



Ивановский государственный энергетический университет

# Вестник Ивановского государственного энергетического университета (Вестник ИГЭУ)

Vestnik Ivanovskogo gosudarstvennogo energeticheskogo universiteta (Vestnik IGEU)

Журнал издается с 2001 года

ISSN 2072-2672

Индекс 18079

2023 / Вып. 3

Учредитель: ФГБОУВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»

## РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ:

**Г.В. Ледуховский**, д-р техн. наук (Иваново)  
(главный редактор)  
**И.К. Муравьев**, канд. техн. наук (Иваново)  
(зам. главного редактора)  
**Е.Н. Бушуев**, д-р техн. наук (Иваново)  
**А.Р. Гайдук**, д-р техн. наук (Таганрог)  
**В.П. Жуков**, д-р техн. наук (Иваново)  
**Ю.Б. Казаков**, д-р техн. наук (Иваново)  
**А.Б. Капранова**, д-р физ.-мат. наук (Ярославль)  
**С.В. Ключина**, нач. УИУНЛ (Иваново)  
**А.Р. Колганов**, д-р техн. наук (Иваново)  
**С.В. Косяков**, д-р техн. наук (Иваново)  
**В.В. Курейчик**, д-р техн. наук (Таганрог)  
**М.Ш. Мисриханов**, д-р техн. наук (Москва)  
**А.В. Митрофанов**, д-р техн. наук (Иваново)  
**А.Ю. Мурзин**, канд. техн. наук (Иваново)  
**В.Ф. Очков**, д-р техн. наук (Москва)  
**С.В. Тарарыкин**, д-р техн. наук (Иваново)  
**М.Ю. Таршис**, д-р техн. наук (Ярославль)  
**А.И. Тихонов**, д-р техн. наук (Иваново)  
**В.А. Шуин**, д-р техн. наук (Иваново)

## Над номером работали:

Ответственные за выпуск: Е.Н. Бушуев, А.Ю. Мурзин,  
А.И. Тихонов, А.Р. Колганов, С.В. Косяков

Начальник УИУНЛ  
Технический редактор  
Редактор

**С.В. Ключина**  
**Н.В. Королева**  
**С.М. Коткова**

## СОДЕРЖАНИЕ

### ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКА

**Н.Л. Бацева, Ю.А. Фоос.** Эффективность применения динамического метода оценивания состояния параметров режима электроэнергетической системы..... **5**

**В.Д. Лебедев, Е.Е. Готовкина.** Разработка конструкции индуктора для закалки детали сложной формы..... **16**

**С.О. Алексинский, Д.С. Шарыгин.** Исследование влияния переходного сопротивления на дистанционное определение места повреждения на основе одностороннего метода..... **25**

**В.Д. Битней, Н.Н. Смотров, А.А. Тимофеев, А.В. Охлопков.** Влияние режима потребления реактивной мощности на техническое состояние турбогенератора ТЗФП-110-2МУЗ..... **34**

### АВТОМАТИЗИРОВАННЫЕ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ

**А.Б. Виноградов, Р.О. Горелкин.** Автономная станция электроснабжения на основе асинхронного генератора с фазным ротором и преобразователя частоты малой мощности.... **43**

**И.С. Полющенко.** Разработка контроллера цифрового датчика положения и его программного обеспечения..... **52**

## МЕТОДЫ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

**Б.А. Староверов, С.К. Улыбышев.** Математическая модель теплоснабжения помещения как объекта динамического управления температурой.....62

## ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

**Е.Р. Пантелеев, А.А. Мукучан.** Логическая модель построения пошаговой контекстной помощи пользователю САПР.....68

*Журнал «Вестник Ивановского государственного энергетического университета» включен в Перечень ведущих рецензируемых научных журналов и изданий, утвержденных ВАК Министерства науки и высшего образования РФ для публикации основных научных результатов диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук и ученой степени доктора наук по следующим научным специальностям: 2.3.3. Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами; 2.3.7. Компьютерное моделирование и автоматизация проектирования; 2.4.2. Электротехнические комплексы и системы; 2.4.3. Электроэнергетика; 2.4.5. Энергетические системы и комплексы; 2.4.6. Теоретическая и прикладная теплотехника; 2.6.13. Процессы и аппараты химических технологий.*

*Предоставляется информация об опубликованных статьях в систему РИНЦ согласно договору № 580-12/2012 ЛО от 13 декабря 2012 г. с ООО «Научная электронная библиотека».*

*Журнал зарегистрирован в базе данных Ulrich's (США).*



**Ivanovo State Power Engineering University**

# Bulletin of the Ivanovo State Power Engineering University (Bulletin ISPEU)

The Journal has been published since 2001

ISSN 2072-2672

2023 / Issue 3

Founder: Federal State-Financed Educational Institution of Higher Professional Education «Ivanovo State Power Engineering University named after V.I. Lenin»

## EDITORIAL BOARD:

**G.V. Ledukhovskiy**, Doctor of Engineering (Ivanovo)  
(Chief Editor)  
**I.K. Muravyev**, Doctor of Engineering (Ivanovo)  
(Chief Editor Assistant)  
**E.N. Bushuyev**, Doctor of Engineering (Ivanovo)  
**A.R. Gaiduk**, Doctor of Engineering (Taganrog)  
**V.P. Zhukov**, Doctor of Engineering (Ivanovo)  
**Yu.B. Kazakov**, Doctor of Engineering (Ivanovo)  
**A.B. Kapranova**, Doctor of Physics and Mathematics  
(Yaroslavl)  
**S.V. Klyunina** (Ivanovo)  
**A.R. Kolganov**, Doctor of Engineering (Ivanovo)  
**S.V. Kosyakov**, Doctor of Engineering (Ivanovo)  
**V.V. Kureychik**, Doctor of Engineering (Taganrog)  
**M.Sh. Misrikhanov**, Doctor of Engineering (Moscow)  
**A.V. Mitrofanov**, Doctor of Engineering (Ivanovo)  
**A.Yu. Murzin**, Doctor of Engineering (Ivanovo)  
**V.F. Ochkov**, Doctor of Engineering (Moscow)  
**S.V. Tararykin**, Doctor of Engineering (Ivanovo)  
**M.Yu. Tarshis**, Doctor of Engineering (Yaroslavl)  
**A.I. Tikhonov**, Doctor of Engineering (Ivanovo)  
**V.A. Shuin**, Doctor of Engineering (Ivanovo)

## The issue is prepared by:

Responsible people for the issue:  
E.N. Bushuyev, A.Yu. Murzin, A.I. Tikhonov,  
A.R. Kolganov, S.V. Kosyakov

Chief of Educational and Scientific  
Literature Publishing Office  
Technical Editor  
Editor

**S.V. Klyunina**  
**N.V. Koroleva**  
**S.M. Kotkova**

## CONTENT

### ELECTRICAL POWER ENGINEERING

**N.L. Batseva, J.A. Foos.** Effectiveness of application of dynamic state estimation method for mode parameters of power system.....**5**

**V.D. Lebedev, E.E. Gotovkina.** Development of design of an inductor for hardening a part of a complex shape.....**16**

**S.O. Aleksinsky, D.S. Sharygin.** Study of influence of transient resistance on distance fault location based on one-sided method.....**25**

**V.D. Bitney, N.N. Smotrov, A.A. Timofeev, A.V. Okhlopov.** Effect of Reactive Power Consumption Mode on Technical Condition of T3FP-110-2MU3 Turbogenerator.....**34**

### AUTOMATION CONTROL SYSTEMS

**A.B. Vinogradov, R.O. Gorelkin.** Autonomous power supply station based on asynchronous generator with phase rotor and low-power frequency converter.....**43**

**I.S. Polyuschenkov.** Development of controller for digital position sensor and its software.....**52**

### METHODS OF MATHEMATICAL SIMULATION

**B.A. Staroverov, S.K. Ulybyshev.** Mathematical model of room heating as object of dynamic temperature control.....**62**

### COMPUTER SCIENCE AND INFORMATION TECHNOLOGIES

**E.R. Panteleev, A.A. Mukuchyan.** Logical model of stepwise contextual help for CAD user.....**68**

*The Journal «Vestnik of Ivanovo State Power Engineering University» is included in the List of Leading Reviewed Scientific Journals and Publications, which are approved by the State Commission for Academic Degrees and Titles of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation for publishing the main scientific results of the dissertations on the candidate and doctoral degrees for the following groups of specialties: 2.3.3. Automation and Control of Technological Processes and Production; 2.3.7. Computer Simulation and Computer-Aided Design; 2.4.2. Electrotechnical Complexes and Systems; 2.4.3. Electric Power Industry; 2.4.5. Energy Systems and Complexes; 2.4.6. Theoretical and Applied Heat Engineering; 2.6.13. Processes and Apparatuses of Chemical Technologies.*

*Information about published articles is sent to the Russian Science Citation Index by agreement with «Scientific Electronic Library» Ltd. No. 580-12/2012 LO of December 13, 2012.*

*The journal is registered in the foreign database Ulrich's Periodicals Directory.*

©Federal State-Financed Educational Institution of Higher Education  
«Ivanovo State Power Engineering University named after V.I. Lenin»

## ЭЛЕКТРОЭНЕРGETИКА

---

УДК 621.311.004.13

**Наталья Ленмировна Бацева**

ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Томский политехнический университет», кандидат технических наук, доцент отделения электроэнергетики и электротехники, Россия, Томск, e-mail: batsevan@tpu.ru

**Юлия Алексеевна Фоос**

ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Томский политехнический университет», аспирант отделения электроэнергетики и электротехники, Россия, Томск, e-mail: yae3@tpu.ru

### Эффективность применения динамического метода оценивания состояния параметров режима электроэнергетической системы

#### Авторское резюме

**Состояние вопроса.** Результаты оценивания режимных параметров электроэнергетических систем используются для решения важных технологических задач с помощью программно-аппаратных комплексов реального времени, например для определения максимально допустимых перетоков активной мощности в сечениях системой мониторинга запасов устойчивости. В настоящее время оценивание состояния в программно-аппаратных комплексах системой мониторинга запасов устойчивости выполняется статическим методом, а в качестве исходных данных используется телеметрия, получаемая от оперативно-информационного комплекса. С внедрением систем мониторинга переходных режимов и возможностью получения синхронизированных векторных измерений с высокой частотой обновления открываются перспективы для применения и совершенствования динамических методов оценивания состояния. Несмотря на то что исследованию и совершенствованию динамических методов оценивания состояния и уделяется внимание, сведений о практическом применении и полученных результатах в литературе недостаточно. Целью исследования является совершенствование динамического метода оценивания состояния на основе расширенного фильтра Калмана и анализ его эффективности при определении режимных параметров реальной электроэнергетических систем.

**Методы и материалы.** Исследования выполнены с помощью усовершенствованного алгоритма динамического метода оценивания состояния, в основе которого лежит расширенный фильтр Калмана. Программный код для работы алгоритма написан на языке C#. Апробация алгоритма оценивания состояния проведена на базе модели энергосистемы, содержащей 55 узлов и 76 ветвей.

**Результаты.** Предложен усовершенствованный динамический метод оценивания состояния режимных параметров. В результате проведенных экспериментов установлено, что в нормальном режиме работы электроэнергетических систем при несвоевременном обновлении телеизмерений динамический метод работает эффективно как для оценивания режимных параметров, так и для определения максимально допустимых перетоков: ошибка оценивания напряжения и активной мощности мала, за счет чего значение максимально допустимых перетоков определяется точнее по сравнению со значением максимально допустимых перетоков, определенным системой мониторинга запасов устойчивости. Также установлено, что после изменения топологии схемы и режима динамический метод показывает высокую точность оценивания параметров только для той части электроэнергетической системы, которая удалена от места изменения топологии и режима, для части же электроэнергетической системы, в которой произошло изменение схемно-режимной ситуации, наилучший результат показывает статический метод оценивания состояния по телеизмерениям и синхронизированным векторным измерениям.

**Выводы.** При управлении режимом в реальном времени статические и динамические методы оценивания должны использоваться совместно, так как в послеаварийном режиме применение статического метода оценивания даст возможность сформировать матрицу перехода к динамическому методу. Безусловным является факт, что использование синхронизированных векторных измерений в качестве исходных данных повышает точность оценивания. Результаты исследований предполагается использовать для совершенствования программной части программно-аппаратных комплексов, содержащих блок оценивания состояния.

**Ключевые слова:** режимные параметры электроэнергетической системы, максимально допустимый переток активной мощности, статический метод оценивания состояния электроэнергетической системы, динамический метод оценивания состояния электроэнергетической системы, расширенный фильтр Калмана, синхронизированные векторные измерения

**Natalia Lenmirovna Batseva**

National Research Tomsk Polytechnic University, Candidate of Engineering Sciences, (PhD), Associate Professor of Electrical Engineering Department, Tomsk, Russia, e-mail: batsevan@tpu.ru

**Julia Alekseevna Foos**

National Research Tomsk Polytechnic University, Postgraduate Student of Electrical Engineering Department, Tomsk, Russia, e-mail: yae3@tpu.ru

## Effectiveness of application of dynamic state estimation method for mode parameters of power system

### Abstract

**Background.** The results of the estimation of power system mode parameters are used to solve important technological tasks by real-time hardware-software packages (HSPs), for instance, the calculation of maximum allowed power flows (MAPFs) via sections by a Control System of Stability Margin (HSP CSSM). Now, in the HSP CSSM the state estimation is realized by the static method. Remote measurements (RMs) obtained from an operative informational complex are used as initial data. With the introduction of Wide-Area Measurement Systems and the possibility to obtain synchronized phasor measurements (SPMs) with a high update rate, it becomes possible to apply and improve state estimation dynamic methods. Even though, many researchers pay attention to the state estimation dynamic method, but practical application of this method and obtained results are presented in papers insufficiently. The goal of the study is to improve the state estimation dynamic method based on the extended Kalman filter and analyze the effectiveness in determining the mode parameters of electric power system.

**Materials and methods.** The studies are performed by the developed algorithm of the state estimation dynamic method based on extended Kalman filter. C# is the language for software code. Practical evaluation of the state estimation algorithm has been carried out on the basis of a power system model containing 55 nodes and 76 branches.

**Results.** An improved dynamic method to estimate the state of mode parameters is proposed. The test results show that in steady-state modes, when RMs are not updated on time, the developed dynamic method demonstrates high accuracy for the estimation of mode parameters and MAPFs. The estimation error of a voltage and an active power is low, therefore MAPFs are more specifically than MAPFs obtained by CSSM. Also, this method operates with high accuracy in the post emergency states, but only for that part of the power system, where the topology and mode have not been changed. For the part, where the topology and mode affected, the best result shows the static state estimation method by RMs and SPMs.

**Conclusions.** In post emergency states the static state estimation method offers to form the transfer matrix for the dynamic method, therefore, static and dynamic state estimation methods must be used simultaneously in real-time HSPs. It is an undoubted fact that the use of synchronized phasor measurements as input data increases the accuracy of estimation. These results are expected to implement in the software of HSPs, involving the state estimation component.

**Key words:** mode parameters of the electric power system, maximum allowed active power flow, static and dynamic state estimation methods, extended Kalman filter, synchronized phasor measurements

DOI: 10.17588/2072-2672.2023.3.005-015

**Введение.** Совершенствованию методов оценивания состояния (ОС) электроэнергетических систем (ЭЭС) уделяется достаточно внимания, так как результаты ОС используются для решения как технологических, так и научных задач [1–3]. Важным результатом при совершенствовании методов ОС и их реализации является получение более точных оценок параметров режима для комплексов, работающих в темпе технологического процесса, например для системы мониторинга запасов устойчивости (СМЗУ) при определении максимально допустимых перетоков активной мощности (МДП) в сечениях. Точное определение МДП позволит максимально использовать пропускную способность сечения, сохраняя устойчивость и надежность работы энергорайонов ЭЭС [4]. В настоящее время ОС в СМЗУ

выполняется циклично, статическим методом оценивания, когда в качестве исходных данных используется набор измерений, соответствующий одному временному срезу, а динамика изменения режимных параметров не учитывается [2].

Учет динамики может быть выполнен с помощью динамических методов ОС, поскольку исходные данные для них – это не только текущая, но и ретроспективная телеметрическая информация [5].

Динамические методы ОС базируются на уравнении динамики системы, связывающем режимные параметры ЭЭС в разные моменты времени. В связи с этим считается, что эти методы, по сравнению со статическим методом, обладают большей устойчивостью к сбоям и помехам, большей надежностью работы в услови-

ях недостаточности телеизмерений (ТИ), а также облегчают поиск выбросов в ТИ [6, 7].

В [6] динамические методы ОС рассматриваются для решения задач фильтрации, прогноза и сглаживания.

Задача фильтрации реализуется с помощью фильтра Калмана, заключающегося в использовании уравнений, связывающих параметры состояния в различные моменты времени, а матрица перехода идентифицируется для каждого рассматриваемого интервала времени. В задаче прогноза модель динамики упрощается и матрица перехода становится единичной. Такая модель соответствует задаче прогнозирования параметров с упреждением на секунды вперед. В случае прогнозирования на часы или сутки вперед матрица перехода дополняется коэффициентом перехода. Задача сглаживания заключается в уточнении полученных ранее оценок на основе текущих измерений.

Отдельно в [6] поставлена задача отслеживания режимных параметров для получения оценок в последовательные дискретные моменты времени. Идея состоит в том, что оценки измеренных параметров, полученные в предшествующие моменты времени, рассматриваются как прогнозы этих величин и используются в качестве стартовой точки для получения оценок в текущий момент времени.

Авторы [8] разделяют динамические методы ОС на три группы: метод ОС, использующий упрощенные модели динамики; метод отслеживания режимных параметров, основанный на обработке ретроспективной информации статическим методом ОС без явного использования динамических моделей; *FASE*-метод (*Forecasting-Aided State Estimation*), основанный на выполнении ОС в каждый момент времени статическим методом с добавлением процедуры прогнозирования параметров режима. Авторы [8] полагают, что для практического применения перспективными являются методы второй и третьей групп, как менее чувствительные к резким изменениям режима и/или топологии схемы. Вместе с этим они отмечают, что методы второй группы требуют избыточности телеизмерений и менее устойчивы к выбросам в ТИ, а третьей – ограничены упрощенной моделью динамики, что может привести либо к расхождению процесса ОС, либо к некорректной оценке параметров режима.

В исследованиях [9] проведен сравнительный анализ методов: статического *SSE*-метода (*Static State Estimation*); стандартного динамического *DSE*-метода (*Dynamic State Estimation*) и двух частных – *FASE*-метода и *TSE*-метода отслеживания состояния системы (*Tracking State Estimation*). Авторы [9] отмечают, что *SSE*-метод, по сравнению с *DSE*-методом, не имеет возможности отслеживать динамику системы и требует, чтобы вектор состояния

можно было наблюдать только с помощью последнего набора доступных ТИ. *FASE*-метод работает с упрощенной моделью динамики и использует линейную модель перехода из одного состояния ЭЭС в другое, поэтому он применим только к медленно изменяющимся режимам, а *TSE*-метод предполагает, что состояние ЭЭС остается статичным.

В [8, 9] отмечено, что при возникновении внезапных изменений схемы и режима результаты, полученные динамическим методом ОС, могут искажаться, так как для составления уравнения динамики требуется время, чтобы адаптироваться к новой схемно-режимной ситуации.

Практические результаты, полученные с помощью динамических методов ОС в условиях изменения схемно-режимной ситуации, приведены только в [10] на примере использования *FASE*-метода. На тестовых схемах показано, что при внезапном изменении мощности нагрузки *FASE*-метод не способен отслеживать динамическое изменение напряжения и угла вектора напряжения.

Следует также отметить, что развитие динамических методов ОС в определенной степени было затруднено из-за недостаточной частоты обновления телеизмерений, получаемых от устройств телемеханики (УТМ) [11]. С внедрением системы мониторинга переходных режимов (СМПР) появилась возможность получать синхронизированные векторные измерения (СВИ), частота обновления которых достаточна для применения и совершенствования динамических методов ОС [12, 13].

Ниже дан анализ эффективности применения модифицированного *TSE*-метода и усовершенствованного *DSE*-метода для определения параметров режима и МДП в сечении схемы ОЭС с использованием в качестве исходных данных ТИ и СВИ. Модифицированный *TSE*-метод рассмотрен и апробирован в [14].

**Теоретические положения.** Основой *DSE*-метода являются фильтры Калмана: расширенный (*Extended Kalman Filter – EKF*), сигматочечный (*Unscented Kalman Filter – UKF*) и кубатурный (*Cubature Kalman Filter – CKF*) [15–17]. Существуют *Generalized Maximum (GM)* модификации фильтра Калмана, такие как *GM-EKF* и *GM-UKF* [10].

*DSE*-метод на базе *EKF* нашел применение для задач обнаружения выбросов в ТИ, сокращения машинного времени ОС, выявления выбросов в ТИ [18, 19]. В [20] *DSE*-метод рассмотрен для задач прогнозирования режимных параметров ЭЭС с применением нейросетевых технологий. В [21] предложен метод прогнозного ОС с использованием трех процедур фильтрации Калмана для повышения точности ОС в режимах с медленными стохастическими изменениями нагрузки и генерации.

Преимуществом *EKF* является простота реализации и настройки, но при этом существует необходимость на каждой итерации вычислять матрицу Якоби для линеаризации системы. Авторы [22, 23] считают, что это приводит к снижению точности ОС и производительности расчетов при росте интервала измерений. Матрица Якоби используется не только для ОС, но и для расчета установившихся режимов, их оптимизации, поиска опасных сечений, эквивалентирования, поэтому расчет матрицы Якоби автоматизирован в программных комплексах для расчета режимов и не требует больших вычислительных затрат.

*DSE*-метод, основанный на *EKF*, состоит из двух этапов: прогнозирования и корректировки.

Прогнозирование вектора состояния системы в текущий момент времени осуществляется по формуле

$$\hat{x}_k^- = \Phi \hat{x}_{k-1} + B u_{k-1}, \quad (1)$$

где  $\hat{x}_k^-$  – спрогнозированный вектор состояния системы в текущий момент времени;  $\Phi$  – динамическая модель системы (матрица перехода);  $\hat{x}_{k-1}$  – вектор состояния системы в предшествующий момент времени;  $B$  – матрица управляющего воздействия;  $u_{k-1}$  – управляющее воздействие в предшествующий момент времени.

Прогнозирование ошибки ковариации выполняется согласно формуле

$$P_k^- = \Phi P_{k-1} \Phi^T + C, \quad (2)$$

где  $P_k^-$  – прогнозирование ошибки вектора состояния системы в текущий момент времени;  $P_{k-1}$  – ошибка вектора состояния системы в предшествующий момент времени;  $C$  – ковариация шума процесса.

Параметр Калмана вычисляется как

$$K_k = \frac{P_k^- J^T}{(J P_k^- J^T + Q)}, \quad (3)$$

где  $K_k$  – параметр Калмана;  $J$  – матрица Якоби;  $Q$  – ковариация шума измерений.

Корректировка оценки вектора состояния системы в текущий момент времени выполняется по формуле

$$\hat{x}_k = \hat{x}_k^- + K_k (z_k - J \hat{x}_k^-), \quad (4)$$

где  $z_k$  – измерение в текущий момент времени.

Корректировка ошибки ковариации осуществляется по формуле

$$P_k = (I - K_k J) P_k^-, \quad (5)$$

где  $I$  – матрица избыточности.

*DSE*-метод подразумевает задачу оценки параметров режима ( $r_i$ ) по данным измерений текущего ( $t$ ) режима с учетом предшествующего режима ( $t-1$ ).

Модель динамики представляется в виде

$$r_t = F_t \cdot r_{t-1}(U) \pm q_k, \quad (6)$$

где  $t = 1, \dots, N$  – номера дискретных моментов времени;  $F_t$  – диагональная матрица перехода системы из состояния в момент времени ( $t-1$ ) к состоянию  $t$ ;  $q_k$  – шум динамики.

Если процесс считается стационарным, то динамика изменения измеряемого параметра выглядит следующим образом:

$$r_t = r_{t-1}(U) \pm q_k. \quad (7)$$

*DSE*-метод с учетом использования СВИ в качестве исходных данных усовершенствован следующим образом: вектор состояния и матрица перехода (1) формируются с учетом измерений углов векторов напряжений. При формировании матрицы Якоби в (3) учитываются первые производные векторов тока и напряжения. Матрица ковариации шума процесса (2) формируется на основе матрицы Якоби. Матрица ковариации шума измерений (3) задается с учетом ошибки измерений (для ТИ ошибка измерений составляет  $\sigma = 0,02$ , для СВИ –  $\sigma = 0,005$ ) [14]. Вектор измерений (4) расширяется для учета векторов тока и напряжения.

Предварительно задается предельное число итераций  $k_{max}$ , допустимая погрешность оценки величин векторов напряжений  $\varepsilon$ , приращение напряжения  $\Delta U$  и временной промежуток  $\Delta t$ . Значение погрешности  $\varepsilon$  представляет собой разность оцененных значений напряжений в узлах ЭЭС на итерациях  $k$  и  $k-1$  и характеризует сходимость итерационного процесса. Приращение напряжения  $\Delta U$  характеризует степень инертности системы.

При проведении экспериментов принято, что  $\Delta U = 0$ . Интервал времени  $\Delta t = 10$  мин – это время, за которое формировался набор ТИ и СВИ.

Алгоритм усовершенствованного *DSE*-метода на основе *EKF* выглядит следующим образом:

1. Задать номер итерации  $k = 0$ .

2. Составлять вектор состояния  $U_k$ :

$$U_k = \{U_i^{СВИ} \parallel U_i^{TM} \parallel U_i^{ном}, \delta_i^{СВИ} \parallel \delta_i^{BP}\}, \quad (8)$$

где  $U_i^{СВИ}$  – измерение напряжения в узле, в котором установлены устройства синхронизированных векторных измерений (УСВИ);  $\delta_i^{СВИ}$  – измерение угла вектора напряжения в узле, в котором установлены УСВИ.

3. Составлять вектор измерений  $R_k$  размерностью  $M$ , соответствующей количеству измерений в массиве:

$$R_k = \{U_i, \delta_i, P_i, Q_i, P_{ij}, Q_{ij}, I_{ij}, \gamma_{ij}\}, \quad (9)$$

где  $\gamma_{ij}$  – измерение угла вектора тока.

4. Составлять вектор-функцию  $R_k(U)$ , определяющую режимные параметры через узловые напряжения:

$$R_k(U) = \{U_i, \delta_i, P_i(U), Q_i(U), P_{ij}(U), Q_{ij}(U), I_{ij}(U), \gamma_{ij}(U)\}. \quad (10)$$

5. Вычисляют матрицу перехода  $\Phi_k$  из одного состояния ЭЭС в другое по алгоритму:



5.1. Вектор  $U_k$  интегрируют на заданном временном промежутке.

5.2. К первому элементу вектора  $U_{k-1}$  добавляют заданное приращение и интегрируют на таком же временном промежутке, что и вектор  $U_k$ .

5.3. Из вектора, полученного в п. 5.1, поэлементно вычитают вектор, полученный в п. 5.2, делят на приращение напряжения, получая первый столбец матрицы  $\Phi_k$ .

5.4. Повторяют пп. 5.2 и 5.3 до тех пор, пока не будут пройдены все элементы вектора  $U_{k-1}$ .

Формульное описание пп. 5.1–5.4 выглядит следующим образом:

$$\Phi_k = \Delta U + \frac{\partial f(U, t)}{\partial U} \Delta t. \quad (11)$$

6. Рассчитывают прогнозный вектор состояния системы в текущий момент времени:

если  $k = 0$ , то

$$\underline{U}_k = \Phi_k \underline{U}_k, \quad (12)$$

если  $k > 0$ , то

$$\underline{U}_k = \Phi_k \underline{U}_{k-1}. \quad (13)$$

7. Вычисляют матрицу Якоби размером  $[M; 2N-1]$ :

$$J_k = \frac{\partial R_k(U)}{\partial \underline{U}_k}. \quad (14)$$

8. Определяют матрицу весовых коэффициентов:

$$C_k = \frac{1}{\sum_{j=1}^M J_{ij}^2}, \quad (15)$$

где  $J_{ij}$  – элемент матрицы Якоби.

9. Вычисляют прогнозную ковариационную матрицу ошибки:

$$P_k^- = \Phi_k P_{k-1} \Phi_k^T + C_k. \quad (16)$$

10. Рассчитывают прогнозный вектор измерений:

$$R_k^- = J_k \underline{U}_k. \quad (17)$$

11. Определяют параметр Калмана:

$$K_k = \frac{P_k^- J_k^T}{(J_k P_k^- J_k^T + Q)}, \quad (18)$$

где  $Q$  – матрица ковариации шума измерений, учитывающая ошибки измерений  $\sigma$ . Диагональные элементы матрицы  $Q$  равны дисперсии измерений  $\sigma^2$ .

12. Корректируют искомый вектор состояния системы:

$$\underline{U}_k = \underline{U}_k^- + K_k (R_k - R_k^-). \quad (19)$$

13. Корректируют ковариационную матрицу ошибки ОС:

$$P_k = (1 - K_k J_k) P_k^-. \quad (20)$$

14. Проверяют выполнение условия

$$\max |U_k - U_{k-1}| < \varepsilon. \quad (21)$$

Если условие выполняется, то уточнение узловых напряжений окончено и необходимо выполнить п. 16, если – нет, то переходят к п. 15.

15. Принимают  $k = k + 1$ . Если  $k < k_{max}$ , то переходят к п. 6, иначе – расчет прекращают из-за расходимости итерационного процесса.

16. Рассчитывают параметры режима по  $\underline{U}_k$ .

17. Вычисляют ошибку оценивания по среднеквадратичному отклонению (СКО):

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (r_i - \bar{r})^2}{n-1}}. \quad (22)$$

где  $r_i$  – значение параметра режима;  $\bar{r}$  – среднее значение параметра режима в выборке;  $n$  – количество значений в выборке.

**Исследования и анализ результатов.**

Апробация метода проведена на схеме электрической сети 500–220 кВ ОЭС (рис. 1).

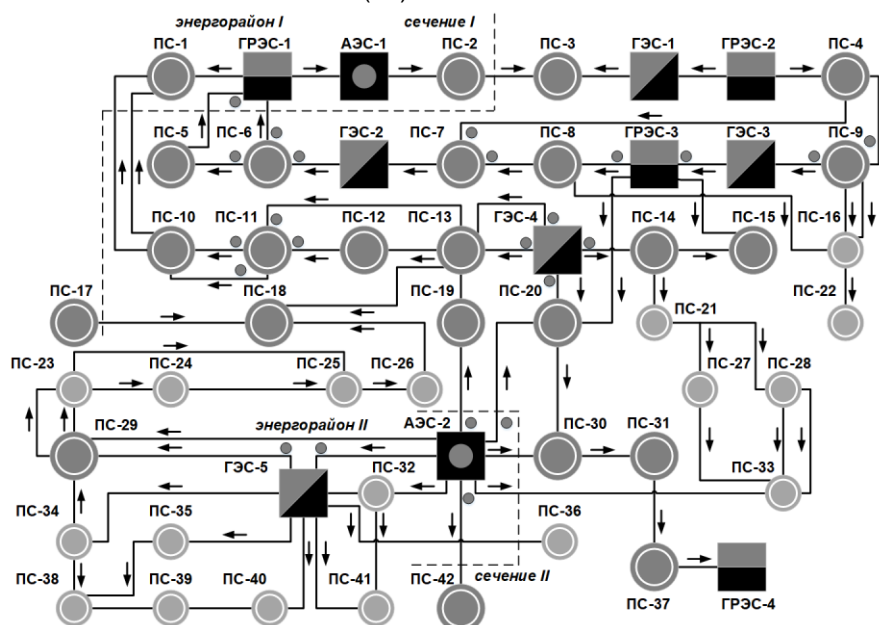


Рис. 1. Топология схемы системообразующей сети 500–220 кВ ОЭС

Схема содержит 55 узлов и 76 ветвей. УСВИ установлены на объектах, представленных в табл. 1.

Таблица 1. Размещение УСВИ

Объект	ВЛ 500 кВ
ГРЭС-1	ГРЭС-1 – ПС-5
ПС-6	ПС-6 – ПС-5; ПС-6 – ГРЭС-1; ПС-6 – ГЭС-2
ПС-7	ПС-7 – ПС-4; ПС-7 – ПС-8
ГРЭС-3	ГРЭС-3 – ПС-8; ГРЭС-3 – ГЭС-3
ПС-9	ПС-9 – ГЭС-3; ПС-9 – ПС-4
ПС-11	ПС-11 – ПС-10; ПС-11 – ПС-12; ПС-11 – ПС-13
ГЭС-4	ГЭС-4 – ПС-13; ГЭС-4 – ПС-14; ГЭС-4 – ПС-2
ГЭС-5	ГЭС-5 – ПС-29; ГЭС-5 – АЭС-2
АЭС-2	АЭС-2 – ПС-19; АЭС-2 – ПС-20; АЭС-2 – ПС-42

Согласно схеме (рис. 1), сечение I разделяет энергорайон I и ОЭС. Контроль перетока активной мощности в сечении I осуществляется в двух направлениях: в часы дневного максимума – из ОЭС в энергорайон I; в часы вечернего минимума – в обратном направлении.

Сечение II разделяет избыточный энергорайон II и ОЭС. Контроль перетоков активной мощности в сечении II осуществляется по допустимой токовой нагрузке сети 220–500 кВ, осуществляющей выдачу мощности от АЭС-2, а также по условию предотвращения нарушения динамической устойчивости энергоблоков АЭС-2.

Контроль режима в энергорайонах производится во всех схемно-режимных ситуациях.

СМЗУ работает в циклическом режиме непрерывно [2]. Данные ТИ поступают в СМЗУ из оперативно-информационного комплекса. Цикл расчета начинается с выполнения ОС статическим методом. Затем запускается процесс расчета МДП в заданных сечениях с помощью последовательного утяжеления оцененного режима. По завершении цикла предоставляется информация о рассчитанных значениях МДП на монитор диспетчеру.

Динамический метод реализован на основе формул (8)–(22). Расчет установившегося режима выполнен в ПК RastrWin3. Оценивание состояния статическим и динамическим методами проведено с помощью программного обеспечения, описанного в [24, 25].

В эксперименте № 1 ОС выполняется в нормальном и послеаварийном режимах, в эксперименте № 2 – в послеаварийном режиме.

**Эксперимент № 1.1.** Рассмотрен случай, когда имеет место обновление ТИ, поступающих по энергорайону I. В табл. 2 представлены режимные параметры.

На рис. 2 и 3 представлены результаты распределения ошибки оценивания напряжения и активной мощности для граничных узлов.

Таблица 2. Режимные параметры

Объект	Напряжение в граничных узлах сечения I $U$ , кВ
ПС-1	504,9
ГРЭС-1	509,25
ПС-2	509,9
ПС-3	510
ПС-10	505,7
ПС-5	512
ПС-6	514,3
ПС-18	508,3
ПС-17	508,63
Объект	Перетоки активной мощности по основным связям сечения I $P_{ij}$ , МВт
ПС-17 – ПС-18	232
ПС-1 – ПС-1 I цепь	67
ПС-1 – ПС-1 II цепь	67
ГРЭС-1 – ПС-5	232
ГРЭС-1 – ПС-6	152
ПС-2 – ПС-3	111

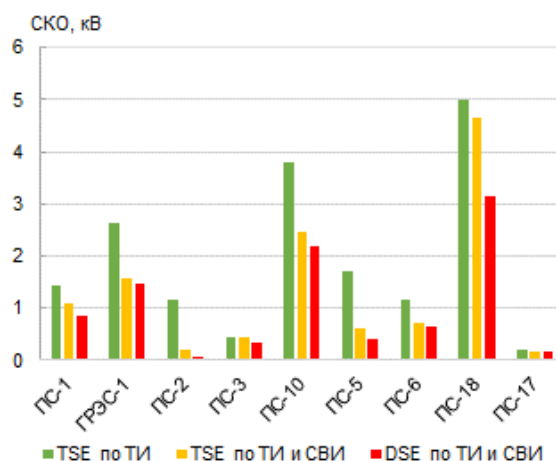


Рис. 2. Эксперимент № 1.1. Распределение ошибки оценивания напряжения в граничных узлах сечения I

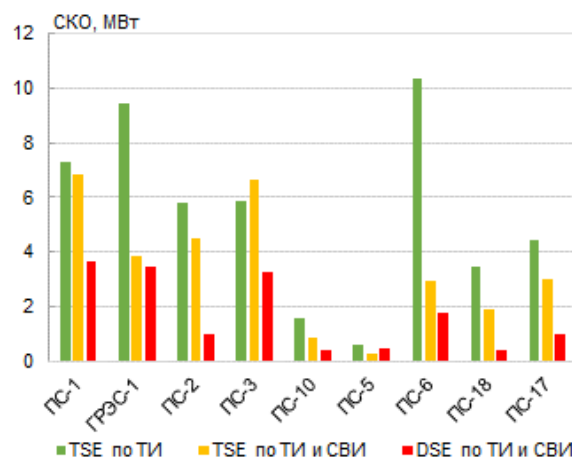


Рис. 3. Эксперимент № 1.1. Распределение ошибки оценивания активной мощности в граничных узлах сечения I

При применении *TSE*-метода по ТИ и СВИ СКО оценивания напряжения и активной мощности меньше, чем при применении *TSE*-метода по ТИ. Это связано с тем, что использование СВИ повышает наблюдаемость ОЭС, следовательно, повышается и качество ОС в условиях обновления ТИ.

В свою очередь, при применении *DSE*-метода СКО оценивания напряжения и активной мощности меньше, чем при применении *TSE*-метода по ТИ и СВИ. Это обусловлено тем, что учитываются измерения не за один временной срез, а за интервал времени, предшествующий выполнению ОС. Таким образом, снижается влияние выбросов в ТИ на ОС.

Результаты расчета МДП в сечении I представлены в табл. 3.

Таблица 3. Результаты расчета МДП в сечении I

Метод	МДП, МВт
<i>TSE</i> -метод по ТИ (СМЗУ)	3920
<i>TSE</i> -метод по ТИ и СВИ	3986
<i>DSE</i> -метод по ТИ и СВИ	3994

В случае применения *TSE*-метода по ТИ отсутствие обновлений ТИ приводит к некорректному ОС – заниженному значению МДП в СМЗУ по сечению I, что не позволяет использовать всю пропускную способность сечения. *DSE*-метод показывает, что реальный МДП на 74 МВт больше по сравнению с перетоком, определенным СМЗУ.

**Эксперимент № 1.2.** Рассмотрено отключение одной цепи ВЛ 500 кВ ПС-1–ПС-10 со стороны ПС-10 действием релейной защиты. В табл. 4 представлены режимные параметры.

Таблица 4. Режимные параметры

Объект	Напряжение в граничных узлах сечения I $U_i$ , кВ
ПС-1	520,1
ГРЭС-1	516,3
ПС-2	512,3
ПС-3	515
ПС-10	517,5
ПС-5	517,4
ПС-6	518,1
ПС-18	514
ПС-17	512
Объект	Перетоки активной мощности по основным связям сечения I $P_{ij}$ , МВт
ПС-17 – ПС-18	55
ПС-1 – ПС-10 I цепь	117
ПС-1 – ПС-10 II цепь	0
ГРЭС-1 – ПС-5	176
ГРЭС-1 – ПС-6	117
ПС-2 – ПС-3	148

На рис. 4 и 5 представлены результаты распределения ошибки оценивания напряжения и активной мощности для граничных узлов сечения I.

При отключении ВЛ 500 кВ ПС-1–ПС-10 фиксируется наброс активной мощности на ЛЭП, входящих в состав сечения I, в диапазоне от 3 до 28 МВт. Напряжение в граничных узлах изменяется до 1 кВ.

Для узлов ГРЭС-1 и ПС-6, в которых установлены УСВИ, применение *TSE*-метода по ТИ и СВИ имеет меньшую ошибку оценивания напряжения и активной мощности по сравнению с применением *TSE*-метода по ТИ: СКО отличается на 0,7 кВ – для напряжения и на 4,5 МВт – для активной мощности.

