях. Отличительной особенностью представленного алгоритма является расчет скорости погружных и наземных асинхронных двигателей при изменении напряжения питания с учетом механических характеристик центробежных и плунжерных насосов. Приведен пример расчета оптимальной величины напряжения промышленной подстанции, питающей гипотетическую отходящую линию с тремя узлами. Отмечено, что разработанный алгоритм представляет собой отражение методики выбора оптимального напряжения промышленной подстанции. Причем этот алгоритм

* Стариков Александр Владимирович, заведующий кафедрой «Электропривод и промышленная автоматика», д.т.н., профессор.

Табачникова Татьяна Владимировна, заведующий кафедрой «Электро- и теплоэнергетика», к.т.н., доцент.

Казанцев Александр Андреевич, старший преподаватель кафедры «Автоматизированные электроэнергетические системы».

Косорлуков Игорь Андреевич, докторант кафедры «Электропривод и промышленная автоматика», к.т.н.

может быть адаптирован под любую отходящую линию, какой бы сложной и разветвленной она ни была.

Ключевые слова: энергетическая эффективность, регулирование напряжения, погружной насос, погружной электродвигатель, удельное потребление электроэнергии.

Повышение энергетической эффективности механизированной добычи нефти является актуальной задачей, позволяющей минимизировать потребление электрической энергии на кубометр поднятой на поверхность жидкости. Пути решения этой задачи разнообразны и включают в себя энергоэффективный дизайн погружной установки [1, 2], разработку насосов, электродвигателей и трансформаторов с большим коэффициентом полезного действия, компенсацию потребляемой реактивной мощности [3] и другие направления [4, 5].

Целью проводимого исследования является решение задачи выбора оптимального значения напряжения промышленной подстанции (ПС), обеспечивающего минимум энергетических затрат при механизированной добыче нефти.

Рассмотрим отходящую от промышленной ПС линию, питающую электротехнические комплексы добывающих скважин (ЭКДС) (рис. 1).

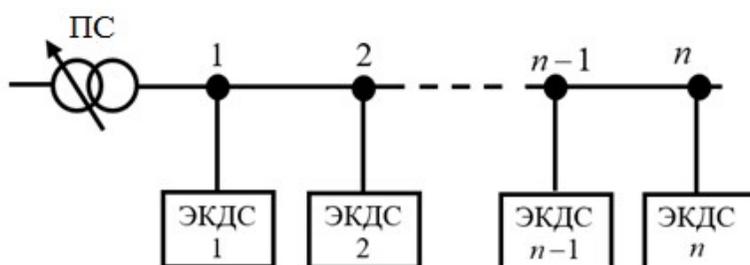


Рис. 1. Неразветвленная отходящая линия электротехнического комплекса добывающих скважин с произвольным числом узлов

Предположим, что отходящая линия нефтяного промысла является неразветвленной и содержит n узлов, к которым подключены ЭКДС, оснащенные погружными центробежными или штанговыми скважинными насосами.

В приводе центробежных насосов в основном применяются погружные электродвигатели (ПЭД), как правило, асинхронные [6]. Штанговые скважинные насосы оснащаются наземными асинхронными двигателями (АД) со стандартным напряжением 0,4 кВ (380 В). В отличие от этого все ПЭД являются высоковольтными с нестандартным номинальным напряжением. Поэтому электротехнический комплекс с погружным центробежным насосом включает в себя повышающий с 0,4 кВ до необходимого напряжения трансформатор, например типа ТМПН. Поскольку напряжение на выходе промышленной ПС, как правило, составляет 6 или 10 кВ, то в составе всех ЭКДС имеются понижающие до 0,4 кВ трансформаторы. Особенность погружных центробежных насосов заключается также в наличии кабеля большой длины, который соединяет ПЭД с повышающим трансформатором. Потери мощности на этом кабеле достигают существенных значений, поэтому перспективной тенденцией в настоящее время является установка на погружной двигатель конденсаторного устройства компенсации реактивной мощности, снижающего величину полного потребляемого тока.

Асинхронные двигатели, приводящие в движение насосы, потребляют как активную, так и реактивную мощность, причем зависимость потребляемой мощности от напряжения питания является существенно нелинейной. Поэтому вариация напряжения на выходе промышленной ПС приводит к изменению скорости вращения электродвигателей, производительности насосов, потребляемой активной и реактивной мощности, потерь в воздушных и кабельных линиях и трансформаторах. Нелинейной также является зависимость реактивной мощности, вырабатываемой конденсаторами, предназначенными для компенсации реактивной мощности. В связи с этим можно предположить, что существует такое напряжение промышленной подстанции, которое доставит минимум какому-либо энергетическому показателю.

Однако следует учитывать, что асинхронный двигатель описывается системой пяти нелинейных дифференциальных уравнений [7–14], аналитического решения которых принципиально не существует. Поэтому даже для выбора оптимального уровня напряжения питания одного двигателя необходимо пользоваться численными методами расчета. Задача определения оптимальной величины напряжения промышленной ПС еще более осложняется тем, что к одной отходящей линии может быть подключено 10 и более скважин и количество решаемых одновременно уравнений существенно возрастает. Поэтому принципиально расчет оптимальной величины напряжения на выходе промышленной подстанции должен производиться численными методами с привлечением того или иного программного продукта.

Для решения поставленной задачи был разработан алгоритм выбора оптимального напряжения промышленной ПС, питающей отходящую линию с ЭКДС (рис. 2). Алгоритм универсален, поскольку он позволяет удовлетворить любому выбранному критерию оптимизации с учетом особенности технологического процесса механизированной добычи нефти. Представленный алгоритм отражает методику расчета оптимального напряжения промышленной ПС, питающей отходящую линию, к которой подключены электротехнические комплексы добывающих скважин.

Исходными данными для расчета являются: количество узлов n ; производительности $Q_1 - Q_n$ насосов при номинальной скорости двигателей; коэффициенты $k_{M1} - k_{Mn}$ или $k_{M2.1} - k_{M2.n}$ механической характеристики в зависимости от типа насоса, применяемого в скважине; параметры Г-образной схемы замещения асинхронных двигателей $R_{2Г1} - R_{2Гn}$, $X_{k1} - X_{kn}$, $X_{m1} - X_{mn}$; скорости идеального холостого хода $\omega_{01} - \omega_{0n}$ и номинальные скорости $\omega_{ном1} - \omega_{номn}$ вращения двигателей; номинальные значения моментов двигателей $M_{ном1} - M_{номn}$, $M_{ном1} - M_{номn}$; моменты трогания $M_{0.1} - M_{0.n}$; минимально допустимые значения фазного напряжения двигателей $U_{1min.1} - U_{1min.n}$; шаг приращения напряжения двигателя самого удаленного узла $\Delta U_{1step.n}$; шаг приращения напряжения ΔU двигателей с 1-го до $(n-1)$ -го; максимально допустимое напряжение на статоре самого удаленного двигателя $U_{1max.n}$; коэффициенты полезного действия двигателей $\eta_1 - \eta_n$; коэффициенты передачи двигателей по отношению к изменению напряжения статора $k_{\partial y 1}^{U1} - k_{\partial y n}^{U1}$; паспортные данные повышающих и понижающих трансформаторов $S_{ном.ТМПН1} - S_{ном.ТМПНn}$; $U_{ном.ТМПН1} - U_{ном.ТМПНn}$; $\Delta P_{xx.ТМПН1} - \Delta P_{xx.ТМПНn}$; $\Delta P_{кз.ТМПН1} - \Delta P_{кз.ТМПНn}$; $\Delta Q_{xx.ТМПН1} - \Delta Q_{xx.ТМПНn}$; $\Delta Q_{кз.ТМПН1} - \Delta Q_{кз.ТМПНn}$; $k_{ТМПН1} - k_{ТМПНn}$; $S_{ном.nm1} -$

$S_{ном.лпн}$; $U_{ном.лп1} - U_{ном.лпн}$; $\Delta P_{ном.лп1} - \Delta P_{ном.лпн}$; $\Delta P_{кз.лп1} - \Delta P_{кз.лпн}$; $\Delta Q_{хх.лп1} - \Delta Q_{хх.лпн}$; $\Delta Q_{кз.лп1} - \Delta Q_{кз.лпн}$; $U_{к.лп1, \%} - U_{к.лпн, \%}$; $k_{лп1} - k_{лпн}$; активные и индуктивные сопротивления кабельных линий $R_{кз1} - R_{кзн}$, $X_{кз1} - X_{кзн}$; активные и индуктивные сопротивления воздушных линий $R_{л1} - R_{лн}$, $X_{л1} - X_{лн}$; активные и индуктивные сопротивления $R_{лс-1}$, $R_{1-2} - R_{(n-1)-n}$, $X_{лс-1}$, $X_{1-2} - X_{(n-1)-n}$ между узлами отходящей линии; реактивные сопротивления конденсаторных батарей, подключенных к статорным обмоткам асинхронных двигателей $X_{кз1} - X_{кзп}$.

Во втором блоке присваивается условный номер шага расчетов $i = -1$. Затем организуется цикл расчетов с вариацией напряжения на самом удаленном двигателе с погружным насосом. В третьем блоке (операторе присвоения) к предыдущему номеру шага расчета прибавляется 1. Поэтому расчет начинается при $i = 0$, и в четвертом операторе рассчитывается приращение фазного напряжения $\Delta U_{1n} = 0$ и находится напряжение на самом удаленном двигателе, подключенном к n -ому узлу отходящей линии:

$$U_{1n} = U_{1\min.n} + \Delta U_{1n} = U_{1\min.n}. \quad (1)$$

То есть на первом шаге расчетов принимается минимально допустимая величина фазного напряжения на самом удаленном двигателе, например на 10 % меньше номинального значения.

В шестом блоке переменной q , с помощью которой организуется цикл расчетов для каждого узла отходящей линии, присваивается значение $q = -1$. В седьмом блоке к предыдущему значению q прибавляется 1, то есть q становится равной 0. Следующий блок производит сравнение величины q с нулем, и поскольку на первом шаге этого цикла (цикла узлов) так оно и есть, то разработанная методика и алгоритм расчета отправляют нас к блоку 12. Если электродвигатель $(n - q)$ -го узла является погружным, то мы переходим к блоку 13.

Поэтому в блоке 13 производится последовательный расчет скорости вращения ПЭД [15]

$$\omega_{(n-q)} = \frac{-M_{ном(n-q)} \sqrt{M_{ном(n-q)}^2 + 4k_{M(n-q)} \left(\omega_{0(n-q)} - \omega_{ном(n-q)} - k_{\partial y(n-q)}^{U_1} \Delta U_{1(n-q)} \right) \times \left[M_{ном(n-q)} \omega_{0(n-q)} - \left(\omega_{0(n-q)} - \omega_{ном(n-q)} - k_{\partial y(n-q)}^{U_1} \Delta U_{1(n-q)} \right) M_{0(n-q)} \right]}}{2k_{M(n-q)} \left(\omega_{0(n-q)} - \omega_{ном(n-q)} - k_{\partial y(n-q)}^{U_1} \Delta U_{1(n-q)} \right)}; \quad (2)$$

фактического скольжения ротора

$$s_{(n-q)} = \frac{\omega_{0(n-q)} - \omega_{(n-q)}}{\omega_{0(n-q)}}; \quad (3)$$

потребляемой этим двигателем активной

$$P_{ПЭД(n-q)} = \frac{k_{M(n-q)} \omega_{(n-q)}^3 + M_{0(n-q)} \omega_{(n-q)}}{\eta_{(n-q)}} \quad (4)$$

и реактивной [16] мощности

$$Q_{ПЭД(n-q)} = 3U_{1(n-q)}^2 \left[\frac{s_{(n-q)}^2 X_{k(n-q)}}{R_{2\Gamma(n-q)}^2 + s_{(n-q)}^2 X_{k(n-q)}^2} + \frac{U_{1(n-q)}^v}{X_{m(n-q)}} - \frac{1}{X_{кз(n-q)}} \right]; \quad (5)$$