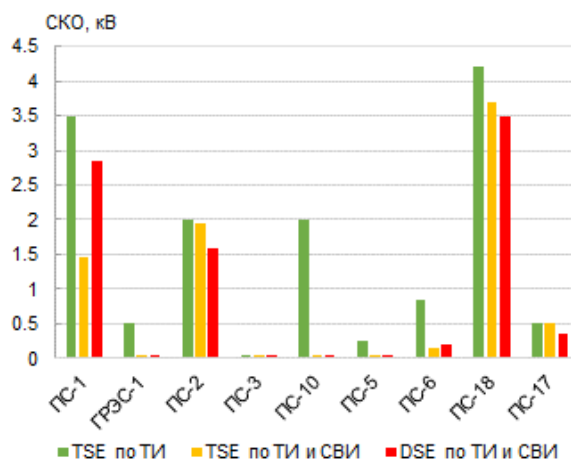


Рис. 4. Эксперимент № 1.2. Распределение ошибки оценивания напряжения в граничных узлах сечения I

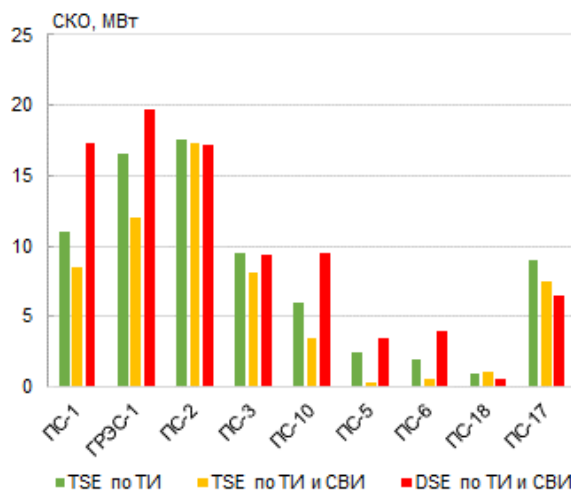


Рис. 5. Эксперимент № 1.2. Распределение ошибки оценивания активной мощности в граничных узлах сечения I

В узлах, в которых УСВИ отсутствуют, СКО отличается на 2 кВ – для напряжения и на 2,5 МВт – для активной мощности. Из-за изменения топологии схемы и режима наибольшая ошибка оценивания активной мощности наблюдается при применении *DSE*-метода и фикси-

руется для ПС-1: СКО по активной мощности на 6,25 МВт больше СКО, полученного при применении *TSE*-метода по ТИ. Однако для узлов ПС-2, 3, 17 и 18, удаленных от места изменения топологии, СКО активной мощности, полученное при применении *DSE*-метода, меньше, чем при применении *TSE*-метода по ТИ, на 2,5 МВт, а СКО напряжения – меньше на 2 кВ. Точность *DSE*-метода становится выше по мере отдаления от места изменения схемно-режимной ситуации.

Результаты расчета МДП в сечении II представлены в табл. 5.

*TSE*-метод по ТИ показывает завышенное на 4 МВт значение МДП по сечению II относительно *TSE*-метода по ТИ и СВИ.

*DSE*-метод показывает завышенное на 10 МВт значение МДП по сечению II относительно применения *TSE*-метода по ТИ и СВИ.

Таблица 5. Результаты расчета МДП в сечении II

Метод	МДП, МВт
<i>TSE</i> -метод по ТИ	3504
<i>TSE</i> -метод по ТИ и СВИ	3500
<i>DSE</i> -метод по ТИ и СВИ	3510

**Эксперимент № 2.** Рассмотрено отключение ВЛ 500 кВ АЭС-2–ПС-19 действием релейной защиты. В табл. 6 представлены режимные параметры.

Таблица 6. Режимные параметры

Объект	Напряжение в граничных узлах сечения II $U$ , кВ
АЭС-2	515,7
ПС-19	505,5
ПС-20	511,9
ПС-30	509,5
ПС-33	234,2
ПС-36	235,4
ПС-42	500
Объект	Перетоки активной мощности по основным связям сечения II $P_{ij}$ , МВт
АЭС-2 – ПС-19	0
АЭС-2 – ПС-20	1285
АЭС-2 – ПС-30	1651
АЭС-2 – ПС-33	68
ГЭС -3 – ПС-36	89
АЭС-2 – ПС-42	292

На рис. 6 и 7 представлены результаты распределения ошибки оценивания напряжения и активной мощности для граничных узлов сечения II.

При отключении ВЛ 500 кВ АЭС-2–ПС-19 фиксируется: снижение напряжения на ПС-19 на 1 кВ; повышение напряжения на АЭС-2 и ПС-42 на 2 кВ, на ПС-20 и 30 на 1 кВ; наброс

активной мощности на ЛЭП, входящих в состав сечения II, в диапазоне от 5 до 24 МВт.

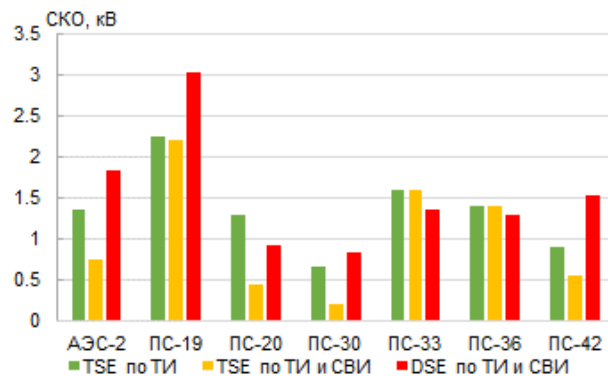


Рис. 6. Эксперимент № 2. Распределение ошибки оценивания напряжения в граничных узлах сечения II

Так как УСВИ установлены по всем ВЛ 500 кВ, входящим в состав сечения II, применение *TSE*-метода по ТИ и СВИ имеет меньшую ошибку оценивания напряжения и активной мощности для АЭС-2, ПС-20, 30 и 42 по сравнению с применением *TSE*-метода по ТИ: СКО отличается на 0,85 кВ – для напряжения и на 7,26 МВт – для активной мощности.

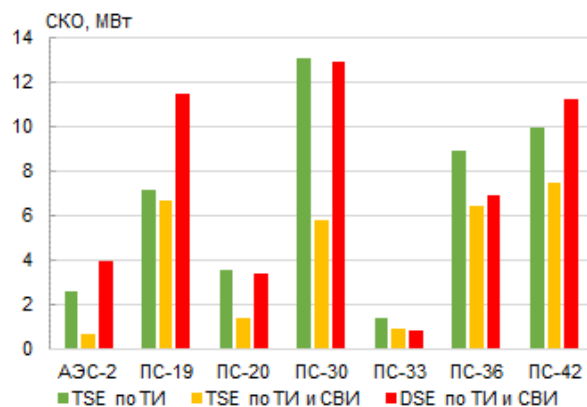


Рис. 7. Эксперимент № 2. Распределение ошибки оценивания активной мощности в граничных узлах сечения II

Отсутствие УСВИ на присоединениях ПС-33, 36, 19 дает незначительное отличие СКО при применении *TSE*-метода по ТИ и СВИ и *TSE*-метода по ТИ: 0,5 кВ – для напряжения и 2,5 МВт – для активной мощности. Из-за изменения топологии схемы и режима наибольшее СКО напряжения наблюдается при применении *DSE*-метода и фиксируется для ПС-19: на 0,84 кВ больше СКО, полученного при применении *TSE*-метода по ТИ, а по активной мощности – на 4,3 МВт. Для узлов ПС-36 и 33, удаленных от места изменения топологии, СКО по напряжению, полученное *DSE*-методом, меньше, чем при применении *TSE*-метода по ТИ, на 0,25 кВ – по напряжению и на 0,5 МВт – по активной мощности. Как и в эксперименте № 1.2, точность *DSE*-метода снизилась локально.

Результаты расчета МДП в сечении II представлены в табл. 7.

Таблица 7. Результаты расчета МДП в сечении II

Метод	МДП, МВт
<i>TSE</i> -метод по ТИ (СМЗУ)	3820
<i>TSE</i> -метод по ТИ и СВИ	3810
<i>DSE</i> -метод по ТИ и СВИ	3845

Применение *TSE*-метода по ТИ показывает завышенное на 10 МВт значение МДП по сечению II относительно применения *TSE*-метода по ТИ и СВИ. Применение *DSE*-метода показывает завышенное на 35 МВт значение МДП по сечению II относительно применения *TSE*-метода по ТИ и СВИ.

**Выводы.** По проведенным исследованиям сделаны следующие выводы:

1. Для оценивания режимных параметров и МДП в нормальном режиме работы ЭЭС даже при несвоевременном обновлении ТИ, а также для оценивания режимных параметров при изменении схемно-режимной ситуации для узлов, удаленных от места ее изменения, лучшие результаты показывает *DSE*-метод. Последнее подтверждается результатами экспериментов №№ 1.2 и 2.

2. Для оценивания режимных параметров и МДП по месту изменения схемы и режима наилучший результат дает *TSE*-метод по ТИ и СВИ, что говорит о перспективности использования СВИ для ОС.

3. При изменении схемно-режимной ситуации ОС должно выполняться *TSE*-методом на заданном интервале времени  $\Delta t$ . Полученные этим методом результаты ОС позволят сформировать для текущей схемно-режимной ситуации матрицу перехода  $\Phi_k$ , которая будет использоваться в качестве исходных для дальнейшего выполнения ОС *DSE*-методом. Это подтверждает утверждение [6] о том, что при отслеживании режимных параметров и управлении режимом в реальном времени *TSE*- и *DSE*-методы должны использоваться совместно, поэтому дальнейшие исследования будут посвящены синтезу модифицированного статического метода ОС [14] и усовершенствованного *DSE*-метода в целях повышения точности оценивания режимных параметров в послеаварийных режимах.

#### Список литературы

1. Чувашева Н.Н. Учет локальной противоаварийной автоматики в технологическом алгоритме ЦСПА // Электроэнергетика глазами молодежи – 2020: материалы XI Междунар. науч.-техн. конф., Ставрополь, 15–17 сентября 2020 г. В 2 т. – Ставрополь: Северо-Кавказский федеральный университет, 2020. – С. 63–66.
2. Система мониторинга запасов устойчивости при планировании и управлении электроэнергетическим режимом ЕЭС России / В.Г. Неуймин, А.С. Александров, Е.И. Сацук и др. // Электроэнергетика глазами молодежи – 2020: материалы XI Междунар. науч.-техн. конф., Ставрополь, 15–17 сентября 2020 г. В 2 т. – Ставрополь: Северо-Кавказский федеральный университет, 2020. – С. 42–45.

3. Batseva N.L., Foos J.A. The Application of Modified Gausse-Newton Method for Improving Accuracy of Regime Parameters State Estimation and Control Action Adjustment in The Centralized Emergency Control System // 2020 3rd International Youth Scientific and Technical Conference on Relay Protection and Automation (RPA). – IEEE, 2020. – P. 1–20.

4. Глазунова А.М., Аксаева Е.С. Модифицированное оценивание состояния для решения диспетчерских задач при управлении режимами электроэнергетической системы // Электричество. – 2013. – № 12. – С. 21–29.

5. Бацева Н.Л., Фоос (Емельянова) Ю.А., Жук А.В. Применение метода динамического оценивания состояния для оценивания параметров режима энергосистемы по телеизмерениям // Результаты современных научных исследований и разработок: сб. ст. XII Всерос. науч.-практ. конф., Пенза, 12 марта 2021 г. – Пенза: Наука и Просвещение (ИП Гуляев Г.Ю.), 2021. – С. 48–53.

6. Гамм А.З. Статистические методы оценивания состояния электроэнергетических систем. – М.: Наука, 1976.

7. Abur A., Gomez-Exposito A. Power System State Estimation: Theory and Implementation. – New York: Marcel Dekker, 2004. – 327 p.

8. Воропай Н.И. Системные исследования в энергетике: Ретроспектива научных направлений СЭИ–ИСЭМ. – Новосибирск: Наука, 2010. – 686 с.

9. Power system dynamic state estimation: Motivations, definitions, methodologies, and future work / J. Zhao, A. Gomer-Exposito, M. Netto, et al. // IEEE Transactions on Power Systems. – 2019. – No. 34(4). – P. 3188–3198.

10. Robust forecasting aided power system state estimation considering state correlations / J. Zhao, G. Zhang, Z.Y. Dong, M. la Scala // IEEE Transactions on Smart Grid. – 2016. – No. 9(4). – P. 2658–2666.

11. Глазунова А.М., Колосок И.Н., Съемщиков Е.С. Обнаружение некорректных данных при управлении интеллектуальной энергосистемой методами динамического оценивания состояния // Электричество. – 2017. – № 2. – С. 18–27.

12. Оценка достоверности динамических моделей сложных электроэнергетических систем по данным СМГР / А.В. Жуков, Ю.А. Куликов, А.С. Герасимов и др. // Оперативное управление в электроэнергетике. – 2011. – № 6.

13. Koshy S., Sunitha R., Cherian E.P. A PMU Model for Dynamic State Estimation of Power Systems // 2018 2nd International Conference on Power, Energy and Environment: Towards Smart Technology (ICEPE). – IEEE, 2018. – P. 1–6.

14. Бацева Н.Л., Фоос Ю.А., Панкратов А.В. Оценка влияния погрешности в синхронизированных векторных измерениях углов при напряжениях на оценивание параметров режима электроэнергетических систем // Вестник Чувашии. – 2020. – № 3. – С. 24–45.

15. Воевода А.А., Трошина Г.В. Моделирование фильтра Калмана с обновленной последовательностью в среде Simulink // Сборник научных трудов.

дов Новосибирского государственного технического университета. – 2015. – № 2. – С. 7–17.

16. Sun K., Qi J., Kang W. Power system observability and dynamic state estimation for stability monitoring using synchrophasor measurements // *Control Engineering Practice*. – 2016. – No. 53. – P. 160–172.

17. **Performance** comparison of static and dynamic state estimators for electric distribution systems / F. Ahmad, A. Rasool, E. Ozsoy, et al. // *International Journal of Emerging Electric Power Systems*. – 2017. – No. 18(3).

18. Глазунова А.М. Исследование свойств измерительной информации с целью ускорения динамического оценивания состояния режимов ЭЭС // *Современные подходы к обеспечению надежности электроэнергетических систем: науч.-практ. совещ., Сыктывкар, 22 мая 2013. – Сыктывкар, 2014. – С. 104–110.*

19. Съемщиков Е.С. Метод выявления успешно проведенных кибератак на базе динамического оценивания состояния электроэнергетической системы // *Системные исследования в энергетике: Труды молодых ученых ИСЭМ СО РАН. – Иркутск: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева Сибирского отделения Российской академии наук, 2016. – С. 45–51.*

20. **Методы** прогнозирования параметров режима электроэнергетических систем для целей мониторинга и управления / А.З. Гамм, А.М. Глазунова, Ю.А. Гришин и др. // *Электричество*. – 2011. – № 5. – С. 17–26.

21. Лукичева И.А., Куликов А.Л. Многомодельная оценка состояния энергосистемы на основе линейных переходных моделей // *Вестник ИГЭУ*. – 2021. – Вып. 1. – С. 31–40. DOI: 10.17588/2072-2672.2021.1.031-040.

22. Шавин М.Ю. Численные методы нелинейной фильтрации для оценки состояния квадрокоптера с поворотными роторами // *Труды Московского физико-технического института*. – 2019. – Т. 11, № 3(43). – С. 86–95.

23. **Performance** comparison of EKF/UKF/CKF for the tracking of ballistic target / D. Hong-de, D. Shao-wu, C. Yuan-cai, W. Guang-bin // *TELKOMNIKA Indonesian Journal of Electrical Engineering*. – 2012. – No. 10(7). – P. 1692–1699.

24. **Свидетельство** о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2021661342 Российская Федерация. Статическое оценивание состояния энергорайонов по синхронизированным векторным измерениям / Н.Л. Бацева, Ю.А. Фоос; заявл. 07.07.2021; заявитель Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет»; опубл. 09.07.2021.

25. **Свидетельство** о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2022685403 Российская Федерация. Динамическое оценивание состояния энергорайонов по синхронизированным векторным измерениям / Н.Л. Бацева, Ю.А. Фоос; заявл. 23.12.2022; заявитель Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет»; опубл. 23.12.2022.

## References

1. Chuvashcheva, N.N. Uchet lokal'noy protivovariy-  
noy avtomatiki v tekhnologicheskoy algoritme TsSPA  
[Accounting for local emergency automation in the techno-  
logical algorithm of the CSPA]. *Materialy XI Mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii «Elektroenergetika glazami molodezhi – 2020», Stavropol', 15–17 sentyabrya 2020 g. V 2 t.* [Proceedings of XI international scientific and technical conference “Electric power industry through the eyes of youth – 2020”, Stavropol', September 15–17, 2020. In 2 vol.]. Stavropol': Severo-Kavkazskiy federal'nyy universitet, 2020, pp. 63–66.

2. Neuymin, V.G., Aleksandrov, A.S., Satsuk, E.I., Mikhaylenko, A.F., Ostanin, A.Yu. Sistema monitoringa zapasov ustoychivosti pri planirovani i upravlenii elektroenergeticheskimi rezhimom EES Rossii [The system of monitoring the reserves of stability in the planning and management of the electric power regime of the power system of Russia]. *Materialy XI Mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii «Elektroenergetika glazami molodezhi – 2020», Stavropol', 15–17 sentyabrya 2020 g. V 2 t.* [Proceedings of XI international scientific and technical conference “Electric power industry through the eyes of youth – 2020”, Stavropol', September 15–17, 2020. In 2 vol.]. Stavropol': Severo-Kavkazskiy federal'nyy universitet, 2020, pp. 42–45.

3. Batseva, N.L., Foos, J.A. The Application of Modified Gauss-Newton Method for Improving Accuracy of Regime Parameters State Estimation and Control Action Adjustment in The Centralized Emergency Control System. 2020 3rd International Youth Scientific and Technical Conference on Relay Protection and Automation (RPA). IEEE, 2020, pp. 1–20.

4. Glazunova, A.M., Akseva, E.S. Modifitsirovannoe otsenivanie sostoyaniya dlya resheniya dispetcherskikh zadach pri upravlenii rezhimami elektroenergeticheskoy sistemy [Modified state estimation for solving dispatching tasks when controlling the modes of the electric power system]. *Elektrichestvo*, 2013, no. 12, pp. 21–29.

5. Batseva, N.L., Foos (Emel'yanova), Yu.A., Zhuk, A.V. Primenenie metoda dinamicheskogo otsenivaniya sostoyaniya dlya otsenivaniya parametrov rezhima energosistemy po teleizmereniyam [Application of the dynamic state estimation method for estimating the parameters of the power system mode by telemetry]. *Sbornik statey XII Vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii «Rezultaty sovremennykh nauchnykh issledovaniy i razrabotok», Penza, 12 marta 2021 g.* [Proceedings of XII All-Russian scientific and practical conference “Results of current scientific research and development – 2021”, Penza, March 12, 2021]. Penza: Nauka i Prosveshchenie (IP Gulyaev G.Yu.), 2021, pp. 48–53.

6. Gamm, A.Z. *Statisticheskie metody otsenivaniya sostoyaniya elektroenergeticheskikh sistem* [Statistical methods for state estimation of electric power systems]. Moscow: Nauka, 1976.

7. Abur, A., Gomez-Exposito, A. Power System State Estimation: Theory and Implementation. New York: Marcel Dekker, 2004. 327 p.

8. Voropay, N.I. *Sistemnye issledovaniya v energetike: Retrospektiva nauchnykh napravleniy SEI–ISEM* [System research in the energy sector: A retrospective of the scientific directions of SEI–ISEM]. Novosibirsk: Nauka, 2010. 686 p.



9. Zhao, J., Gomer-Exposito, A., Netto, M., Mili, L., Abur, A., Terzija, V., Kamwa, I., Pal, B.Ch., Singh, A.K., Qi, Ju., Huang, Z., Meliopoulos, A.P.S. Power system dynamic state estimation: Motivations, definitions, methodologies, and future work. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2019, no. 34(4), pp. 3188–3198.
10. Zhao, J., Zhang, G., Dong, Z.Y., La Scala, M. Robust forecasting aided power system state estimation considering state correlations. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2016, no. 9(4), pp. 2658–2666.
11. Glazunova, A.M., Kolosok, I.N., S'emshchikov, E.S. Obnaruzhenie nekorrektnykh dannykh pri upravlenii intellektual'noy energosistemoy metodami dinamicheskogo otsenivaniya sostoyaniya [Detection of incorrect data in the management of an intelligent power system by dynamic state estimation methods]. *Elektrichestvo*, 2017, no. 2, pp. 18–27.
12. Zhukov, A.V., Kulikov, Yu.A., Gerasimov, A.S., Esipovich, A.Kh., Smirnov, A.N. Otsenka dostovernosti dinamicheskikh modeley slozhnykh elektroenergeticheskikh sistem po dannym SMPR [Estimation of reliability of dynamic models of complex electric power systems according to WAMS data]. *Operativnoe upravlenie v elektroenergetike*, 2011, no. 6.
13. Koshy, S., Sunitha, R., Cherian, E.P. A PMU Model for Dynamic State Estimation of Power Systems. 2018 2nd International Conference on Power, Energy and Environment: Towards Smart Technology (ICEPE). *IEEE*, 2018, pp. 1–6.
14. Batseva, N.L., Foos, Yu.A., Pankratov, A.V. Otsenka vliyaniya pogreshnosti v sinkhronizirovannykh vektornykh izmereniyakh uglov pri napryazheniyakh na otsenivanie parametrov rezhima elektroenergeticheskikh sistem [Estimation of the influence of the error in synchronized phasor measurements of angles at voltages on the estimation of the parameters of the regime of electric power systems]. *Vestnik Chuvashskogo universiteta*, 2020, no. 3, pp. 24–45.
15. Voevoda, A.A., Troshina, G.V. Modelirovanie fil'tra Kalmana s obnovlennoy posledovatel'nost'yu v srede Simulink [Simulation of the Kalman filter with an updated sequence in the Simulink environment]. *Sbornik nauchnykh trudov Novosibirskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*, 2015, no. 2, pp. 7–17.
16. Sun, K., Qi, J., Kang, W. Power system observability and dynamic state estimation for stability monitoring using synchrophasor measurements. *Control Engineering Practice*, 2016, no. 53, pp. 160–172.
17. Ahmad, F., Rasool, A., Ozsoy, E., Sabanovic, A., Elitas, M. Performance comparison of static and dynamic state estimators for electric distribution systems. *International Journal of Emerging Electric Power System*, 2017, no. 18(3).
18. Glazunova, A.M. Issledovanie svoystv izmeritel'noy informatsii s tsel'yu uskoreniya dinamicheskogo otsenivaniya sostoyaniya rezhimov EES [Investigation of the properties of measuring information in order to accelerate the dynamic state estimation of power system modes]. *Nauchno-prakticheskoe soveshchanie «Sovremennye podkhody k obespecheniyu nadezhnosti elektroenergeticheskikh system»*, Syktyvkar, 22–23 maya 2013 [Scientific and practical meeting “Modern approaches to ensure the reliability of electric power systems”, Syktyvkar, May 22, 2013]. Syktyvkar, 2014, pp. 104–110.
19. S'emshchikov, E.S. Metod vyavleniya uspeshno provedennykh kiberatak na baze dinamicheskogo otsenivaniya sostoyaniya elektroenergeticheskoy sistemy [Method of detecting successfully conducted cyberattacks based on dynamic state estimation of the electric power system]. *Trudy molodykh uchenykh ISEM SO RAN «Sistemnye issledovaniya v energetike»* [Proceedings of young scientists of ISEM SB RAS “System research in power engineering”]. Irkutsk: Federal'noe gosudarstvennoe byudzhethoe uchrezhdenie nauki Institut sistem energetiki im. L.A. Melent'eva Sibirskogo otdeleniya Rossiyskoy akademii nauk, 2016, pp. 45–51.
20. Gamm, A.Z., Glazunova, A.M., Grishin, Yu.A., Kurbatskiy, V.G., Sidorov, D.N., Spiryayev, V.A., Tomin, N.V. Metody prognozirovaniya parametrov rezhima elektroenergeticheskikh sistem dlya tseley monitoringa i upravleniya [Methods of forecasting the parameters of the regime of electric power systems for monitoring and management purposes]. *Elektrichestvo*, 2011, no. 5, pp. 17–26.
21. Lukicheva, I.A., Kulikov, A.L. Mnogomodel'naya otsenka sostoyaniya energosistemy na osnove lineynykh perekhodnykh modeley [Multimodule assessment of the state of the power system based on linear transient models]. *Vestnik IGEU*, 2021, issue 1, pp. 31–40. DOI 10.17588/2072-2672.2021.1.031-040.
22. Shavin, M.Yu. Chislennyye metody nelineynoy fil'tratsii dlya otsenki sostoyaniya kvadrokoptera s povorotnymi rotorami [Numerical methods of nonlinear filtering for assessing the condition of a quadcopter with rotary rotors]. *Trudy Moskovskogo fiziko-tekhnicheskogo instituta*, 2019, vol. 11, no. 3(43), pp. 86–95.
23. Hong-de, D., Shao-wu, D., Yuan-cai, C., Guang-bin, W. Performance comparison of EKF/UKF/CKF for the tracking of ballistic target. *TELKOMNIKA Indonesian Journal of Electrical Engineering*, 2012, no. 10(7), pp. 1692–1699.
24. Batseva, N.L., Foos, Yu.A. Staticheskoe ocenivanie sostojaniya jenergorajonov po sinkhronizirovannym vektornym izmereniyam [Static state estimation of energy districts by synchronized phasor measurements]. *Svidetel'stvo o gosudarstvennoy registratsii programmy dlya EVM № 2021661342 Rossiyskaya Federatsiya* [Certificate of state registration of the computer program No. 2021661342 Russian Federation], 2021.
25. Batseva, N.L., Foos, Yu.A. Dinamicheskoe ocenivanie sostojaniya jenergo-rajonov po sinkhronizirovannym vektornym izmereniyam [Dynamic state estimation of energy districts by synchronized phasor measurements]. *Svidetel'stvo o gosudarstvennoy registratsii programmy dlya EVM № 2022685403 Rossiyskaya Federatsiya* [Certificate of state registration of the computer program No. 2022685403 Russian Federation], 2022.

УДК 621.365, 621.78

**Владимир Дмитриевич Лебедев**

ФГБОУ ВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой автоматического управления электроэнергетическими системами, Россия, Иваново, e-mail: vd\_lebedev@mail.ru

**Елена Евгеньевна Готовкина**

ФГБОУ ВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», аспирант кафедры теоретических основ электротехники и электротехнологии, Россия, Иваново, e-mail: elengotovkina@yandex.ru

## Разработка конструкции индуктора для закалки детали сложной формы

### Авторское резюме

**Состояние вопроса.** В связи с активным процессом импортозамещения, отечественная промышленность переходит на производство деталей, ранее закупаемых за рубежом, которые необходимы для стабильной и надежной работы различных технических объектов и систем. В связи с этим становится актуальным разработка технологической установки по закалке металлического профиля. Задача осложняется тем, что профиль имеет очень тонкие стенки неровной формы, которые должны закаляться только с внутренней стороны, в то время как наружная стенка профиля для сохранения прочности должна греться минимально.

**Материалы и методы.** Исследования выполнены на имитационных моделях электромагнитных и тепловых полей, позволяющих воспроизводить процесс индукционного нагрева объекта исследований. В связи с тем что деталь имеет одинаковую форму по всей длине, моделирование процесса ее индукционного нагрева выполнено в двухмерном пространстве.

**Результаты.** Предложена имитационная модель процесса индукционного нагрева детали нестандартной формы, которая включает расчеты тепловых и электромагнитных полей. Предложена конструкция индуктора, дополненная ферритовыми вставками, позволяющая достигать необходимого для процесса закалки температурного режима.

**Выводы.** Разработанная имитационная модель позволяет оценивать распределение теплового и электромагнитного полей детали, тем самым прогнозировать достижение нужных для её закалки температур при использовании различных конструкций индукторов. Результаты численных экспериментов согласуются с физическими представлениями об индукционном нагреве и доказывают возможность использования индукционной закалки для тонкостенных деталей сложной формы вместо применяемой для такого типа деталей лазерной закалки. Предложенная модель может быть использована в инженерной практике проектирования индукторов деталей нестандартной формы.

**Ключевые слова:** индукционная установка, индуктор, закалка стали, имитационная модель с распределенными параметрами, электромагнитные поля, тепловые поля

**Vladimir Dmitrievich Lebedev**

Ivanovo State Power Engineering University, Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor, Head of Automatic Control of Electric Power Systems Department, Russia, Ivanovo, e-mail: vd\_lebedev@mail.ru

**Elena Evgenievna Gotovkina**

Ivanovo State Power Engineering University, Postgraduate Student of Theoretical Foundations of Electrical Engineering and Electrotechnology Department, Russia, Ivanovo, e-mail: elengotovkina@yandex.ru

## Development of design of an inductor for hardening a part of a complex shape

### Abstract

**Background.** Due to active process of import substitution, domestic industry starts producing the parts previously purchased abroad. These parts are necessary for stable and reliable operation of various technical objects and systems. Thus, the development of a technological installation for hardening a metal profile is topical. The task is complicated by the fact that the profile has very thin irregularly shaped walls, which should be hardened only from the inside, while the outer wall of the profile should be heated minimally to maintain strength.

**Materials and methods.** The studies have been carried out on simulation models of electromagnetic and thermal fields, which make it possible to reproduce the process of induction heating of the research object. Since the part has the same shape along the entire length, the simulation of the process of its induction heating is performed in two-dimensional space.



**Results.** The authors have developed a simulation model of the process of induction heating of a part of a non-standard shape, which includes calculations of thermal and electromagnetic fields. The design of the inductor is proposed, supplemented with ferrite inserts, which makes it possible to achieve the temperature regime necessary for the hardening process.

**Conclusions.** The developed simulation model makes it possible to evaluate the distribution of the thermal and electromagnetic fields of the part, thereby predicting getting the temperatures required for its hardening when using various designs of inductors. The results of numerical experiments are consistent with the physical concepts of induction heating and prove the possibility to use induction hardening for thin-walled parts of complex shape instead of laser hardening used for this type of parts. The proposed model can be used in engineering practice to design inductors of non-standard parts.

**Key words:** induction-heating installation, inductor, steel hardening, distributed parameter simulation model, electromagnetic fields, thermal fields

**DOI:** 10.17588/2072-2672.2023.3.016-024

**Введение.** Упрочнение металлов и сплавов является важным мероприятием, обеспечивающим надежную работу машиностроительной отрасли. Термическая обработка металлов является одной из составных частей большого комплекса по производству всевозможных деталей машин, станков, различных инструментов. Существуют различные методы упрочнения стали:

- термомеханическая обработка, которая, в свою очередь, делится на высокотемпературную и низкотемпературную;

- поверхностное упрочнение стальных деталей, которое подразделяется на газоплазменную закалку и электротермическую закалку с нагревом изделий токами высокой частоты (ТВЧ), называемую также индукционным нагревом.

Наиболее прогрессивным является индукционный нагрев, который обладает рядом преимуществ по сравнению с другими методами закалики стали [1–5]:

- высокой производительностью в связи с отсутствием затрат на прогрев установки и ее охлаждение;

- высокой скоростью нагрева, позволяющей сэкономить большое количество времени, повышая продуктивность не только самой установки, но и предприятия в целом;

- возможностью организации прямонаправленного нагрева, благодаря чему происходит равномерное распределение тепла по изделию, что способствует формированию металла более высокого качества;

- отсутствием вредных выбросов (экологически чистая установка);

- возможностью проведения широкого спектра тепловой обработки практически любых материалов, деталей и поверхностей;

- возможностью полной автоматизации процесса;

- возможностью закалики отдельных участков детали;

- экономией производственных ресурсов и снижением себестоимости изделия, поскольку для нагрева потребляется сравнительно меньшее количество энергии.

Наиболее часто индукционной закалке подвергаются детали достаточно больших размеров, которые имеют одинаковое сечение по всей длине заготовки. При такой постановке задачи методика разработки конструкции индуктора известна и достаточно хорошо проработана [3].

Однако в связи с научно-техническим прогрессом метод высокочастотного индукционного нагрева с учетом описанных выше достоинств находит применение для решения сложных нестандартных задач.

В условиях растущего импортозамещения возникла задача производства деталей и элементов, которые ранее поставлялись из-за рубежа, но попали под санкции. Одним из таких элементов является стальной профиль (рис. 1).

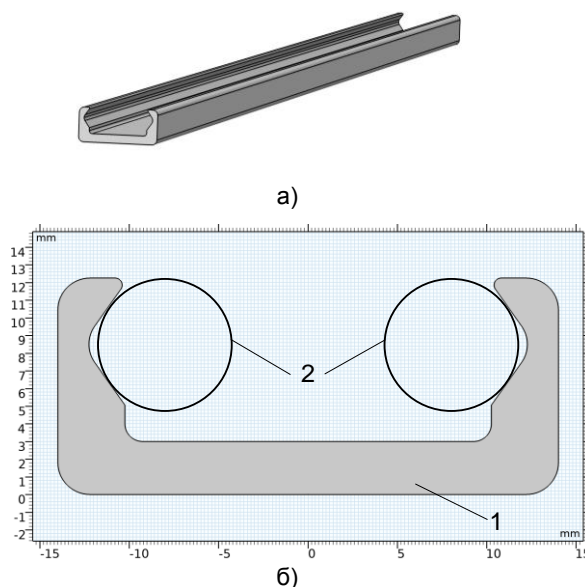


Рис. 1. Макет детали: а – изображение в трехмерном пространстве; б – разрез; 1 – металлический профиль; 2 – мнимые окружности

Важным эксплуатационным требованием к профилю является износостойкость его внутренних стенок, прилегающих к мнимым окружностям 2. Данное требование возможно обеспечить путем выполнения закалики. Закаленный металл подвергается мартенситному превращению.

щению, за счет чего повышается как его твердость, так и его хрупкость. Повышенная хрупкость недопустима, так как может приводить к поломке как при монтаже изделия, так и во время эксплуатации. В целях недопущения повышенной хрупкости металла закалке должны подвергаться только поверхностные слои металла в местах, где необходимо обеспечить его износостойкость, повышая твердость. Соответственно, в процессе закалки остальные зоны профиля не должны прогреваться до температуры закалки. Рассматриваемый нами закаливаемый профиль имеет малые размеры (<30 мм в ширину с толщиной стенок 3–5 мм), что значительно усложняет выполнение поставленных условий.

Таким образом, актуальной является задача разработки и подбора оптимальных параметров индукционной установки, позволяющей выполнить процедуры упрочнения представленной выше детали.

**Индукционная установка.** Индукционная закалочная установка является сложной технической системой, включающей в себя: заготовку (деталь), на которую направлено воздействие; технологию проведения данного воздействия (систему контроля и управления); оборудование, с помощью которого осуществляется воздействие: индуктор, источник питания, систему закалочного охлаждения, систему механизации (рис. 2).

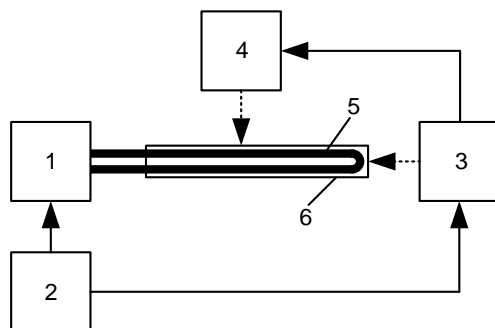


Рис. 2. Структурная схема индукционного оборудования для термической обработки: 1 – источник питания; 2 – система контроля и управления; 3 – система закалочного охлаждения; 4 – система механизации; 5 – индуктор; 6 – нагреваемый элемент

Обрабатываемый профиль изготовлен из нелегированной специальной конструкционной качественной углеродистой стали, закалка которой происходит при нагреве поверхности в диапазоне температур 805–850 °C<sup>2</sup> с последующим охлаждением водой. Как уже было отмечено выше, организация процесса закалки затрудняется сложной формой профиля детали, а

также условием нагрева только тех поверхностей изделия, которые подвергаются повышенному износу. Для достижения указанных условий необходимо правильно разработать конструкцию индуктора, а также подобрать остальные блоки системы.

Воздействие на деталь осуществляется наведенными токами, создаваемыми индуктором, подключенным к источнику питания. В настоящее время в качестве источников питания индукционных установок применяют три различных типа преобразователей частоты: ламповые, машинные, полупроводниковые. Основной их задачей является преобразование одно- и трехфазного тока промышленной частоты и напряжения в однофазный с заданными параметрами (частота, напряжение). Диапазоны генерируемых частот различных типов генераторов представлены в табл. 1. Для поверхностной закалки тонких поверхностей с глубиной закаленного слоя от 0,8 до 1,2 мм применяются высокочастотные и сверхвысокочастотные индукционные установки [1]. Величина генерируемых токов закалки ограничивается предельной мощностью установки и режимом работы. В связи с этим основными требованиями при выборе источника питания являются:

- подбор прибора по необходимой мощности и частоте;
- наличие системы контроля и управления выходных параметров, а также самодиагностики с возможностью подстройки и наладки;
- высокий КПД преобразования электроэнергии.

Таблица 1. Диапазоны частот различных генераторов

Тип генератора	Диапазон генерируемых частот, Гц
Машинный	500–10 000
Полупроводниковый	4 000–66 000
Ламповый	до 10 000 000

После нагрева поверхности, согласно технологии процесса закалки, ее следует охладить в воде. Основным требованием системы закалочного охлаждения является обеспечение бесперебойной подачи охлаждающей воды с постоянными параметрами в течение всего процесса индукционной закалки: температурой, расходом, скоростью подачи.

Закаливаемая деталь в данной индукционной установке перемещается вдоль индуктора со скоростью, необходимой и достаточной для качественного процесса закалки. Система механизации должна обеспечивать фиксацию профиля, а также поддерживать постоянную скорость перемещения.

Корректная работа описанных выше блоков, регулирование электромагнитного воздействия, обеспечивается системой кон-

<sup>2</sup> ГОСТ 1050-88. Прокат сортовой, калиброванный, со специальной отделкой поверхности из углеродистой качественной конструкционной стали. Общие технические условия.

троля и управления. Для высокочастотной индукционной заковки, при которой процессы протекают за считанные секунды, наиболее подходящей является система управления по отклонению [6]: задаются контролируемые величины (мощность нагрева, параметры охлаждения), эти параметры сравниваются с допустимыми интервалами, подается управляющий сигнал, после завершения процесса заковки при тестовых испытаниях деталь признается пригодной или браком (рис. 3).

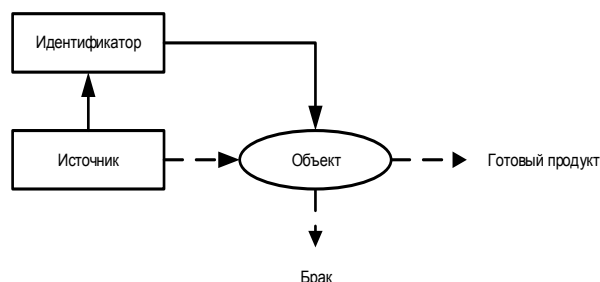


Рис. 3. Схема системы контроля и управления процессом индукционной заковки при длительности цикла одного действия менее 1 минуты

Таким образом, для решения задачи по заковке требуемых поверхностей рассматриваемого профиля (рис. 1) необходимо разработать конструкцию индуктора, позволяющую нагревать только требуемые радиусные участки, оставляя при этом незакаленными наружные поверхности детали; подобрать технологические параметры источника питания; разработать систему управления частоты и мощности для обеспечения его корректной работы. Системы механизации и охлаждения являются стандартными, хорошо изученными, но требующими не менее тщательной проработки в целях уменьшения или исключения низкой твердости или перегрева поверхностей. Проработка всего технологического процесса заковки позволит найти оптимальный экономичный режим работы, свести к минимуму появление брака при заковке: образование закалочных трещин; деформацию и коробление; обезуглероживание и окисление; изменение размеров; появление мягких пятен.

**Имитационная модель процесса индукционного нагрева.** Процесс индукционной заковки известен уже более 100 лет. За это время были выведены аналитические формулы для расчета индукторов [7], однако воспользоваться ими для нагрева описанной выше заготовки невозможно, поскольку они предназначены для деталей цилиндрической или иной формы с ровными краями.

Расчет параметров индуктора для обеспечения описанного выше технологического процесса возможно выполнить на основе имитационного моделирования процесса индукционного нагрева.