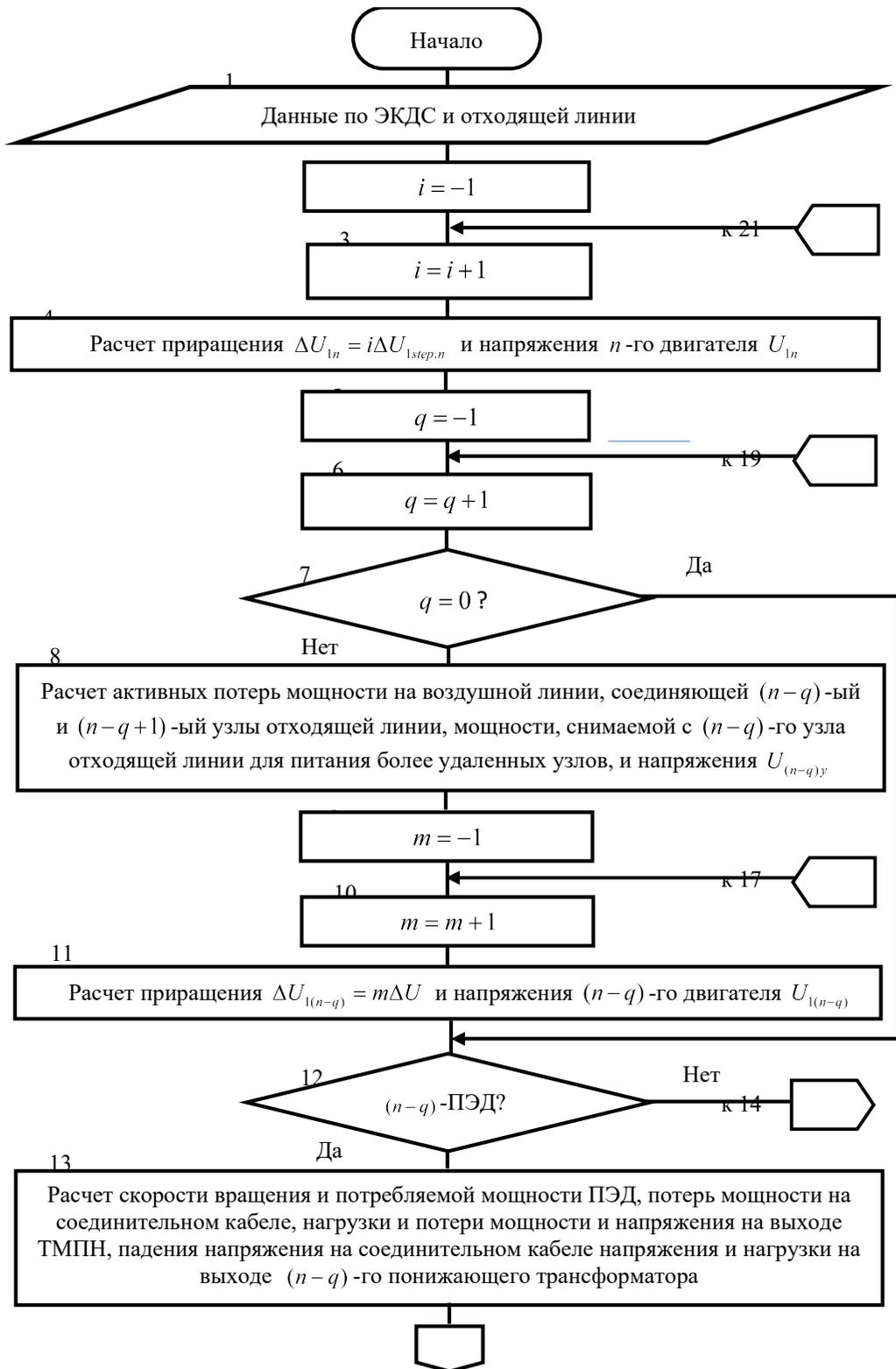


Рис. 2. Алгоритм расчета оптимального напряжения промышленной ПС, питающей отходящую линию с ЭКДС (начало)

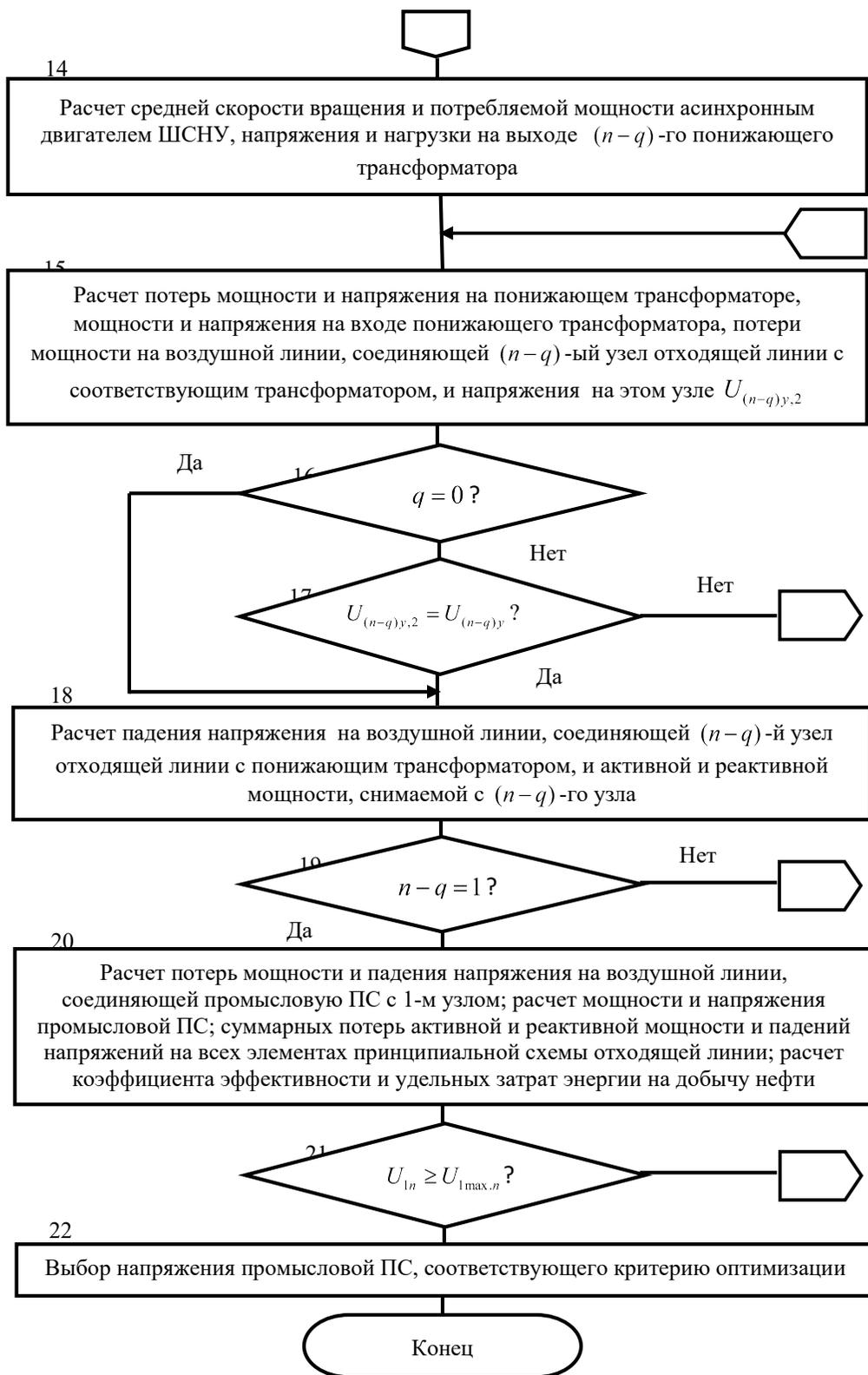


Рис. 2. Алгоритм расчета оптимального напряжения промышленной ПС, питающей отходящую линию с ЭКДС (окончание)

потерь активной и реактивной мощности на соединительном кабеле [16]

$$\Delta P_{к\lambda(n-q)} = \frac{(P_{ПЭД(n-q)}^2 + Q_{ПЭД(n-q)}^2) R_{к\lambda(n-q)}}{3U_{1(n-q)}^2}, \quad (6)$$

$$\Delta Q_{к\lambda(n-q)} = \frac{(P_{ПЭД(n-q)}^2 + Q_{ПЭД(n-q)}^2) X_{к\lambda(n-q)}}{3U_{1(n-q)}^2}. \quad (7)$$

В блоке 13 также рассчитывается активная, реактивная и полная нагрузка, снимаемая с выхода повышающего трансформатора

$$P_{ТМПН(n-q)} = P_{ПЭД(n-q)} + \Delta P_{к\lambda(n-q)}, \quad (8)$$

$$Q_{ТМПН(n-q)} = Q_{ПЭД(n-q)} + \Delta Q_{к\lambda(n-q)}, \quad (9)$$

$$S_{ТМПН(n-q)} = \sqrt{P_{ТМПН(n-q)}^2 + Q_{ТМПН(n-q)}^2}; \quad (10)$$

напряжение $U_{ТМПН(n-q)}$ на выходе ТМПН

$$U_{ТМПН(n-q)} = \sqrt{\left(\sqrt{3}U_{1(n-q)} + \frac{P_{ПЭД(n-q)}R_{к\lambda(n-q)} + Q_{ПЭД(n-q)}X_{к\lambda(n-q)}}{\sqrt{3}U_{1(n-q)}} \right)^2 + \left(\frac{P_{ПЭД(n-q)}X_{к\lambda(n-q)} - Q_{ПЭД(n-q)}R_{к\lambda(n-q)}}{\sqrt{3}U_{1(n-q)}} \right)^2}; \quad (11)$$

падение напряжения на соединительном кабеле

$$\Delta U_{к\lambda(n-q)} = U_{ТМПН(n-q)} - \sqrt{3}U_{1(n-q)}; \quad (12)$$

коэффициент загрузки, потери мощности и падение напряжения на этом трансформаторе

$$\beta_{ТМПН(n-q)} = \frac{S_{ТМПН(n-q)}}{10^3 S_{ном.ТМПН(n-q)}}, \quad (13)$$

$$\Delta P_{ТМПН(n-q)} = 10^3 \left(\Delta P_{xx.ТМПН(n-q)} + \beta_{ТМПН(n-q)}^2 \Delta P_{кз.ТМПН(n-q)} \right), \quad (14)$$

$$\Delta Q_{ТМПН(n-q)} = 10^3 \left(\Delta Q_{xx.ТМПН(n-q)} + \beta_{ТМПН(n-q)}^2 \Delta Q_{кз.ТМПН(n-q)} \right), \quad (15)$$

$$\Delta S_{ТМПН(n-q)} = \sqrt{\Delta P_{ТМПН(n-q)}^2 + \Delta Q_{ТМПН(n-q)}^2}, \quad (16)$$

$$\Delta U_{ТМПН(n-q)} = \frac{R_{ТМПН(n-q)}P_{ТМПН(n-q)} + X_{ТМПН(n-q)}Q_{ТМПН(n-q)}}{k_{ТМПН(n-q)}^2 U_{ТМПН(n-q)}}, \quad (17)$$

где

$$R_{ТМПН(n-q)} = \frac{10^3 \Delta P_{кз.ТМПН(n-q)} U_{ном.ТМПН(n-q)}^2}{S_{ном.ТМПН(n-q)}^2};$$

$$X_{ТМПН(n-q)} = 10U_{к.ТМПН(n-q),\%} \frac{U_{ном.ТМПН(n-q)}^2}{S_{ном.ТМПН(n-q)}}.$$

Затем расчет переходит в блок 15, в котором определяется напряжение

$$U_{2nm(n-q)} = \frac{U_{ТМПН(n-q)}}{k_{ТМПН(n-q)}} + \Delta U_{ТМПН(n-q)} \quad (18)$$

на выходе $(n-q)$ -го понижающего трансформатора, обеспечивающего требуемое напряжение $U_{1n} = U_{1\min.n} + \Delta U_{1n} = U_{1\min.n}$ на статоре ПЭД, и активная, реактивная и полная нагрузка понижающего трансформатора

$$P_{2nm(n-q)} = P_{ТМПН(n-q)} + \Delta P_{ТМПН(n-q)}, \quad (19)$$

$$Q_{2nm(n-q)} = Q_{ТМПН(n-q)} + \Delta Q_{ТМПН(n-q)}, \quad (20)$$

$$S_{2nm(n-q)} = \sqrt{P_{2nm(n-q)}^2 + Q_{2nm(n-q)}^2}. \quad (21)$$

Если асинхронный двигатель самого удаленного насоса принадлежит ШСНУ, то расчет происходит по другой ветви представленного алгоритма и из блока 12 мы переходим в блок 14, где определяется средняя скорость $\omega_{(n-q)}$ двигателя за период качания

$$\omega_{(n-q)} = \frac{M_{ном(n-q)}\omega_{0(n-q)} - M_{0(n-q)}(\omega_{0(n-q)} - \omega_{ном(n-q)} - k_{\partial y(n-q)}^{U_1}\Delta U_{1(n-q)})}{M_{ном(n-q)} + k_{M2(n-q)}(\omega_{0(n-q)} - \omega_{ном(n-q)} - k_{\partial y(n-q)}^{U_1}\Delta U_{1(n-q)})}. \quad (22)$$

Затем в блоке 14 происходит последовательное вычисление среднего скольжения $S_{(n-q)}$, потребления двигателем ШСНУ активной $P_{АД(n-q)}$ и реактивной $Q_{АД(n-q)}$ мощности по формулам с точностью до обозначения, повторяющим выражения (3) – (5). Далее в этом же блоке происходит расчет напряжения и нагрузки понижающего трансформатора

$$U_{2nm(n-q)} = \sqrt{3}U_{1(n-q)}, \quad (23)$$

$$P_{2nm(n-q)} = P_{АД(n-q)}, \quad (24)$$

$$Q_{2nm(n-q)} = Q_{АД(n-q)}, \quad (25)$$

$$S_{2nm(n-q)} = \sqrt{P_{АД(n-q)}^2 + Q_{АД(n-q)}^2}. \quad (26)$$

Из блоков 13 и 14 алгоритм приводит нас в блок 15, в котором по формулам с точностью до обозначения, повторяющим выражения (13) – (16), производится расчет коэффициента загрузки $\beta_{nm(n-q)}$ и потерь мощности $\Delta P_{nm(n-q)}$, $\Delta Q_{nm(n-q)}$, $\Delta S_{nm(n-q)}$ на понижающем трансформаторе. В блоке 15 также определяются активная, реактивная и полная мощность на входе понижающего трансформатора и падение напряжения на нем:

$$P_{1nm(n-q)} = P_{2nm(n-q)} + \Delta P_{nm(n-q)}, \quad (27)$$

$$Q_{1nm(n-q)} = Q_{2nm(n-q)} + \Delta Q_{nm(n-q)}, \quad (28)$$

$$S_{1nm(n-q)} = \sqrt{P_{1nm(n-q)}^2 + Q_{1nm(n-q)}^2}, \quad (29)$$

$$\Delta U_{nm(n-q)} = \frac{R_{nm(n-q)}P_{nm(n-q)} + X_{nm(n-q)}Q_{nm(n-q)}}{k_{nm(n-q)}^2 U_{nm(n-q)}}, \quad (30)$$

$$\text{где } R_{nm(n-q)} = \frac{10^3 \Delta P_{кз.нм(n-q)} U_{ном.нм(n-q)}^2}{S_{нм(n-q)}^2}; \quad X_{nm(n-q)} = 10U_{к.нм(n-q),\%} \frac{U_{ном.нм(n-q)}^2}{S_{ном.нм(n-q)}}.$$