Имитационная модель процесса индукционного нагрева профиля основана на решении системы уравнений Максвелла (теорема о циркуляции магнитного поля и закон Фарадея), записанных относительно векторного магнитного потенциала и при предположении гармоничности поля во времени для связи расчетов электромагнитных и тепловых полей:

– система уравнений Максвелла:

$$\nabla \times \vec{H} = \vec{J}, \quad (1)$$

$$\vec{B} = \nabla \times \vec{A}, \quad (2)$$

$$\vec{E} = -j\omega \vec{A}; \quad (3)$$

– уравнение теплопередачи:

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} + \nabla \cdot \vec{q} = Q; \quad (4)$$

– уравнения электромагнитных потерь:

$$Q = Q_{\text{резист}} + Q_{\text{магн}}, \quad (5)$$

$$Q_{\text{резист}} = \frac{1}{2} \text{Re}(\vec{J} \cdot \vec{E}), \quad (6)$$

$$Q_{\text{магн}} = \frac{1}{2} \text{Re}(i\omega \vec{B} \cdot \vec{H}), \quad (7)$$

где  $\nabla$  – дифференциальный оператор набла;  $\vec{H}$  – напряженность магнитного поля, А/м;  $\vec{J}$  – плотность электрического тока, А/м<sup>2</sup>;  $\vec{E}$  – напряженность электрического поля, В/м;  $\vec{B}$  – магнитная индукция, Тл;  $\vec{A}$  – векторный магнитный потенциал, Тл/м;  $\sigma_{\text{эл}}$  – электропроводность, См/м;  $\rho$  – плотность, кг/м<sup>3</sup>;  $C_p$  – удельная изобарная теплоемкость, Дж/(кг·К);  $T$  – температура, °С;  $\vec{q} = -\lambda \nabla T$  – удельный тепловой поток, Вт/м<sup>2</sup>;  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности, Вт/(м·°С);  $Q$  – электромагнитные потери, Вт;  $Q_{\text{резист}}$  – резистивные потери, Вт;  $Q_{\text{магн}}$  – магнитные потери, Вт.

Система уравнений дополнена следующими граничными условиями (рис. 4):

– магнитная изоляция

$$\vec{n} \times \vec{A} = 0; \quad (8)$$

– тепловая изоляция

$$-\vec{n} \times \vec{q} = 0; \quad (9)$$

– конвективный теплообмен

$$-\vec{n} \times \vec{q} = \alpha(T_{\text{ос}} - T); \quad (10)$$

– теплообмен излучением

$$-\vec{n} \times \vec{q} = \varepsilon \sigma (T_{\text{ос}}^4 - T^4), \quad (11)$$

где  $\alpha$  – коэффициент теплоотдачи, Вт/(м<sup>2</sup>·°С);  $\varepsilon$  – коэффициент излучения;  $\sigma$  – постоянная Стефана-Больцмана.

Коэффициент теплоотдачи для поверхностей различной геометрической ориентации задавался в формульном виде [8]:

– для вертикальной поверхности

$$\alpha = \begin{cases} \frac{k}{L} \left( 0,68 + \frac{0,67 Ra_L^{1/4}}{\left( 1 + \left( \frac{0,492k}{\mu C_p} \right)^{9/16} \right)^{4/9}} \right), & \text{если } Ra_L \leq 10^9, \\ \frac{k}{L} \left( 0,825 + \frac{0,387 Ra_L^{1/6}}{\left( 1 + \left( \frac{0,492k}{\mu C_p} \right)^{9/16} \right)^{8/27}} \right)^2, & \text{если } Ra_L > 10^9; \end{cases} \quad (12)$$

– для горизонтальной поверхности

$$\alpha = \begin{cases} \frac{k}{L} 0,54 Ra_L^{1/4}, & \text{если } \begin{cases} T \leq T_{\text{внешн}}, \\ 10^4 \leq Ra_L \leq 10^7, \end{cases} \\ \frac{k}{L} 0,15 Ra_L^{1/3}, & \text{если } \begin{cases} T \leq T_{\text{внешн}}, \\ 10^7 \leq Ra_L \leq 10^{11}, \end{cases} \\ \frac{k}{L} 0,27 Ra_L^{1/4}, & \text{если } \begin{cases} T > T_{\text{внешн}}, \\ 10^5 \leq Ra_L \leq 10^{10}; \end{cases} \end{cases} \quad (13)$$

– для наклонной поверхности

$$\alpha = \begin{cases} \frac{k}{L} \left( 0,68 + \frac{0,67 ((\cos \varphi) Ra_L)^{1/4}}{\left( 1 + \left( \frac{0,492k}{\mu C_p} \right)^{9/16} \right)^{4/9}} \right), & \text{если } Ra_L \leq 10^9, \\ \frac{k}{L} \left( 0,825 + \frac{0,387 Ra_L^{1/6}}{\left( 1 + \left( \frac{0,492k}{\mu C_p} \right)^{9/16} \right)^{8/27}} \right)^2, & \text{если } Ra_L > 10^9, \end{cases} \quad (14)$$

где  $L$  – длина поверхности, м;  $Ra_L$  – коэффициент Релея.

В связи с тем что профиль имеет одинаковую форму по всей длине, имитационное моделирование процесса его индукционного нагрева выполнялось в двухмерном пространстве. Моделирование в двухмерном пространстве занимает меньше времени и облегчает требования к вычислительным ресурсам по сравнению с моделированием в трехмерном пространстве.

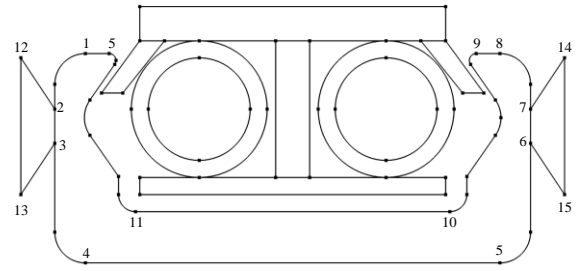


Рис. 4. Граничные условия по тепловому полю: 1-2, 3-4, 8-7, 6-5, 5-11, 9-10, 12-13, 14-15 – конвективный теплообмен от вертикальной поверхности профиля; 1-5, 9-8, 11-10, 4-5 – конвективный теплообмен от горизонтальной поверхности профиля; 2-12, 3-13, 7-14, 6-15 – конвективный теплообмен от наклонной поверхности медной трапеции; 2-12-13-3, 7-14-15-6 – теплообмен излучением от медной трапеции; 2-1-5-11-10-9-8-7, 6-5-4-3 – теплообмен излучением от профиля

Геометрические условия однозначности профиля и первоначальной конструкции индуктора в двумерном пространстве представлены на рис. 5. Индуктор изображен в виде медной трубки диаметром 8 мм. Внутри индуктора циркулирует вода для его охлаждения. Снаружи к индуктору добавлена ферритовая вставка для получения необходимого распределения магнитного поля и обеспечения нагрева требуемых участков профиля.

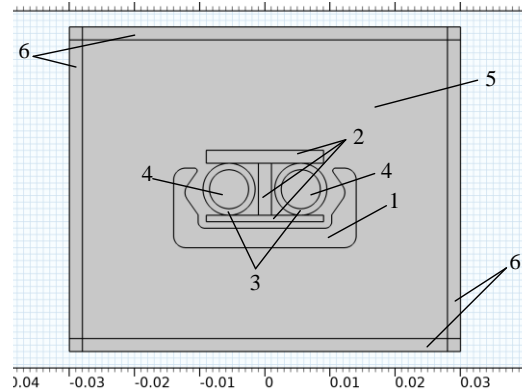


Рис. 5. Геометрия имитационной модели исследуемого профиля и первоначальная конструкция индуктора: 1 – профиль; 2 – ферритовые вставки; 3 – медные трубки  $d = 8$  мм; 4 – вода; 5 – воздух; 6 – бесконечные элементы

Для уменьшения дополнительной погрешности расчетов электромагнитных полей имитационной модели, связанной с ограничением расчетной области, в модель добавлены бесконечные элементы. Они расширяют расчетную область до бесконечности за счет масштабирования их координат при сохранении размеров расчетной области.

Для расчета имитационной модели выбран метод конечных элементов. В результате анализа выполненных исследований выбрана

сетка с 20 граничными слоями у профиля и общим количеством конечных элементов 10634.

**Разработка оптимальной конструкции индуктора.** При первоначальной предложенной конструкции индуктора (рис. 5) разогреть внутренние боковые стенки профиля в заданных областях не представляется возможным. Изотермы боковой стенки профиля располагаются горизонтально (рис. 6), прогревая обе поверхности детали одновременно. Разница температуры в нижней и верхней вертикальной частях профиля составляет около 100 °С. Таким образом, происходит перегрев верхней половины заготовки, в то время как нижняя часть не успевает нагреваться до температуры закалки.

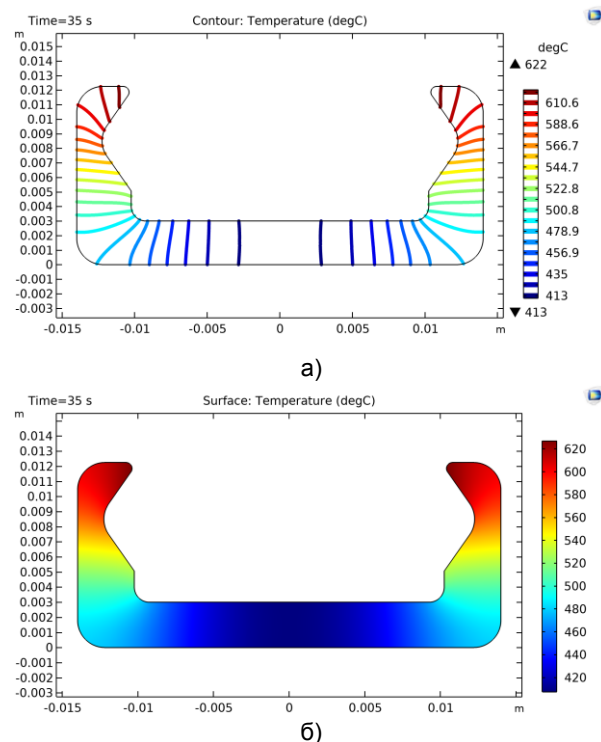


Рис. 6. Графики распределения температуры при первоначальной конструкции индуктора: а – изотермы; б – картина распределения температурного поля

Анализ картины магнитного поля (рис. 7,а) позволяет сделать вывод о необходимости его распределения. Для этого решено использовать дополнительные ферритовые вставки (рис. 7,б). Изменение длины поперечного сечения этих вставок приводит к изменению распределения магнитного поля и температуры боковой стенки профиля. Вычислительные эксперименты показали, что при слишком коротком поперечном сечении ферритовых вставок изотермы загибаются недостаточно, а при более длинном – наблюдается смещение зоны максимального нагрева вниз от центра боковой стенки. В результате исследования была выбрана длина ферритовых вставок, позволившая получить оптимальную картину распределения магнитного поля (рис. 7,б).

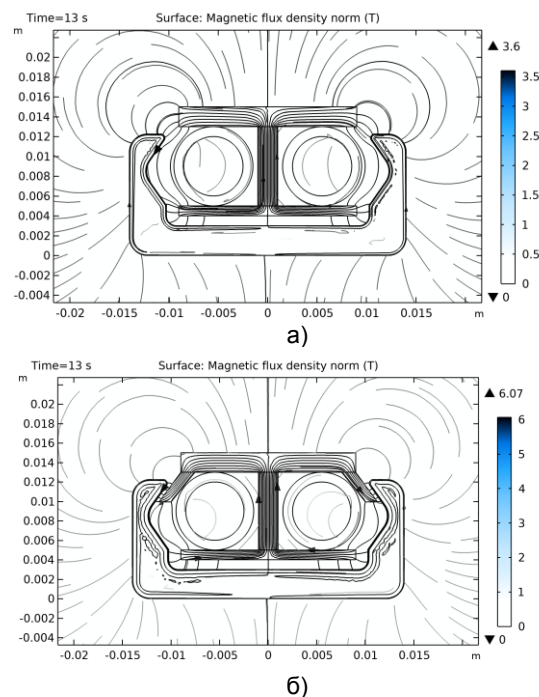


Рис. 7. Распределение магнитного поля: а – первоначальная конструкция индуктора; б – оптимальная конструкция индуктора

Графики распределения температуры при оптимальной конструкции индуктора представлены на рис. 8. Изотермы (рис. 8,а) начинают загибаться в нужную сторону, однако за счет того, что деталь очень тонкая, она прогревается полностью, что не удовлетворяет условию закалки только поверхностей. Деталь в этом случае будет являться браком.

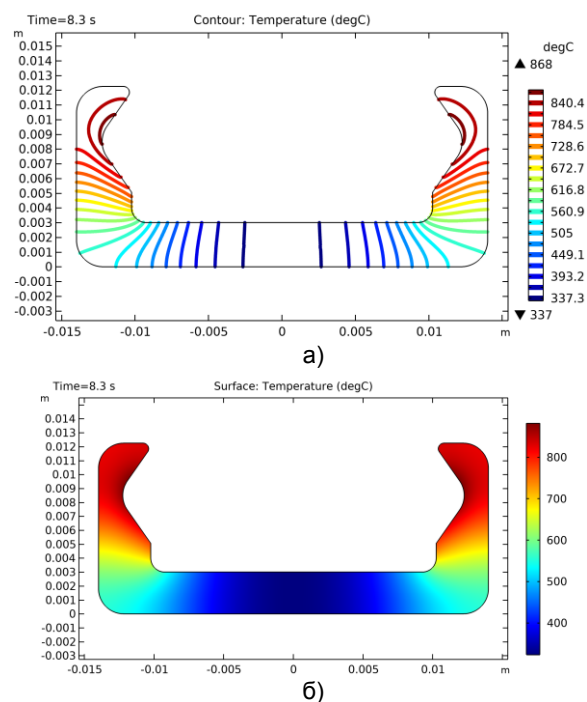


Рис. 8. Графики распределения температуры при нагреве до 850 °С при оптимальной конструкции индуктора: а – изотермы; б – картина распределения температурного поля



Для того чтобы избежать этого и снизить температуру наружной стенки, предлагается добавить дополнительные теплоотводы. В качестве таких теплоотводов могут быть теплоотводы в виде медных трубок, заполненных водой, прилегающих к наружной стенке детали, медных тетраэдров, трапеций, прилегающих острием к заготовке. Вычислительные эксперименты показали, что при использовании трубок с водой охлаждение наружной стенки происходит слишком интенсивно, полностью меняется картина распределения теплового поля, зоны соприкосновения с трубками не нагреваются до нужных температур, а увеличение подаваемого тока приводит к перегреву остальной части пластины; при использовании треугольных пластин отвод тепла недостаточен. Оптимальным является применение медных трапеций, варьируя форму, размеры и точку прилегания которых удалось разработать конструкцию, обеспечивающую заданное распределение картины теплового поля с повышенным градиентом температуры на внутренней и внешней стенках закаливаемой детали (рис. 9, 10).

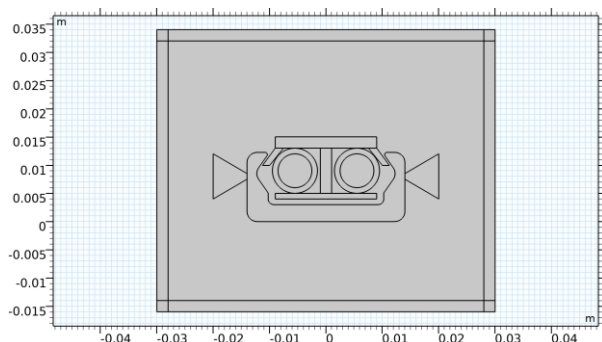


Рис. 9. Итоговая конструкция индуктора с закаливаемой деталью

На имитационной модели разработанной конструкции индуктора были проведены исследования влияния величины подаваемого тока и частоты на скорость нагрева поверхностей детали. Моделирование проводилось для токов 100, 200, 300, 400, 500 А на частоте 10, 30, 50–100 кГц. При токе 100 А, независимо от частоты, стенки детали не могут нагреться до требуемой температуры. Увеличение частоты приводит к более интенсивному процессу нагрева, но большее влияние на скорость тепловых процессов оказывает величина подаваемого тока (рис. 11,а), вследствие чего разница температур между внутренней и внешней стенками увеличивается, позволяя закалить требуемые радиусные участки, не подвергая при этом фазовому переходу внешнюю стенку детали. Выявлено, что при величине тока, равной 500 А, тепловое поле начинает изменяться: идет перегрев нижней части детали, при этом верхняя половина не догревается до закалочных температур, поэтому наиболее подходящим

режимом работы данной индукционной установки являются токи в диапазоне 300–400 А на частотах 80–100 кГц.

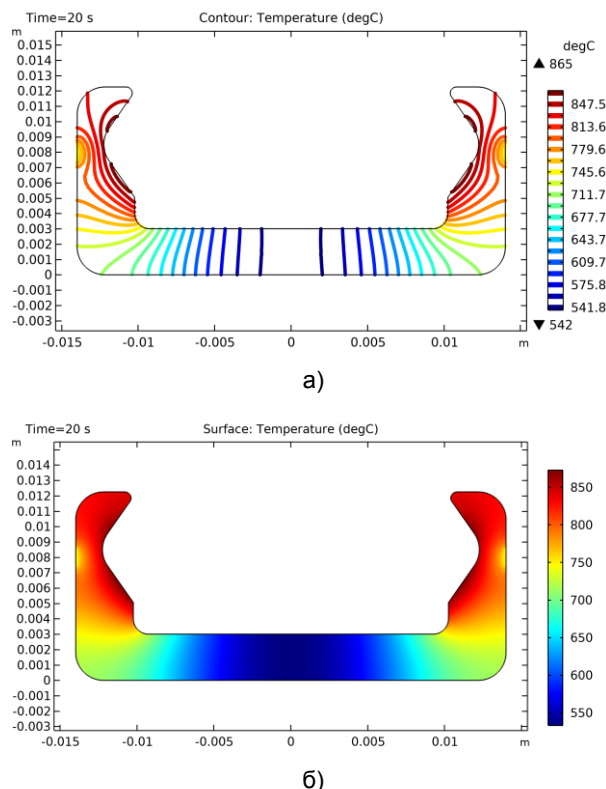


Рис. 10. Распределение температуры ( $t = 20$  с,  $I = 250$  А,  $f = 100$  кГц): а – изотермы; б – картина распределения температурного поля

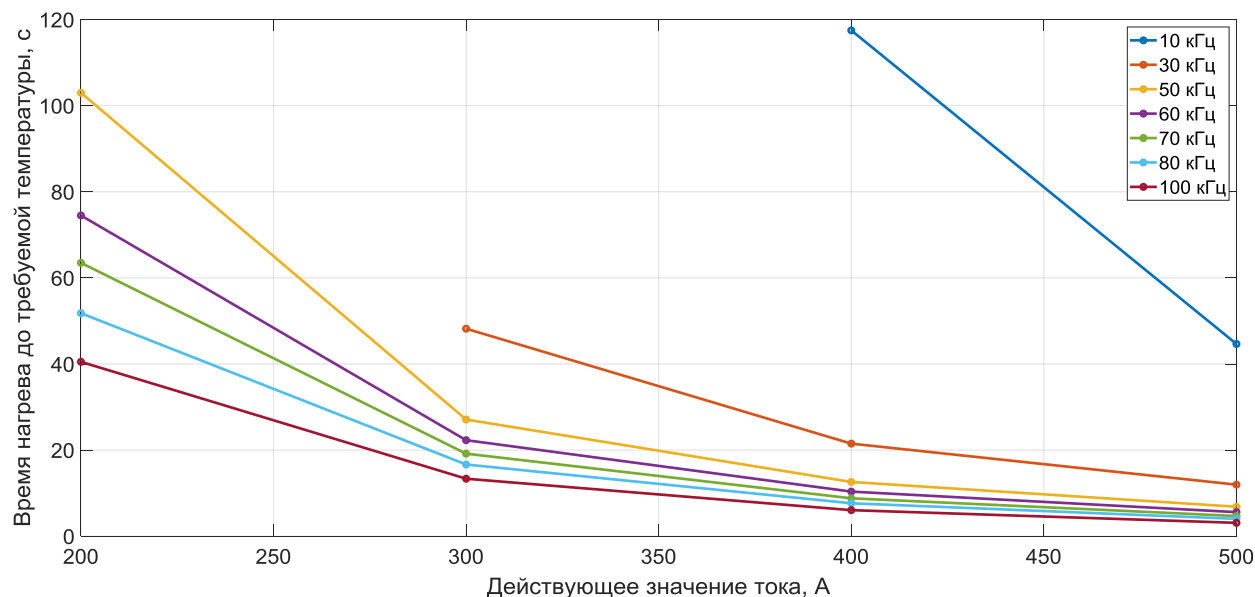
**Выводы.** Индукционный нагрев позволяет обрабатывать детали различных форм и размеров. Для эффективной работы индукционной установки необходимо правильно разработать конструкцию индуктора, выбрать подходящие материалы для его изготовления и оптимальный режим работы источника питания, согласованный с характеристиками индуктора-заготовки, и т.д.

Разработанный в результате выполненных исследований индуктор позволяет закалять отдельные участки очень тонкой детали сложной формы.

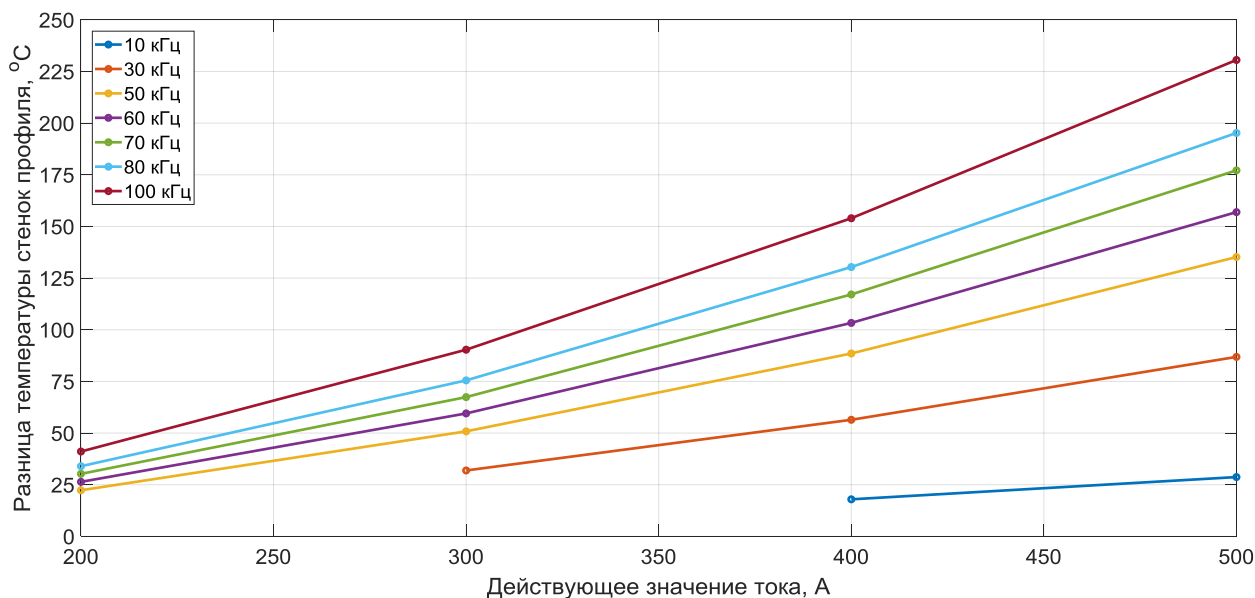
Условия индукционного нагрева детали под закалку, подобранные в процессе моделирования при вариации таких параметров, как частота, мощность нагрева, геометрия концентраторов магнитного поля, оказались удовлетворяющими требованиям закалки только поверхности.

Применение математического компьютерного моделирования позволило оперативно получить необходимые параметры технологического процесса закалки.

Дальнейшие исследования будут направлены на разработку системы регулирования коэффициента мощности индукционной установки.



а)



б)

Рис. 11. Энергетические характеристики при разных частотах генерируемого напряжения: а – время нагрева поверхности до температуры закалки от величины тока; б – разница температур закаливаемой и не закаливаемой поверхностей заготовки от величины подаваемого тока

### Список литературы

1. Кучеров В.В. Особенности использования индукционных установок различного частотного диапазона; виды индукционных трансформаторов; градирни и чиллеры – промышленные системы охлаждения индукционного оборудования. Ч. II // Индустрия. – 2014. – № 6(88). – С. 13–17.
2. Торяников А.Ю., Барышников А.А. Сравнительный анализ высокоэнергетических методов поверхностного упрочнения стали // Молодой ученый. – 2021. – № 19(361). – С. 45–49.
3. Корягин Ю.Д., Филатов В.И. Индукционная закалка сталей: учеб. пособие. – Челябинск: Изд-во ЮУрГУ, 2006. – 52 с.
4. Троценко В.В., Подольничик П.И. Индукционный нагреватель [Электронный ресурс] // Электрон-

ный научно-методический журнал Омского ГАУ. – 2018. – № 1(12) январь – март. – Режим доступа: <http://e-journal.omgau.ru/images/issues/2018/1/00516.pdf>

5. Рогинская Л.Э., Исмаилов Р.Р., Рахманова Ю.В. Согласование выходных параметров инвертора для индукционного нагрева с параметрами нагрузки с помощью ферромагнитного умножителя частоты // Электротехнические и информационные комплексы и системы. – 2013. – Т. 9, № 2. – С. 12–17.

6. Гордиенко А.И., Михлюк А.И., Вегера И.И. Индукционная термическая обработка в машиностроении: анализ, проблемы и перспективы развития // Литье и металлургия. – 2010. – № 1(54), 2(55). – С. 140–148.

7. Слухоцкий А.Е., Рыскин С.Е. Индукторы для индукционного нагрева. – Л.: Энергия, 1974. – 264 с.

## 8. Fundamentals of Heat and Mass Transfer /

F.P. Incropera, D.P. DeWitt, T.L. Bergman, A.S. Lavine. – 6th ed. – New York: John Wiley & Sons, 2006.

### References

1. Kucherov, V.V. Osobennosti ispol'zovaniya induktsionnykh ustanovok razlichnogo chastotnogo diapazona; vidy induktsionnykh transformatorov; gradirni i chillery – promyshlennye sistemy okhlazhdeniya induktsionnogo oborudovaniya. Ch. II [Features of the use of induction installations of different frequency ranges; types of induction transformers; cooling towers and chillers – industrial cooling systems for induction equipment. Part II]. *Industriya*, 2014, no. 6(88), pp. 13–17.

2. Toryannikov, A.Yu., Baryshnikov, A.A. Sravnitel'nyy analiz vysokoenergeticheskikh metodov poverkhnostnogo uprochneniya stali [Comparative analysis of high-energy methods of surface hardening of steel]. *Molodoy uchenyy*, 2021, no. 19(361), pp. 45–49.

3. Koryagin, Yu.D., Filatov, V.I. *Induktsionnaya zakalka staley* [Induction hardening of steels]. Chelyabinsk: YuUrGU, 2006. 52 p.

4. Trotsenko, V.V., Podolyanchik, P.I. Induktsionnyy nagrevatel' [Induction heater]. *Elektronnyy*

*nauchno-metodicheskiy zhurnal Omskogo GAU*, 2018, no. 1 (12), yanvar' – mart. Available at: <http://e-journal.omgau.ru/images/issues/2018/1/00516.pdf>.

5. Roginskaya, L.E., Ismagilov, R.R., Rakhmanova, Yu.V. Soglasovanie vykhodnykh parametrov invertora dlya induktsionnogo nagreva s parametrami nagruzki s pomoshch'yu ferromagnitnogo umnozhitelya chastoty [Matching the output parameters of an inverter for induction heating with load parameters using a ferromagnetic frequency multiplier]. *Elektrotekhnicheskie i informatsionnye komplekсы i sistemy*, 2013, vol. 9, no. 2, pp. 12–17.

6. Gordienko, A.I., Mikhlyuk, A.I., Vegera, I.I. Induktsionnaya termicheskaya obrabotka v mashinostroenii: analiz, problemy i perspektivy razvitiya [Induction heat treatment in mechanical engineering: analysis, problems and development prospects]. *Lit'e i metallurgiya*, 2010, no. 1(54), 2(55), pp. 140–148.

7. Slukhotskiy, A.E., Ryskin, S.E. *Induktory dlya induktsionnogo nagreva* [Inductors for induction heating]. Leningrad: Energiya, 1974. 264 p.

8. Incropera, F.P., DeWitt, D.P., Bergman, T.L., Lavine, A.S. *Fundamentals of Heat and Mass Transfer*. New York: John Wiley & Sons, 2006.



УДК 621.3.018.782.3

**Сергей Олегович Алексинский**

ФГБОУ ВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», кандидат технических наук, доцент кафедры АУЭС, Россия, Иваново, телефон (4932) 26-99-06, e-mail: aleksinsky19@mail.ru

**Дмитрий Сергеевич Шарыгин**

ФГБОУ ВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», аспирант кафедры АУЭС, Россия, Иваново, телефон (4932) 26-99-06, e-mail: sharyginds@yandex.ru

## **Исследование влияния переходного сопротивления на дистанционное определение места повреждения на основе одностороннего метода**

### **Авторское резюме**

**Состояние вопроса.** Одной из основных функций современных устройств релейной защиты является определение места повреждения на воздушных линиях электропередач напряжением 110–220 кВ. На сегодняшний день реальные погрешности определения места повреждения по параметрам аварийного режима в большинстве случаев составляют около 5 %. Однако бывают случаи, когда они превышают 10–20 %. Одностороннее определение места повреждения по параметрам аварийного режима и повышение его точности является актуальной задачей, поскольку не везде организован канал связи на ЛЭП для передачи аварийной информации. Основным параметром, оказывающим существенное влияние на точность одностороннего метода определения места повреждения, является переходное сопротивление. Целью исследования является изучение влияния переходного сопротивления на метод определения места повреждения по параметрам аварийного режима на основе одностороннего замера, предложенный А.Е. Аржанниковым. В ходе исследования были поставлены следующие задачи: оценка влияния переходного сопротивления на точность указанного метода определения места повреждения; определение поляризующей величины для определения места повреждения, обеспечивающей большую точность метода, в том числе, при наличии переходного сопротивления в месте короткого замыкания; получение критерия распознавания вида короткого замыкания, не зависящего от переходного сопротивления; получение способа определения величины переходного сопротивления в месте короткого замыкания.

**Материалы и методы.** Исследование и оценка погрешностей дистанционного определения места повреждения по параметрам аварийного режима произведена на основе серии расчетов токов короткого замыкания при различных переходных сопротивлениях в месте короткого замыкания и различных удалениях точки короткого замыкания. Расчет токов и обработка данных произведены в программном комплексе АРМ СРЗА. В качестве исследуемого объекта выбрана одиночная воздушная линия напряжением 110 кВ с двусторонним питанием и длиной 70 км. Для выполнения исследований первичные преобразователи принимались идеальными.

**Результаты.** Получена оценка погрешностей метода определения места повреждения одностороннего замера. Предложено использование тока нулевой последовательности в указанном методе определения места повреждения в качестве поляризующей величины, что обеспечивает большую точность, чем использование тока обратной последовательности. Для обеспечения устойчивого функционирования одностороннего определения места повреждения по параметрам аварийного режима, особенно при коротком замыкании через значительные переходные сопротивления, обосновано использование методов, нечувствительных к переходным сопротивлениям. Предложен параметр идентификации вида короткого замыкания – коэффициент образа  $K_{обр}$ . Определены его значения для каждого вида короткого замыкания, показана его малая зависимость от переходных сопротивлений. Дано расчетное обоснование значения коэффициента идентификации двухфазных замыканий (между фазами и между фазами и землей) по соотношению токов обратной и нулевой последовательностей. Дана оценка переходного сопротивления в месте короткого замыкания по соотношению симметричных составляющих для моделируемой ЛЭП.

**Выводы.** Результаты исследования могут использоваться для совершенствования существующих методов определения места повреждения по параметрам аварийного режима, а именно для повышения их точности за счет учета переходного сопротивления в месте повреждения и за счет использования подходящей поляризующей величины, а также для более точного определения вида короткого замыкания за счет использования предложенного параметра идентификации.

**Ключевые слова:** определение места повреждения, параметры аварийного режима, переходное сопротивление, виды короткого замыкания, ток прямой последовательности, ток обратной последовательности

**Sergey Olegovich Aleksinsky**

Ivanovo State Power Engineering University, Candidate of Engineering Sciences, (PhD), Associate Professor of Electric Power Systems Automatic Control Department, Russia, Ivanovo, telephone (4932) 269-906, e-mail: aleksinsky19@mail.ru

**Dmitriy Sergeevich Sharygin**

Ivanovo State Power Engineering University, Postgraduate Student of Electric Power Systems Automatic Control Department, Russia, Ivanovo, telephone (4932) 269-906, e-mail: sharyginds@yandex.ru

## Study of influence of transient resistance on distance fault location based on one-sided method

### Abstract

**Background.** Fault location on 110–220 kV overhead power lines is one of the main functions of modern relay protection devices. Currently, the actual errors of fault location based on emergency mode (EM) parameters in most cases are about 5 %. However, there are cases when they exceed 10–20 %. One-sided fault location based on EM parameters and improvement of its accuracy are important issues to study since there isn't a communication channel on power lines for the transmission of emergency information everywhere. The main parameter that has a significant impact on the accuracy of fault location method is the transient resistance. The aim of the research is to study the effect of transient resistance on the one-sided fault location method based on EM parameters proposed by A.E. Arzhannikov. In the course of the study, the following tasks are set: assessment of the effect of transient resistance on the accuracy of the specified fault location method; determination of the polarizing value for fault location, which ensures greater accuracy of the method, including the presence of transient resistance at the place of a short circuit; defining a criterion to recognize the type of short circuit that does not depend on the transient resistance; development of a method to determine the value of the transient resistance at the fault location.

**Materials and methods.** To study and evaluate the errors of distance fault location based on EM parameters, a series of calculations of short circuit currents has been made for various transient resistances at the fault location and at various distances of the fault. The calculation of currents and data processing has been carried out in the ARM SRZA software package. A single overhead line with a voltage of 110 kV with a two-sided supply and a length of 70 km is chosen as the object under study. To perform the research, the primary converters are taken as ideal.

**Results.** The authors have obtained the estimation of the errors of the one-sided fault location method. It is proposed to use the zero-sequence current as a polarizing quantity in the indicated fault location method, which provides greater accuracy than the use of the negative sequence current. To ensure the stable operation of one-sided fault location based on EM parameters, especially in case of short circuit with significant transient resistances, the use of methods that are insensitive to transient resistances is justified. A parameter to identify the type of short circuit is proposed, the coefficient of the image  $K_{obr}$ . Its values are determined for each type of short circuit, a small dependence on transient resistances is found. A calculation substantiation is given for the value of the identification coefficient of two-phase faults (Phase-to-Phase and Phases-to-Earth) according to the ratio of negative and zero sequence currents. The authors have estimated the transient resistance at the fault site by the ratio of symmetrical components for the simulated power transmission line.

**Conclusions.** The results of the study can be used to improve the existing methods of fault location based on EM parameters, namely: to improve their accuracy considering the transient resistance at the fault site; to improve their accuracy using a suitable polarizing value; to determine the type of short circuit more accurately by using the proposed identification parameter.

**Key words:** fault location, emergency mode parameters, transient resistance, types of short circuit, positive sequence current, negative sequence current

**DOI:** 10.17588/2072-2672.2023.3.025-033

**Введение.** Определение места повреждения (ОМП) и вида замыкания на воздушных линиях электропередач напряжением 110–220 кВ является одной из актуальных задач электроэнергетики [1–7]. Погрешности ОМП в значительной части замеров близки к 5 %, однако нередки случаи, когда они превышают 10–20 % [1, 8–10]. Такие отклонения объясняются рядом причин: особенностями условий возникновения замыканий в энергосистеме; особенностями процессов в измерительном тракте; чувствительностью различных алгоритмов к тому или иному виду возмущений или искажений.

Как известно, наиболее вероятным видом повреждения (85 % случаев) в сетях напряжением 110 кВ и выше являются однофазные замыкания на землю [11]. Поскольку каналы связи, способные передавать значения параметров токов и напряжений с противо-

ложного конца линии, организованы далеко не на всех линиях, методы одностороннего замера продолжают оставаться преобладающими. В устройствах одностороннего ОМП, функционирующих по параметрам аварийного режима (ПАР), широко применяется дистанционный метод. Известно [12], что одним из основных факторов, обуславливающих погрешность замера сопротивления до места замыкания, является переходное сопротивление в месте повреждения.

В связи с этим актуальным является исследование и оценка влияния переходного сопротивления на параметры короткого замыкания (КЗ) на воздушных линиях электропередачи (ВЛ). Ниже представлен новый способ распознавания вида КЗ для совершенствования методов дистанционного ОМП по ПАР.

**Оценка влияния переходного сопротивления.** Одним из основных факторов, ока-

зывающих влияние на точность ОМП по ПАР, является переходное сопротивление в месте замыкания [13]. Устранение влияния переходного сопротивления достигается измерением реактивной составляющей сопротивления в месте установки устройства ОМП [12]:

$$X = \operatorname{Im} \left( \frac{U_{\Phi}}{I_{\Phi} + K I_0} \right). \quad (1)$$

Способ эффективен только на линиях с односторонним питанием или ненагруженных линиях с двусторонним. Отсутствие нагрузки характеризует совпадение векторов напряжений систем с противоположных концов линии по фазе и отсутствие реактивной составляющей напряжения в переходном сопротивлении (по отношению к напряжению в месте установки устройства).

При наличии сдвига фаз между векторами напряжений систем с противоположных концов линии устранение влияния переходного сопротивления может быть достигнуто путем мгновенного замера сопротивления в момент перехода через нуль тока в переходном сопротивлении в месте замыкания [14]:

$$L = \frac{U_{\Phi}}{(I_{\Phi} + K I_0) Z_{\text{уд}}}. \quad (2)$$

Считается, что в первом приближении ток в месте замыкания можно считать почти совпадающим по фазе с током нулевой последовательности в месте замера в начале линии. Способ чувствителен к искажениям фазы в измерительном тракте. Устойчивость функционирования средств ОМП повышается при использовании вместо мгновенных значений параметров интегральных величин. В целях совершенствования алгоритма ОМП по выражению (1) было предложено ввести поляризующую (опорную) величину, в качестве которой использовался ток нулевой последовательности в месте установки устройства ОМП [12]. Мнимые части отношений  $\operatorname{Im}(U_{\Phi} / I_0)$  и  $\operatorname{Im}((I_{\Phi} + K^* I_0) Z_{\text{уд}} / I_0)$  при совпадении по фазе  $I_0$  и  $I_{0к}$  позволяют полностью устранить влияние переходного сопротивления:

$$L = \frac{\operatorname{Im}[U_{\Phi} / I_0]}{\operatorname{Im}[(I_{\Phi} + K I_0) Z_{\text{уд}} / I_0]}; \quad (3)$$

$$K = \frac{Z_{0\text{уд}} - Z_{1\text{уд}}}{Z_{1\text{уд}}}. \quad (4)$$

Совпадение фаз имеет место в режиме опробования линии при АПВ или при разземлении нейтрали трансформатора нагрузки. В качестве поляризующего тока вместо тока нулевой последовательности  $I_0$  в ряде случаев используют ток обратной последовательности  $I_2$

или аварийный ток прямой последовательности  $I_{1\text{ав}} = I_1 - I_1^{(\text{нагр})}$  [15].

Для оценки погрешностей методов поляризации произведена серия расчетов токов КЗ при различных переходных сопротивлениях в месте КЗ и при различных удалениях точки КЗ.

На рис. 1 представлена часть расчетной схемы замещения для АРМ СРЗА. Рассмотрена одиночная воздушная линия напряжением 110 кВ с двусторонним питанием длиной 70 км. Сдвиг по фазе между ЭДС систем с противоположных концов линии отсутствует. Линия разбита на четыре участка длиной по 17,5 км. Вычисления производились при  $K^{(1)}$  через переходное сопротивление  $R_{\text{пер}} = [0, 1, 10, 20, 40, 60]$  Ом.

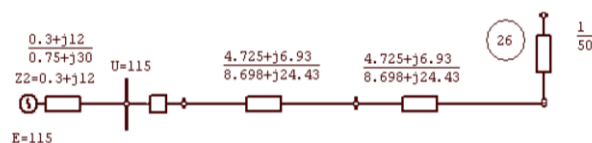


Рис. 1. Расчетная схема замещения для участка воздушной линии в программном комплексе АРМ СРЗА

Результаты расчетов отражены на рис. 2, 3, где показаны зависимости приведенных погрешностей методов ОМП по выражению (3) от удаления точки повреждения для различных переходных сопротивлений. На рис. 2 в качестве поляризующей величины использован ток нулевой последовательности в месте замера, а на рис. 3 – ток обратной последовательности. На рис. 2, 3 линии 1–6 отражают изменение погрешности (относительно длины ЛЭП) при изменении переходного сопротивления  $R_{\text{пер}} = [0, 1, 10, 20, 40, 60]$  Ом.