Далее в блоке 15 находится напряжение $U_{1nm(n-q)}$ на входе понижающего трансформатора

$$U_{1nm(n-q)} = U_{2nm(n-q)} k_{nm(n-q)} + \Delta U_{nm(n-q)}, \quad (31)$$

потери активной $\Delta P_{л(n-q)}$ и реактивной $\Delta Q_{л(n-q)}$ мощности на воздушной линии, соединяющей $(n-q)$ -й узел отходящей линии с соответствующим трансформатором, и напряжение $U_{(n-q)y,2}$ на этом узле:

$$\Delta P_{л(n-q)} = \frac{S_{1nm(n-q)}^2 R_{л(n-q)}}{U_{1nm(n-q)}^2}, \quad (32)$$

$$\Delta Q_{л(n-q)} = \frac{S_{1nm(n-q)}^2 X_{л(n-q)}}{U_{1nm(n-q)}^2}, \quad (33)$$

$$U_{(n-q)y,2} = \sqrt{\left(U_{1mn(n-q)} + \frac{P_{1mn(n-q)} R_{л(n-q)} + Q_{1mn(n-q)} X_{л(n-q)}}{U_{1mn(n-q)}} \right)^2 + \left(\frac{P_{1mn(n-q)} X_{л(n-q)} - Q_{1mn(n-q)} R_{л(n-q)}}{U_{1mn(n-q)}} \right)^2}. \quad (34)$$

Если идет первый шаг цикла узлов, то есть $q = 0$, то в алгоритме расчета происходит переход в блок 18, где производится расчет падения напряжения $\Delta U_{л(n-q)}$ на воздушной линии, соединяющей $(n-q)$ -й узел отходящей линии с понижающим трансформатором:

$$\Delta U_{л(n-q)} = U_{(n-q),2} - U_{1mn(n-q)}. \quad (35)$$

Затем в блоке 18 находится активная и реактивная мощность, снимаемая с $(n-q)$ -го узла:

$$P_{(n-q)} = P_{(n-q+1)} + P_{1nm(n-q)} + \Delta P_{л(n-q)}, \quad (36)$$

$$Q_{(n-q)} = Q_{(n-q+1)} + Q_{1nm(n-q)} + \Delta Q_{л(n-q)}, \quad (37)$$

и поскольку на первом шаге цикла узлов $(n-q) \neq 1$, то в алгоритме расчета оптимального напряжения промышленной ПС происходит переход в блок 6, где начинается новый шаг в цикле узлов. В этом случае $q \neq 0$, поэтому в блоке 8 вычисляются активные $\Delta P_{л(n-q),(n-q+1)}$ и реактивные $\Delta Q_{л(n-q),(n-q+1)}$ потери мощности на воздушной линии, соединяющей $(n-q)$ -й и $(n-q+1)$ -й узлы отходящей линии:

$$\Delta P_{л(n-q),(n-q+1)} = \frac{(P_{(n-q+1)}^2 + Q_{(n-q+1)}^2) R_{л(n-q),(n-q+1)}}{U_{(n-q+1)}^2}, \quad (38)$$

$$\Delta Q_{л(n-q),(n-q+1)} = \frac{(P_{(n-q+1)}^2 + Q_{(n-q+1)}^2) X_{л(n-q),(n-q+1)}}{U_{(n-q+1)}^2}. \quad (39)$$

Далее в блоке 8 определяются значения активной $P_{(n-q),(n-q+1)}$ и реактивной $Q_{(n-q),(n-q+1)}$ мощности, снимаемой с $(n-q)$ -го узла отходящей линии для питания более удаленных узлов, и напряжение $U_{(n-q)y}$ на узле с номером $(n-q)$:

$$P_{(n-q),(n-q+1)} = P_{(n-q+1)} + \Delta P_{л(n-q),(n-q+1)}, \quad (40)$$

$$Q_{(n-q),(n-q+1)} = Q_{(n-q+1)} + \Delta Q_{л(n-q),(n-q+1)}, \quad (41)$$

$$U_{(n-q)y} = \sqrt{\left(U_{(n-q+1)} + \frac{P_{(n-q+1)} R_{l(n-q),(n-q+1)} + Q_{(n-q+1)} X_{l(n-q),(n-q+1)}}{U_{(n-q+1)}} \right)^2 + \left(\frac{P_{(n-q+1)} X_{l(n-q),(n-q+1)} - Q_{(n-q+1)} R_{l(n-q),(n-q+1)}}{U_{(n-q+1)}} \right)^2}. \quad (42)$$

Затем алгоритм расчета переходит в блок 9, где переменной m присваивается начальное значение $m = -1$, после чего в блоке 10 к этому значению прибавляется 1 и начинается цикл подбора напряжения на статоре $(n - q)$ -го асинхронного двигателя, которое должно быть при напряжении $U_{(n-q)y}$. Поэтому в блоке 11 рассчитывается в зависимости от величин m и ΔU значение фазного напряжения на статоре $(n - q)$ -го асинхронного двигателя:

$$U_{1(n-q)} = U_{\min.(n-q)} + m\Delta U. \quad (43)$$

Далее вычислительные процедуры переходят в блок 12 и повторяются те же самые расчеты, которые были при $q = 0$. Единственная отличительная особенность вычислений при $q \neq 0$ заключается в том, что после блока 16 происходит переход в блок 17, где сравниваются значения $U_{(n-q)y,2}$ с $U_{(n-q)y}$. Если они не совпадают, то опять происходит переход в блок 10 и повторяются все расчеты, пока $U_{(n-q)y,2}$ и $U_{(n-q)y}$ не совпадут с некоторой незначительной погрешностью.

При совпадении $U_{(n-q)y,2}$ с $U_{(n-q)y}$ вычислительные процедуры переходят в блоки 18 и 19, и затем циклы узлов и подбора напряжения на статоре $(n - q)$ -го асинхронного двигателя повторяются до тех пор, пока в блоке 19 не зафиксируется значение $(n - q) = 1$, подтверждающее, что расчеты по всем узлам отходящей линии завершены.

После этого алгоритм приводит нас в блок 20, где происходит последовательный расчет активных $\Delta P_{ПС}$ и реактивных $\Delta Q_{ПС}$ потерь мощности на воздушной линии, соединяющей промышленную ПС питания с 1-м узлом отходящей линии, активной $P_{ПС}$, реактивной $Q_{ПС}$ и полной $S_{ПС}$ мощности и напряжения $U_{ПС}$ промышленной ПС:

$$\Delta P_{ПС} = \frac{(P_1^2 + Q_1^2) R_{ПС-1}}{U_{1y}^2}, \quad (44)$$

$$\Delta Q_{ПС} = \frac{(P_1^2 + Q_1^2) X_{ПС-1}}{U_{1y}^2}, \quad (45)$$

$$P_{ПС} = P_1 + \Delta P_{ПС}, \quad (46)$$

$$Q_{ПС} = Q_1 + \Delta Q_{ПС}, \quad (47)$$

$$S_{ПС} = \sqrt{P_{ПС}^2 + Q_{ПС}^2}, \quad (48)$$

$$U_{ПС} = \sqrt{\left(U_{1y} + \frac{P_1 R_{ПС-1} + Q_{ПС} X_{ПС-1}}{U_{1y}} \right)^2 + \left(\frac{P_1 X_{ПС-1} - Q_1 R_{ПС-1}}{U_{1y}} \right)^2}. \quad (49)$$

Затем в блоке 20 вычисляются падение напряжения

$$\Delta U_{ПС-1} = U_{ПС} - U_{(n-q)y,2} \quad (50)$$

на воздушной линии, соединяющей центр питания с первым узлом, суммарные потери активной ΔP и реактивной ΔQ мощности; сумма падений напряжений ΔU на всех элементах принципиальной схемы отходящей линии. Минимизация этих потерь может выступать в качестве одного из критериев оптимизации.