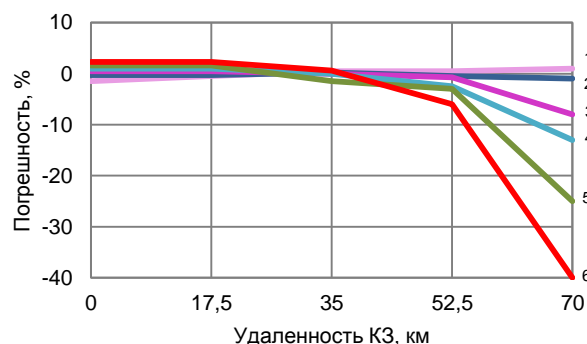


Рис. 2. Погрешности дистанционного метода с поляризацией по току нулевой последовательности

Общий характер изменения погрешностей аналогичен: при КЗ в первой половине линии погрешности незначительны и преимущественно положительны, вблизи середины линии они меняют знак и становятся отрицательными. По мере перемещения точки КЗ к концу линии наблюдается резкий рост погрешности. При опорной величине  $I_2$  даже

наблюдается эффект сокращения замера по мере удаления точки КЗ.

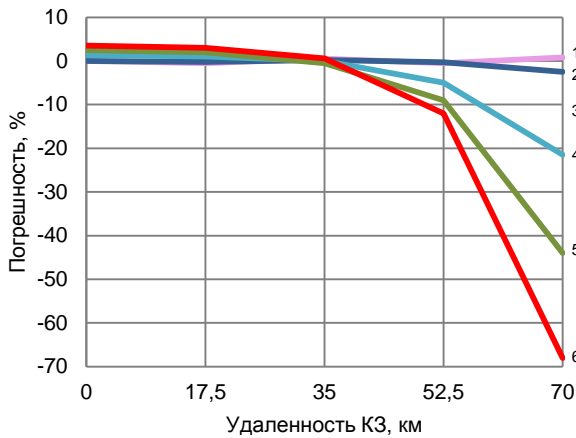


Рис. 3. Погрешности дистанционного метода с поляризацией по току обратной последовательности

**Способы распознавания вида КЗ.** Одной из задач, решаемых в устройствах ОМП, является распознавание вида короткого замыкания. Традиционно [12] для этого использовались симметричные составляющие. Замыкание принято считать симметричным при условии

$$4 \cdot I_2 < I_1 \text{ и } I_n < I_1, \quad (5)$$

где  $I_n$  – номинальный ток линии (трансформатора тока линии).

Замыкание считается двухфазным при условии

$$6 \cdot I_0 < I_2. \quad (6)$$

Замыкание на землю характеризуется соотношением  $6 \cdot I_0 > I_2$ .

Разделение однофазных и двухфазных замыканий на землю производится путем анализа амплитудных и фазовых соотношений между параметрами, прежде всего токами нулевой, обратной и прямой последовательностей.

Совершенствование методов определения вида повреждения производится на основе анализа характерных признаков вида повреждения. Так, для  $K^{(3)}$  характерно приращение тока прямой последовательности и отсутствие (минимальное значение из-за погрешностей измерения, несимметрии сопротивления дуги) составляющих обратной и нулевой последовательностей. Признаки образа  $K^{(3)}$  наиболее эффективно проявляются в относительном параметре:

$$K_{обр} = \frac{|I_1| - |I_{доав}|}{|I_2| + |I_0|}, \quad (7)$$

где  $K_{обр}$  – коэффициент образа замыкания;  $|I_1|$ ,  $|I_2|$ ,  $|I_0|$  – модули симметричных составляющих токов;  $|I_{доав}|$  – модуль доаварийного тока прямой последовательности.

Очевидно, что при  $K^{(3)}$  в полностью симметричном режиме  $K_{обр}$  стремится к бесконечности. Для примера приведены значения  $K_{обр}$  при различных видах замыканий для расположения точек КЗ в начале и середине линии с односторонним питанием при нагрузке 30 МВт (см. таблицу). Расчеты произведены для различных сочетаний сопротивлений дуги и земли.

Значения  $K_{обр}$  при различных видах замыканий

$R_d/R_z$ , Ом/Ом	$K^{(1)}$		$K^{(2)}$		$K^{(1,1)}$	
	$I = 0$ км	$I = 35$ км	$I = 0$ км	$I = 35$ км	$I = 0$ км	$I = 35$ км
10/50	0,495	0,477	0,997	0,991	0,986	0,979
50/50	0,492	0,486	0,987	0,995	0,973	0,952
200/50	0,468	0,474	0,931	0,95	0,929	0,884
0/0	0,5		1		~1	
$\Delta K_{обр}^*$	0,07		0,07		0,12	

При различных сочетаниях сопротивлений и варьировании места КЗ относительные отклонения коэффициента образа  $K_{обр}$  от предельного значения для различных видов замыканий не превышают 0,07 или 0,12, что позволяет идентифицировать вид замыкания. С учетом запаса, определим  $K_{обр}$  для разных видов КЗ:

- для  $K^{(3)}$  – при  $K_{обр} > 5$  погрешности  $\Delta I_2 = \Delta I_0 = 0,1 \cdot I_1$ , тогда  $K_{обр. мин} = 1/(0,1 + 0,1) = 5$ ;
- для  $K^{(1)}$  – при  $K_{обр} < 0,7$  полусумма предельных значений для разных видов КЗ  $K_{обр} = (0,88 + 0,5)/2 \sim 0,7$ ;
- для  $K^{(2)}$  или  $K^{(1,1)}$  – при  $0,7 < K_{обр} < 1,3$  различить  $K^{(2)}$  и  $K^{(1,1)}$  параметр  $K_{обр}$  не позволяет, для этой цели используется соотношение  $I_2/I_0$ .

Схема замещения для расчета токов при  $K^{(1,1)}$  приведена на рис. 4.

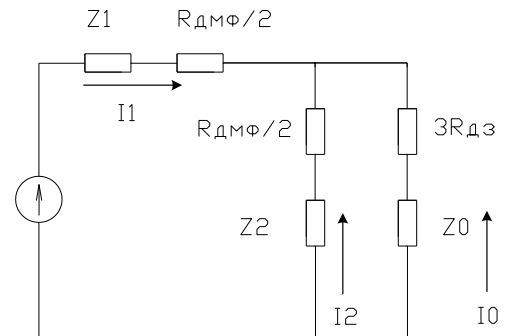


Рис. 4. Схема замещения для расчета токов при  $K^{(1,1)}$

В месте КЗ выполняется соотношение  $I_1 = -(I_2 + I_0)$ . Распределение токов обратной и нулевой последовательностей происходит обратно пропорционально сопротивлениям соответствующих ветвей:

$$K_{обр2фнз} = \frac{I_2}{I_0} = \frac{3 \cdot R_{дз} + Z_0}{R_{дмф}/2 + Z_2}, \quad (8)$$

$$K_{\text{обр2фнз}} = \frac{3 \cdot (0,33 + 0,05) + j \cdot 5,5 X_2}{0,2 + j \cdot X_2} = 5,5,$$

где  $K_{\text{обр2фнз}} = \frac{I_2}{I_0}$  – коэффициент образа двухфазного КЗ на землю;  $R_{\text{дз}}$  – сопротивление дуги на землю и земли ( $R_{\text{дз}} = 0,05 \cdot L_{\text{КЗ}} + R_{\text{пр.уд}} \cdot L_{\text{КЗ}}$ ;  $R_{\text{пр.уд}} = 0,33$  (Ом/км) для АС-95);  $R_{\text{дмф}}$  – сопротивление дуги между фазами ( $R_{\text{дмф}} = 0,4$  Ом).

Для двухцепной линии без троса выполняется соотношение  $X_0/X_2 = 5,5$ .

Для определения максимального значения параметра  $K_{\text{обр2фнз}}$  принимаются максимальные значения  $R_{\text{дз}}$  и минимальные  $R_{\text{дмф}}$ .

С учетом коэффициента запаса  $K_3 = 1,1$  принимаем  $K_{\text{обр2фнз}} = 6$ , что соответствует (6).

Различие между  $K^{(1)}$  и  $K^{(1,1)}$  также может быть установлено по факту приращения тока в одной или двух фазах на соизмеримую величину.

**Влияние переходного сопротивления на параметры КЗ.** Соотношение параметров токов и напряжений при различных видах КЗ, как металлических, так и через переходное сопротивление, описано в литературе, например в [16]. При этом модель места КЗ в ряде случаев принималась упрощенной, не учитывался характер замыкания. Двухфазное замыкание на землю моделировалось сопротивлением на землю и металлическим замыканием между фазами, что может приводить к неточности в представлении замыкания из-за неучета сопротивления дуги или сопротивления предмета, через который происходит междуфазное замыкание. В целях уточнения соотношения электрических величин при разных видах КЗ произведена серия расчетов. Пример расчетной схемы замещения для программного комплекса АРМ СРЗА приведен на рис. 1.

Рассматривались следующие типы замыканий: наброс металлического предмета ( $R_1 = R_2 = 0,1$  Ом) и дуговое замыкание с перекрытием междуфазного промежутка. Замыкание на землю рассматривалось через опору с перекрытием гирлянды изоляторов и учетом характера грунта (влажный, скальный). Сопротивление принято максимальным нормируемым в диапазоне 10–30 Ом<sup>1</sup>. Поскольку в схеме замещения нулевой последовательности участвует утроенное значение переходного сопротивления  $R_0 = 3 \cdot (R_{\text{д}} + R_{\text{оп}})$ , при среднем значении  $R_{\text{оп}} = 15$  Ом и  $R_{\text{д}} = 1,5$  Ом принимается  $R_0 = 50$  Ом. Поскольку реальные значения сопротивления в месте замыкания часто оказываются меньшими,

значительная часть расчетов проведена для ряда меньших величин  $R_0$ .

Параметры активного междуфазного переходного сопротивления находятся в диапазоне  $R_1 = R_2 = 0,1 - 500$  Ом<sup>2</sup>.

Рассчитываются модули и углы фазных напряжений и фазных токов, а также напряжений и токов симметричных составляющих.

Результаты расчетов представлены на векторных диаграммах.

1. На рис. 5 представлены векторные диаграммы токов и напряжений фаз, а также их симметричных составляющих при  $K^{(2)}_{\text{вс}}$  через переходное сопротивление.

Анализ векторных диаграмм двухфазного замыкания  $K^{(2)}_{\text{вс}}$  позволил сделать следующий вывод: при увеличении переходного сопротивления напряжение опережающей поврежденной фазы превышает напряжение отстающей; напряжение отстающей фазы в диапазоне сопротивлений от 0 до 5 Ом уменьшается, а далее от 5 Ом до максимума – возрастает. Фаза напряжения (сдвиг вектора) отстающей фазы в диапазоне сопротивлений от 0 до 15 Ом возрастает, а от 15 Ом до максимума – уменьшается. Поворот вектора тока замыкания при увеличении переходного сопротивления происходит от 0° до 90°. Характерным признаком  $K^{(2)}$  является существенный рост вектора напряжения опережающей фазы и меньшее отклонение по фазе от аналогичного вектора при металлическом замыкании.

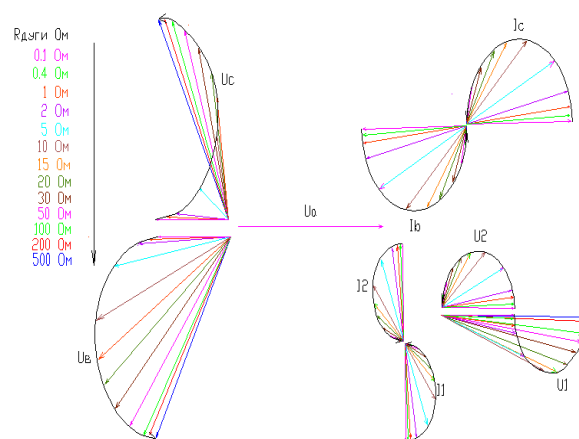


Рис. 5. Двухфазное КЗ. Векторные диаграммы токов и напряжений фаз, а также их симметричных составляющих при  $K^{(2)}_{\text{вс}}$  через переходное сопротивление

Амплитудные соотношения напряжений прямой и обратной последовательностей при  $K^{(2)}$  с ростом переходного сопротивления имеют монотонный характер: напряжение обратной

<sup>1</sup> Правила устройства электроустановок. Раздел 2. Передача электроэнергии. Гл. 2.4. Воздушные линии электропередачи напряжением до 1 кВ. Воздушные линии электропередачи напряжением выше 1 кВ. – 7-е изд. – СПб.: Изд-во ДЕАН, 2005. – 192 с.

<sup>2</sup> Руководящие указания по релейной защите. Вып. 11. Расчеты токов короткого замыкания для релейной защиты и системной автоматики в сетях 110–750 кВ. – М.: Энергия, 1979. – 152 с.



последовательности убывает, а прямой – увеличивается. Фазовые же соотношения немонотонны: до сопротивления 10 Ом угол между векторами увеличивается, а при больших значениях – сокращается. Таким образом, по соотношению амплитуд напряжений прямой и обратной последовательностей можно оценить величину переходного сопротивления.

2. На рис. 6, 7 представлены векторные диаграммы токов и напряжений при  $K^{(1,1)}_{BC}$ .

Замыкания через повышенные (десятки и сотни Ом) переходные сопротивления имеют место при замыканиях на землю в пролете между опорами, на дерево, на проезжающую под ВЛ крупногабаритную технику.

Как показали расчеты, при значительных переходных сопротивлениях уровни токов КЗ существенно снижаются и становятся сопоставимыми с токами нагрузки.

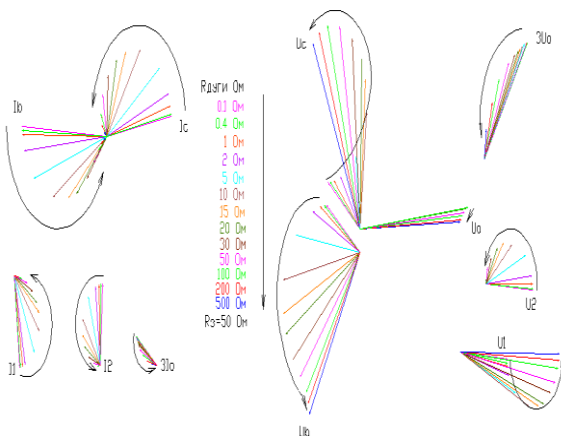


Рис. 6. Двухфазное КЗ. Векторные диаграммы токов и напряжений фаз при  $K^{(1,1)}$

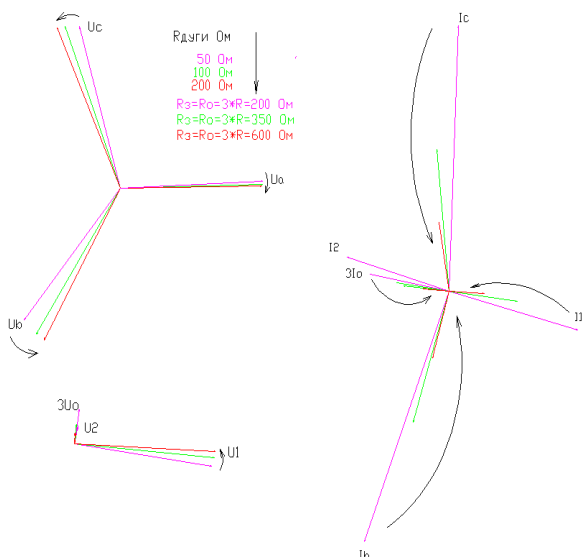


Рис. 7. Двухфазное КЗ. Векторные диаграммы токов и напряжений фаз при  $K^{(1,1)}$  через переходное сопротивление

Анализ векторных диаграмм фазных напряжений показывает, что характер ампли-

тудно-фазовых соотношений напряжений поврежденных фаз принципиально позволяет дать оценку величине переходного сопротивления. При росте переходного сопротивления до 15 Ом угол между векторами напряжений поврежденных фаз увеличивается, при этом амплитуда напряжения опережающей поврежденной фазы постоянно растет, а отстающей при сопротивлении от 0 до 5 Ом даже уменьшается и только при больших сопротивлениях начинает расти.

При двухфазном замыкании на землю через значительное переходное сопротивление со стороны земли токи и напряжения изменяются монотонно: при увеличении сопротивления напряжения растут, а токи уменьшаются; фазовые соотношения как токов, так и напряжений стабильны и изменяются незначительно.

При варьировании междуфазного переходного сопротивления в пределах 500 Ом диапазон изменения фаз токов и напряжений нулевой последовательности оказался существенно меньше, чем у составляющих обратной последовательности.

3. На рис. 8 представлены векторные диаграммы токов и напряжений при  $K^{(1)}$  на опору.

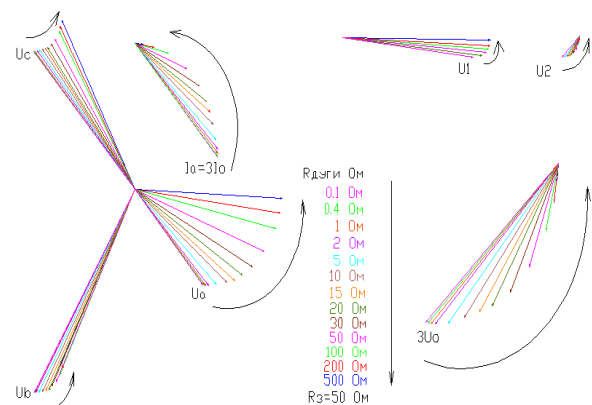


Рис. 8. Однофазное КЗ. Векторные диаграммы токов и напряжений фаз при  $K^{(1)}$  на опору

При увеличении переходного сопротивления напряжение опережающей неповрежденной фазы ( $U_b$ ) монотонно уменьшается, а отстающей фазы ( $U_c$ ) до 50 Ом уменьшается, а затем увеличивается. Угол между векторами напряжений неповрежденных фаз монотонно возрастает.

4. Для оценки влияния нагрузки на параметры токов и напряжений при  $K^{(1)}$  и  $K^{(1,1)}$  при замыкании через значительное сопротивление на землю производилась серия расчетов. Результаты в виде векторных диаграмм представлены на рис. 9. Расчеты велись для  $K^{(1)}$  и  $K^{(1,1)}$  при нагрузке  $318+j199$  Ом, что соответствует мощности нагрузки 30 МВт.

Соотношения сопротивлений прямой (обратной) и нулевой последовательностей в ме-

сте замыкания принимались: 50/200; 100/350; 200/600. Сопротивления нулевой последовательности принимались достаточно высокими ввиду возможности высокого сопротивления грунтов, например, в горной местности.

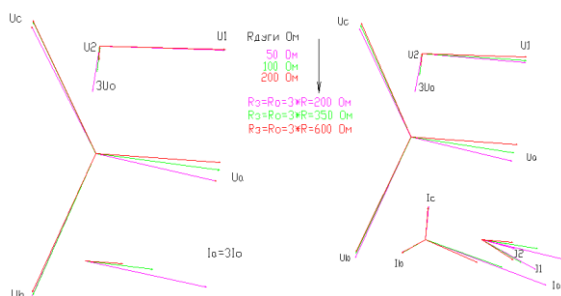


Рис. 9. Однофазное КЗ. Векторные диаграммы токов и напряжений фаз при  $K^{(1)}$  через переходное сопротивление без и с учетом нагрузки 30 МВт

Расчеты показали, что даже при таких значительных переходных сопротивлениях токи КЗ превышают токи нагрузки не менее чем в 2 раза:  $342/162 = 2,11$  для  $K^{(1)}$  и  $416/161 = 2,58$  для  $K^{(1,1)}$ .

Влияние нагрузки проявляется в расхождении по фазе векторов прямой, обратной и нулевой последовательностей на угол до  $20^\circ$ ; остальные амплитудные и фазовые соотношения сохраняются.

**Выводы.** Результаты исследований влияния переходного сопротивления на точность дистанционного метода ОМП на основе одностороннего замера, проиллюстрированные для модели одиночной воздушной линии 110 кВ, выполненной в АРМ СРЗА, отражают конкретную схемно-режимную ситуацию. Для получения более объективных выводов необходимо применить предложенную методику к другим моделям ВЛ, что и планируется выполнить в ходе дальнейших исследований.

В рассмотренном дистанционном методе одностороннего замера расстояния до точки однофазного КЗ на землю применение в качестве поляризующей величины тока нулевой последовательности более целесообразно, чем использование тока обратной последовательности, так как при этом обеспечивается большая точность и практически отсутствие зависимости от переходного сопротивления в месте КЗ при рассмотрении линий с односторонним питанием или ненагруженных линий с двусторонним.

Выполненная оценка влияния переходного сопротивления в месте КЗ позволяет более точно определить место КЗ, т. е. выполнить ОМП. Например, если расчетное переходное сопротивление имеет большую величину, то следует использовать методы, нечувствительные к переходным сопротивлениям.

Предложенный параметр идентификации вида замыкания – коэффициент образа

$K_{обр}$  – показал его малую зависимость от переходных сопротивлений. В дальнейших исследованиях требуется рассмотреть применение коэффициента образа на модели сети с двусторонним питанием.

Расчетное обоснование значения коэффициента идентификации двухфазных замыканий (между фазами и между фазами с землей) по соотношению токов обратной и нулевой последовательностей показало, что по соотношению напряжений прямой и обратной последовательностей возможна оценка величины переходного сопротивления. Рассмотрение амплитудно-фазовых соотношений напряжений поврежденных фаз принципиально позволяет дать оценку величине переходного сопротивления, в том числе, и при токах КЗ, сравнимых с токами нагрузки. Результаты данного анализа позволяют повысить точность методов одностороннего ОМП и могут применяться, например, при компенсации в алгоритме ОМП погрешности, вносимой переходным сопротивлением (например, аналогично [17]).

#### Список литературы

1. Гуря Д.Н., Корольков А.Л. Сравнение традиционных и волнового методов определения места повреждения по итогам натурных испытаний на ЛЭП 220–330 кВ // Материалы VIII Междунар. науч.-техн. конф. «Электроэнергетика глазами молодежи – 2017», 2–6 октября 2017 г. – Самара, 2017. – С. 415–418.
2. Guerra W., Kagan N. Fault Location and Voltage Estimation in Transmission Systems by Evolutionary Algorithms // 15th International Conference on Intelligent System Applications to Power Systems, 2009. DOI:10.1109/ISAP.2009.5352871.
3. Asynchronous Fault Location in Transmission Lines Considering Accurate Variation of the Ground-Mode Traveling Wave Velocity / R. Liang, Z. Yang, N. Peng, et al. // Energies. – 2017. – Vol. 10. – P. 1957. DOI:10.3390/en10121957.
4. Подшивалин А.Н., Исмуков Г.Н. Адаптация методов определения места повреждения к современным требованиям эксплуатации линий электропередачи [Электронный ресурс] // Современные направления развития систем релейной защиты и автоматики энергосистем: материалы IV Междунар. науч.-техн. конф., г. Екатеринбург, 3–7 июня 2013 г. – Режим доступа: <https://b-ok.org/book/3208751/87a52e>
5. Chen X., Jiao Z. Accurate fault location method of distribution network with limited number of PMUs // Proc. 2018 China Int. Conf. Electricity Distribution (CICED). – China, 2018. – P. 1503–1507. DOI: 10.1109/CICED.2018.8592074.
6. Gama J.R., Lopes F.V. On compensating synchronization errors in two-terminal based fault location approaches // Proc. 2017 Workshop Commun. Netw. Power Syst. (WCNPS). – Brasilia, Brazil, 2017. – P. 1–4. DOI:10.1109/WCNPS.2017.8253082.

7. **Машенков В.М.** Особенности определения места повреждения на ВЛ напряжением 110–750 кВ: учеб. пособие. – М.: Издание Центра подготовки кадров энергетики, 2005.

8. **Абрамочкина Л.В.** Повышение точности определения места повреждения воздушных линий электропередачи по параметрам предаварийного и аварийного режимов: дис. ... канд. техн. наук: 05.14.02. – Томск: НИТПУ, 2014.

9. **Ефремов В.А.** Виды погрешностей ОМП и их влияние на точность замера // Релейная защита и автоматизация. – 2014. – № 2(15). – С. 54–58.

10. **Оценка** точности определения места повреждения ЛЭП методом искусственного короткого замыкания / Д.Н. Гура, А.Л. Корольков, В.М. Пасторов, В.М. Кожевников // Электротехника. – 2019. – № 2. – С. 73–77.

11. **Ермаков К.И.** Совершенствование методов и средств определения места повреждения на линиях электропередачи для организации аварийно-восстановительных работ: дис. ... канд. техн. наук: 05.14.02. – Чебоксары, 2021. – 209 с.

12. **Аржанников Е.А., Лукоянов В.Ю., Мисриханов М.Ш.** Определение места короткого замыкания на высоковольтных линиях электропередачи / под ред. В.А. Шуина. – М.: Энергоатомиздат, 2003. – 272 с.

13. **Yablokov A., Sharygin D., Filatova G.** Methodology of a multifactorial automated research of fault location determination methods on EHV lines // 2022 4th International Youth Conference on Radio Electronics, Electrical and Power Engineering (REEPE). – М., 2022. – P. 1–7. DOI: 10.1109/REEPE53907.2022.9731468.

14. **Суяр, Саркиз, Мутон.** Развитие принципов измерения и выполнения систем защиты и определения места повреждения для трехфазных ВЛ // Релейная защита и противоаварийная автоматика (СИГРЭ-74). – М.: Энергия, 1976. – С. 20–33.

15. **Диагностика** линий электропередачи / Ю.Я. Лямец, В.И. Антонов, В.А. Ефремов и др. // Электротехнические микропроцессорные устройства и системы: межвуз. сб. науч. тр. – Чебоксары: Изд-во Чуваш. ун-та, 1992.

16. **Ульянов С.А.** Электромагнитные переходные процессы. – М.: Энергия, 1970.

17. **Филатова Г.А.** Разработка и исследование способов и алгоритмов определения места однофазного замыкания на землю в кабельных сетях 6–10 кВ по параметрам переходного процесса: дис. ... канд. техн. наук: 05.14.02. – Иваново, 2017. – 239 с.

## References

1. Gura, D.N., Korol'kov, A.L. Sroavnenie traditsionnykh i volnovogo metodov opredeleniya mesta povrezhdeniya po itogam naturnykh ispytaniy na LEP 220–330 kV [A comparison of conventional and wave methods for fault location according to the results of the experiments of full-scale tests on power lines 220–330 kV]. *Materialy VIII Mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii «Elektroenergetika glazami molodezhi –*

*2017»*, 2–6 oktyabrya 2017 g. [Proceedings of the VIII International scientific and technical conference “Electric power industry through the eyes of youth – 2017”, October 2–6, 2017]. Samara, 2017, pp. 415–418.

2. Guerra, W., Kagan, N. Fault Location and Voltage Estimation in Transmission Systems by Evolutionary Algorithms. 15th International Conference on Intelligent System Applications to Power Systems, 2009. DOI: 10.1109/ISAP.2009.5352871.

3. Liang, R., Yang, Z., Peng, N., Liu, C., Zare, F. Asynchronous Fault Location in Transmission Lines Considering Accurate Variation of the Ground-Mode Traveling Wave Velocity. *Energies*, 2017, vol. 10, p. 1957. DOI: 10.3390/en10121957.

4. Podshivalin, A.N., Ismukov, G.N. Adaptatsiya metodov opredeleniya mesta povrezhdeniya k sovremennym trebovaniyam ekspluatatsii liniy elektroperedachi [A modern Look at RFL in emergency mode parameters]. *Materialy IV Mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii «Sovremennye napravleniya razvitiya sistem releynoy zashchity i avtomatiki energosistem»*, Ekaterinburg, 3–7 iyunya 2013 g. [Proceedings of the IV International scientific and technical conference “Current trends of the development of relay protection systems and automation of power systems”, Yekaterinburg, June 3–7, 2013]. Available at: <https://b-ok.org/book/3208751/87a52e>.

5. Chen, X., Jiao, Z. Accurate fault location method of distribution network with limited number of PMUs. Proc. 2018 China Int. Conf. Electricity Distribution (CICED), pp. 1503–1507. DOI: 10.1109/CICED.2018.8592074.

6. Gama, J.R., Lopes, F.V. On compensating synchronization errors in two-terminal based fault location approaches. Proc. 2017 Workshop Commun. Netw. Power Syst. (WCNPS), Brasília, Brazil, 2017, pp. 1–4. DOI: 10.1109/WCNPS.2017.8253082.

7. Mashenkov, V.M. *Osobennosti opredeleniya mesta povrezhdeniya na VL napryazheniem 110–750 kV* [Features of determining the location of damage on overhead lines with a voltage of 110–750 kV]. Moscow: Izdanie Tsentra podgotovki kadrov energetiki, 2005.

8. Abramochkina, L.V. *Povyshenie tochnosti opredeleniya mesta povrezhdeniya vozdukhnykh liniy elektroperedachi po parametram predavariynogo i avariynogo rezhimov*. Diss. ... kand. tekhn. nauk [Improving the accuracy of fault location on overhead power lines according to the parameters of pre-emergency and emergency modes. Cand. tech. sci. diss.]. Tomsk: NITPU, 2014.

9. Efremov, V.A. Vidy pogreshnostey OMP i ikh vliyanie na tochnost' zamera [Types of fault location errors and their influence on measurement accuracy]. *Reley'naya zashchita i avtomatizatsiya*, 2014, no. 2(15), pp. 54–58.

10. Gura, D.N., Korol'kov, A.L., Pastоров, V.M., Kozhevnikov, V.M. Otseuka tochnosti opredeleniya mesta povrezhdeniya LEP metodom iskusstvennogo korotkogo zamykaniya [Evaluation of fault location accuracy on power lines by the method of artificial short circuit]. *Elektrotekhnika*, 2019, no. 2, pp. 73–77.

11. Ermakov, K.I. *Sovershenstvovanie metodov i sredstv opredeleniya mesta povrezhdeniya na liniyakh*



*elektroperedachi dlya organizatsii avariynovosstanovitel'nykh rabot*. Diss. ... kand. tekhn. nauk [Improvement of methods and means for fault location on power lines for organizing emergency recovery work. Cand. tech. sci. diss.]. Cheboksary, 2021. 209 p.

12. Arzhannikov, E.A., Lukoyanov, V.Yu., Misrikhanov, M.Sh. *Opredelenie mesta korotkogo замыкания на высоковольтных линиях электропередачи* [Determining the location of a short circuit on high-voltage power lines]. Moscow: Energoatomizdat, 2003. 272 p.

13. Yablokov, A., Sharygin, D., Filatova, G. Methodology of a multifactorial automated research of fault location determination methods on EHV lines. 2022 4th International Youth Conference on Radio Electronics, Electrical and Power Engineering (REEPE). Moscow, 2022, pp. 1–7. DOI: 10.1109/REEPE53907.2022.9731468.

14. Suyar, Sarkis, Mouton. *Razvitie printsipov izmereniya i vypolneniya sistem zashchity i opredeleniya mesta povrezhdeniya dlya trekhfaznykh VL* [Development of the principles of measurement and implementation of protection systems and fault location for three-phase overhead lines]. *Releynaya zashchita i*

*protivoavariynaya avtomatika (SIGRE-74)* [Relay protection and emergency automatics (CIGRE-74)]. Moscow: Energiya, 1976, pp. 20–33.

15. Lyamets, Yu.Ya., Antonov, V.I., Efremov, V.A., Nudel'man, G.S., Podshivalin, N.V. *Diagnostika liniy elektroperedachi* [Diagnostics of power lines]. *Mezhvuzovskiy sbornik nauchnykh trudov «Elektrotekhnicheskie mikroprotsessornye ustroystva i sistemy»* [Interuniversity collection of scientific works "Electrotechnical microprocessor devices and systems"]. Cheboksary: Izdatel'stvo Chuvashskogo universiteta, 1992.

16. Ul'yanov, S.A. *Elektromagnitnye perekhodnye protsessy* [Electromagnetic transients]. Moscow: Energiya, 1970.

17. Filatova, G.A. *Razrabotka i issledovanie sposobov i algoritmov opredeleniya mesta odnofaznogo замыкания на землю в кабельных сетях 6–10 kV по параметрам переходного процесса*. Diss. ... kand. tekhn. nauk [Development and research of methods and algorithms for fault location of a single-phase earth fault in cable networks of 6–10 kV according to the parameters of the transient process. Cand. tech. sci. diss.]. Ivanovo, 2017. 239 p.

УДК 621.313.322

**Владислав Дмитриевич Битней**

ФГБОУ ВО НИУ «МЭИ», студент кафедры ЭС института электроэнергетики и электротехники, Россия, Москва, e-mail: BitneyVD@mpei.ru

**Николай Николаевич Смотров**

ФГБОУ ВО НИУ «МЭИ», кандидат технических наук, доцент кафедры ЭС института электроэнергетики и электротехники, Россия, Москва, e-mail: SmotrovNN@mpei.ru

**Александр Андреевич Тимофеев**

ФГБОУ ВО НИУ «МЭИ», аспирант кафедры ЭС института электроэнергетики и электротехники, Россия, Москва, e-mail: TimofeevAAn@mpei.ru

**Андрей Владимирович Охлопков**

ФГБОУ ВО НИУ «МЭИ», ассистент кафедры ТОТ ИТАЭ, Россия, Москва, e-mail: OkhlopkovAV@mpei.ru

## Влияние режима потребления реактивной мощности на техническое состояние турбогенератора ТЗФП-110-2МУЗ<sup>1</sup>

### Авторское резюме

**Состояние вопроса.** Необходимость работы турбогенераторов в режиме потребления реактивной мощности связана с дефицитом компенсирующих устройств в сети. В последнее время участились аварии, связанные с продолжительной работой генераторов в режиме малых уровней возбуждения, что является необходимым условием для потребления генератором реактивной мощности. Цель исследования заключается в оценке влияния режима потребления реактивной мощности на техническое состояние турбогенератора ТЗФП-110-2МУЗ.

**Методы и материалы.** Источником сведений о техническом состоянии турбогенератора послужили данные, полученные из эксплуатационной и ремонтной документации, протоколов электрических и тепловых испытаний, технических отчетов с результатами комплексных диагностических обследований турбогенератора.

**Результаты.** Обследованы сердечники генераторов серии ТЗФ. При обследованиях ни разу не выявлены зазоры между нажимными пальцами и поверхностью крайних пакетов, что указывает на отсутствие существенной кривизны крайних пакетов сердечника. В ходе исследования температуры по термопреобразователям сопротивления ТЗФП-110-2МУЗ выявлено, что с увеличением потребления реактивной мощности температура обмоток и активной стали сердечника статора турбогенератора уменьшается и в основном не превышает верхних предельных значений уставок, в режиме выдачи реактивной мощности выявлена противоположная зависимость. Установлено, что влияние режима потребления реактивной мощности на техническое состояние ТЗФП-110-2МУЗ при работе в установившихся режимах в пределах заводской PQ-диаграммы минимально. В сердечнике статора турбогенератора рассматриваемой серии за счет значительного усовершенствования конструкции и технологии изготовления торцевых зон достигнута высокая устойчивость зубцов крайних пакетов к эксплуатационным нагрузкам.

**Выводы.** С точки зрения практической значимости турбогенераторы серии ТЗФ допускаются к применению для потребления реактивной мощности. В качестве дальнейшего направления исследований планируется рассмотреть работу турбогенераторов в маневренных режимах с переходом от выдачи реактивной мощности к ее потреблению и обратно.

**Ключевые слова:** электрическая станция, сердечник статора турбогенератора, регулирование реактивной мощности, обмотка статора

**Vladislav Dmitrievich Bitney**

National Research University "MPEI", Student, Electric Power Stations Department, Institute of Electric Power and Electrical Engineering, Russia, Moscow, e-mail: BitneyVD@mpei.ru

**Nickolay Nickolaevich Smotrov**

National Research University "MPEI", Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor, Electric Power Stations Department, Institute of Electric Power and Electrical Engineering, Russia, Moscow, e-mail: SmotrovNN@mpei.ru

<sup>1</sup> Работа выполнена в рамках проекта «Разработка методики выбора оптимальных режимов по реактивной мощности для генерирующих установок ГТУ и ПГУ с помощью цифрового расчетного аппарата» при поддержке гранта НИУ МЭИ на реализацию программ научных исследований «Приоритет 2030: Технологии будущего» в 2022–2024 гг.

The study has been carried out within the framework of the project "Development of the methodology for selecting optimal reactive power modes for generating units of GTU and CCGT using a digital calculation apparatus" with the grant of the National Research University MPEI for implementation of the research programs "Priority 2030: Future Technologies" in 2022–2024.

**Alexander Andreevich Timofeev**

National Research University "MPEI", Graduate Student, Electric Power Stations Department, Institute of Electric Power and Electrical Engineering, Russia, Moscow, e-mail: TimofeevAAn@mpei.ru

**Andrey Vladimirovich Okhlopkov**

National Research University "MPEI", Assistant, Department of Theoretical Foundations of Thermal Engineering Department, Institute of Thermal and Nuclear Power Engineering of the National Research University "Moscow Power Engineering Institute", Russia, Moscow, e-mail: OkhlopkovAV@mpei.ru

## Effect of Reactive Power Consumption Mode on Technical Condition of T3FP-110-2MU3 Turbogenerator

### Abstract

**Background.** The necessity of turbogenerators operation in the reactive power consumption mode is determined by the shortage of compensating devices in the network. Recently, accidents associated with generators long-term operation at low levels of excitation have become more frequent, which is a prerequisite for the consumption of reactive power by the generator. The purpose of this research is to assess the effect of the reactive power consumption mode on the technical condition of the T3FP-110-2MU3 turbogenerator.

**Materials and methods.** The source of information about the technical condition of the turbogenerator is the data obtained from the operating and repair documentation, electrical and thermal tests protocols, technical reports with the results of comprehensive diagnostic examinations of the turbogenerator.

**Results.** The cores of T3F series generators have been examined. No gaps between the pressure fingers and the surface of the edge packages have ever been detected during examinations, which indicates the absence of significant curvature of the extreme core packages. During the study of temperature by T3FP-110-2MU3 thermal resistance converters, it is found out that with an increase of reactive power consumption, the temperature of the windings and the active steel of the stator core of the turbo generator decreases and it does not exceed the upper warning settings in the mode of reactive power output, the opposite dependence is visible. It is established that the influence of the reactive power consumption mode on the technical condition of the T3FP-110-2MU3 when operating in steady-state modes within the factory PQ-diagram is minimal. In the stator core of the turbogenerator under consideration, high resistance of the teeth of the extreme packages to operational loads has been achieved, due to significant improvements in the design and manufacturing technology of the end zones.

**Conclusions.** From the point of view of practical significance, T3F series turbogenerators are allowed to be used for reactive power consumption. As a further direction of research, it is planned to consider the operation of turbogenerator in maneuverable modes with the transition from the issuance of reactive power to its consumption and vice versa.

**Key words:** electric power plant, turbogenerator stator core, reactive power control, turbogenerator, operation, stator winding

DOI: 10.17588/2072-2672.2023.3.034-042

**Введение.** Проблема избытка реактивной мощности в энергосистеме Московского региона существует уже достаточно длительное время и обусловлена рядом причин объективного характера:

- общим снижением энергопотребления в регионе (закрытие в 2000-е годы расположенных на территории Москвы предприятий) и, как следствие, работой ненагруженных ЛЭП как источников реактивной мощности;

- постепенной заменой воздушных линий (ВЛ) электропередач на кабельные с изоляцией из сшитого полиэтилена, имеющие существенно большую удельную емкость<sup>2</sup>;

- недостаточным количеством и мощностью существующих средств компенсации реактивной мощности на подстанциях Московского

региона (в том числе, из-за демонтажа синхронных компенсаторов) [1, 2].

Избыток реактивной мощности в энергосистеме вызывает общее повышение напряжения в системе и приводит к недопустимо высокому уровню величины  $U$  в отдельных ее точках, что влечет за собой снижение надежности работы и повышение аварийности электрооборудования потребителей (в том числе, из-за роста нагрева, вызванного увеличением потребляемого тока по сравнению с номинальным, и, как следствие, ускорения процессов старения и износа изоляции).

Одним из путей решения данной проблемы является перевод эксплуатирующихся на электростанциях генерирующих компаний турбогенераторов в режим потребления реактивной мощности (недовозбуждения). В настоящее время большинство турбогенераторов ТЭС эксплуатируются преимущественно в режимах выдачи реактивной мощности согласно ГОСТ 533-2000,

<sup>2</sup> Справочник по проектированию электрических сетей / под ред. Д.Л. Файбисовича. – М.: Изд-во НЦ ЭНАС, 2012. – 376 с.

РД 34.45.501-88, СО 153-34.45.501<sup>3</sup> (работа в режимах потребления ограничена действием устройств ограничения минимального возбуждения (ОМВ)).

Следует отметить, что турбогенераторы, как правило, оснащены быстродействующими системами возбуждения, способными отреагировать на возмущения в сети в течение доли миллисекунд и действовать в течение одной полувольты периода электрического напряжения. В объем их функций входят как нормализация напряжения в узлах электрической сети в нормальном режиме работы, так и компенсация мгновенных изменений напряжения в электрической сети при аварийных возмущениях или переходных процессах для поддержания значения напряжения близким к номинальному [3, 4].