Однако следует заметить, что вариация напряжения на асинхронных двигателях погружных насосов в соответствии с формулами (2) и (22) приводит к изменению производительности этих насосов и суммарного дебита Q всех скважин, подключенных к рассматриваемой отходящей линии. Суммарный дебит может быть подсчитан по формуле

$$Q = \sum_{k=1}^n \frac{Q_k \omega_k}{\omega_{номk}} \quad (51)$$

Отсюда можно ввести в рассмотрение коэффициент эффективности $k_{эф}$ и удельные затраты энергии E_1 и E_2 , которые также рассчитываются в блоке 20 по формулам

$$k_{эф} = \frac{Q}{P_{ПС}}, \quad (52)$$

$$E_1 = \frac{24P_{ПС}}{Q}, \quad (53)$$

$$E_2 = \frac{24S_{ПС}}{Q}. \quad (54)$$

Далее алгоритм переходит в блок 21, где сравнивается напряжение на самом удаленном двигателе с максимально допустимым значением $U_{1,max,n}$. Если оно не достигнуто, то происходит переход в третий блок и выполняются все описанные выше расчеты для другого напряжения на статоре самого удаленного двигателя.

После перебора всех возможных значений $U_{1,n}$ с шагом $\Delta U_{1step,n}$ вычислительные процедуры заканчиваются и в блоке 22 происходит выбор оптимального значения напряжения промышленной подстанции, соответствующего требуемому критерию оптимизации.

Отличительная особенность разработанной методики и алгоритма расчета оптимальной величины напряжения промышленной ПС заключается в том, что она учитывает технологические аспекты механизированной добычи нефти, а именно нагрузочные характеристики погружных насосов разных типов.

Процесс вычисления оптимального уровня напряжения легко автоматизируется, поскольку представленный выше алгоритм может быть реализован, например, в программе MathCAD.

Для примера приведем результаты расчета оптимальной величины напряжения на промышленной подстанции для гипотетической отходящей линии нефтяного промысла с количеством узлов $n = 3$. К первому и третьему узлам подключены ЭКДС с центробежными насосами и ПЭД, ко второму – ШСНУ. Рассматриваемые ЭКДС имеют следующие необходимые для расчета параметры:

$$Q_1 = 130 \text{ м}^3/\text{сутки}, \quad Q_2 = 5,8 \text{ м}^3/\text{сутки}, \quad Q_3 = 87 \text{ м}^3/\text{сутки};$$

$$k_{M1} = 1,328 \cdot 10^{-3} \text{ Нмс}^2/\text{рад}, \quad k_{M2,2} = 0,6264 \text{ Нмс}/\text{рад}, \quad k_{M3} = 1,401 \cdot 10^{-3} \text{ Нмс}^2/\text{рад};$$

$$R_{2r1} = R_{2r3} = 1,868 \text{ Ом}, \quad R_{2r2} = 0,075 \text{ Ом};$$

$$\begin{aligned}
X_{k1} &= X_{k3} = 6,884 \text{ Ом}, X_{k2} = 0,887 \text{ Ом}; \\
X_{m1} &= X_{m3} = 68,414 \text{ Ом}, X_{m2} = 7,646 \text{ Ом}; \\
\omega_{01} &= \omega_{03} = 314,16 \text{ рад/с}, \omega_{02} = 78,54 \text{ рад/с}; \\
\omega_{ном1} &= \omega_{ном3} = 296,88 \text{ рад/с}, \omega_{ном2} = 76,97 \text{ рад/с}; \\
M_{ном1} &= M_{ном3} = 151,58 \text{ Нм}, M_{ном2} = 480,71 \text{ Нм}; \\
M_{0.1} &= M_{0.3} = 8,83 \text{ Нм}, M_{0.2} = 24,04 \text{ Нм}; \\
U_{1\text{min}.1} &= U_{1\text{min}.3} = 727,46 \text{ В}, U_{1\text{min}.2} = 207,85 \text{ В}; \\
\Delta U_{1\text{step}.3} &= 20,207 \text{ В}, \Delta U = 0,01 \text{ В}; U_{1\text{max}.3} = 889,12 \text{ В}; \\
\eta_1 &= \eta_3 = 0,81, \eta_2 = 0,92; \\
k_{\text{дв}1}^{U1} &= k_{\text{дв}3}^{U1} = 0,0511 \text{ рад/Вс}, k_{\text{дв}2}^{U1} = 0,0039 \text{ рад/Вс}; \\
S_{ном.ТМПП1} &= S_{ном.ТМПП3} = 100 \text{ кВА}; \\
U_{ном.ТМПП1} &= U_{ном.ТМПП3} = 0,4 \text{ кВ}; \\
\Delta P_{\text{хх.ТМПП1}} &= \Delta P_{\text{хх.ТМПП3}} = 0,31 \text{ кВт}; \Delta P_{\text{кз.ТМПП1}} = \Delta P_{\text{кз.ТМПП3}} = 2,4 \text{ кВт}; \\
\Delta Q_{\text{хх.ТМПП1}} &= \Delta Q_{\text{хх.ТМПП3}} = 2,2 \text{ кВАр}; \Delta Q_{\text{кз.ТМПП1}} = \Delta Q_{\text{кз.ТМПП3}} = 5,5 \text{ кВАр}; \\
U_{\text{к.ТМПП1},\%} &= U_{\text{к.ТМПП3},\%} = 5,5\%; \\
k_{\text{ТМПП1}} &= k_{\text{ТМПП3}} = 3,65; \\
S_{ном.нм1} &= S_{ном.нм2} = S_{ном.нм3} = 63 \text{ кВА}; \\
U_{ном.нм1} &= U_{ном.нм2} = U_{ном.нм3} = 0,4 \text{ кВ}; \\
\Delta P_{ном.нм1} &= \Delta P_{ном.нм2} = \Delta P_{ном.нм3} = 0,22 \text{ кВт}; \\
\Delta P_{\text{кз.нм1}} &= \Delta P_{\text{кз.нм2}} = \Delta P_{\text{кз.нм3}} = 1,28 \text{ кВт}; \\
\Delta Q_{\text{хх.нм1}} &= \Delta Q_{\text{хх.нм2}} = \Delta Q_{\text{хх.нм3}} = 1,512 \text{ кВАр}; \\
\Delta Q_{\text{кз.нм1}} &= \Delta Q_{\text{кз.нм2}} = \Delta Q_{\text{кз.нм3}} = 2,835 \text{ кВАр}; \\
U_{\text{к.нм1},\%} &= U_{\text{к.нм2},\%} = U_{\text{к.нм3},\%} = 4,5\%; \\
k_{\text{нм1}} &= k_{\text{нм2}} = k_{\text{нм3}} = 15; \\
R_{\text{кл1}} &= 0,994 \text{ Ом}, R_{\text{кл3}} = 1,191 \text{ Ом}; \\
X_{\text{кл1}} &= 0,166 \text{ Ом}, X_{\text{кл3}} = 0,199 \text{ Ом}; \\
R_{\text{л1}} &= 0,248 \text{ Ом}, R_{\text{л2}} = 0,207 \text{ Ом}, R_{\text{л3}} = 0,207 \text{ Ом}; \\
X_{\text{л1}} &= 0,206 \text{ Ом}, X_{\text{л2}} = 0,172 \text{ Ом}, X_{\text{л3}} = 0,172 \text{ Ом}; \\
R_{\text{ПС-1}} &= 1,024 \text{ Ом}, R_{\text{1-2}} = 0,449 \text{ Ом}, R_{\text{2-3}} = 0,299 \text{ Ом}; \\
X_{\text{ПС-1}} &= 0,828 \text{ Ом}, X_{\text{1-2}} = 0,372 \text{ Ом}, X_{\text{2-3}} = 0,248 \text{ Ом}.
\end{aligned}$$