**Методы исследования.** При анализе влияния режимов работы оборудования ТЭС были использованы:

1) паспортные данные генераторов, результаты нормативных испытаний, проведенных в соответствии с «Объемом и нормами испытания электрооборудования» (электрические, тепловые и т.д.);

2) карты допустимых нагрузок генераторов;

3) сведения об отказах и повреждениях турбогенераторов за указанный период, о количестве неплановых остановов энергоблоков по состоянию вышеперечисленного оборудования в год и за наблюдаемый период, о длительности периодов простоя энергоблоков при проведении аварийно-восстановительных ремонтов указанного оборудования, а также данные по фактической длительности наработки энергоблоков за наблюдаемый период эксплуатации;

4) данные по режимам работы генераторов за указанный период:

- сведения о длительности, периодичности и нагрузке при работе турбогенераторов в режимах, отличающихся от номинальных по активной и реактивной мощности, уровням напряжений, по месяцам;

- данные по вибромониторингу турбогенераторов;

- данные по тепловому состоянию турбогенераторов;

- результаты комплексных обследований турбогенераторов;

5) нормативно-техническая документация по теме участия генерирующего оборудо-

вания в режимах регулирования реактивной мощности<sup>4</sup>.

В данном исследовании были собраны сведения о техническом состоянии сердечника статора турбогенератора ТЗФП-110-2МУЗ с косвенным воздушным охлаждением [5]. При проведении ретроспективного анализа технической документации наибольшее количество информации было получено из протоколов и технических отчетов по результатам комплексных диагностических обследований рассматриваемых турбогенераторов за период с 2008 по 2021 г.

При изучении технической документации в первую очередь анализировались результаты контроля состояния зубцов сердечника при проведении капитальных ремонтов и регистрировались данные о выявленных случаях ослабления прессовки и распушения зубцов, о наличии трещин в листах активной стали, обломах и выкрашиваниях ослабленных листов, подсчитывалось количество зубцов, требующих ремонта путем установки специальных уплотняющих клиньев или стеклотекстолитовых вставок [6]. Параллельно изучались сведения о наличии либо отсутствии местных замыканий между листами сердечника в местах распрессовок и выкрашиваний, а также данные о повреждениях корпусной изоляции обмотки статора ослабленными и обломившимися сегментами [7].

Общий вид турбогенератора серии ТЗФ, предназначенного для выработки электроэнергии при непосредственном соединении с паровыми турбинами на тепловых электростанциях, приведен на рис. 1<sup>5</sup>.

Сердечник статора, состоящий из сегментов электротехнической стали толщиной 0,5 мм с низкими удельными потерями, собран на продольных ребрах статора и вдоль оси разделен вентиляционными каналами на пакеты. Торцевая зона сердечника статора защищена

<sup>3</sup> ГОСТ 533-2000. Машины электрические вращающиеся. Турбогенераторы. Общие технические условия; РД 34.45.501-88, СО 153-34.45.501. Типовая инструкция по эксплуатации генераторов на электростанциях.

<sup>4</sup> Сборник распорядительных материалов по эксплуатации энергосистем. Электротехническая часть. Ч. 1. – М.: ОРГРЭС, 2002; Сборник информационных материалов по эксплуатации энергосистем. Электротехническая часть. Приложение к «Сборнику распорядительных материалов по эксплуатации энергосистем». – М.: ОРГРЭС, 2002; СТО 17330282.27.01-2006. Тепловые электрические станции. Методики оценки состояния основного оборудования. Утв. Приказом № 200 ОАО «РАО «ЕЭС России» от 28.03.2007; Циркуляр Ц-06-96 «О повышении надежности турбогенераторов мощностью 100–800 МВт, работающих в режимах недо возбуждения». – М.: Департамент науки и техники РАО «ЕЭС России», 1996.

<sup>5</sup> СТО 70238424.29.160.20.010-2009. Турбогенераторы серии ТЗФ. Групповые технические условия на капитальный ремонт. Нормы и требования. Дата введ. 03.08.2009.

от потоков рассеяния медными экранами, что позволяет расширить диапазон нагрузки при работе генератора с потреблением реактивной мощности<sup>6</sup>.

Обмотка статора трехфазная, стержневая, двухслойная с транспозицией проводников в пазовой части. Изоляция обмотки статора терморезистивная класса F, допустимые температуры по классу B.

Обмотка ротора выполнена из полосовой меди с присадкой серебра и имеет непосредственное охлаждение воздухом, проходящим по вертикальным выфрезерованным в катушках обмотки ротора каналам и поступающим из подпазовых каналов.

В табл. 1 представлены паспортные данные турбогенератора ТЗФП-110-2МУЗ, произведенного заводом «Электросила» и введенного в эксплуатацию в 2008 г.

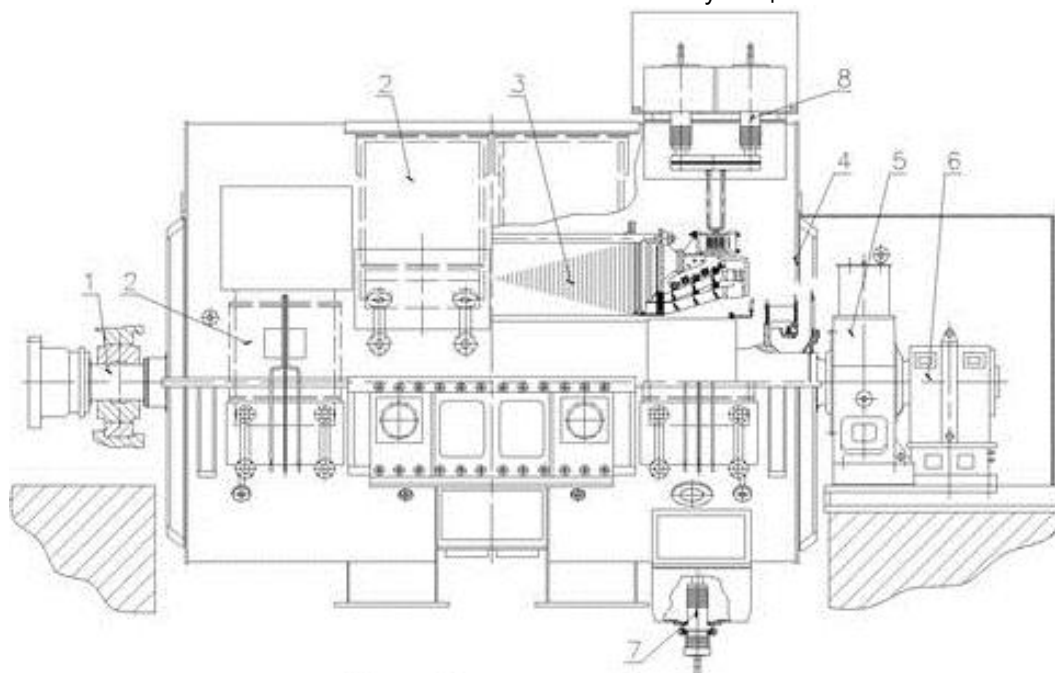


Рис. 1. Общий вид турбогенератора ТЗФП-110-2: 1 – ротор; 2 – воздухоохладитель; 3 – статор; 4 – кожух воздухохладительный; 5 – подшипник; 6 – щеточный аппарат; 7 – концевой вывод; 8 – нулевой вывод

Таблица 1. Паспортные данные турбогенератора ТЗФП-110-2МУЗ

Параметр	Обозначение, размерность	ТЗФП-110-2МУЗ
Номинальная активная мощность	$P$ , МВт	110
Номинальная полная мощность	$S$ , МВА	137,5
Коэффициент мощности	$\cos \varphi$	0,8
КПД (в номинальном режиме)	$\eta$ , %	98,4
Статическая перегрузаемость	отн. ед.	1,77
Номинальное линейное напряжение статора	$U_1$ , кВ	10,5
Номинальный ток обмотки статора	$I_1$ , кА	7,561
Номинальное напряжение возбуждения	$U_2$ , В	190
Номинальный ток возбуждения	$I_2$ , А	1,720

Параметр	Обозначение, размерность	ТЗФП-110-2МУЗ
Номинальная частота вращения	$n$ , об/мин	3,000
Охлаждение	–	Воздушное
Толщина (мм) / марка активной стали	–	0,5/3,405
Длина активной стали	$L_a$ , мм	2,940
Диаметр расточки статора	$D_1$ , мм	1,215
Число пазов статора	$z_1$	60
Сопряжение фаз обмотки статора	–	YY
Число параллельных ветвей обмотки статора	$a$	2
Класс нагревостойкости изоляции обмотки статора	–	F
Допустимая температура обмотки статора по термопреобразователю сопротивления (ТС)	$\theta_{обм.с}$ , °C	125
Допустимая температура стали статора по ТС	$\theta_{ст.с}$ , °C	120
Допустимая температура обмотки ротора по сопротивлению	$\theta_{обм.р}$ , °C	120

<sup>6</sup> Генератор ТЗФП-110-2МУЗ [Электронный ресурс] // Записки автомашера. URL: <https://dmsht.ru/generator-tzfp-110-2muz/> (дата обращения: 27.02.2022).

На рис. 2 представлена PQ-диаграмма турбогенератора ТЗФ-110-МУЗ. В настоящее время одна из проблем регулирования реактивной мощности состоит в следующем: оперативный персонал ТЭЦ в ряде случаев не может обеспечить выполнение команд диспетчера АО «СО ЕЭС» на перевод генераторов в режим с максимальным приемом реактивной мощности из-за особенностей настройки ОМВ, призванных исключить выпадение генератора из синхронизма, или ухудшением технического состояния оборудования. Следствием невыполнения команд диспетчера являются значительные штрафные санкции в отношении генерирующей компании.

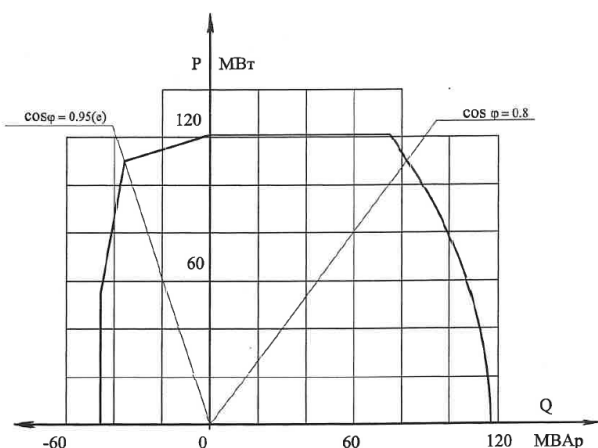


Рис. 2. Диаграмма мощности турбогенератора ТЗФ-110-2

В свою очередь, диспетчер АО «СО ЕЭС» при регулировании режима руководствуется заводской документацией: номинальными паспортными данными турбогенераторов и диаграммой мощности турбогенератора, построенной для номинального напряжения на статоре и без учета особенностей настройки ОМВ.

Одним из путей решения данной проблемы является актуализация данных диаграмм на основании проведенных испытаний. Генерирующие компании, в соответствии с существующей нормативно-технической документацией, имеют возможность направить актуальные версии PQ-диаграмм в АО «СО ЕЭС».

Турбогенератор выполнен с непосредственным воздушным охлаждением обмотки ротора и сердечника статора и косвенным воздушным охлаждением обмотки статора. Охлаждающий воздух циркулирует в генераторе по трехконтурной схеме под действием вентиляторов, установленных на валу ротора, и охлаждается вертикальными воздухоохладителями, встроенными в корпус турбогенератора (рис. 3). Система вентиляции турбогенераторов серии ТЗФ выполнена таким образом, что потоки охлаждающего сердечник воздуха в центральной части не выходят в зазор между статором и ротором, а по специальным U-образным каналам между пакетами активной стали проходят со «спинки» в область зубцов, потом разворачиваются и выходят вновь в область «спинки».

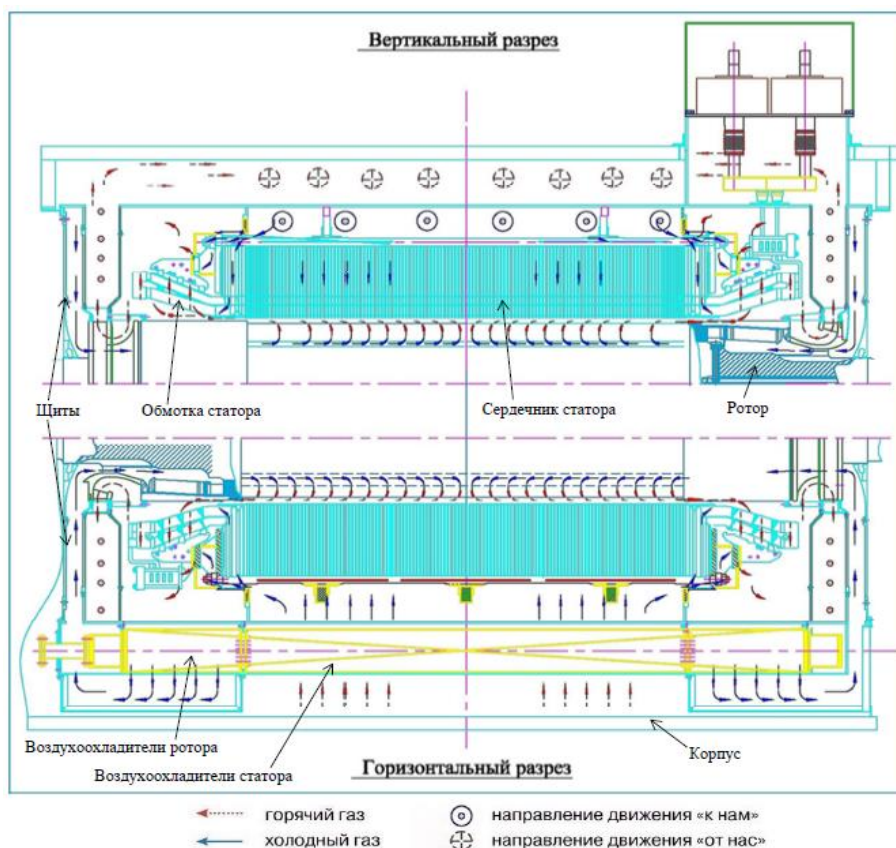


Рис. 3. Схема вентиляции турбогенератора серии ТЗФ

Выходу воздуха в зазор препятствуют специальные тангенциально-ориентированные распорки, установленные в области коронок зубцов. Наличие таких распорок практически исключает вероятность отгиба и излома уголков крайних листов в области коронок зубцов в процессе эксплуатации генератора и при проведении мероприятий по переключению пазов, что неоднократно отмечалось на старых турбогенераторах типа ТВ2-30-2, ТВ2-100-2, ТВ-60-2.

Турбогенераторы серии ТЗФ являются дальнейшим развитием серии ТФ. Применяемая в них трехконтурная схема отличается повышенной эффективностью. Улучшенные характеристики, повышенное значение КПД, надежность и перегрузочная способность турбогенераторов достигаются за счет разделения потоков воздуха, охлаждающего статор и ротор. Исключение их взаимного отрицательного влияния позволяет снизить нагрев активных и конструктивных частей генератора при одновременном снижении расхода воздуха. Применение встроенных центробежных вентиляторов со специальными направляющими и спрямляющими аппаратами позволило снизить потери в вентиляторах и повысить КПД генераторов.

В стандартах МЭК 60751 (введен в 2008 г.) и в новом ГОСТ 6651-2009 (введен в России с 1 января 2011 г.) были приняты новые значения (класс А и класс В) предельных отклонений ТС от идеальной характеристики. Контроль теплового состояния обмотки и сердечника статора турбогенератора, а также охлаждающих сред производится термопреобразователями сопротивления с допуском класса В ( $0,3+0,005 \cdot |t|$ ), где  $|t|$  – температура измеряемой среды, °С), который является наиболее распространенным в промышленности<sup>7</sup>. Их уставки на сигнал представлены в табл. 2 в зависимости от объекта измерения. Схема расположения термопреобразователей сопротивления в ТЗФП-110-2МУЗ представлена на рис. 4.

**Анализ влияния режимов потребления/выдачи реактивной мощности на температуру турбогенератора ТЗФП-110-2МУЗ.** На основании данных по потреблению/выдаче реактивной мощности и данных по изменению температуры обмотки и активной стали сердечника статора за период с 06.2021 по 11.2021 была построена зависимость, представленная на рис. 5 [8, 9].

Таблица 2. Термопреобразователи сопротивления, установленные в ТЗФП-110-2МУЗ

№ ТС	Тип ТС	Место установки		Объект измерения	Уставка на сигнал, °С		
					верхняя аварийная	верхняя предупреди- тельная	нижняя предупреди- тельная
1	ТСП 9502-02	Паз. № 3	Сторона турбины	Обмотка статора	145	125	—
2		Паз. № 11					
3		Паз. № 23					
4		Паз. № 31					
5		Паз. № 43					
6		Паз. № 51					
7		Паз. № 3	Сторона контактных колец				
9		Паз. № 11					
10		Паз. № 23					
11		Паз. № 31					
12		Паз. № 43					
13		Паз. № 51					
14		Паз. № 3					
15		Паз. № 11					
16		Паз. № 23					
17		Паз. № 31					
18		Паз. № 43					
19		Паз. № 51	Сторона контактных колец				
20		Паз. № 3					
21		Паз. № 11					
22		Паз. № 23					
23		Паз. № 31					
24		Паз. № 43					

<sup>7</sup> Термопреобразователи сопротивления платиновые и медные ТСП 9502, ТСМ 9502 [Электронный ресурс] // НОВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ. URL: [https://omsketalon.nt-rt.ru/images/manuals/tsp\\_9502\\_tsm\\_9502.pdf](https://omsketalon.nt-rt.ru/images/manuals/tsp_9502_tsm_9502.pdf) (дата обращения: 27.02.2022).

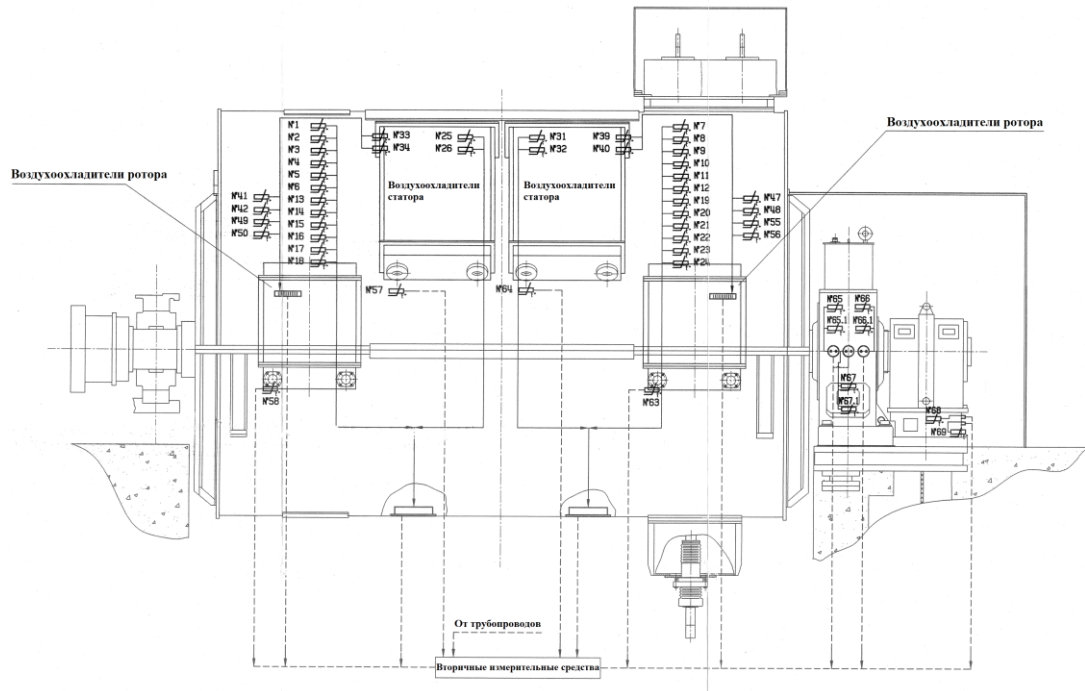


Рис. 4. Схема расположения термопреобразователей сопротивления в ТЗФП-110-2МУ3

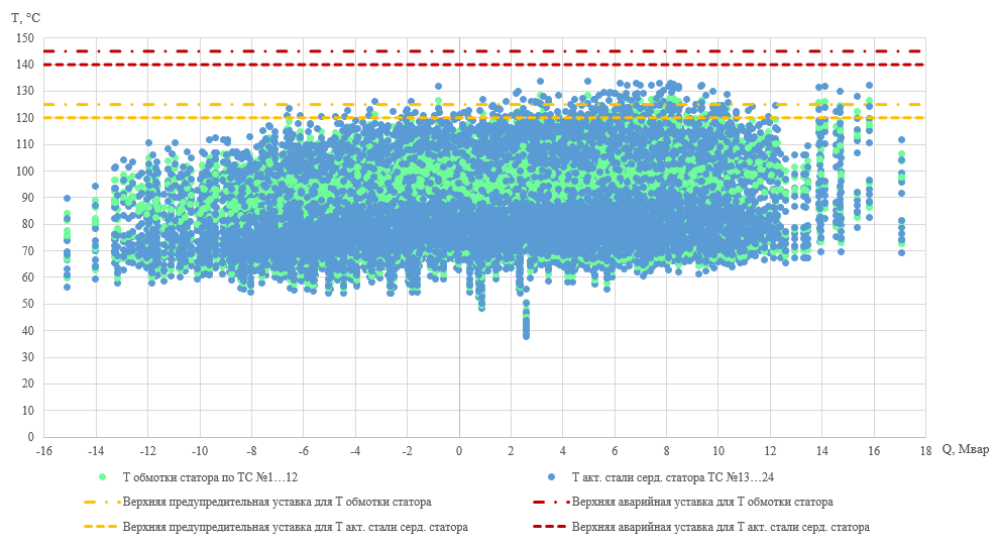


Рис. 5. Зависимость температуры статора ТЗФП-110-2МУ3 от режима потребления/выдачи реактивной мощности (убран датчик «Т обмотки статора Паз №11 (сторона “Т”))», который показывает температуру 180,5 °C)

Анализ зависимости (рис. 5) позволяет сделать следующие выводы:

1. Измеренные температуры распределяются достаточно равномерно по контрольным точкам в различных пазах, за исключением одного, вероятно, дефектного датчика на турбогенераторе.

2. На ТС № 13-24, предназначенных для измерения температуры активной стали сердечника статора, отмечается значительное превышение верхней предупредительной уставки более чем в 15 % измерений.

3. С увеличением потребления реактивной мощности температура обмоток и активной стали сердечника статора турбогенератора

ТЗФП-110-2МУ3 уменьшается и в основном не превышает верхних предупредительных уставок. В режиме выдачи реактивной мощности выявлена противоположная зависимость.

В сердечнике статора данного генератора реализованы все наиболее эффективные конструктивные и технологические решения для обеспечения высокого уровня надежности и устойчивости крайних пакетов активной стали к эксплуатационным воздействиям [10–12]:

– под нажимными плитами устанавливаются медные экраны, используемые для демпфирования поля рассеяния лобовых частей, а первые и вторые крайние пакеты с каждой стороны сердечника статора имеют укороченные



зубцы и выполняют функцию магнитных шунтов – они практически не воспринимают на себя нагрузку от приложенного к статору электромагнитного момента и предназначены в основном для ослабления поля рассеяния лобовых частей, проникающего в зубцы рабочих крайних пакетов сердечника;

–зубцы магнитных шунтов, а также третьих, четвертых и пятых рабочих крайних пакетов выполнены ступенчатыми, со значительным скосом в радиальном направлении; кроме того, эти зубцы сделаны разрезными (в средней их части выполнены продольные шлицы) – данные конструктивные меры способствуют ослаблению индукции магнитного поля лобовых частей в области коронок зубцов, а также уменьшению плотности вихревых токов, индуцируемых в них аксиальной составляющей магнитного поля рассеяния;

–крайние пакеты сердечника (включая и магнитные шунты) выполнены склеенными и запеченными, а шлицы разрезных пакетов замонированы эпоксидной замазкой, что повышает жесткость и выносливость зубцов по отношению к электромагнитным и термомеханическим воздействиям при работе генератора.

В целом следует также отметить достаточно высокое качество изготовления сердечников генераторов серии ТЗФ – при обследовании ни разу не выявлены зазоры между нажимными пальцами и поверхностью крайних пакетов, что указывает на отсутствие существенной кривизны крайних пакетов сердечника.

**Результаты исследования.** Опыт проводимых комплексных диагностических обследований на турбогенераторах серии ТЗФ подтверждает высокую устойчивость зубцов крайних пакетов к эксплуатационным нагрузкам и показывает, что на данных турбогенераторах отсутствуют опасные дефекты прессовки, распушения и выкрашивания. Таким образом, у данных машин в настоящее время отсутствует непосредственная угроза возникновения механических повреждений изоляции обмотки статора ослабленными сегментами активной стали.

Ретроспективный анализ результатов испытаний генераторов серии ТЗФ на нагревание показывает, что в тепловом отношении обмотки статоров этих машин характеризуются сравнительно высокими температурами нагрева. В ряде случаев максимальные температуры обмоток в номинальном режиме достигали и даже превышали предельно допустимые значения. При этом температура верхних слоев изоляции в машинах ТЗФ ближе к температуре меди и из-за этого наружная поверхность стержней нагрета сильнее.

Вплоть до настоящего времени, благодаря регулярно проводимым комплексным диагностическим обследованиям сердечников статоров и ремонтно-восстановительным работам, выполнявшимся по результатам этих обследований, удавалось избегать массовых пробоев

статорных обмоток, непосредственно вызванных механическими повреждениями корпусной изоляции ослабленными и обломившимися фрагментами листов активной стали.

При отсутствии должного контроля за состоянием сердечников и проведения ремонтов ослабленных зубцов будет возрастать опасность прорезания корпусной изоляции обмотки статора обломками выкрашившихся листов активной стали и, соответственно, риск ее пробоя в работе или при испытаниях.

Дополнительно необходимо отметить, что работа генератора в маневренных режимах с переходом от выдачи реактивной мощности к ее потреблению и обратно будет создавать условия для увеличения взаимных перемещений активной стали и стержней обмотки в районе их выхода из пазов и, как следствие, более интенсивного истирания изоляции в результате ее фрикционного взаимодействия с боковыми гранями зубцов сердечника статора.

**Выводы.** В ходе исследования были сформулированы следующие выводы.

1. Влияние режима потребления реактивной мощности на техническое состояние турбогенератора ТЗФП-110-2МУЗ при работе в установившихся режимах в пределах заводской PQ-диаграммы минимально.

2. В сердечнике статора турбогенератора рассматриваемой серии за счет значительного усовершенствования конструкции и технологии изготовления торцевых зон достигнута высокая устойчивость зубцов крайних пакетов к эксплуатационным нагрузкам.

3. При обнаружении невозможности работы в режиме с максимальным приемом реактивной мощности для предотвращения невыполнения команд диспетчера АО «СО ЕЭС» рекомендуется проводить актуализацию PQ-диаграмм на основе соответствующих испытаний.

4. Турбогенераторы серии ТЗФ допускаются к применению для потребления реактивной мощности.

В качестве дальнейшего направления исследований планируется рассмотреть работу турбогенераторов в маневренных режимах с переходом от выдачи реактивной мощности к ее потреблению и обратно.

#### Список литературы

1. **Применение** асинхронизированных турбогенераторов на электростанциях ОАО «Мосэнерго» / С.А. Аршунин, П.В. Голов, Н.А. Антипова и др. // Электротехника. – 2010. – № 2. – С. 14–18
2. **Воротницкий В.Э.** Энергетическая эффективность и компенсация реактивной мощности в электрических сетях. Проблемы и пути решения // Электронный журнал «ЭНЕРГОСОВЕТ». – Весна 2017. – № 47 // [www.energsovet.ru](http://www.energsovet.ru).
3. **Цгоев Р.С.** Расширение области устойчивости синхронной машины с тиристорной бесщеточной системой возбуждения // Электро. Электротехника, электроэнергетика, электротехническая промышленность. – 2006. – № 1. – С. 11–13. – EDN KVNHT.

4. **Грабовский В.П.** Анализ повреждаемости валов роторов турбогенераторов с тиристорной системой возбуждения // Экспериментальные и теоретические исследования в современной науке: сб. ст. по материалам LII–LIII Междунар. науч.-практ. конф., Новосибирск, 27 мая 2020 г. Т. 4–5(47). – Новосибирск: Общество с ограниченной ответственностью «Сибирская академическая книга», 2020. – С. 63–74. – EDN UNXCHR.

5. **Эксплуатация турбогенераторов с непосредственным охлаждением / под общ. ред. Л.С. Линдорфа, Л.Г. Мамиконянца.** – М.: Энергия, 1972. – 352 с.

6. **Пиккульский В.А.** Влияние режимов работы, условий охлаждения и эксплуатационного состояния статора на изменение плотности прессовки в зубцовой зоне крайних пакетов // *Электротехника*. – 1991. – № 10. – С. 6–9.

7. **Пиккульский В.А.** Влияние термомеханических деформаций в статоре турбогенератора на изменение плотности прессовки в зубцовой зоне крайних пакетов // *Электротехника*. – 1991. – № 5. – С. 17–21.

8. **Битней В.Д., Остроушко В.А., Охлопков А.В.** Оценка влияния режима работы в части регулирования реактивной мощности на техническое состояние генерирующего оборудования // *Радиоэлектроника, электротехника и энергетика: тез. докл. XXVIII Междунар. науч.-техн. конф. студ. и асп., г. Москва, 17–19 марта 2022 г.* – М.: Общество с ограниченной ответственностью «Центр полиграфических услуг «РАДУГА», 2022. – С. 850. – EDN ILLMVG.

9. **Impact of operation mode in terms of reactive power regulations on technical condition and reliability of generating equipment operation / S. Lenev, A. Vivchar, A. Okhlopov, V. Bitney** // *Proceedings of the 2022 4th International Youth Conference on Radio Electronics, Electrical and Power Engineering, REEPE 2022: 4, Moscow, 17–19 марта 2022 г.* – Moscow, 2022. – DOI: 10.1109/REEPE53907.2022.9731385. – EDN JGBMNI.

10. **Азбукин Ю.И., Аврух В.Ю.** Модернизация турбогенераторов. – М.: Энергия, 1980. – 232 с.

11. **Mamikonians L.G., Pikul'skiy V.A., Polyakov F.A.** A1-211 Service life Prolongation and Reliability Increase of Long Operating Turbogenerators // *Доклад на Сессии СИГРЭ*, 2006.

12. **Курбатов П.А., Гриценко А.Д., Охлопков А.В.** Влияние регулирования реактивной мощности на надежность генерирующего оборудования // *Электрические станции*. – 2022. – № 9(1094). – С. 22–32. – EDN OJNGKK.

## References

1. Arshunin, S.A., Golov, P.V., Antipova, N.A., Labunets, I.A., Sokur, P.V. *Primenenie asinkhronizirovannykh turbogeneratorov na elektrostantsiyakh OAO «Mosenergo»* [Operation of asynchronous turbogenerators at Mosenergo OJSC electric power plants]. *Elektrotehnika*, 2010, vol. 2, pp. 14–18.

2. Vorotnitskiy, V.E. *Energeticheskaya effektivnost' i kompensatsiya reaktivnoy moshchnosti v elektricheskikh setyakh. Problemy i puti resheniya* [Energy efficiency and reactive power compensation in electrical networks. Challenges and ways to address them]. *ENERGOSOVET*, 2017, vol. 47, pp. 44–53. Available at: [www.energsovet.ru](http://www.energsovet.ru).

3. Tsgoev, P.C. *Rasshirenje oblasti ustoychivosti sinkhronnoy mashiny s tiristornoy besshchetochnoy sistemoy возбуждения* [Expansion of the stability region of a synchronous machine with a thyristor brushless excitation system]. *Elektro*.

*Elektrotehnika, elektroenergetika, elektrotekhnicheskaya promyshlennost'*, 2006, no. 1, pp. 11–13.

4. Grabovskiy, V.P. *Analiz povrezhdaemosti valov rotorov turbogeneratorov s tiristornoy sistemoy возбуждения* [Analysis of damage to rotor shafts of turbogenerators with a thyristor system]. *Eksperimental'nye i teoreticheskie issledovaniya v sovremennoy nauke: sbornik statey po materialam LII–LIII Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii, Novosibirsk, 27 maya 2020 g. T. 4–5(47)* [Experimental and theoretical research in modern science: Collection of articles based on the materials of the LII–LIII International Scientific and Practical Conference, Novosibirsk, May 27, 2020. Vol. 4–5(47)]. Novosibirsk: Limited Liability Company “Siberian Academic Book”, 2020, pp. 63–74.

5. Lindorf, L.S., Mamikonians, L.G. *Ekspluatatsiya turbogeneratorov s neposredstvennym okhlazhdeniem* [Operation of turbogenerators with direct cooling]. Moscow: Energiya, 1972. 352 p.

6. Pikul'skiy, V.A. *Vliyanie rezhimov raboty, usloviy okhlazhdeniya i ekspluatatsionnogo sostoyaniya statora na izmenenie plotnosti pressovki v zubtsovoy zone kraynikh paketov* [The effect of operating modes, cooling conditions, and the operational status of the stator on the change in the density of pressing in the tooth area of the outer packs]. *Elektrotehnika*, 1991, vol. 10, pp. 6–9.

7. Pikul'skiy, V.A. *Vliyanie termomekhanicheskikh deformatsiy v statore turbogeneratora na izmenenie plotnosti pressovki v zubtsovoy zone kraynikh paketov* [The effect of thermomechanical deformations in the turbogenerator stator on the change in the density of pressing in the tooth area of the outer packs]. *Elektrotehnika*, 1991, no. 5, pp. 17–21.

8. Bitney, V.D., Ostroushko, V.A., Okhlopov, A.V. *Otsenka vliyaniya rezhima raboty v chasti regulirovaniya reaktivnoy moshchnosti na tekhnicheskoe sostoyanie generiruyushchego oborudovaniya* [Evaluation of the effect of the operation mode in terms of reactive power control on the technical status of generating equipment]. *Radioelektronika, elektrotehnika i energetika: tezisy dokladov XXVIII Mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii studentov i aspirantov, Moskva, 17–19 marta 2022 g.* [Proceedings of abstracts of XXVIII International scientific technical conference of students and graduate students: Radioelectronics, electrical engineering and energy, Moscow, March 17–19, 2022]. Moscow, 2022, p. 850.

9. Lenev, S., Vivchar, A., Okhlopov, A., Bitney, V. *Effect of operation mode in terms of reactive power regulations on technical condition and reliability of generating equipment operation*. *Proceedings of the 2022 4th International Youth Conference on Radio Electronics, Electrical and Power Engineering, REEPE 2022: 4, Moscow, March 17–19, 2022*. Moscow, 2022. DOI 10.1109/REEPE53907.2022.9731385.

10. Azbukin, Yu.I., Avrukh, V.Yu. *Modernizatsiya turbogeneratorov* [Retrofit of turbogenerators]. Moscow: Energiya, 1980. 232 p.

11. Mamikonians, L.G., Pikul'skiy, V.A., Polyakov, F.A. *Service life Prolongation and Reliability Increase of Long Operating Turbogenerators*. Report at the CIGRE Session, 2006.

12. Kurbatov, P.A., Gritsenko, A.D., Okhlopov, A.V. *Vliyanie regulirovaniya reaktivnoy moshchnosti na nadezhnost' generiruyushchego oborudovaniya* [Effect of reactive power control on the generating equipment reliability]. *Elektricheskie stantsii*, 2022, no. 9(1094), pp. 22–32.

## АВТОМАТИЗИРОВАННЫЕ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ

---

УДК 62-833.6

**Анатолий Брониславович Виноградов**

Научно-технический центр электропривода «Вектор», доктор технических наук, научный руководитель, Россия, Иваново, телефон (4932) 26-97-08, e-mail: vinorg\_ab@mail.ru

**Роман Олегович Горелкин**

ФГБОУ ВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», аспирант, учебный мастер кафедры ЭПиАПУ, Россия, Иваново, e-mail: roman.gorelkin.96@mail.ru

### Автономная станция электроснабжения на основе асинхронного генератора с фазным ротором и преобразователя частоты малой мощности

#### Авторское резюме

**Состояние вопроса.** В настоящее время основными вариантами построения высокоэффективных источников 3-фазного напряжения с двигателем внутреннего сгорания в качестве первичного двигателя и изменяемой в функции нагрузки частотой вращения являются асинхронные и синхронные генераторы с двухзвенными преобразователями частоты полной мощности. Требуется разработка и исследование эффективности применения автономной станции электроснабжения с переменной частотой вращения на основе преобразователя частоты малой мощности в целях снижения ее стоимости при наличии возможности экономии топлива двигателя внутреннего сгорания за счет регулирования частоты в функции нагрузки.

**Материалы и методы.** Описание электростанции и ее системы управления выполнено на структурно-функциональном уровне. Исследование ее характеристик реализовано посредством компьютерного моделирования в программном комплексе Delphi. Для оценки потенциальной топливной эффективности электростанции использована многопараметровая характеристика двигателя внутреннего сгорания ЯМЗ-238.

**Результаты.** Представлены функциональная схема электростанции, структурная схема системы ее управления без использования датчика скорости. Приведены временные диаграммы моделирования ее работы на несимметричную нагрузку, а также ее энергетические характеристики. Произведена оценка энергетических характеристик и потенциальной возможности экономии топлива ДВС при работе электростанции на симметричную активно-индуктивную нагрузку при условии многократного снижения мощности преобразователя частоты относительно номинальной мощности нагрузки. Показано, что, в отличие от известных аналогов, разработанная электростанция позволяет при ограничении номинальной мощности преобразователя на уровне 20 % от номинальной мощности нагрузки обеспечивать эффективный диапазон регулирования скорости двигателя внутреннего сгорания не менее 2, что создает предпосылки значительной экономии топлива.

**Выводы.** Использование электростанции в предложенном исполнении позволяет снизить ее стоимость за счет снижения мощности преобразователя и повысить ее энергоэффективность за счет регулирования скорости двигателя внутреннего сгорания при удовлетворительной точности поддержания выходного напряжения в условиях существенно несимметричной нагрузки. Достоверность полученных результатов подтверждена компьютерным моделированием.

**Ключевые слова:** автономная станция электроснабжения, асинхронный генератор, активный выпрямитель, инвертор напряжения, двигатель внутреннего сгорания

**Anatoliy Bronislavovich Vinogradov**

Electrical Drive Research and Technical Center “Vector”, Doctor of Engineering Sciences (Post-doctoral degree), Research Supervisor, Russia, Ivanovo, telephone (4932) 26-97-08, e-mail: vinorg\_ab@mail.ru

**Roman Olegovich Gorelkin**

Ivanovo State Power Engineering University, Post-graduate Student, Training Master of Electric Drive and Automation of Industrial Plants Department, Russia, Ivanovo, e-mail: roman.gorelkin.96@mail.ru

## Autonomous power supply station based on asynchronous generator with phase rotor and low-power frequency converter

### Abstract

**Background.** Currently, asynchronous and synchronous generators with two-link full power frequency converters are the main options to design highly efficient sources of 3-phase voltage with an internal combustion engine (ICE) as a prime mover and a variable speed as a function of the load. It is required to develop and study the effectiveness of the use of an autonomous power supply station with a variable speed based on a low-power frequency converter to reduce its cost with the possibility of saving ICE fuel by controlling the frequency as a function of the load.

**Materials and methods.** The description of the power plant and its control system is made at the structural and functional level. The study of its characteristics is carried out by means of computer simulation in the Delphi software package. To assess the potential fuel efficiency of the power plant, a multi-parameter characteristic of the YaMZ-238 internal combustion engine is used.

**Results.** The functional diagram of the power plant, the structural diagram of its control system without the use of a speed sensor are presented. The time diagrams for modeling work on an asymmetric load and its energy characteristics are given. It is shown that the developed power plant allows to provide an effective ICE speed control range of at least 2 with the limitation of the rated power of the converter at the level of 20 % of the rated power of the load. Thus, it creates the preconditions for significant fuel savings.

**Conclusions.** The use of the power supply station in the proposed design makes it possible to reduce its cost by reducing the power of the converter and increase its energy efficiency by controlling the speed of ICE with a satisfactory accuracy of the output voltage under conditions of a significantly asymmetric load. The reliability of the results obtained in the study is confirmed by computer simulation.