Предположим, что погружные асинхронные двигатели оснащены индивидуальными конденсаторными устройствами для компенсации реактивной мощности с реактивными сопротивлениями $X_{\text{кв}1} = X_{\text{кв}3} = 70,771 \text{ Ом}$.

В соответствии с разработанной методикой и алгоритмом произведены расчеты по формулам (1) – (54), результаты которых приведены в табл. 1, 2.

Таблица 1

Зависимость потребляемой мощности от промышленной подстанции и суммарных потерь мощности в трансформаторах и кабельных и воздушных линиях от уровня напряжения

$U_{пс}$, В	ΔU_3 , %	ΔP , кВт	ΔQ , кВАр	$P_{пс}$, кВт	$Q_{пс}$, кВАр
5385	-10	8,163	16,762	108,192	55,136
5664	-5	7,925	16,838	109,402	55,893
5804	-2,5	7,823	16,883	110,041	56,161
5944	0	7,731	16,933	110,771	56,365
6089	2,5	7,982	17,443	111,714	68,077
6230	5	7,915	17,52	112,424	68,777
6512	10	7,809	17,693	113,905	70,119

Таблица 2

Зависимость суточной добычи нефти, коэффициента эффективности и удельных затрат электроэнергии от уровня напряжения промышленной подстанции

$U_{пс}$, В	Q , м ³ /сут	$k_{эф} = \frac{Q}{P_{пс}}$, м ³ /сут·кВт	$E_1 = \frac{24P_{пс}}{Q}$, кВт·час/м ³	$S_{пс}$, кВА	$E_2 = \frac{24S_{пс}}{Q}$, кВА·час/м ³
5385	222,194	2,054	11,686	121,431	13,116
5664	223,359	2,042	11,755	122,853	13,201
5804	223,95	2,035	11,793	123,544	13,24
5944	224,546	2,028	11,832	124,224	13,277
6089	225,148	2,015	11,908	130,822	13,945
6230	225,758	2,008	11,952	131,793	14,011
6512	226,994	1,993	12,043	133,757	14,142

Анализ полученных данных позволяет сделать выбор оптимальной величины напряжения промышленной ПС. Если в качестве критерия оптимизации взять минимум активных потерь в трансформаторах и воздушных и кабельных линиях, то оптимальным будет напряжение 5944 В. Если же требуется обеспечить минимум потребления активной, полной мощности и удельного потребления электрической энергии, то оптимальным будет напряжение на промышленной ПС, равное $U_{пс} = 5385$ В.

Приведенный пример расчета соответствует простейшему виду отходящей линии, приведенному на рис. 1. Однако разработанный алгоритм легко адаптируется и под разветвленную отходящую линию, когда к одному узлу подключено несколько ЭКДС. Он также может быть применен и для расчета оптимального напряжения промышленной подстанции, питающей несколько отходящих линий.

Для реализации требуемого оптимального напряжения на промышленных подстанциях должны применяться трансформаторы, позволяющие производить регулировку под нагрузкой. При этом следует учитывать дискретность регулирования напряжения как по уровню, так и по времени.

Выводы

1. Разработанная методика и алгоритм расчета оптимального уровня напряжения на промышленной ПС являются универсальными с позиции обеспечения оптимума по любому возможному энергетическому критерию оптимизации.

2. Алгоритм расчета может быть адаптирован под любую отходящую линию с электротехническими комплексами добывающих скважин, какой бы сложной и разветвленной она ни была.

3. Для повышения энергетической эффективности механизированной добычи нефти необходимо использовать промысловые подстанции с трансформаторами, обеспечивающими регулирование напряжения под нагрузкой.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Тарасов В.П.* Энергосберегающий дизайн УЭЦН // Инженерная практика. – 2010. – № 3. – С. 26–32.
2. *Мартюшев Д.Н.* Комплексный подход к энергоэффективности при добыче нефти УЭЦН // Инженерная практика. – 2011. – № 6. – С. 72–77.
3. *Табачникова Т.В.* Индивидуальная компенсация реактивной мощности электротехнического комплекса добывающей скважины с электроцентробежным насосом / Т.В. Табачникова, Р.И. Гарифуллин, Э.Д. Нурбосынов, А.В. Махт // Промышленная энергетика. – 2015. – № 2. – С. 44–47.
4. *Ивановский В.Н.* Энергетика добычи нефти: основные направления оптимизации энергопотребления // Инженерная практика. – 2011. – № 6. – С. 18–26.
5. *Афанасьев Н.В.* Совершенствование режима напряжения и электропотребления в условиях предприятий нефтедобычи / Н.В. Афанасьев, И.А. Чернявская, Д.Н. Нурбосынов // Нефть Татарстана. – 1999. – № (1–2). – С. 64–67.
6. Погружное оборудование и комплексный сервис // Технический каталог. – № 3. – М.: ГК «Римера», 2014. – 203 с.
7. *Анучин А.С.* Системы управления электроприводов. – М.: Изд. дом МЭИ, 2015. – 373 с.
8. *Михайлов О.П.* Автоматизированный электропривод станков и промышленных роботов. – М.: Машиностроение, 1990. – 304 с.
9. *Соколовский Г.Г.* Электроприводы переменного тока с частотным регулированием. – М.: Академия, 2006. – 265 с.
10. *Стариков А.В.* Линеаризованная математическая модель асинхронного электродвигателя как объекта системы частотного управления // Вестник Самарского государственного технического университета. Серия: Физико-математические науки. – 2002. – № 16. – С. 175–180.
11. *Галицков С.Я., Галицков К.С., Масляницын А.П.* Динамика асинхронного двигателя: Учеб. пособие. – Самара: СамГАСА, 2004. – 104 с.
12. *Кузнецов В.А., Мигачев А.В., Стариков А.В., Титов А.Р.* Особенности математической модели асинхронного электродвигателя аппаратов воздушного охлаждения масла // Вестник Самарского государственного технического университета. Серия: Технические науки. – 2011. – № 3 (31). – С. 171–179.
13. *Яруллин Р.Б., Линенко А.В.* К вопросу динамической характеристики асинхронного двигателя // Электротехнические и информационные комплексы и системы. – 2013. – № 2. Т. 9. – С. 42–46.
14. *Стариков А.В., Лисин С.Л., Табачникова Т.В., Косорлуков И.А., Беляева О.С.* Линеаризованная математическая модель погружного асинхронного двигателя // Вестник Самарского государственного технического университета. Серия: Технические науки. – 2019. – № 4 (64). – С. 155–167.
15. *Starikov A., Tabachnikova T., Kosorlukov I.* Calculation of the Rotation Speed of a Submersible Induction Motor for the Tasks of Determining the Optimal Value of the Supply Voltage // 2020 International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies (FarEastCon). DOI: 10.1109/FarEastCon50210.2020.9271308/
16. *Вайнштейн Р.А., Коломиец Н.В., Шестакова В.В.* Основы управления режимами энергосистем по частоте и активной мощности, по напряжению и реактивной мощности: учеб. пособие. – Томск: Изд-во Томского политехн. ун-та, 2010. – 96 с.