**Key words:** autonomous power supply station, asynchronous generator, active rectifier, voltage inverter, internal combustion engine

**DOI:** 10.17588/2072-2672.2023.3.043-051

**Состояние вопроса.** Автономные станции электроснабжения (АСЭ) [1–4] широко востребованы как источники электроэнергии на объектах малой и средней мощности, удаленных от централизованных электросетей, в качестве резервных источников электроэнергии на случай временного сбоя в централизованном электроснабжении и в качестве источников энергии мобильной техники. В качестве генераторов, выполняющих электромеханическое преобразование энергии, чаще всего используются электрические машины переменного тока с круговым вращающимся полем: асинхронные либо синхронные. При использовании в качестве первичного источника механической энергии двигателя внутреннего сгорания (ДВС) целесообразным с точки зрения повышения суммарного КПД системы и снижения ее эксплуатационных расходов является применение систем, допускающих работу с переменной частотой вращения ДВС. Это позволяет регулировать скорость генератора в зависимости от мощности нагрузки АСЭ, обеспечивая работу

ДВС на характеристике максимальной топливной эффективности, и за счет этого экономить топливо в условиях сильно изменяющихся нагрузок. Другим важным фактором является стоимость АСЭ. По этому показателю определенное преимущество имеют системы, в которых через полупроводниковый преобразователь передается только часть энергии, циркулирующей между первичным двигателем и нагрузкой. По совокупности обладания двумя вышеуказанными свойствами в качестве одного из наиболее целесообразных вариантов построения АСЭ может быть выбрана электростанция на основе асинхронного генератора с фазным ротором (АГФР).

Построение систем векторного управления асинхронной машиной с фазным ротором (машиной двойного питания, синхронизированной асинхронным генератором) рассмотрено в значительном количестве работ [5–11]. В ряде из них рассматриваются вопросы управления без датчика скорости. При этом чаще всего рассматриваются системы, работающие па-

раллельно с сетью, в частности, применительно к ветрогенераторным установкам, и традиционно мало внимания уделяется рассмотрению работы этих систем на несимметричную нагрузку. По своему исполнению система управления инвертором роторной цепи АСЭ с АГФР существенно отличается от систем управления электростанций, работающих параллельно с сетью, как по набору регулируемых переменных, так и по решаемым задачам. В последних уровень и частота напряжения определяются сетью, а в автономных источниках задача их стабилизации ложится на систему управления инвертором ротора.

Ниже рассматривается один из возможных вариантов построения АСЭ на основе АГФР с управлением от двухзвенного четырехквадрантного преобразователя частоты, построенного на IGBT с ШИМ (рис. 1). Данный вариант построения АСЭ обладает существенными преимуществами относительно других вариантов: с неуправляемым выпрямителем со стороны статорной цепи АГФР; с четырехквадрантными тиристорными преобразователями; с непосредственными или матричными преобразователями частоты. По сравнению с первым из указанных вариантов, рассмотренный ниже имеет более широкий диапазон регулирования частоты вращения генератора как вниз, так и вверх от ее номинального значения и лучший гармонический состав выходного напряжения. По сравнению со вторым вариантом – значительно лучший гармонический состав. По сравнению с третьим – более низкую стоимость, высокую надежность и диапазон воспринимаемых нагрузок, обеспечиваемые за счет меньшего количества силовых ключей и наличия емкости в звене постоянного напряжения преобразователя.

**Материалы и методы.** Функциональная схема АСЭ (рис. 1) включает: генератор  $G$ , приводимый в движение от ДВС; трехфазный мостовой активный выпрямитель (АВ) на IGBT, питаемый с выхода АСЭ; трехфазный мостовой автономный инвертор напряжения (АИН), подключенный к роторной цепи АГФР; звено постоянного напряжения (ЗПТ), содержащее конденсаторы емкостного фильтра и транзисторный ключ управления балластным резистором  $R_b$ ; систему управления (СУ) АСЭ; элементы пассивной фильтрации; датчиковую систему, состоящую из трех датчиков выходного напряжения АСЭ (ДН2), датчика напряжения ЗПТ (ДН1), двух датчиков тока на выходе АВ (ДТ1) и либо двух датчиков тока, расположенных на выходе АИН, либо трех датчиков тока, расположенных на выходе статорной цепи генератора (ДТ2); трехфазную четырехпроводную нагрузку. К пассивным фильтрующим элементам схемы относятся: емкость ЗПТ (CDC); емкость  $C_{f1}$ , обеспечивающая фильтра-

цию высокочастотных дифференциальных составляющих выходного напряжения АСЭ; емкость  $C_{f0}$ , обеспечивающая фильтрацию как дифференциальных, так и нейтральных высокочастотных составляющих выходного напряжения; переменная дифференциально включенная емкость  $C_{f2}$ , совместно с  $C_{f0}$  и  $C_{f1}$  обеспечивающая баланс реактивной мощности системы с учетом индуктивностей АГФР, индуктивности дросселя входной цепи АВ ( $L_f$ ), реактивных составляющих нагрузки. Заметим, что при ограниченных диапазонах изменения реактивной составляющей нагрузки дополнительно подключаемая к выходу АСЭ емкость  $C_{f2}$  может отсутствовать.

На схеме рис. 1 не показаны аккумуляторная батарея 12 (24) В, подключаемая к ЗПТ через отсекающий диод, от которой выполняется запуск АСЭ; обратный диод в схеме чоппера; защитно-коммутационная аппаратура (выходные супрессоры, обеспечивающие аппаратную защиту от кратковременных перенапряжений в дополнение к программной защите, реализуемой в СУ АСЭ); автоматический выключатель, выполняющий функции аппаратной защиты от перегрузок и коротких замыканий в дополнение к соответствующим программным защитами. Также на схеме не показан согласующий трансформатор, который может включаться как в статорную, так и в роторную цепь генератора, в функции которого входит согласование рабочих напряжений статорной и роторной цепей между собой, что обеспечивает минимизацию стоимости силовой части преобразователя пониженной мощности. Функции этого трансформатора может выполнять сам генератор, обмоточные данные которого специальным образом согласованы при проектировании. Балластный резистор и управляющий им ключ могут использоваться в системе опционально и при наличии такой необходимости обеспечивать дополнительную защиту полупроводников инвертора и выпрямителя от перенапряжений, а также создавать минимальную нормированную нагрузку в режиме холостого хода АСЭ.

Структурная схема системы управления АСЭ (рис. 2) включает в себя системы управления АВ и АИН, а также наблюдатель состояния (НС) АСЭ, вычисляющий все необходимые для ее работы переменные по информации с датчиков токов и напряжений. В качестве дополнительной может использоваться информация о скорости ДВС. Двухканальная система векторного управления АВ [12] выполнена на основе принципов подчиненного регулирования и включает в себя регуляторы активной ( $R_{ix}$ ) и реактивной ( $R_{iy}$ ) составляющих входного тока АВ в ортогональной системе координат, ориентированной по вектору выходного напряжения АСЭ.

The diagram illustrates the control system for a two-phase asynchronous motor (Двухфазный АСЭ). It includes the following components and signal flows:

- Reference Inputs:**  $U_L$ ,  $I_d$ ,  $I_y$ , and  $U_{DC}$ .
- Control Blocks:**
  - RU<sub>L</sub>**: Receives  $U_L$  and  $\omega_\psi^*$  to produce  $I_d^*$ .
  - RI<sub>d</sub>**: Receives  $I_d^*$  and  $I_d$  to produce  $U_{id}^*$ .
  - R $\omega_\psi$** : Receives  $\omega_\psi^*$  and  $\omega_\psi$  to produce  $U_{iq}^*$ .
  - RI<sub>y</sub>**: Receives  $I_y^*$  and  $I_y$  to produce  $U_{afy}^*$ .
  - RU<sub>DC</sub>**: Receives  $U_{DC}^*$  and  $U_{DC}$  to produce  $I_x^*$ .
  - RI<sub>x</sub>**: Receives  $I_x^*$  and  $I_x$  to produce  $U_{afx}^*$ .
- Coordinate Transformation Blocks:**
  - БВО1**: Receives  $U_{id}^*$ ,  $U_{iq}^*$ , and  $U_{DC}$  to produce  $U_{id}^{**}$  and  $U_{iq}^{**}$ .
  - БВО2**: Receives  $U_{afy}^*$ ,  $U_{afx}^*$ , and  $U_{DC}$  to produce  $U_{afy}^{**}$  and  $U_{afx}^{**}$ .
- Control Blocks:**
  - ПК1 dq**: Receives  $U_{id}^{**}$ ,  $U_{iq}^{**}$ , and  $\phi_\psi$  to produce  $U_{ia}^*$ ,  $U_{ib}^*$ , and  $U_{ic}^*$ .
  - ПК2 xy**: Receives  $U_{afy}^{**}$ ,  $U_{afx}^{**}$ , and  $\phi_u$  to produce  $U_{afa}^*$ ,  $U_{afb}^*$ , and  $U_{afc}^*$ .
- Output Blocks:**
  - БУК АИН**: Receives  $U_{ia}^*$ ,  $U_{ib}^*$ , and  $U_{ic}^*$  to produce  $\kappa$  АИН.
  - БУК АВ**: Receives  $U_{afa}^*$ ,  $U_{afb}^*$ , and  $U_{afc}^*$  to produce  $\kappa$  АВ.
- State Observer and Sensors:**
  - Наблюдатель состояния АСЭ**: Receives  $U_L$ ,  $U_{DC}$ ,  $I_d$ ,  $\omega_\psi$ ,  $I_x$ ,  $I_y$ ,  $\phi_\psi$ , and  $\phi_u$  to produce  $U_L$ ,  $U_{DC}$ ,  $I_d$ ,  $\omega_\psi$ ,  $I_x$ ,  $I_y$ ,  $\phi_\psi$ , and  $\phi_u$ .
  - Датчики**: Receives  $U_L$ ,  $U_{DC}$ ,  $I_d$ ,  $\omega_\psi$ ,  $I_x$ ,  $I_y$ ,  $\phi_\psi$ , and  $\phi_u$  to produce  $U_L$ ,  $U_{DC}$ ,  $I_d$ ,  $\omega_\psi$ ,  $I_x$ ,  $I_y$ ,  $\phi_\psi$ , and  $\phi_u$ .
- Block Zадания (Reference Block):**
  - RS<sub>пч</sub>**: Receives  $I_y^*$  and  $S_{af}$  to produce  $S_i$ .
  - БТО**: Receives  $U_L^*$  and  $I_s$  to produce  $U_L$ .
  - РН<sub>ДВБ</sub>**: Receives  $\omega^*$  and  $P_L$  to produce  $\omega_\psi^*$ .

Внешним по отношению к контуру регулирования активной составляющей тока АВ является контур регулирования напряжения ЗПТ с регулятором  $RU_{DC}$ . Двухканальная система векторного управления АИН роторной цепи включает в себя канал регулирования выходного напряжения АСЭ (напряжения на нагрузке) с регулятором напряжения  $RU_L$  и регулятором реактивной составляющей тока ротора  $RId$ , а

Ориентация всех векторных переменных системы управления АИН роторной цепи производится в ортогональной системе координат, жестко связанной с вектором потокосцепления статора АГФР. Компоненты векторов заданных напряжений АИН и АВ в ортогональных вращающихся системах координат ограничиваются в блоках векторного ограничения БВО1 и БВО2 с



учетом напряжения ЗПТ, преобразуются в координатных преобразователях ПК1 и ПК2 в естественную 3-фазную неподвижную относительно статора АГФР систему координат ABC. Далее в блоках управления ключами БУК АИН и БУК АВ происходит формирование импульсов управления всеми 12 транзисторами преобразователя согласно синусоидальному закону формирования 3-фазной ШИМ.

Математическое описание вышеуказанных блоков системы управления АСЭ и методы синтеза регуляторов представлены в [12]. Синтез регуляторов системы управления АИН и АВ выполнен в рамках теории систем подчиненного регулирования путем настройки контуров регулирования переменных на оптимальные процессы соответствующего порядка с учетом схемной линеаризации этих контуров и их упрощенного описания в виде инерционных звеньев первого порядка. С точки зрения повышения помехоустойчивости датчиковой системы и учитывая, что ориентация векторных переменных АГФР выполняется по потокосцеплению статора, целесообразно контролировать токи генератора посредством установки датчиков в его статорную цепь, а токи ротора рассчитывать в наблюдателе состояния по параметрам системы. Это дополнительно обеспечивает возможность вычисления и контроля тока нейтрального провода АСЭ. Заданные значения переменных на входах регуляторов формируются в блоке задания с учетом реализации функций токоограничения, минимизации потерь в системе ДВС–АСЭ и равномерного распределения мощности между инвертором и выпрямителем.

Наблюдатель состояния АСЭ построен на основе хорошо известного математического описания асинхронной машины в виде системы дифференциальных уравнений Парка-Горева, представленной, например, в [13, 14], дополнительно учитывающей нелинейность цепи намагничивания и при необходимости исследования энергетических характеристик системы процессы в стали магнитопровода [12]. Оценка потокосцепления статора выполняется на основе векторного уравнения статорной цепи генератора в неподвижной относительно статора ортогональной системе координат по напряжениям и токам, полученным из их фазных значений в преобразователе координат  $ПК\ ABC \rightarrow \alpha\beta$ . Частота выходного напряжения определяется по частоте вращения поля генератора, вычисляемой как отношение модулей векторов ЭДС статора и потокосцепления статора. Известная проблема введения начальных условий и стабилизации выходов интеграторов, вычисляющих компоненты вектора потокосцепления, решается с помощью корректирующей обратной связи, компенсирующей влияние сигнальных и пара-

метрических возмущений на точность вычисления потока и частоты. Средствами математического моделирования была проанализирована эффективность различных методов формирования корректирующих сигналов и по критерию минимизации отклонений оценок потокосцепления и частоты от введения тестового возмущения в ЭДС статора в качестве базовой принята коррекция выходов интеграторов на основе введения отрицательной обратной связи по оценкам средних за период основной гармоники компонент вектора потокосцепления. Коэффициент данной связи устанавливается экспериментально по результатам математического моделирования либо в процессе настройки системы управления по вышеуказанному критерию.

**Результаты.** Моделирование АСЭ выполнено в среде Delphi. При моделировании процессов в статических и динамических режимах работы АСЭ учитывались алгоритмы переключения ключей инвертора и выпрямителя, эффект насыщения магнитной системы генератора. Учет динамики ДВС выполнялся с помощью инерционного звена 1-го порядка на основе данных натурного эксперимента. В качестве генератора использовалась асинхронная машина с фазным ротором 5АНК250МВ4 со следующими параметрами:  $U_{\text{ном}} = 380/220\text{ В}$ ;  $I_{\text{ном}} = 205\text{ А}$ ;  $f_{\text{ном}} = 50\text{ Гц}$ ; КПД = 94 %;  $\cos(\varphi) = 0,87$ ;  $L_{\text{с}} = 0,0002\text{ Гн}$ ;  $L_{\text{ст}} = 0,00023\text{ Гн}$ ;  $L_{\text{м0}} = 0,0145\text{ Гн}$ ;  $L_{\text{мн}} = 0,0076\text{ Гн}$ ;  $R_{\text{с20}} = 0,0132\text{ Ом}$ ;  $R_{\text{р20}} = 0,026\text{ Ом}$ ;  $Z_p = 2$ ;  $J = 2\text{ кгм}^2$ , где  $L_{\text{с}}$ ,  $L_{\text{ст}}$ ,  $L_{\text{м0}}$ ,  $L_{\text{мн}}$  – индуктивности рассеяния статора, ротора, взаимная в режиме XX и номинальном. При оценке энергетических характеристик АСЭ учитывались также потери в стали, механические и добавочные потери асинхронной машины, КПД инвертора и выпрямителя, полученные в ходе обработки данных автономных стендовых испытаний элементов АСЭ.

На рис. 3 изображены временные диаграммы выходных напряжений (а), токов нагрузки (б), напряжения ЗПТ (в), токов статора АГФР для фаз А и В (г) в режиме ступенчатого подключения и отключения нагрузки фазы А в диапазоне (0,1...1) от ее номинального значения.

Интегральная оценка величины искажений, вызываемых несимметричной нагрузкой в выходных напряжениях АСЭ, может быть выполнена по относительному значению максимального отклонения модуля выходного напряжения от его номинального значения. В частности, в установившемся режиме работы АСЭ, когда одна из ее фаз нагружена номинальной мощностью, а две остальные – 10 %-й нагрузкой, этот показатель составил 4,8 %, что соответствует колебаниям модуля выходного напряжения АСЭ в пределах  $\pm 15\text{ В}$  от его номинального значения.

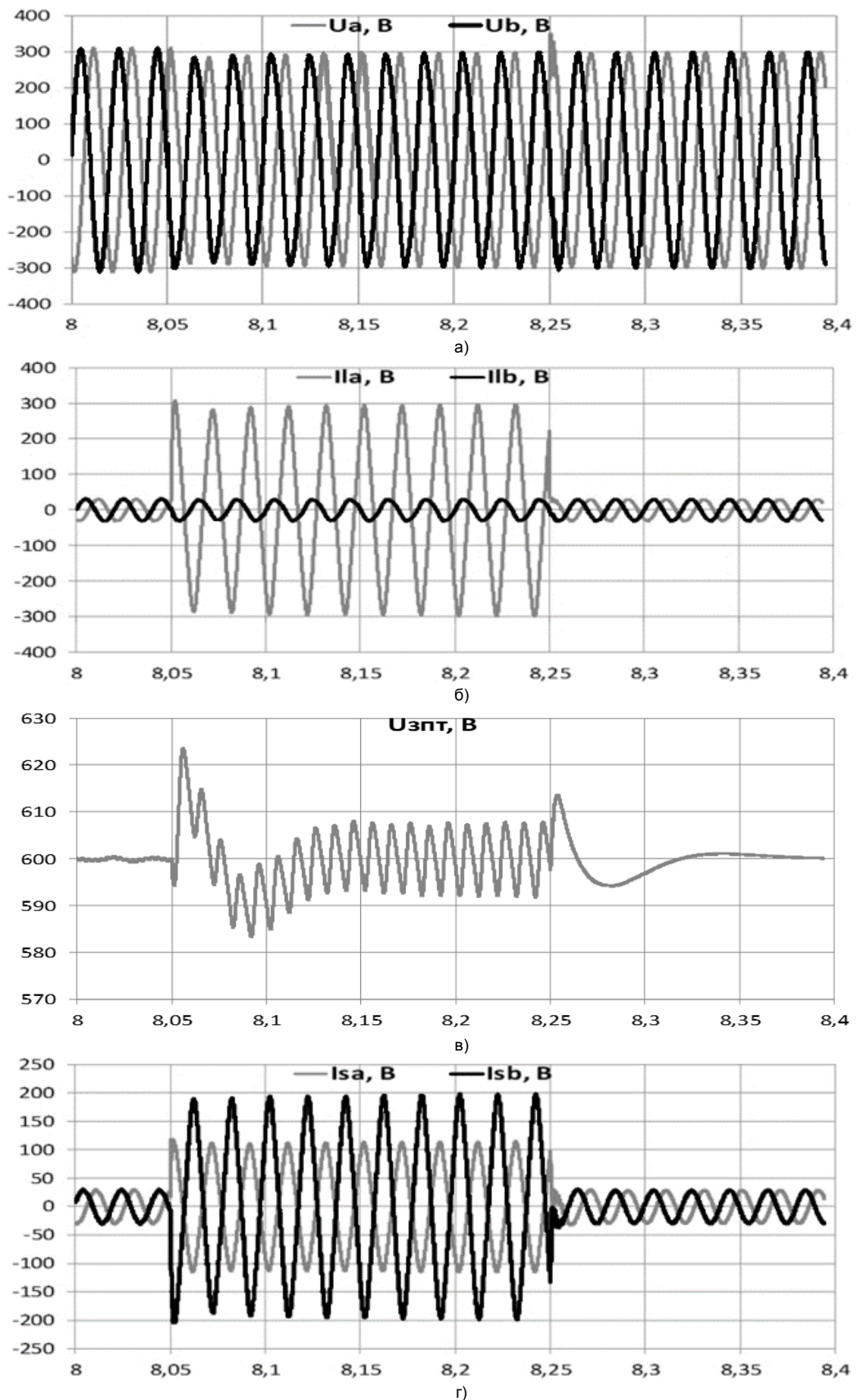


Рис. 3. Временные диаграммы включения несимметричной линейной нагрузки

На рис. 4,а представлены зависимости полных мощностей преобразователя частоты  $S_{пч}$  и нагрузки  $S_{нагр}$ , тока статора генератора и КПД АСЭ от частоты вращения генератора (в относительных единицах). На рис. 4,б – зависимости полных мощностей нагрузки при различных коэффициентах мощности:  $K_m = 1,0; 0,9; 0,8$ . Зависимости получены для предельных длительных режимов работы АСЭ при ограничении по номинальному току статора генератора и номинальной мощности преобразователей (активного выпрямителя и инвертора), ограниченных на уровне 20 % от номинальной мощности нагрузки. В качестве базового принят номинальный режим работы АСЭ, характеризуемый номинальными значениями мощности преобразователя и тока генератора при симметричной RL-нагрузке с коэффициентом мощности  $K_m = 0,9$ . Абсолютные значения параметров номинального режима работы АСЭ при указанных ограничениях следующие:  $N = 1855$  об/мин;  $S_{нагр} = 181$  кВА;  $S_{пч} = 35$  кВА;  $I_s = 205$  А;  $\text{КПД}_{асэ} = 94,3$  %;  $R_{нагр} = 0,7227$  Ом;  $L_{нагр} = 1,114$  мГн.

Суммарная дифференциальная емкость на выходе АСЭ  $C_f = C_{f1} + C_{f2} + C_{f0}$  принята постоянной. Ее значение установлено таким образом, что в режиме холостого хода (ХХ) АСЭ она полностью обеспечивает генератор реактивной мощностью, необходимой для его возбуждения. Эта емкость может быть рассчитана по формуле

$$C_f = I_{ном} / (2pf_{ном}U_{ном}), \quad (1)$$

где  $I_{ном}$  – номинальный ток цепи намагничивания АГФР.

В этом случае в режиме ХХ и при чисто активной нагрузке реактивная мощность, циркулирующая в преобразователях, близка к нулю, а их полные мощности в основном определяются активными составляющими, которые с точностью до малых значений собственных потерь в преобразователях близки друг к другу. В случае присутствия в нагрузке АСЭ реактивной составляющей индуктивного характера баланс реактивной мощности уже не может быть обеспечен только за счет емкости  $C_f$  и дополнительная реактивная мощность начинает циркулировать че-

рез преобразователи и емкость ЗПТ. В этом случае минимизация мощности преобразователя частоты обеспечивается выравниванием полных мощностей АВ и АИН посредством регулятора мощности ПЧ ( $RS_{пч}$ ) (рис. 2), формирующего задание по реактивному току АВ.

Оптимизация энергетических показателей системы ДВС–АСЭ с учетом потерь в ДВС выполняется за счет регулирования его частоты вращения в функции мощности нагрузки регулятором скорости дизеля ( $RN_{двс}$ ) (рис. 2). Определяемая регулятором зависимость заданной скорости ДВС от текущего значения мощности нагрузки формируется по характеристике максимальной топливной эффективности (минимальных потерь) ДВС с учетом предельных зависимостей АСЭ (рис. 4) и того факта, что собственное КПД АСЭ относительно высоко и слабо изменяется в зависимости от скорости. При этом важное значение имеет согласование параметров (скорости и мощности) номинального режима АСЭ с характеристикой ДВС. Значение скорости, при которой АСЭ способно передавать в нагрузку максимальную мощность в длительном режиме, зависит не только от номинальной частоты вращения АГФР, но и от ограничения, накладываемого на мощность ПЧ. Она выбирается на стадии проектирования АСЭ и согласуется с характеристикой ДВС.

Оценку эффективности регулирования скорости дизель-генераторной установки в зависимости от нагрузки АСЭ можно выполнить по многопараметровой характеристике ДВС (рис. 5). В частности, для дизеля из серии ЯМЗ-238 при средней мощности нагрузки 75 кВт относительный перерасход топлива при работе на постоянной скорости 1850 об/мин относительно работы на характеристике с максимальной топливной интенсивностью со скоростью 1000 об/мин составляет

$$\delta g = \frac{g_{enom75} - g_{eopt75}}{g_{eopt75}} = \frac{258 - 214}{214} = 0,206,$$

где  $g_{enom75}$ ,  $g_{eopt75}$  – удельный расход топлива при работе ДВС с мощностью 75 кВт на номинальной и оптимальной по топливной эффективности скоростях.

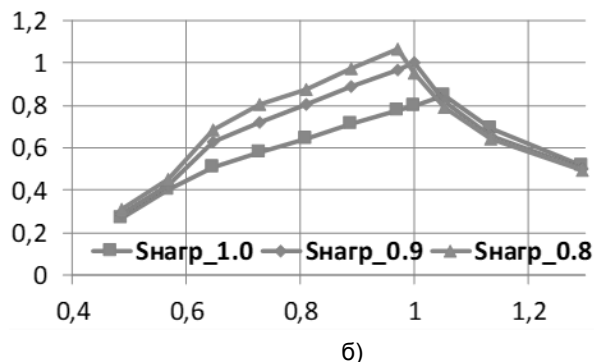
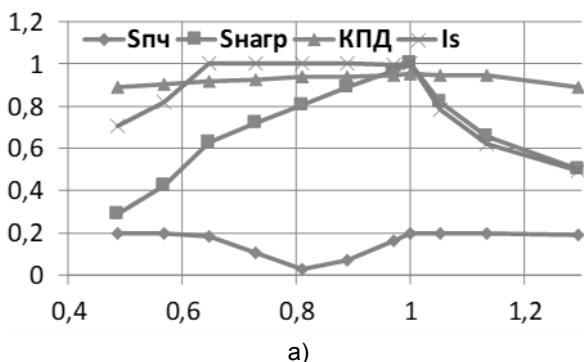


Рис. 4. Энергетические характеристики АСЭ при линейной симметричной активно-индуктивной нагрузке

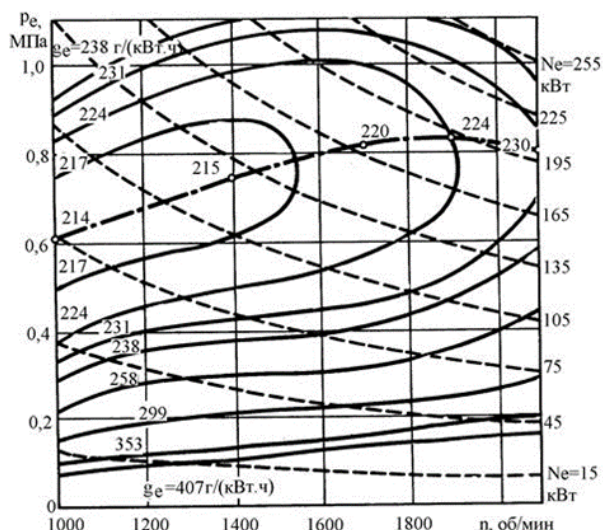


Рис. 5. Многопараметровая характеристика дизеля ЯМЗ-238:  $N_e$  – мощность дизеля, кВт;  $n$  – скорость дизеля, об/мин;  $g_e$  – удельный расход топлива, г/кВт·ч;  $p_e$  – среднее эффективное давление на поршень, МПа

Таким образом, если средняя мощность нагрузки не превышает 50 % от номинальной мощности ДВС, то экономия топлива за счет регулирования скорости в зависимости от нагрузки в соответствии с характеристикой максимальной топливной эффективности может составлять до 20 %, по сравнению с работой на постоянной скорости, соответствующей номинальному режиму электростанции. При длительной работе АСЭ в режимах малых нагрузок экономия топлива за счет регулирования скорости может быть существенно выше.

Защита АСЭ от токовых перегрузок осуществляется путем снижения выходного напряжения АИН в блоке токоограничения (БТО) (рис. 2). Защита от коротких замыканий – временной блокировкой силовых ключей преобразователя с автоматическим возвратом в рабочий режим при пропадании замыкания.

В ходе моделирования были определены рациональные значения всех пассивных фильтрующих элементов, входящих в состав АСЭ. Емкость ЗПТ выбирается по условию ограничения на желаемом уровне величины пульсаций в предельных динамических и несимметричных режимах работы АСЭ, индуктивность входного дросселя АВ – по заданной величине высокочастотных (на частоте ШИМ) пульсаций его входных токов. Нейтральная, она же минимальная дифференциальная выходная емкость АСЭ ( $C_0$ ) выбирается по желаемой величине высокочастотных пульсаций выходного напряжения, суммарная дифференциальная выходная емкость ( $C_f$ ) – исходя из реактивной мощности, необходимой для возбуждения генератора. Следует заметить, что при чисто активной нагрузке и близких к единице коэффициентах мощности нагрузки

АСЭ удовлетворительно работает при условии  $C_f = C_0$ . При выше-указанных параметрах АГФР и частоте ШИМ 5...10 кГц значение этой емкости может быть относительно небольшим: 20...50 мкФ. В этом случае реактивная мощность, необходимая для возбуждения АДФР, в основном обеспечивается емкостью ЗПТ. Однако при снижении коэффициента мощности нагрузки в АСЭ возбуждаются автоколебания, в дальнейшем приводящие к неработоспособности и являющиеся следствием отсутствия установившегося баланса реактивной мощности системы. Для устранения данного эффекта емкость  $C_f$  увеличивается до значения, определяемого (1).

**Выводы.** Анализ данных, полученных в результате проведенных исследований, позволяет сделать следующие выводы, подтверждающие достижение поставленной цели:

- разработанная АСЭ на основе АГФР с преобразователем частоты пониженной мощности обеспечивает возможность построения высокоэффективного и относительно недорогого источника 3-фазного переменного напряжения, способного работать в широком диапазоне нагрузок, в том числе с низким коэффициентом мощности и в условиях максимальной асимметрии по фазам, мощность которых во много раз превышает установленную мощность преобразователя частоты;

- при ограничении номинальной мощности преобразователя до 20 % от номинальной мощности нагрузки эффективный диапазон регулирования скорости ДВС, обеспечивающий повышение энергоэффективности АСЭ и, как следствие, значительную экономию топлива, составляет не менее 2. При необходимости он может быть расширен за счет увеличения мощности, т.е. стоимости преобразовательной части АСЭ.

#### Список литературы

1. Григораш О.В., Богатырев Н.И., Курзин Н.Н. Системы автономного электроснабжения / под ред. Н.И. Богатырева. – Краснодар, 2001. – 333 с.
2. Автономные генераторные установки на основе двигателей внутреннего сгорания переменной частоты вращения / О.С. Хватов, А.Б. Дарьенков, И.С. Самоявчев, И.С. Поляков. – Н. Новгород: Нижегород. гос. техн. ун-т им. Р.Е. Алексеева, 2016. – 172 с.
3. Управление станцией автономного электроснабжения в составе транспортного средства / А.Б. Виноградов, Д.Б. Изосимов, С.Н. Флоренцев, А.А. Коротков // Электричество. – 2009. – № 9. – С. 49–55.
4. Виноградов А.Б. Автономная станция электроснабжения на основе асинхронного генератора с КЗ ротором и преобразователя частоты пониженной мощности // Труды XI Междунар. (XXII Всерос.) конф. по автоматизированному электроприводу (АЭП-2020), Санкт-Петербург, 4–7 октября 2020 г. – СПб., 2020. – С. 80–86.

5. Гуляев И.В., Тутаев Г.М. Системы векторного управления электроприводом на основе асинхронизированного вентильного двигателя. – Саранск: Изд-во Мордов. ун-та, 2010. – 200 с.

6. Мещеряков В.Н., Муравьев А.А. Асинхронный генератор на базе машины двойного питания // Известия СПбГЭТУ «ЛЭТИ». – 2016. – № 4. – С. 45–49.

7. Мещеряков В.Н., Безденежных Д.В. Наблюдатель потокоцепления для машины двойного питания, управляемой по статорной и роторной цепям // Вестник Воронежского государственного технического университета. – 2010. – № 11. – С. 170–173.

8. Datta R., Ranganathan V.T. Direct Power Control of Grid-connected Wound Rotor Induction Machine Without Rotor Position Sensors // IEEE Transactions on Power Electronics. – 2001. – Vol. 16, issue 3. – P. 390–399.

9. Drid S., Tadjine M., Nait-Said M-S. Nonlinear Feedback Control and Torque Optimization of a Doubly Fed Induction Motor // Journal of ELECTRICAL ENGINEERING. – 2005. – No. 3–4, vol. 56. – P. 57–63.

10. Peresada S., Tilli A., Tonielli A. Power Control of a Doubly Fed Induction Machine via Output Feedback // Control Engineering Practice. – 2004. – No. 12. – P. 41–57.

11. Poddar G., Ranganathan V.T. Direct Torque and Frequency Control of Double-Inverter-Fed Slip-Ring Induction Motor Drive // IEEE Transactions on Power Electronics. – 2004. – No. 6, vol. 51. – P. 1329–1337.

12. Виноградов А.Б. Векторное управление электроприводами переменного тока. – Иваново, 2008. – 318 с.

13. Ковач К.П., Рац И. Переходные процессы в машинах переменного тока. – М.: Госэнергоиздат, 1963. – 744 с.

14. Шрейнер Р.Т. Математическое моделирование электроприводов переменного тока с полупроводниковыми преобразователями частоты. – Екатеринбург: УРО РАН, 2000. – 654 с.

## References

1. Grigorash, O.V., Bogatyrev, N.I., Kurzin, N.N. *Sistemy avtonomnogo elektrosnabzheniya* [Autonomous power supply systems]. Krasnodar, 2001. 333 p.

2. Khvatov, O.S., Dar'nikov, A.B., Samoyavchev, I.S., Polyakov, I.S. *Avtonomnye generatorye ustanovki na osnove dvigateley vnutrennego sgoraniya peremennoy chastoty vrashcheniya* [Autonomous generator sets based on variable speed internal combustion engines]. Nizhniy Novgorod: Nizhegorodskiy gosudarstvennyy tekhnicheskiiy universitet im. R.E. Alekseeva, 2016. 172 p.

3. Vinogradov, A.B., Izosimov, D.B., Florantsev, S.N., Korotkov, A.A. *Upravlenie stantsiey avtonomnogo elektrosnabzheniya v sostave transportnogo sredstva* [Control of an autonomous power supply station as part of a vehicle].

*Elektrichestvo*, 2009, no. 9, pp. 49–55.

4. Vinogradov, A.B. *Avtonomnaya stantsiya elektrosnabzheniya na osnove asinkhronnogo generatsiya s KZ rotorom i preobrazovatelya chastoty ponizhennoy moshchnosti* [Autonomous power supply station based on an asynchronous generator with a short-circuit rotor and a low power frequency converter]. *Trudy XI Mezhdunarodnoy (XXII Vserossiyskoy) konferentsii po avtomatizirovannomu elektroprivodu (AEP-2020)*, Sankt-Peterburg, 4–7 oktyabrya 2020 g. [XI International Conference on Electrical Power Drive Systems (ICEPDS), Sankt-Peterburg, 2020, 04–07 Oct.]. Saint-Petersburg, 2020, pp. 80–86.

5. Gulyaev, I.V., Tutaev, G.M. *Sistemy vektornogo upravleniya elektroprivodom na osnove asinkhronizirovannogo ventily'nogo dvigatelya* [Electric drive vector control systems based on asynchronized brushless motor]. Saransk: Izdatel'stvo Mordovskogo universiteta, 2010. 200 p.

6. Meshcheryakov, V.N., Murav'ev, A.A. *Asinkhronnyy generator na baze mashiny dvoynogo pitaniya* [Asynchronous generator based on dual-feed machine]. *Izvestiya SPbGETU «LETI»*, 2016, no. 4, pp. 45–49.

7. Meshcheryakov, V.N., Bezdenzhnykh, D.V. *Nablyudatel' potokostsepleniya dlya mashiny dvoynogo pitaniya, upravlyаемой по статорной и роторной тсепям* [Flux linkage observer for a dual-feed machine controlled by stator and rotor circuits]. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*, 2010, no. 11, pp. 170–173.

8. Datta, R., Ranganathan, V.T. Direct Power Control of Grid-connected Wound Rotor Induction Machine Without Rotor Position Sensors. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2001, vol. 16, issue 3, pp. 390–399.

9. Drid, S., Tadjine, M., Nait-Said, M-S. Nonlinear Feedback Control and Torque Optimization of a Doubly Fed Induction Motor. *Journal of ELECTRICAL ENGINEERING*, 2005, no. 3–4, vol. 56, pp. 57–63.

10. Peresada, S., Tilli, A., Tonielli, A. Power Control of a Doubly Fed Induction Machine via Output Feedback. *Control Engineering Practice*, 2004, no. 12, pp. 41–57.

11. Poddar, G., Ranganathan, V.T. Direct Torque and Frequency Control of Double-Inverter-Fed Slip-Ring Induction Motor Drive. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2004, no. 6, vol. 51, pp. 1329–1337.

12. Vinogradov, A.B. *Vektornoe upravlenie elektroprivodami peremennogo toka* [Vector Control of AC Electrical Drives]. Ivanovo, 2008. 320 p.

13. Kovach, K.P., Rats, I. *Perekhodnye protsessy v mashinakh peremennogo toka* [Transient processes in AC machines]. Moscow: Gosenergoizdat, 1963. 744 p.

14. Shreyner, R.T. *Matematicheskoe modelirovaniye elektroprivodov peremennogo toka s poluprovodnikovymi preobrazovatelyami chastoty* [Mathematical modeling of AC electric drives with semiconductor frequency converters]. Ekaterinburg: URO RAN, 2000. 654 p.



УДК 621.3+62-5

**Игорь Сергеевич Полющенко**

ООО НПО «Рубикон – Инновация», кандидат технических наук, инженер отдела № 36, Россия, Смоленск, e-mail: polyushenkov.igor@yandex.ru

## Разработка контроллера цифрового датчика положения и его программного обеспечения

### Авторское резюме

**Состояние вопроса.** Для работы систем управления электроприводов, замкнутых по целевой регулируемой координате – скорости движения или положению исполнительного механизма, необходима информационно-измерительная подсистема, образованная аппаратными и программными средствами, которые осуществляют детектирование, захват и обработку сигналов от датчиков. Функционально завершенными и самостоятельными элементами такой подсистемы являются контроллеры каждого из датчиков, в том числе цифровых датчиков положения, также используемых для измерения скорости движения. При разработке такого контроллера необходимо учитывать требования к системе управления, характеристики датчиков и их сигналов, форму представления результата измерения положения, способ сопряжения датчика с системой управления, особенности аппаратных и программных вычислительных ресурсов, в том числе время выполнения. В связи с этим разработка контроллера цифрового датчика положения и его программного обеспечения является актуальной задачей.

**Методы и материалы.** При разработке контроллера применены методы вычислительной математики и системного анализа, методы модельно-ориентированного программирования, методы разработки и отладки программного обеспечения, а также методы экспериментального исследования.

**Результаты.** Предложено алгоритмическое описание контроллера цифрового датчика положения для преобразования углового положения вала электропривода, при вращении циклически изменяющегося в пределах одного оборота, в угол его поворота, имеющий широкие пределы изменения. Также, алгоритмически описано измерение скорости вращения вала электропривода путем расчета приращения его углового положения в течение интервала наблюдения. Разработано программное обеспечение контроллера, которое может послужить типовым элементом для микропроцессорных систем управления электроприводов.

**Выводы.** При разработке контроллера цифрового датчика положения, как и других элементов информационно-измерительной подсистемы замкнутых электроприводов, требуется учет характеристик различных технических средств и требований к системе управления. Успешной разработкой способствует применение современных микроконтроллеров, имеющих встроенные специализированные модули для детектирования, захвата и обработки сигналов, а также применение детализированных вычислительных алгоритмов и математических методов, наименее затратных по времени выполнения.

**Ключевые слова:** цифровой датчик положения, электропривод, система управления, модельно-ориентированное программирование, вычислительный алгоритм

**Igor Sergeevich Polyushchenkov**

LLC R&amp;D Company "Rubicon – Innovation", Candidate of Engineering Sciences, Engineer, Department № 36, Russia, Smolensk, e-mail: polyushenkov.igor@yandex.ru

## Development of controller for digital position sensor and its software

### Abstract

**Background.** For the operation of electric drives control systems, closed on the target coordinate of control – speed or position of actuator, an informational and measuring subsystem, formed by hardware and software to detect, capture and process signals from sensors, is required. The functionally completed and independent elements of such a subsystem are the controllers of each of the sensors, including digital position sensors, also used to measure the speed of motion. When developing such a controller, it is necessary to take into account the requirements for control system, performances of sensors and their signals, the form of position measurement result, the technique of the sensor interfacing with the control system, the features of hardware and software computing resources, including execution time. Thus, the development of a digital position sensor controller and its software is an actual problem.