Статья поступила в редакцию 2 августа 2021 г.

ALGORITHM FOR CALCULATING THE OPTIMAL VALUE OF THE FIELD SUBSTATION VOLTAGE*

A.V. Starikov¹, T.V. Tabachnikova², A.A. Kazantsev¹, I.A. Kosorlukov¹

¹Samara State Technical University
244, Molodogvardeyskaya st., Samara, 443100, Russian Federation

²Almetyevsk State Oil Institute
2, Lenin's st., Almetyevsk, Tatarstan, 423450, Russian Federation

E-mail: star58@mail.ru, tvtab@mail.ru, kazantzev@63.ru, kosorlukov@gmail.com

Abstract. *The article is devoted to improving the energy efficiency of mechanized mining by selecting the optimal voltage level at the field substation, which provides the required optimization criterion. An unbranched line extending from the field substation, which supplies an arbitrary number of electrical complexes of producing wells, is considered. It is shown that these complexes can contain both submersible centrifugal pumps and rod borehole pumping units driven by asynchronous motors. Mathematical models of electrical complexes of producing wells are nonlinear and are described by high-order differential equations. Therefore, the problem of finding the optimal voltage level of a field substation can only be solved using numerical methods. An algorithm for calculating the optimal voltage value is developed, taking into account the technological features of mechanized oil production. It is a search algorithm that contains three internal cycles: voltage variations at the asynchronous motor farthest from the field substation, sorting out the nodes of the outgoing line, and equalizing the voltage at the nodes when the load of the electrical complexes of the producing wells changes. Well-known analytical expressions are given for calculating the active, reactive and full load of step-up and step-down transformers used in the considered electrical complexes, as well as power losses on these elements and on air and cable lines. A distinctive feature of the presented algorithm is the calculation of the speed of submersible and ground asynchronous motors when the supply voltage changes, taking into account the mechanical characteristics of centrifugal and plunger pumps. An example of calculating the optimal voltage value of a field substation feeding a hypothetical outgoing line with three nodes is given. It is noted that the developed algorithm is a reflection of the method of choosing the optimal voltage of the field substation. Moreover, this algorithm can be adapted to any outgoing line, no matter how complex and branched it is.*

Keywords: *energy efficiency, voltage regulation, submersible pump, submersible electric motor, specific power consumption.*

REFERENCES

1. *Tarasov V.P.* Energy-saving design of ESP // Engineering practice. 2010. No. 3. P. 26–32.
2. *Martyushev D.N.* An integrated approach to energy efficiency in oil production ESP // Engineering practice. 2011. No. 6. P. 72–77.
3. *Tabachnikova T.V.* Individual compensation of reactive power of the electrical complex of a production well with an electric centrifugal pump / T.V. Tabachnikova, R.I. Garifullin, E. D. Nurbosynov, A.V. Macht // Monthly production and technical journal "Industrial Energy". 2015. No. 2. P. 44–47.

* *Alexander V. Starikov (Dr. Sci. (Techn.)), Professor.
Tatyana V. Tabachnikova (Ph. D. (Techn.)), Associate Professor.
Alexander A. Kazantsev, Senior Lecturer.
Igor A. Kosorlukov (Ph. D. (Techn.)), Doctoral Student.*

4. *Ivanovsky V.N.* Oil production energy: main directions of energy consumption optimization // Engineering practice. 2011. No. 6. P. 18–26.
5. *Afanasyev N.V., Chernyavskaya I.A., Nurbosynov D.N.* Improvement of the voltage regime and power consumption in the conditions of oil production enterprises // Oil of Tatarstan. 1999. No. (1–2). P. 64–67.
6. Submersible equipment and integrated service // Technical catalog No. 3. Moscow: Rimera Group of Companies, 2014. 203 p.
7. *Anuchin A.S.* Electric drive control systems. M.: Publishing house MEI, 2015. 373 p.
8. *Mikhailov O.P.* Automated electric drive of machine tools and industrial robots. M.: Mashinostroenie, 1990. 304 p.
9. *Sokolovsky G.G.* AC electric drives with frequency regulation. M.: Academy, 2006. 265 p.
10. *Starikov A.V.* Linearized mathematical model of an asynchronous electric motor as an object of a frequency control system // Bulletin of the Samara State Technical University. Series "Physics and Mathematics", 2002, Issue 16. Pp. 175–180.
11. *Galitskov S.Ya., Galitskov K.S., Maslyanitsyn A.P.* Dynamics of an induction motor: a tutorial. Samara: SamGASA, 2004. 104 p.
12. *Kuznetsov V.A., Migachev A.V., Starikov A.V., Titov A.R.* Features of the mathematical model of an asynchronous electric motor for oil air coolers // Bulletin of the Samara State Technical University. Series "Technical Sciences", 2011, No. 3 (31). S. 171–179.
13. *Yarullin R.B., Lilenko A.V.* On the question of the dynamic characteristics of an asynchronous motor // Electrical and information complexes and systems. 2013. No. 2, v. 9. P. 42–46.
14. *Starikov A.V., Lisin S.L., Tabachnikova T.V., Kosorlukov I.A., Belyaeva O.S.* Linearized mathematical model of a submersible induction motor // Bulletin of the Samara State Technical University. Series "Technical Sciences", 2019. No. 4 (64). P. 155–167.
15. *Starikov A., Tabachnikova T., Kosorlukov I.* Calculation of the Rotation Speed of a Submersible Induction Motor for the Tasks of Determining the Optimal Value of the Supply Voltage // 2020 International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies (FarEastCon). DOI: 10.1109/FarEastCon50210.2020.9271308/
16. *Weinstein R.A., Kolomiets N.V., Shestakov V.V.* Fundamentals of control of modes of power systems by frequency and active power, by voltage and reactive power: textbook. Tomsk: Publishing house of the Tomsk Polytechnic University, 2010. 96 p.