**Materials and methods.** When developing the controller, methods of computational mathematics and system analysis, methods of model-based programming, methods of software developing and debugging, as well as methods of experimental research were applied.

**Results.** An algorithmic description of the digital position sensor controller is proposed for converting the angular position of the electric drive shaft, which changes cyclically within one revolution during rotation, into its rotation angle, which has wide limits of change. Also, the measuring of rotation speed of the electric drive shaft is algorithmically described by cal-



culating the increment of its angular position during the observation interval. The software for this controller has been developed, which can serve as a typical element for microprocessor control systems for electric drives.

**Conclusions.** When developing a controller for a digital position sensor, as well as other elements of the informational and measuring subsystem of closed-loop electric drives, it is necessary to take into account the performances of various technical means and requirements for the control system. Successful development is contributed by the use of modern microcontrollers with built-in specialized modules for detecting, capturing and processing signals, as well as the use of detailed computational algorithms and mathematical methods that are the least expensive in terms of execution time.

**Key words:** digital position sensor, electric drive, control system, model-based programming technique, computational algorithm

DOI: 10.17588/2072-2672.2023.3.052-061

**Введение.** Замкнутые системы автоматического управления электроприводов обладают более высоким уровнем технического совершенства по сравнению с системами, разомкнутыми по целевой координате. Если использовать терминологию Теории электропривода [1, 2], то в зависимости от назначения и области применения они могут осуществлять ограничение координат, стабилизацию координат при воздействии возмущающих факторов, а также обработку динамически изменяющихся во времени задающих воздействий.

Функциональная схема замкнутой системы управления электропривода показана на рис. 1. В зависимости от положения переключателя П она может быть либо следящей, воспроизводя заданную координату положения  $\varphi_3(t)$ , либо осуществлять стабилизацию скорости вращения  $\omega$  на уровне ее заданной величины  $\omega_3$ . Работа такой системы управления в режиме слежения и в режиме стабилизации скорости вращения описывается согласно [1, 2]. В схеме электропривода обозначены следующие ее элементы: электрический двигатель ЭД, датчик положения ДП, регулятор положения РП, регулятор скорости РС, контур регулирования тока КРТ, имеющий сигнал задания  $i_3$ , исполнительный механизм ИМ, по координатам движения которого замкнута система управления.

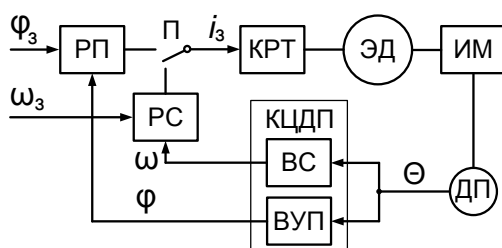


Рис. 1. Замкнутая система автоматического управления электропривода

Следует пояснить, что под угловым положением вала электропривода понимается угол  $\Theta$  в пределах одного его оборота от нуля, выбранного в качестве условного начала отсчета, до 360 градусов, или до  $2\pi$  радиан. Угловое положение может измеряться в импульсах от датчика положения ДП или в дискретах цифрового кода. В отличие от него, угол поворота  $\varphi$ ,

будучи выражен в тех же единицах измерения, при вращении вала в зависимости от специфики системы управления может изменяться в более широком диапазоне, который в пределе ограничен лишь диапазоном используемого числового формата, например int16 или int32.

Для замыкания обратных связей необходима информационно-измерительная подсистема, состоящая из датчиков, а также аппаратных и программных средств, которые осуществляют детектирование, захват и обработку их сигналов. В связи со сказанным на рис. 1 как элемент такой подсистемы показан контроллер цифрового датчика положения КЦДП, состоящий из вычислителя скорости ВС и вычислителя угла поворота ВУП. Под таким контроллером понимается функционально завершенная и самостоятельная совокупность аппаратных и программных средств, которая может послужить типовым элементом систем управления без значительной доработки в зависимости от специфики электропривода.

При разработке указанного выше контроллера необходимо учитывать физические и конструктивные характеристики датчиков, от которых зависят диапазон, точность и дискретность измерения координат, форма представления результата этого измерения, своевременность обновления информации, способ сопряжения с системой управления, так как от них, в свою очередь, зависят характеристики и функциональность системы управления электропривода в целом.

Целью данного исследования является разработка контроллера цифрового датчика положения для использования его в составе микропроцессорной системы управления электропривода. Согласно функциональной схеме, показанной на рис. 1, контроллер датчика положения должен осуществлять вычисление угла поворота электропривода и скорости его вращения.

Для достижения поставленной цели необходимо было решить следующие задачи:

- составить алгоритмическое описание контроллера цифрового датчика положения с учетом функциональности аппаратных модулей, обычно имеющихся в составе микроконтроллеров, которые используются в системах управле-

ния электроприводов, а также с учетом дискретности измерения углового положения и итерационности выполнения вычислений;

- в соответствии с алгоритмическим описанием контроллера составить его программное обеспечение в виде конфигурируемой подпрограммы с применением вычислений, наименее затратных по времени;

- экспериментально проверить предлагаемые технические решения в составе системы управления электропривода.

**Методы исследования.** В системах управления электроприводов в качестве датчиков положения широко распространены инкрементальные энкодеры [3]. Функциональная схема (рис. 2) и временные диаграммы (рис. 3) иллюстрируют устройство инкрементального энкодера, принцип его работы и сопряжение с микроконтроллером, например, из семейства STM32 [4]. Для генерирования счетных импульсов при его вращении на кодовом диске инкрементального энкодера имеются две последовательности дискретных элементов. Эти элементы могут иметь различную физическую основу. Например, на рис. 2 показан оптический кодový диск, для генерирования и детектирования импульсов от которого используются оптические источники BL1 и BL2, а также приемники UC1 и UC2.

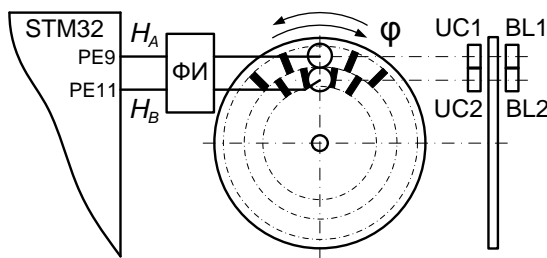


Рис. 2. Устройство инкрементального энкодера и его сопряжение с микроконтроллером

Формирователь импульсов ФИ предназначен для преобразования импульсов, генерируемых при вращении кодového диска, к виду квадратурных импульсов последовательностей  $H_A$  и  $H_B$  (рис. 3), которые имеют высокую крутизну фронтов и нормированную величину логических уровней. Согласно этим временным диаграммам, последовательность импульсов  $H_A$  либо опережает последовательность импульсов  $H_B$ , либо отстает от нее на четверть периода их следования в зависимости от направления вращения вала.

При измерении углового положения  $\Theta$  микроконтроллер осуществляет подсчет фронтов импульсов  $H_A$  и  $H_B$  с учетом взаимной ориентации этих последовательностей по порядку следования в зависимости от направления вращения. В связи с этим, угловое положение вала  $\Theta$ , показанное на рис. 3, имеет ступенчатую форму, а каждому ее уровню соответствует

приращение или уменьшение счета на единицу по отношению к соседним уровням.

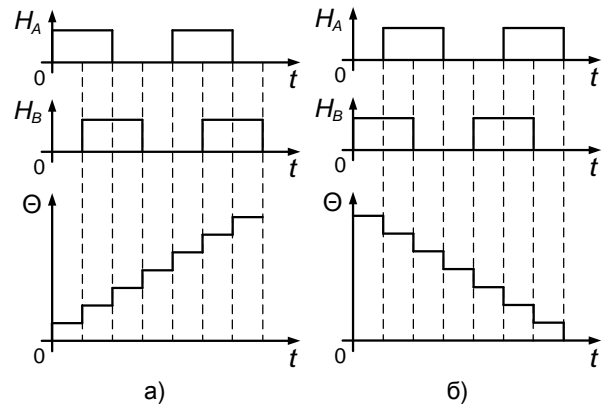


Рис. 3. Временные диаграммы инкрементального энкодера при прямом (а) и реверсном (б) направлениях вращения

Для инкрементального энкодера началом отсчета является положение вала, при котором включено электрическое питание системы управления. В качестве условного начала отсчета у инкрементальных энкодеров имеется индексная метка [3], которая может использоваться для обозначения границы очередного оборота. Если на одном обороте энкодера имеется  $\Theta_{\max}$  фронтов импульсов  $H_A$  и  $H_B$ , то его дискретность  $Q$  определяется следующим образом:

$$Q = \frac{2\pi}{\Theta_{\max}}. \quad (1)$$

Ввод сигналов непосредственно в микроконтроллер электропривода по двум сигнальным линиям позволяет своевременно получать информацию об угловом положении вала исполнительного механизма без временных задержек по отношению к его вращению и протеканию вычислительного процесса в системе управления, что нехарактерно для цифровых последовательных интерфейсов I2C (Inter-Integrated Circuit) и SPI (Serial Peripheral Interface) [5]. Эти интерфейсы часто используются для сопряжения контроллеров различных датчиков, в том числе датчиков положения с системами управления электроприводов.

В контроллерах цифровых датчиков положения возможны различные соотношения программных и аппаратных средств. Если программные средства обладают значительной гибкостью и универсальностью для осуществления разнообразных вычислительных алгоритмов при обработке сигналов и в целом информации, то аппаратные средства благодаря своей специализации по детектированию и захвату сигналов могут способствовать значительному снижению вычислительных ресурсов микроконтроллера, используемых системой управления электропривода. Сравним некоторые из них. Так, использование системных прерываний при перепаде уровней логических сиг-

налов позволяет детектировать счетные импульсы  $H_A$  и  $H_B$  энкодера, но их подсчет в зависимости от направления вращения, как и определение самого направления вращения, в этом случае должен осуществляться программно, что вызывает значительную вычислительную нагрузку микроконтроллера. Эта нагрузка, завися от параметра  $\Theta_{\max}$  энкодера, возрастает при росте скорости вращения. Использование же специализированных модулей, встроенных в микроконтроллеры, для их сопряжения с инкрементальными энкодерами позволяет аппаратно осуществить как детектирование квадратурных импульсов, так и их счет с учетом направления вращения. Такой режим их работы имеет название Quadrature Encoder Pulse (QEP)

При включении контроллера цифрового датчика положения в состав системы управления электропривода его вычисления должны иметь некоторый приоритет по отношению к другим вычислениям, осуществляемым в этой системе. Кроме того, интервалы повторения его вычислений должны иметь стабильную величину. Эти требования выполняются при формировании интервалов по прерыванию при переполнении одного из таймеров, встроенных в микроконтроллер. В соответствии с этим, на рис. 4 показана модельная схема обработчика прерывания при переполнении таймера, составленная с использованием модельных блоков из библиотеки Waijung Blockset [6] в составе Matlab, которая предназначена для модельно-ориентированной разработки программного обеспечения для микроконтроллеров семейства STM32.

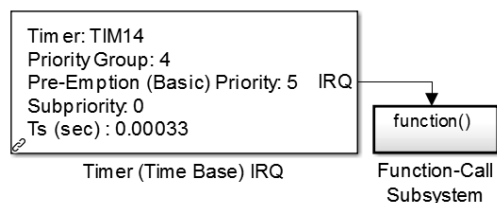


Рис. 4. Модельная схема обработчика прерывания при переполнении таймера

Согласно этой схеме, при возникновении указанного прерывания вызывается к выполнению модельная подсистема вида Function-Call Subsystem, внутри которой могут быть расположены схемы из модельных блоков или пользовательские модельные блоки, разработанные на основе подпрограмм на языке C, как это сделано в [7].

Рассмотрим преобразование углового положения вала электропривода в угол его поворота. В библиотеке Waijung Blockset из состава Matlab имеется модельный блок обработчика инкрементального энкодера вида Encoder Read. Модельная схема, содержащая этот блок, показана на рис. 5. Такая модельная схема должна быть помещена в подсистему вида Function-Call Subsystem обработчика прерыва-

ния при переполнении таймера (рис. 4). Модельный блок Encoder Read использует один из многофункциональных таймеров, встроенных в микроконтроллер STM32, в режиме QEP для счета импульсов квадратурных последовательностей  $H_A$  и  $H_B$  инкрементального энкодера (рис. 3). При этом модельный блок Encoder Read вычисляет угловое положение вала электропривода, на котором установлен энкодер, в пределах от нуля до значения счета  $\Theta_{\max}$ , соответствующего одному его обороту, которое задается в пользовательском меню данного блока.

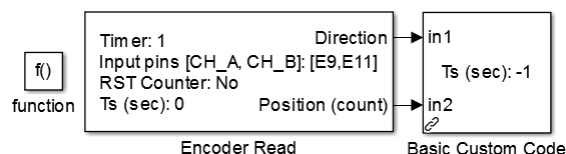


Рис. 5. Модельная схема обработчика инкрементального энкодера

Ранее при разработке микропроцессорной системы управления электропривода – сервоконтроллера на базе двигателей различных типов [7] – доступ к параметру  $\Theta_{\max}$  был обеспечен непосредственно в программном обеспечении этой системы для ее конфигурирования в зависимости от типа инкрементального энкодера. Такой доступ осуществляется при восстановлении параметров системы из памяти постоянного запоминающего устройства и при их задании по цифровым линиям связи системой управления верхнего уровня.

Описанная особенность модельного блока Encoder Read и счетчика квадратурных импульсов в режиме QEP ограничивает их применение для измерения угла поворота вала электропривода  $\varphi$  в более широких пределах, чем один его оборот  $\Theta_{\max}$ .

В связи со сказанным выше при разработке системы управления электропривода [7] был осуществлен способ преобразования углового положения вала  $\Theta$  в угол его поворота  $\varphi$ , который иллюстрируется временными диаграммами, показанными на рис. 6. Для простоты скорость вращения  $\omega$  имеет три уровня, которые устанавливаются мгновенно, что, однако, позволяет продемонстрировать характерные закономерности. Также для простоты ступенчатость зависимостей  $\Theta(t)$  и  $\varphi(t)$ , обусловленная дискретным счетом импульсов, на рис. 6 не показана. Два уровня скорости равны по величине, но противоположны по направлению, а третий уровень скорости равен нулю.

Так как модельный блок Encoder Read, используя счетчик в режиме QEP, вычисляет угловое положение  $\Theta$  в пределах одного оборота вала, то при постоянной скорости его вращения  $\omega > 0$  зависимость  $\Theta(t)$ , показанная на рис. 6, циклически линейно возрастает от нуля

до величины  $\Theta_{\max}$ , соответствующей полному обороту. При  $\omega < 0$  зависимость  $\Theta(t)$  циклически линейно убывает от  $\Theta_{\max}$  до нуля. При  $\omega = 0$  угловое положение вала остается постоянной величиной. Продолжительность интервала  $T_\omega$  равна времени совершения валом одного оборота. Для расчета приращения  $\Delta\Theta$  углового положения  $\Theta$ , измеренного за некоторый интервал времени выборки  $T_s \rightarrow 0$ , используется следующее выражение:

$$\Delta\Theta = \Theta(t + T_s) - \Theta(t). \quad (2)$$

Величина  $\Delta\Theta$  пропорциональна скорости вращения вала  $\omega$  за исключением границ каждого из оборотов, то есть при переходах  $\Theta$  от нуля к  $\Theta_{\max}$  и от  $\Theta_{\max}$  к нулю. На этих границах величина  $\Delta\Theta$  принимает значения, которые в пределах при  $T_s \rightarrow 0$  стремятся к  $\pm\Theta_{\max}$ , а знак  $\Delta\Theta$  при этом противоположен знаку скорости  $\omega$ . Очевидно, что те же закономерности имеют место и при произвольно изменяющейся скорости вращения вала  $\omega$  в пределах каждого из интервалов  $T_\omega$ .

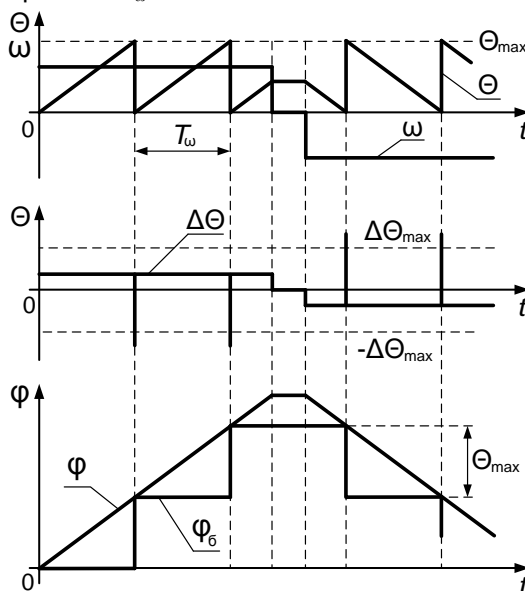


Рис. 6. Преобразование углового положения вала электропривода в угол его поворота

Таким образом, чтобы детектировать совершение валом электропривода очередного оборота, требуется при каждой итерации выборки его углового положения  $\Theta$ , которые происходят через равные интервалы времени  $T_s$ , по (2) вычислить приращение  $\Delta\Theta$  и сравнить его с некоторой пороговой величиной  $\pm\Delta\Theta_{\max}$ , причем такой, что  $|\Delta\Theta_{\max}| < \Theta_{\max}$ . Далее, исходя из сравнения  $\Delta\Theta$  и  $\pm\Delta\Theta_{\max}$ , детектируется завершение очередного оборота вала, направление этого оборота и начало нового его оборота, что иллюстрируется на рис. 6, согласно которому угол поворота  $\varphi$  вала вычисляется следующим образом:

$$\varphi = \varphi_6 + \Theta = m\Theta_{\max} + \Theta, \quad (3)$$

где  $\varphi_6$  – базовый угол поворота;  $m$  – число полных оборотов вала от начала вращения по отношению к началу отсчета (причем  $m$  может принимать целые числовые значения).

Очевидно, что величина  $\Delta\Theta_{\max}$  должна быть выбрана в зависимости от предполагаемой или расчетной максимальной скорости вращения таким образом, чтобы при ней величина  $\Delta\Theta$  выходила за пределы  $\pm\Delta\Theta_{\max}$  только на границах оборотов. Опыт разработки электропривода [7] с учетом оценки дискретности энкодеров привел к выводу, что целесообразным является соотношение  $|\Delta\Theta_{\max}| \approx 0,6\Theta_{\max}$ .

Рассмотренный выше способ преобразования углового положения вала в угол его поворота не требует использования индексной метки энкодера, что упрощает осуществление вычислений и их согласование с захватом и выборкой сигналов в зависимости от времени, а также способствует снижению времени их выполнения.

Далее рассмотрим измерение скорости вращения электропривода с использованием инкрементального энкодера. Для этого существует два принципиально различающихся способа. Согласно одному из них, требуется измерять продолжительность интервалов между импульсами энкодера, которая обратно пропорциональна скорости вращения. В современных микроконтроллерах, в том числе STM32, имеются встроенные модули, которые позволяют осуществить такой захват импульсов с аппаратным фиксированием временных интервалов между ними, однако они не ориентированы на обработку квадратурных импульсных сигналов инкрементальных энкодеров [4, 6]. Программно-аппаратное осуществление этого способа измерения скорости с совместным использованием различных встроенных модулей микроконтроллера достаточно сложное и связано с его значительной вычислительной нагрузкой, возрастающей при увеличении скорости вращения вала и параметра  $\Theta_{\max}$  энкодера.

Согласно другому способу, для измерения скорости требуется вычислять приращение числа счетных импульсов энкодера или цифрового кода углового положения за некоторый интервал времени наблюдения. Этот способ может быть осуществлен при использовании счетчика QEP и таймера, формирующего интервалы времени по прерыванию при переполнении, то есть тех же аппаратных модулей, что и при вычислении угла поворота вала в зависимости от его углового положения. При этом возникает задача выбора продолжительности интервала наблюдения. Очевидно, что при некоторой дискретности энкодера  $Q$  и некоторой скорости вращения вала  $\omega$  за интервал наблюдения меньшей продолжительности микроконтроллер получает меньшее количество импульсов, чем за интервал большей продолжительности. Следовательно, с уве-

личением продолжительности этого интервала увеличивается и разрешающая способность измерения скорости. Однако при этом снижается частота обновления информации о скорости, что эквивалентно действию фильтра низких частот, включенного в замкнутый контур электропривода, что может послужить возмущающим фактором для системы управления, вызывая рост колебательных процессов при движении. Степень влияния такой инерционности может быть оценена в зависимости от соотношения продолжительности интервала наблюдения и динамики настройки регулятора скорости РС замкнутого контура. Это влияние может оказаться невелико.

Описанное обстоятельство является основанием для изменения продолжительности интервала наблюдения в зависимости от величины скорости вращения.

Рассмотрим подробнее вычисление скорости вращения электропривода в соответствии с функциональной схемой, показанной на рис. 7. Эта схема иллюстрирует вычисление скорости вращения электропривода  $\omega_{0,k}$  в зависимости от приращения углового положения  $S_{0,k}$ , вычисленного счетчиком импульсов СИ  $H_A$  и  $H_B$  энкодера, за интервал наблюдения  $T_{0,k}$  переменной продолжительности. Далее путем усреднения  $N$  значений скорости, вычисленных на  $N$  предыдущих интервалах наблюдения, по методу скользящего среднего вычисляется скорость вращения  $\omega_k$ . Элементы схемы, среди которых счетчик импульсов, элемент для расчета скорости (ЭРС), вычислитель интервалов наблюдения (ВИН), элемент задания (ЭЗ) и вычислитель скользящего среднего отсчетов скорости, обозначенный  $\Sigma$ , реализованы программно и являются совокупностями команд, операторов и синтаксических конструкций языка С.

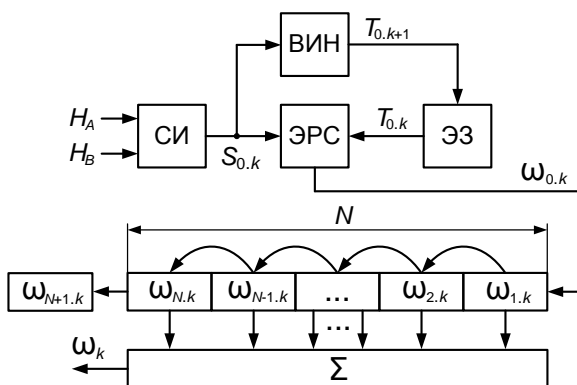


Рис. 7. Функциональная схема вычисления скорости вращения электропривода

Переменные, обозначенные на рис. 7, имеют следующие индексы:  $k$  – порядковый номер измерения скорости;  $n$  – порядковый номер измерения скорости в выборке из  $N$  значений, используемых при вычислении скользящего среднего, причем  $1 \leq n \leq N$ . Согласно рис. 7,

переменные, используемые при вычислении значения скорости вращения  $\omega_{0,k}$ , которое не входит в указанный массив из  $N$  элементов, имеют индекс  $n = 0$ .

Интервал наблюдения  $T_{0,k}$  для  $k$ -го измерения скорости является кратным по отношению к базовому интервалу  $T_6$ :

$$T_{0,k} = T_6 h_{0,k}, \quad (4)$$

где  $h_{0,k}$  – число интервалов  $T_6$  на интервале наблюдения  $h_{\min} \leq h \leq h_{\max}$  и  $h_{\min} \geq 1$ .

Базовый интервал  $T_6$  должен формироваться со стабильной продолжительностью по приоритетному прерыванию при переполнении таймера. Его продолжительность выбирается в зависимости от временных характеристик системы управления, например, от счета системного времени или итераций выполнения вычислений регулятором скорости.

Продолжительность интервала наблюдения для очередного  $(k+1)$ -го измерения скорости вычисляется элементом ВИН, показанным на рис. 7, в зависимости от приращения углового положения  $S_{0,k}$ , полученного при предыдущем  $k$ -м измерении скорости на интервале  $T_{0,k}$ :

$$h_{0,k+1} = h_{0,k} + 1 \text{ при } S_{0,k} < S_{\min}; \quad (5)$$

$$h_{0,k+1} = h_{0,k} - 1 \text{ при } S_{0,k} > S_{\max}; \quad (6)$$

$$T_{0,k+1} = T_6 h_{0,k+1}. \quad (7)$$

Для выполнения  $(k+1)$ -й итерации измерения скорости элемент задания ЭЗ устанавливает у ЭРС очередное значение  $T_{0,k+1}$ , вычисленное в результате выполнения  $k$ -й итерации измерения. Временные диаграммы на рис. 8 иллюстрируют вычисление продолжительности интервала наблюдения по формулам (5)–(7).

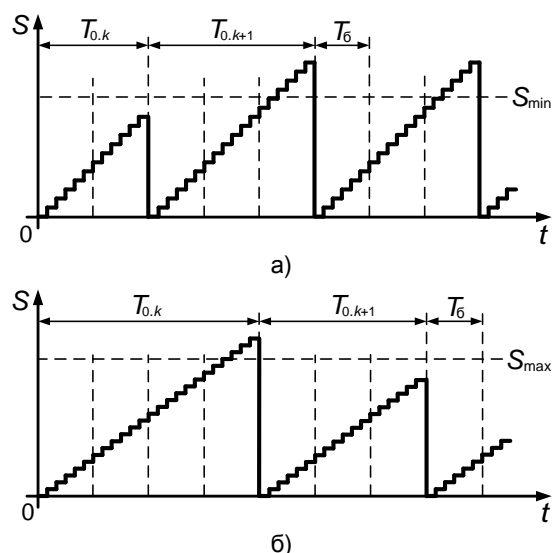


Рис. 8. Вычисление продолжительности интервала наблюдения: а – по (5) и (7); б – по (6) и (7)

Скорость вращения вала при  $k$ -м измерении на интервале наблюдения  $T_{0,k}$  в размерности [рад/с] рассчитывается элементом ЭРС как отношение приращения углового положения

$S_{0,k}$  вала к продолжительности интервала наблюдения:

$$\omega_{0,k} = \frac{2\pi S_{0,k}}{\Theta_{\max} T_{0,k}}. \quad (8)$$

Согласно (8), граничным значениям  $S_{\min}$  и  $S_{\max}$  из (5) и (6) соответствуют следующие значения скоростей:

$$\omega_{\min} = \frac{2\pi S_{\min}}{\Theta_{\max} T_{0,k}}; \quad (9)$$

$$\omega_{\max} = \frac{2\pi S_{\max}}{\Theta_{\max} T_{0,k}}. \quad (10)$$

После расчета по (8) очередного значения скорости  $\omega_{0,k}$  согласно алгоритму скользящего среднего и схеме на рис. 7 оно помещается в массив из  $N$  элементов путем их сдвига в сторону увеличения индекса  $n$ :

$$\omega_{n+1,k} = \omega_{n,k}. \quad (11)$$

Таким образом, очередное значение скорости  $\omega_{0,k}$ , вычисленное на интервале наблюдения  $T_{0,k}$ , становится элементом  $\omega_{1,k}$  массива, а элемент  $\omega_{N+1,k}$  удаляется из него, как показано на рис. 7. Несмотря на то, что элементы массива, начиная с  $n = 2$ , получены при предшествующих измерениях, они имеют одинаковый индекс  $k$ , так как они все используются для расчета средней скорости вращения  $\omega_k$  при  $k$ -м измерении.

Расчет средней скорости по ее значениям, полученным в результате  $N$  последовательных измерений, осуществляется элементом  $\Sigma$ , показанным на рис. 7, согласно следующему выражению:

$$\omega_k = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N \omega_{n,k}. \quad (12)$$

При очередном  $k$ -м измерении скорости среди элементов массива (рис. 7), по сравнению с предыдущим измерением, заменяются только два элемента, имеющие индексы  $n = 1$  и  $n = N+1$ . Поэтому для вычисления скользящего среднего для  $N$  значений скорости целесообразно использовать более простое выражение:

$$\omega_k = \omega_{k-1} - \omega_{N+1,k} + \omega_{1,k}, \quad (13)$$

где  $\omega_{k-1}$  – среднее значение скорости при  $(k-1)$ -м ее измерении.

Расчет по (13), по сравнению с (12), позволяет несколько снизить вычислительные затраты микроконтроллера. Важно отметить, что в этом случае  $\omega_{0,k}$  при расчете по (8) необходимо разделить на  $N$ . При этом величина  $N$  может быть учтена в множителе  $T_{0,k}$ , как в [8].

Дискретность  $\delta_{n,k}$  и разрешающая способность  $\mu_{n,k}$  измерения скорости для  $n$ -го ее значения из массива  $N$  элементов составляет:

$$\delta_{n,k} = \frac{1}{\mu_{n,k}} = \frac{2\pi}{\Theta_{\max} T_{n,k}} = \frac{Q}{T_{\delta} h_{n,k}}, \quad (14)$$

где  $T_{n,k}$  – интервал наблюдения при измерении значения скорости  $\omega_{n,k}$ ;  $h_{n,k}$  – кратность интервала  $T_{\delta}$  по отношению к интервалу наблюдения  $T_{n,k}$ ;  $Q$  – дискретность измерения положения энкодером, рассчитанная по (1).

Дискретность  $\delta_k$  и разрешающая способность  $\mu_k$  измерения скорости  $\omega_k$ , вычисленной как скользящее среднее  $N$  ее значений, последовательных во времени, определяется как

$$\delta_k = \frac{1}{\mu_k} = \frac{\delta_{n,k}}{N}. \quad (15)$$

Для оценки точности измерения скорости может послужить отношение ее величины к дискретности измерения при некоторых значениях индексов  $n$  и  $k$ :

$$W_{n,k} = \frac{\omega_{n,k}}{\delta_{n,k}} = \frac{\Theta_{\max} T_{n,k} \omega_{n,k}}{2\pi} = S_{n,k}, \quad (16)$$

где  $S_{n,k}$  – приращение углового положения на интервале наблюдения  $T_{n,k}$  при скорости вращения  $\omega_{n,k}$ .

Из выражения (16) следует, что при некоторой фиксированной величине  $W_{n,k} = S_{n,k}$  скорость вращения  $\omega_{n,k}$ , которая измерена с дискретностью  $\delta_{n,k}$  и разрешающей способностью  $\mu_{n,k}$ , обратно пропорциональна продолжительности интервала наблюдения  $T_{n,k}$ . Поэтому при увеличении скорости вращения продолжительность интервала наблюдения может быть сокращена при сохранении дискретности и разрешающей способности измерения. При снижении же скорости вращения продолжительность интервала наблюдения должна быть увеличена для сохранения величин  $\delta_{n,k}$  и  $\mu_{n,k}$ . Однако при этом следует учитывать, что  $h_{n,k}$  принимает дискретные значения от  $h_{\min}$  до  $h_{\max}$ , базовый интервал  $T_{\delta}$  имеет фиксированную продолжительность, а величина  $h_{\max}$  ограничена внесением задержек в контур регулирования скорости. Поэтому диапазон поддержания  $W_{n,k}$  ограничен и имеет интервалы, в которых величина  $W_{n,k}$  изменяется в некоторых пределах при изменении скорости вращения.

На основании сказанного требуется определить граничные значения приращений углового положения  $S_{\min}$  и  $S_{\max}$ , которые показаны на рис. 8 и используются при вычислениях продолжительностей интервалов наблюдения по (5) и (6). Из (16) следует приведенное ниже соотношение, согласно которому граничные значения  $S_{\min}$  и  $S_{\max}$  не зависят от скорости вращения:

$$S_{\min} < W_{n,k} < S_{\max}. \quad (17)$$

Из (9), (10) и (17) следует, что граничные значения  $S_{\min}$  и  $S_{\max}$  следует выбирать в зависимости от значений параметров, входящих в эти выражения, а также в зависимости от желаемой точности измерения с учетом своевременности обновления информации для систе-



мы управления электропривода о его скорости движения.

Таким образом,  $W_{n,k}$ , являясь оценкой точности измерения скорости, обозначает, с какой дискретностью  $\delta_{n,k}$  и разрешающей способностью  $\mu_{n,k}$  измерена скорость  $\omega_{n,k}$ . Если на некотором интервале наблюдения  $T_{n,k}$  величина  $W_{n,k} = S_{n,k}$  возросла более  $S_{\max}$ , то продолжительность  $T_{n,k}$  завышена и при следующем измерении скорости величину  $T_{0,k+1}$  целесообразно снизить, чтобы, сохранив точность измерения, сократить задержку по времени в системе управления. Если же  $W_{n,k} = S_{n,k}$  меньше  $S_{\min}$ , то точность измерения скорости при данном значении  $k$  снижена. Поэтому целесообразно увеличить продолжительность следующего интервала наблюдения  $T_{0,k+1}$ , чтобы вернуть величину  $W_{n,k}$  в диапазон (17).

**Результаты исследования.** На основе приведенного выше алгоритмического описания контроллера разработано оригинальное программное обеспечение [8] на языке C, а именно подпрограмма, которая может послужить элементом программного обеспечения микропроцессорных систем управления электроприводов, разработанных как с использованием модельно-ориентированных средств, так и в виде структурированного текста. На основе этой подпрограммы разработан пользовательский модельный блок вида Basic Custom Code [6], достаточно универсальный для систем управления следящих электроприводов и систем стабилизации скорости. Настройка этого блока в зависимости от особенностей системы управления осуществляется путем задания параметров подпрограммы, среди которых число импульсов (или дискрет кода), приходящихся на один оборот энкодера  $\Theta_{\max}$ , интервал времени  $T_s$  между выборками углового положения, продолжительность базового интервала наблюдения  $T_6$ , кратная величине интервала выборки  $T_s$ , и диапазон его изменения от  $h_{\min}$  до  $h_{\max}$ .

Использование этого модельного блока в программном обеспечении разработанного электропривода [7] позволило обеспечить его функциональность, а именно движение в режиме слежения и в режиме стабилизации скорости вращения исполнительного механизма. Период выборки углового положения  $T_s$  и базовый интервал наблюдения  $T_6$  имеют продолжительность 330 мкс, что равно интервалу времени между итерациями выполнения подпрограмм регуляторов положения и скорости.

В качестве экспериментального результата применения преобразования углового положения в угол поворота электропривода следует указать полное исключение пропуска импульсов энкодера, в том числе на границах его оборота при переходе углового положения  $\Theta$  от  $\Theta_{\max}$  к нулю или от нуля к  $\Theta_{\max}$ . Это актуально при динамических процессах движения,

имеющих небольшой размах, в окрестности указанного углового положения, которое происходит при удержании заданного положения следящим электроприводом [9, 10]. Дискретность измерения положения  $Q$ , рассчитанная по (1), сохраняется во всем диапазоне изменения угла поворота  $\varphi$  в пределах числового формата int32 при вращении электропривода.

Чтобы оценить влияние дискретности измерения скорости вращения при использовании описанных технических решений на стабилизацию скорости электропривода, рассмотрим экспериментальные графики скорости  $\omega(t)$  при ее нулевой заданной величине  $\omega_3 = 0$ , показанные на рис. 9. Электропривод с бесколлекторным двигателем постоянного тока, согласно функциональной схеме, показанной на рис. 1, замкнут по скорости его вращения, причем  $T_6 = 330$  мкс,  $N = 10$ , а встроенный в двигатель энкодер имеет  $\Theta_{\max} = 2048$ . Графики получены с помощью приложения для персонального компьютера, которое предназначено для управления электроприводом [7] и отображения координат его движения.

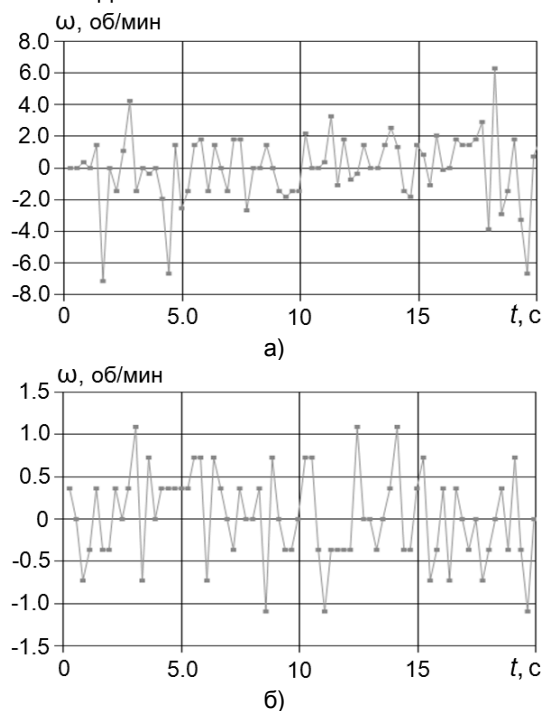


Рис. 9. График скорости замкнутой системы электропривода при ее заданной величине  $\omega_3 = 0$ : а – при  $h_{\max} = 1$ ; б – при  $h_{\max} = 4$

График, показанный на рис. 9,а, получен при  $h_{\max} = 1$ , а график на рис. 9,б получен при  $h_{\max} = 4$ . Согласно графикам, динамические процессы работы регулятора скорости по ее стабилизации [9, 10] на заданном уровне  $\omega_3 = 0$  приводят к некоторым кратковременным отклонениям от него. При  $\omega \rightarrow 0$  продолжительность интервала наблюдения  $T_{0,k}$ , согласно (5)–(7), автоматически принимает максимальную величину  $h_{0,k} = h_{\max}$ . Поэтому при  $h_{\max} = 1$  коррек-

ция интервала наблюдения в зависимости от скорости вращения электропривода не осуществляется, а интервал наблюдения имеет минимальную продолжительность  $T_{n,k} = T_6$  при всех итерациях ее измерения. Сопоставление графиков приводит к выводу, что увеличение дискретности  $\delta_k$ , рассчитанной по (14) и (15) в зависимости от  $h_{n,k}$ , является возмущающим фактором для замкнутой системы стабилизации скорости электропривода. Пропорциональный и интегральный коэффициенты регулятора скорости в обоих случаях одинаковые. Увеличение  $\delta_k$  ожидаемо приводит к увеличению размаха отклонений скорости  $\omega(t)$  от ее заданной нулевой величины, как показано на рис. 9,а, по сравнению с графиком на рис. 9,б. Многократное повторение таких экспериментов показало стабильное воспроизведение описанной выше закономерности в зависимости от величины  $h_{\max}$ .

Среднее значение скорости движения электропривода  $\omega(t)$  в обоих случаях примерно равно заданному нулевому значению, поэтому при продолжительном наблюдении валы исполнительного механизма и электрического двигателя визуально неподвижны. Величина заданной скорости выбрана равной нулю, то есть  $\omega_s = 0$ , чтобы при получении графиков исключить влияние неравномерности нагрузки при вращении исполнительного механизма, которая вызывает дополнительные динамические процессы работы регулятора скорости.

При замыкании системы стабилизации по скорости исполнительного механизма, согласно схеме на рис. 1, был применен энкодер ЛПР-137А, имеющий  $\Theta_{\max} = 10000$ .

Описанный и осуществленный способ преобразования углового положения вала в угол его поворота применим и при использовании других типов цифровых датчиков, имеющих в качестве результата измерения углового положения его цифровой код. Сказанное относится к сельсинам, синусно-косинусным вращающимся трансформаторам и магнитным энкодерам [3], которые имеют встроенные вычислительные элементы для получения цифрового кода измеренного ими углового положения и встроенные средства для сопряжения с системами управления по цифровым линиям связи и сетевым интерфейсам I2C и SPI. Однако в этом случае могут возникнуть сложности с обеспечением своевременного обновления информации об угловом положении электропривода в связи с ограниченной интенсивностью и сравнительно низким приоритетом получения данных от таких датчиков. Это вносит задержки, в том числе, случайной продолжительности в контур регулирования положения, снижая качество управления, и ставит под вопрос возможность корректного измерения скорости вращения электропривода для ее стабилизации.

В качестве иллюстрации сказанного на рис. 10 показана модельная схема для сопряжения системы управления электропривода с цифровым датчиком положения, подключенным к ней по сетевой шине I2C. Такая схема в составе программного обеспечения контроллера цифрового датчика положения должна быть помещена в подсистему Function-Call Subsystem, показанную на рис. 4, которая вызывается по прерыванию при переполнении таймера.

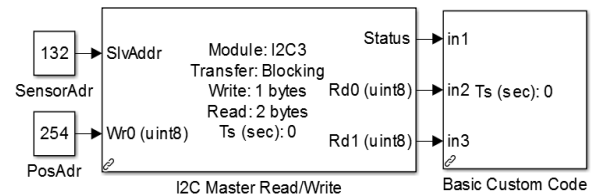


Рис. 10. Модельная схема обработчика датчика положения при сопряжении по шине I2C

С помощью переменной SensorAdr указан адрес датчика на шине I2C, а с помощью переменной PosAdr указан адрес старшего из двух байтов переменной целочисленного типа uint16, расположенной в памяти цифрового датчика. В ней записан код из 14 бит измеренного углового положения. Принятая от датчика в форме двух байтов Rd0 и Rd1, эта переменная может быть использована для вычисления угла поворота вала с помощью модельного блока вида Basic Custom Code на основе программного обеспечения контроллера [8].

**Выводы.** Предложенное алгоритмическое описание контроллера цифрового датчика положения и разработанное на его основе программное обеспечение позволяют осуществлять преобразование углового положения вала электропривода, циклически изменяющегося при вращении в зависимости от его направления в пределах оборота от нуля до 360 градусов или  $2\pi$  радиан, в угол поворота, который имеет более широкие пределы изменения.

Выполненное в контроллере измерение скорости вращения электропривода путем вычисления приращения его углового положения в течение интервала наблюдения, продолжительность которого для каждой итерации измерения автоматически вычисляется в зависимости от величины скорости вращения на предыдущем интервале, позволяет сохранить разрешающую способность в более широком диапазоне скорости вращения.

Использование встроенных в микроконтроллер специализированных модулей, предназначенных для детектирования и захвата сигналов, а также детально проработанных вычислительных алгоритмов на основе математических методов способствует успешной разработке программного обеспечения, в том

числе, снижению затрат по времени его выполнения и включению его в состав системы управления.

#### Список литературы

1. **Анучин А.С.** Системы управления электроприводов. – М.: Изд. дом МЭИ, 2015. – 373 с.
2. **Терехов В.М., Осипов О.И.** Системы управления электроприводов: учебник для вузов / под ред. В.М. Терехова. – М.: Изд. центр «Академия», 2005. – 304 с.
3. **Розанов Ю.К., Соколова Е.М.** Электронные устройства электромеханических систем: учеб. пособие для вузов. – М.: Изд. центр «Академия», 2004. – 272 с.
4. **STM32 Arm Cortex Microcontrollers** [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [www.st.com](http://www.st.com) (дата обращения 16.12.2022).
5. **Денисенко В.В.** Компьютерное управление технологическим процессом, экспериментом, оборудованием. – М.: Горячая линия–Телеком, 2009. – 608 с.
6. **Waijung Blockset** [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://waijung.aimagin.com> (дата обращения 16.12.2022).
7. **Polyuschenkov I.** Model-oriented Programming Technique in The Development of Electric Drive Control System // 2019 26th International Workshop on Electric Drives: Improvement in Efficiency of Electric Drives (IWED). – 2019. – P. 1–6. DOI: 10.1109/IWED.2019.8664388.
8. **Свидетельство** о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2022668748. Программа для преобразования углового положения в угол поворота и вычисления скорости вращения / И.С. Полющенко; зарег. в реестре программ для ЭВМ 11.10.2022.
9. **Егупов Н.Д.** Методы классической и современной теории управления: учебник в 3 т. Т. 2. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2000. – 736 с.
10. **Ротач В.Я.** Теория автоматического управления: учебник для вузов – М.: Изд. дом МЭИ, 2008. – 396 с.

#### References

1. Anuchin, A.S. *Sistemy upravleniya elektroprivodov* [Control systems of electric drives]. Moscow: Izdatel'skiy dom MEI, 2015. 373 p.
2. Terekhov, V.M., Osipov, O.I. *Sistemy upravleniya elektroprivodov* [Control systems of electric drives]. Moscow: Izdatel'skiy tsentr «Akademiya», 2006. 304 p.
3. Rozanov, Yu.K., Sokolova, E.M. *Elektronnye ustroystva elektromekhanicheskikh sistem* [Electronic equipment of electromechanical systems]. Moscow: Izdatel'skiy tsentr «Akademiya», 2004. 272 p.
4. STM32 Arm Cortex Microcontrollers. Available at: [www.st.com](http://www.st.com) (Date of appeal 16.12.2022).
5. Denisenko, V.V. *Kompyuternoe upravlenie tekhnologicheskimi protsessami, eksperimentami, oborudovaniem* [Computer control of process, experiment, equipment]. Moscow: Goryachaya liniya – Telekom, 2009. 608 p.
6. Waijung Blockset. Available at: <http://waijung.aimagin.com> (Date of appeal 16.12.2022).
7. Polyuschenkov, I. Model-oriented Programming Technique in The Development of Electric Drive Control System. 2019 26th International Workshop on Electric Drives: Improvement in Efficiency of Electric Drives (IWED), 2019, pp. 1–6. DOI: 10.1109/IWED.2019.8664388.
8. Polyuschenkov, I.S. *Programma dlya preobrazovaniya uglovogo polozheniya v ugol povorota i skorosti vrashcheniya* [Software program to convert angular position into rotation angle and to calculate rotation speed]. Svidetel'stvo o gosudarstvennoy registratsii programmy dlya EVM № 2022668748 [Program for converting angular position into rotation angle and calculating rotation speed. Certificate of Software Registration no. 2022668748], 2022.
9. Egupov, N.D. *Metody klassicheskoy i sovremennoy teorii upravleniya*. V 3 t., t. 2 [Classic and Modern Methods of Control Theory. In 3 vol., vol. 2]. Moscow: Izdatel'stvo MGTU im N.E. Bauman, 2000. 736 p.
10. Rotach, V.Ya. *Teoriya avtomaticheskogo upravleniya* [Automatic Control Theory]. Moscow: Izdatel'skiy dom MEI, 2008. 396 p.

## МЕТОДЫ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

---

УДК 681.3

**Борис Александрович Староверов**

ФГБОУВО «Костромской государственный университет», доктор технических наук, профессор кафедры автоматики и микропроцессорной техники, Россия, Кострома, e-mail: sba44@mail.ru

**Сергей Константинович Улыбышев**

ФГБОУВО «Костромской государственный университет», аспирант, Россия, Кострома, e-mail: ulybyshev@outlook.com

### Математическая модель теплоснабжения помещения как объекта динамического управления температурой

#### Авторское резюме

**Состояние вопроса.** Энергосбережение в процессе отопления административных зданий является актуальной задачей. Потенциально большие возможности заключаются в динамическом управлении температурой помещений в зависимости от расписания их использования. Динамическое управление должно отвечать критерию энергоэффективности и обеспечивать температуру воздуха в помещениях во временных интервалах их использования на требуемом уровне комфорта при наличии внешних возмущений. Очевидно, что такое управление можно реализовать лишь автоматической системой. Для синтеза такой системы необходимы математические модели теплоснабжения помещений как объектов управления, что определяет актуальность рассматриваемой задачи.

**Материалы и методы.** Математические модели получены с использованием экспериментальных данных и методов численного моделирования.

**Результаты.** На основе уравнений динамического теплового баланса помещения получены математические модели в пространстве состояния и в виде передаточных функций по управляющим и возмущающим воздействиям.

**Выводы.** Полученные виды математической модели помещения дают возможность определять способы качественного и количественного управления теплоснабжением помещения с заданной точностью и определять графики изменения температуры в зависимости от расписания его использования, оптимальные по минимуму расхода энергии.

**Ключевые слова:** отопление помещений административных зданий, энергосбережение, математическая модель теплоснабжения помещения, динамический процесс изменения температуры, графики регулирования температуры помещения

**Boris Alexandrovich Staroverov**

Kostroma State University, Doctor of Engineering Sciences (Post-doctoral degree), Professor of Automation and Microprocessor Technology Department, Russia, Kostroma, e-mail: sba44@mail.ru

**Sergey Konstantinovich Ulybyshev**

Kostroma State University, Post-graduate Student, Russia, Kostroma, e-mail: ulybyshev@outlook.com

## Mathematical model of room heating as object of dynamic temperature control

### Abstract

**Background.** Energy saving issue in the process of administrative buildings heating is an important one. Dynamic control of room temperature depending on the schedule of its usage gives great opportunities. Dynamic control should meet the criteria of energy efficiency and ensure air temperature in the rooms at time intervals of their usage at the required level in terms of external impact on the building. Obviously, such control can only be implemented by an automatic system. To synthesize such a system, we need mathematical models of room heating as control objects. Consequently, the problem under consideration is relevant.

**Materials and methods.** Experimental data and numerical simulation methods are used to obtain mathematical models.

**Results.** Mathematical models are obtained in the state space and in the form of transfer functions for controlling and disturbing influences based on the equations of the dynamic heat balance of the room.

**Conclusions.** Two types of mathematical model of the room are defined. They make it possible to synthesize the laws of qualitative and quantitative control of the heat supply of the building with a given accuracy and to determine schedules of temperature changes depending on the schedule of its use, optimal in terms of minimum energy consumption.

**Key words:** space heating of administrative buildings, energy saving, mathematical model of space heat supply, dynamic process of temperature change, schedules of room temperature control

**DOI:** 10.17588/2072-2672.2023.3.062-067

**Введение.** Помещения (кабинеты, аудитории) в административных зданиях и учебных корпусах используются по времени, как правило, на 50 % и менее. Помещения могут быть полностью неиспользуемые, например, в выходные и праздничные дни, в каникулы. Температура в этих помещениях в периоды неиспользования может снижаться вплоть «до точки росы», что, очевидно, дает возможность значительно экономить тепловую энергию [1, 2].

Одной из основных проблем является определение оптимальных с точки зрения получения максимальной экономии энергии графиков регулирования температуры помещения, так как процессы уменьшения и увеличения температуры имеют значительную инерционность [3, 4]. На рис. 1 показан примерный график динамического регулирования температуры помещения при переходе от периода паузы к периоду использования и обратно.

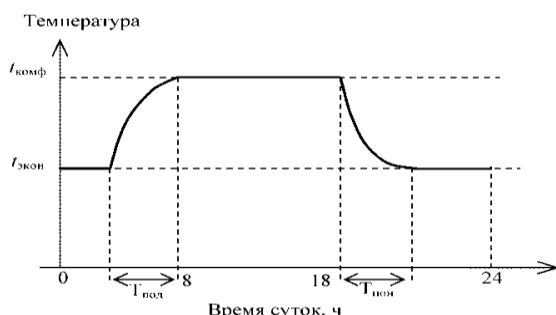


Рис. 1. График динамического регулирования температуры помещения

В период подъема температуры  $T_{\text{пов}}$  от экономного уровня  $t_{\text{экон}}$  до температуры воздуха помещений происходит нагрев ограждающих конструкций (стены, пол, потолок). В период понижения температуры  $T_{\text{пон}}$  происходит обратный процесс — остывание воздуха в помещении и его конструктивного ограждения. Время от 8 до 18 часов — это период использования помещения по назначению при комфортной температуре.

Основным параметром графика, который необходимо определить, является величина экономного уровня, при которой достигается максимальная экономия тепловой энергии. Для этого необходимо учитывать динамические процессы нагрева и охлаждения в отдельном помещении.

Большинство работ, которые посвящены получению математических моделей теплоснабжения зданий и отдельных помещений, основаны на статических процессах теплообмена (например, [5, 6]). Динамическим моделям теплоснабжения также посвящен ряд работ (например, [7–10]), но в них рассматриваются или здания в целом, или отдельные составляющие системы теплоснабжения (тепловые узлы, отопительные батареи и т.п.), или помещения без учета ряда важных составляющих, определяющих динамику процесса изменения температуры.

В связи с этим получение наиболее полной математической модели теплоснабжения отдельного помещения с помощью отопительных батарей, подключенных к системе централизованного отопления, является актуальной

задачей. Данная модель должна позволять рассчитывать оптимальные по минимуму расхода тепловой энергии графики динамического регулирования температуры помещения и определять способы автоматического управления температурой.

**Методы исследования.** В качестве типового примера рассматривается отдельное помещение (кабинет, аудитория), которое имеет ограждение, включающее внешнюю стену с окнами, перекрытия (пол, потолок), внутренние стены (перегородки), отделяющие от соседних помещений. Источником тепла является батарея. Для получения модели помещения как объекта управления используются уравнения динамического теплового баланса и результаты экспериментальных исследований.

**Исходные уравнения теплового баланса.** Уравнение, описывающее тепловой баланс помещения в динамике относительно средних параметров между тепловой мощностью, отдаваемой нагревательным прибором (батареей), и мощностью, расходуемой на нагрев перегородок между смежными помещениями и наружной стены, имеет следующий вид:

$$C_1 \frac{dq_1}{dt} = k_{\text{НП}}(q_3 - q_1) - k_{\text{ОГС}}(q_2 - q_c) - k_{\text{ОГН}}(q_2 - q_n), \quad (1)$$

где  $C_1$  – теплоемкость помещения, Вт·с/град;  $q_1$  – температура воздуха в помещении, град.;  $k_{\text{НП}}$  – коэффициент теплоотдачи нагрева помещения, Вт/град;  $q_3$  – средняя температура отопительного прибора, град;  $k_{\text{ОГС}}$  – коэффициент теплопередачи смежных перегородок, Вт/град;  $q_2$  – температура ограждений помещения, град.;  $q_c$  – температура смежных помещений, град.;  $k_{\text{ОГН}}$  – коэффициент теплопередачи стен наружу во внешнюю среду, Вт/град;  $q_n$  – наружная температура, град.

В свою очередь, динамика нагрева ограждений помещения определяется разностью между температурой воздуха в помещении и температурой перегородок, которая зависит от температуры в смежных помещениях. Температура в смежных помещениях может быть ниже, так как они в это время не используются. В результате получается следующее уравнение:

$$C_2 \frac{dq_2}{dt} = k_{\text{ОГП}}(q_1 - q_2), \quad (2)$$

где  $C_2$  – теплоемкость ограждений помещения, Вт·с/град;  $k_{\text{ОГП}}$  – коэффициент теплопередачи во ограждения помещения, Вт/град.

Динамика теплопередачи от отопительного прибора во внутреннее помещение определяется тепловой мощностью отопительного прибора, зависящей от удельного расхода теплоносителя и разности его температуры на входе и выходе, и мощностью, идущей на нагрев воздуха:

$$C_3 \frac{dq_3}{dt} = Q_{\text{ОП}} - k_{\text{НП}}(q_3 - q_1), \quad (3)$$

где  $C_3$  – теплоемкость отопительного прибора или батареи, Вт·с/град;  $Q_{\text{ОП}} = M_{\text{ОП}}\Delta q_{\text{ОП}}$  – тепловая мощность отопительного прибора, Вт;  $M_{\text{ОП}} = C_T m$  – расход теплоносителя, Вт·с/град;  $C_T$  – удельная теплоемкость, Вт·с/(кг·град);  $m$  – массовый расход теплоносителя, кг/с;  $\Delta q_{\text{ОП}} = q_{\text{ВХ}} - q_{\text{ВЫХ}}$  – величина перепада температуры, град, на которую охлаждается теплоноситель, проходя через отопительный прибор.

Очевидно, что количество тепловой энергии воздушной массы помещения, Вт·с, определяется выражением

$$Q_1 = C_1 q_1.$$

Количество тепловой энергии ограждений помещения, Вт·с, определяется выражением

$$Q_2 = C_2 q_2.$$

Количество тепловой энергии, отдаваемой отопительным прибором, Вт·с, определяется выражением

$$Q_3 = C_3 q_3.$$

Объединение уравнений (1), (2) и (3) и приведение подобных членов дает систему уравнений, наиболее полно описывающих динамику изменения температуры отдельного помещения при качественном и количественном регулировании с учетом внешних возмущений:

$$\begin{cases} C_1 \frac{dq_1}{dt} = -k_{\text{НП}}q_1 - (k_{\text{ОГС}} + k_{\text{ОГН}})q_2 + k_{\text{НП}}q_3 + k_{\text{ОГС}}q_c + k_{\text{ОГН}}q_n, \\ C_2 \frac{dq_2}{dt} = k_{\text{ОГП}}q_1 - k_{\text{ОГП}}q_2, \\ C_3 \frac{dq_3}{dt} = -k_{\text{НП}}(q_3 - q_1) + C_T m \Delta q. \end{cases} \quad (4)$$

В матричной форме система уравнений (4) имеет вид

$$\dot{\mathbf{G}} = \mathbf{AG} + \mathbf{BU} + \mathbf{CF}, \quad (5)$$

где

$$\mathbf{G} = \begin{bmatrix} q_1 \\ q_2 \\ q_3 \end{bmatrix} \text{ – координаты состояния;}$$

$$\mathbf{U} = \begin{bmatrix} m \\ \Delta q \end{bmatrix} \text{ – управляющие воздействия;}$$

$$\mathbf{F} = \begin{bmatrix} q_c \\ q_n \end{bmatrix} \text{ – возмущающие воздействия;}$$



$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & 0 \\ a_{31} & 0 & a_{33} \end{bmatrix} - \text{матрица динамики,}$$

$$a_{11} = -k_{\text{НП}}/C_1; \quad a_{12} = (-k_{\text{ОГС}} - k_{\text{ОГН}})/C_1;$$

$$a_{13} = k_{\text{НП}}/C_1; \quad a_{21} = k_{\text{ОГС}}/C_2;$$

$$a_{22} = -k_{\text{ОГП}}/C_2; \quad a_{31} = k_{\text{НП}}/C_3; \quad a_{33} = -k_{\text{НП}}/C_3;$$

$$\mathbf{B} = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ b_{31} & b_{32} \end{bmatrix} - \text{коэффициенты управления,}$$

$b_{31} = C_T \Delta q / C_3$  (при  $\Delta q = \text{const}$ ) – количественное регулирование;

$b_{32} = C_T m / C_3$  (при  $m = \text{const}$ ) – качественное регулирование;

$$\mathbf{C} = \begin{bmatrix} c_{11} & c_{12} \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} - \text{коэффициенты возмущений,}$$

$c_{11} = k_{\text{ОГС}}/C_1$  – коэффициент передачи от температуры смежных помещений;

$c_{12} = k_{\text{ОГН}}/C_1$  – коэффициент передачи от наружной температуры.

**Формирование модели.** В соответствии с уравнением (5) на рис. 2 представлена структурная схема описания динамики процесса изменения температуры помещения в виде системы элементарных передаточных функций.

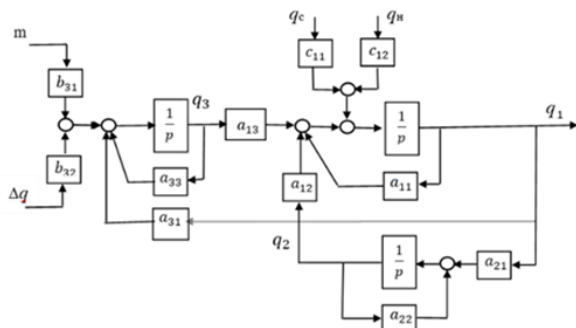


Рис. 2. Структурная схема описания динамики процесса изменения температуры помещения при изменении управляющих ( $m$ ,  $\Delta q$ ) и возмущающих ( $q_c$ ,  $q_n$ ) воздействий

Данная структурная схема помещения как объекта управления позволяет моделировать процессы качественного или количественного регулирования температуры, а также синтезировать регулятор состояний, используя переменные  $q_1$ ,  $q_2$ ,  $q_3$  как координаты состояния объекта, если применить три соответствующих датчика температуры. При использовании наблюдателя состояния достаточно будет лишь одного датчика температуры в помещении  $q_1$ .

Для синтеза типовых регуляторов структурную схему целесообразно представить схемой в виде набора аperiodических передаточ-

ных функций. Для этого методом структурных преобразований объединяются элементарные передаточные функции. В результате получим структурные схемы моделей составляющих объекта управления (рис. 3).

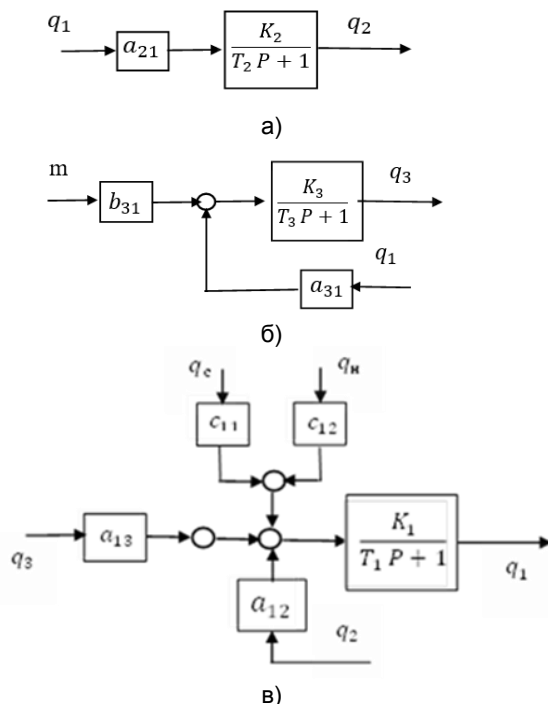


Рис. 3. Структурные схемы моделей составляющих объекта управления: а – нагревательный прибор; б – ограждения помещения; в – воздушная масса помещения

На рис. 3 обозначено:

$$K_3 = \frac{1}{-a_{33}} = \frac{C_3}{k_{\text{НП}}}; \quad T_3 = \frac{1}{-a_{33}} = \frac{C_3}{k_{\text{НП}}} - \text{коэффициент}$$

передачи и постоянная времени отопительного прибора;

$$a_{31} = \frac{k_{\text{НП}}}{C_3} - \text{коэффициент передачи от нагревательного прибора;}$$

$$b_{31} = \frac{C_T \Delta q}{C_3} - \text{коэффициент передачи количественного регулирования (при } \Delta q = \text{const});$$

$$K_2 = \frac{1}{-a_{22}} = \frac{C_2}{k_{\text{ОГП}}}; \quad T_2 = \frac{1}{-a_{22}} = \frac{C_2}{k_{\text{ОГП}}} - \text{коэффициент}$$

$$a_{21} = \frac{k_{\text{ОГП}}}{C_2} - \text{коэффициент передачи от нагревательного прибора;}$$

$$K_1 = \frac{1}{-a_{11}} = \frac{C_1}{k_{\text{НП}}}; \quad T_1 = \frac{1}{-a_{11}} = \frac{C_1}{k_{\text{НП}}} - \text{коэффициент}$$

$$a_{13} = \frac{k_{\text{НП}}}{C_1} - \text{коэффициент передачи от нагревательного прибора;}$$

$a_{12} = \frac{-k_{\text{ОГС}} - k_{\text{ОГН}}}{C_1}$  – коэффициент передачи от ограждений;

$c_{11} = \frac{k_{\text{ОГС}}}{C_1}$ ;  $c_{12} = \frac{k_{\text{ОГН}}}{C_1}$  – коэффициенты переда-

чи от температуры смежных помещений и наружного воздуха соответственно.

**Результаты.** Объединение структурных схем отдельных контуров дает общую схему описания динамики изменения температуры (рис. 4).

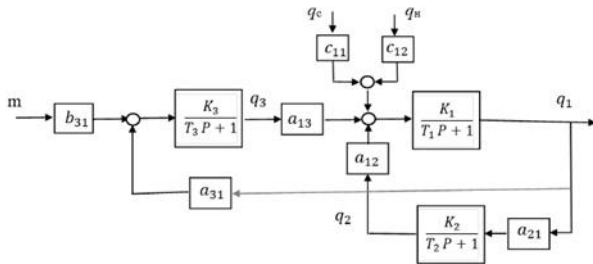


Рис. 4. Структурная схема описания динамики изменения температуры помещения

Исходя из общей структурной схемы (рис. 4), передаточная функция по управлению имеет вид

$$W_y(p) = \frac{q_1(p)}{m(p)} = \frac{b_1 p + b_0}{a_3 p^3 + a_2 p^2 + a_1 p + a_0}, \quad (6)$$

где

$$\begin{aligned} a_0 &= K_1 K_2 a_{12} a_{21} + K_1 K_2 a_{13} a_{31} + 1; \\ a_1 &= T_3 + T_2 + T_1 + T_2 K_1 K_2 a_{13} a_{31} + T_3 K_1 K_2 a_{13} a_{31} + \\ &+ T_1 K_1 K_2 a_{12} a_{21}; \\ a_2 &= T_1 T_2 + T_2 T_3 + T_1 T_3 + T_2 T_3 K_1 K_2 a_{13} a_{31}; \\ a_3 &= T_1 T_2 T_3; \\ b_0 &= K_1 K_2 a_{13} b_{31}; \\ b_1 &= K_1 K_2 a_{13} b_{31} T_2. \end{aligned}$$

Аналогично, передаточная функция по возмущению (по наружной температуре  $q_n$ ) представляется следующим выражением:

$$W_H(p) = \frac{q_1(p)}{q_n(p)} = \frac{b_{2H} p^2 + b_{1H} p + b_{0H}}{a_3 p^3 + a_2 p^2 + a_1 p + a_0}, \quad (7)$$

где

$$\begin{aligned} b_{0H} &= K_1 c_{12}; \quad b_{1H} = T_2 K_1 c_{12} + T_3 K_1 c_{12}; \\ b_{2H} &= T_2 T_3 K_1 c_{12}. \end{aligned}$$

Из (6) и (7) определяется выражение зависимости температуры в помещении при изменении подачи теплоносителя в отопительный прибор (отопительную батарею) и при изменении температуры наружного воздуха:

$$\begin{aligned} q_1(p) &= \frac{b_1 p + b_0}{a_3 p^3 + a_2 p^2 + a_1 p + a_0} m(p) + \\ &+ \frac{b_{2H} p^2 + b_{1H} p + b_{0H}}{a_3 p^3 + a_2 p^2 + a_1 p + a_0} q_n(p). \end{aligned} \quad (8)$$

Решение уравнения (8) дает описание динамического процесса изменения температуры в помещении при управляющем и возмущающем воздействиях, что позволяет построить кривую переходного процесса при изменении температуры в помещении от  $q_{\text{комф}}$  до  $q_{\text{экон}}$ .

В качестве примера проведен расчет переходного процесса нагрева воздуха помещения, которое имеет ограждение, включающее внешнюю стену с окном. Параметры модели определены на основе справочных данных, включающих коэффициенты теплоемкости и коэффициенты теплопередачи. Динамические параметры определялись экспериментальным способом путем изменения подачи теплоносителя в батарею отопления. В результате получена следующая передаточная функция:

$$W_y(p) = \frac{324878p + 79,2}{3150336p^3 + 66451p^2 + 31p + 0,004}.$$

Рассчитанный по этой передаточной функции переходный процесс при увеличении подачи теплоносителя совместно с экспериментальным графиком представлен на рис. 5.

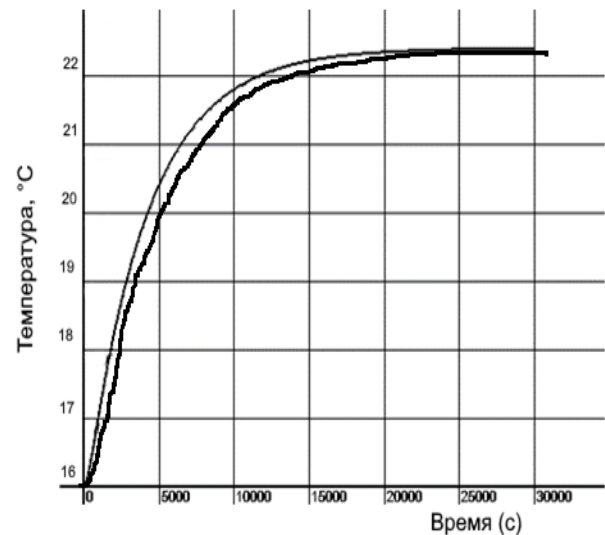


Рис. 5. Кривые переходного процесса изменения температуры помещения при ступенчатом увеличении подачи теплоносителя: расчетная (тонкая линия) и экспериментальная (жирная линия)

Результаты расчета и экспериментальные данные имеют расхождение в пределах 10 %.

**Выводы.** На основе уравнений динамического теплового баланса помещения получены математические модели в пространстве состояния и в виде передаточных функций по управлению и возмущению. Модели дают возможность рассчитать кривые переходных процессов и использовать их для определения оптимальных по минимуму расхода энергии графиков динамического регулирования температуры помещения в зависимости от расписания его использования. Полученные математические модели делают также возможным синтезировать законы управ-

ления для автоматических систем качественного и количественного формирования температурных графиков помещения с требуемой точностью.

### Список литературы

1. **Мониторинг** теплового режима отдельных помещений / А.В. Пуговкин, Н.И. Петрова, С.В. Купреков, С.И. Абрамчук // Энерго- и ресурсоэффективность малоэтажных жилых зданий: материалы II Всерос. науч. конф. с междунар. участием, Новосибирск, 24–26 марта 2015 г. – Новосибирск: Институт теплофизики СО РАН, 2015. – С. 101–107.

2. **Исследование** нестационарных тепловых режимов отопления зданий и сооружений / В.В. Афанасьев, В.Г. Ковалев, В.А. Тарасов и др. // Вестник Чувашского университета. – 2015. – № 1. – С. 20–28.

3. **Ханнанова В.Н.** Математическая модель системы регулирования температуры внутри помещения // Вестник Казанского технологического университета. – 2013. – № 18. – С. 309–313.

4. **Регулирование** температуры внутри жилых и общественных помещений – перспективный и эффективный метод энергосбережения / А.П. Баскаков, А.П. Мартюшев, Г.Я. Захарченко, А.Н. Ведерников // Коммунальщик. – 2006. – № 7. – С. 62.

5. **Тверской М.М., Румянцев Д.В.** Оптимальное управление температурным режимом здания при комбинированной системе отопления // Наука ЮУрГУ. Секции технических наук: материалы 67-й науч. конф. – Челябинск: Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет), 2015. – С. 460–467.

6. **Бухмиров В.В., Пророкова М.В.** Оценка микроклимата в помещениях жилых, общественных и административных зданий // Вестник ИГЭУ. – 2015. – Вып. 4. – С. 1–6.

7. **Гетия С.И., Кочетов О.С., Стареева М.О.** Расчет оптимальных параметров микроклимата рабочей зоны // Вестник МГУПИ. – 2013. – № 5. – С. 84–92.

8. **Зингер Н.М.** Гидравлические и тепловые режимы теплофикационных систем. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 320 с.

9. **Федоров Д.Г.** Разработка алгоритма и регулятора адаптивного управления теплоснабжения и оптимизации энергопотребления зданий // Материалы X Республиканского конкурса инновационных проектов УМНИК-2014 «Молодая инновационная Чувашия» (27–28 марта 2014 г.). – Чебоксары, 2014. – С. 20–21.

### References

1. Pugovkin, A.V., Petrova, N.I., Kuprekov, S.V., Abramchuk, S.I. Monitoring teplovogo rezhima otidel'nykh pomeshcheniy [Monitoring of thermal regime

of individual rooms]. *Materialy II Vserossiyskoy nauchnoy konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem «Energo- i resursoeffektivnost' maloetazhnykh zhilykh zdaniy»*, Novosibirsk, 24–26 marta 2015 g. [Proceedings of II all Russian scientific conference with international participation “Energy and resource efficiency of low-rise residential buildings”]. Novosibirsk: Institut teplofiziki SO RAN, 2015, pp. 101–107.

2. Afanas'ev, V.V., Kovalev, V.G., Tarasov, V.A., Tarasova, V.V., Fedorov, D.G. Issledovanie nestatsionarnykh teplovykh rezhimov otopleniya zdaniy i sooruzheniy [Research into transient heating modes of buildings and constructions heating systems]. *Vestnik Chuvashskogo universiteta*, 2015, no. 1, pp. 20–28.

3. Khannanova, V.N. Matematicheskaya model' sistemy regulirovaniya temperatury vnutri pomeshcheniya [Mathematical model of temperature control system inside a room]. *Vestnik Kazanskogo tekhnologicheskogo universiteta*, 2013, no. 18, pp. 309–313.

4. Baskakov, A.P., Martyushev, A.P., Zakharchenko, G.Ya., Vedernikov, A.N. Regulirovanie temperatury vnutri zhilykh i obshchestvennykh pomeshcheniy – perspektivnyy i effektivnyy metod energosberezheniya [Temperature control inside residential and public buildings – a promising and effective method of energy conservation]. *Kommunal'shchik*, 2006, no. 7, p. 62.

5. Tverskoy, M.M., Rumyantsev, D.V. Optimal'noe upravlenie temperaturnym rezhimom zdaniya pri kombinirovannoy sisteme otopleniya [Optimal control of the temperature mode of the building in a combined heating system]. *Materialy 67 nauchnoy konferentsii* [Materials of the 67-th scientific conference]. Chelyabinsk: Yuzhno-Ural'skiy gosudarstvennyy universitet, 2015, pp. 460–467.

6. Bukhmirov, V.V., Prorokova, M.V. Otsenka mikroklimata v pomeshcheniyakh zhilykh, obshchestvennykh i administrativnykh zdaniy [Assessment of microclimate in the premises of residential, public and administrative buildings]. *Vestnik IGEU*, 2015, issue 4, pp. 1–6.

7. Getiya, S.I., Kochetov, O.S., Stareeva, M.O. Raschet optimalnykh parametrov mikroklimata rabochey zony [Calculation of optimal parameters of the microclimate of the working area]. *Vestnik MGUPI*, 2013, no. 5, pp. 84–92.

8. Zinger, N.M. *Gidravlicheskie i teplovye rezhimy teplofikatsionnykh sistem* [Hydraulic and thermal regimes of heating systems]. Moscow: Energoatomizdat, 1986. 320 p.

9. Fedorov, D.G. Razrabotka algoritma i regulatora adaptivnogo upravleniya teplosnabzheniya i optimizatsii energopotrebleniya zdaniy [Development of algorithm and adaptive control regulator of heating and building energy consumption optimization]. *Materialy X Respublikanskogo konkursa innovatsionnykh projektov UMNİK-2014 «Molodaya innovatsionnaya Chuvashiya»*, 27–28 marta 2014 [Materials of the Republican contest of innovative projects UMNİK 2014 “Young innovative Chuvashia”, March 27–28, 2014]. Cheboksary, 2014, pp. 20–21.

## ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

УДК 004.031.6

**Евгений Рафаилович Пантелеев**

ФГБОУ ВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», доктор технических наук, профессор кафедры программного обеспечения компьютерных систем, Россия, Иваново, телефон (4932) 26-98-60, e-mail: erp@poks.ispu.ru

**Арман Арсенович Мукучян**

ФГБОУ ВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», аспирант кафедры программного обеспечения компьютерных систем, Россия, Иваново, e-mail: 15508@gapps.ispu.ru

### Логическая модель построения пошаговой контекстной помощи пользователю САПР

#### Авторское резюме

**Состояние вопроса.** Автоматическое формирование пошаговой контекстной помощи пользователю САПР существенно уменьшает время, необходимое для решения прикладной задачи, за счет исключения затрат на поиск необходимых подсказок в сопроводительной документации. Сети Петри являются адекватной моделью представления возможных действий пользователя с учетом состояния данных приложения (контекстом). Применение метода инверсии сети Петри, использующего для построения цепочек рекомендованных действий *ограниченный* перебор, предпочтительнее использования стандартной процедуры анализа достижимости, основанной на *исчерпывающем* переборе. Однако отсутствие в известных реализациях явного отделения аксиом инверсии (знаний) от механизма их обработки (вывода) лишает систему контекстной помощи необходимой гибкости при изменении аксиоматики для учета допущений, связанных с конкретной моделью. В связи с этим целью исследования является обеспечение необходимой гибкости системы контекстной помощи за счет отделения модели представления знаний от механизма вывода.

**Материалы и методы.** В качестве модели сценариев действий пользователя используется раскрашенная сеть Петри. Аксиомы инверсии реализованы на языке PROLOG. В качестве инструмента построения цепочек рекомендованных действий использован стандартный механизм вывода языка PROLOG.

**Результаты.** Предложена аксиоматическая модель инверсии сети Петри и реализованный на ее базе метод построения пошаговой контекстной помощи стандартной машиной вывода языка PROLOG. Метод отличается явным отделением знаний (аксиом инверсии) от механизма вывода (построения пошаговых рекомендаций), что уменьшает затраты на адаптацию системы контекстной помощи при внесении изменений в аксиоматику инверсии.

**Выводы.** Предложенный метод позволяет снизить временные затраты на адаптацию системы контекстной помощи, так как сфера вносимых изменений ограничена декларациями аксиом инверсии. Достоверность результатов подтверждается данными использования предложенного метода для формирования контекстной помощи пользователю САПР «Модель и Архив» отечественной компании CSoft. Полученные результаты позволяют создавать контекстные справочные службы для существующих приложений с минимальными изменениями их кодовой базы.

**Ключевые слова:** пошаговая контекстная помощь, сети Петри, язык логического программирования PROLOG, аксиомы инверсии

**Evgeny Rafailovich Pantelev**

Ivanovo State Power Engineering University, Doctor of Engineering Sciences (Post-doctoral degree), Professor of Computer Systems Software Department, Russia, Ivanovo, telephone (4932) 26-98-60, e-mail: erp@poks.ispu.ru

**Arman Arsenovich Mukuchyan**

Ivanovo State Power Engineering University, Postgraduate Student of Computer Systems Software Department, Russia, Ivanovo, e-mail: 15508@gapps.ispu.ru

## Logical model of stepwise contextual help for CAD user

### Abstract

**Background.** Automatic stepwise contextual help for CAD systems users reduces time to solve the application task since it saves time to search the prompt message in system documentation. Petri nets (PN) can be used to bind available actions of the user considering the state of application data (context). Application of the Petri net inversion method, which uses *limited* enumeration to construct chains of recommended actions is preferable than using the standard reachability analysis procedure based on *exhaustive* enumeration. However, the absence in the known implementations of an explicit separation of the axioms of inversion (knowledge) from the mechanism of their processing (inference) deprives the stepwise contextual help system of the necessary flexibility when changing the axioms to consider the assumptions associated with a particular model. Thus, the aim of this research is to provide the necessary flexibility of the contextual help system by separating the knowledge representation model from the inference engine.

**Materials and methods.** A colored PN is used as a model of user action scenarios. The inversion axioms are implemented in the PROLOG language. The standard inference engine of the PROLOG language is used as a tool to construct chains of recommended actions.

**Results.** The authors have proposed an axiomatic model of PN inversion and a method to construct a stepwise contextual help by the standard inference engine of the PROLOG language. The method differs by explicit separation of knowledge (inversion axioms) from the inference engine (stepwise recommendations). It reduces the computational costs of adapting the contextual help system when changing the inversion axioms.

**Conclusion.** The proposed method allows to reduce the time spent on adapting the contextual help system, since the field of the changes is limited by the declarations of the inversion axioms. The reliability of the results is confirmed since the proposed method of contextual help is used for the CAD "Model and Archive" user of CSoft company. The results obtained allow creating contextual help services for existing applications with minimal changes to their code base.

**Key words:** stepwise contextual help, Petri nets, logic programming language PROLOG, axioms of inversion

**DOI:** 10.17588/2072-2672.2023.3.068-078

**Введение.** Решение прикладной задачи в САПР зачастую требует от пользователя выполнения цепочки необходимых действий методом проб и ошибок. Например, одной из задач информационной системы для поддержки жизненного цикла объектов капитального строительства и технологического оборудования промышленных предприятий CADLib Модель и Архив (МИА)<sup>1</sup> [1] отечественного разработчика ГК CSoft является проверка цифровой трехмерной модели, включающая, в частности, измерение расстояний между точками и объектами, создание заметок. Для измерения расстояния между двумя точками необходимо выбрать соответствующий пункт выпадающего меню «Инструменты». Для опытного пользователя данные действия очевидны, однако новый сотрудник не может связать известные ему дей-

ствия с элементами интерфейса (рис. 1,а) и вынужден обращаться к справочным файлам либо просматривать все элементы строки меню в поисках нужного действия.

Известные системы контекстной помощи (СКП) в различных прикладных областях предполагают наличие моделей сценариев действий пользователя и текущего контекста приложения. В качестве примера можно привести интеллектуальную обучающую систему SlideTutor для диагностики заболеваний по визуальным признакам [2] с контекстной помощью в виде пошаговых инструкций и диагностики ошибочных шагов студента. Ограничение «глубины» контекстной помощи действиями, непосредственно доступными из текущего контекста, существенно снижает ценность данного подхода для его применения в САПР, так как проектировщик обычно планирует решение задачи в терминах проектных операций<sup>2</sup>, которые реализуются цепочками действий с элементами интерфейса

<sup>1</sup> САПР МИА позволяет управлять процессом проектирования, осуществлять проверку 3D-моделей, информационную поддержку в процессе строительства и эксплуатации зданий, сооружений и оборудования, организовывать коллективный доступ и управление инженерными данными информационной модели, проверять наличие коллизий информационных моделей и т.д.; Руководство пользователя CADLib Модель и Архив. – CSoft Development, 2020. – 312 с.

<sup>2</sup> Согласно ГОСТ 22487-77, под проектной операцией понимается действие или формализованная совокупность действий, составляющих часть проектной процедуры, алгоритм которых остается неизменным для ряда проектных процедур, инвариантных к инструменту их реализации.

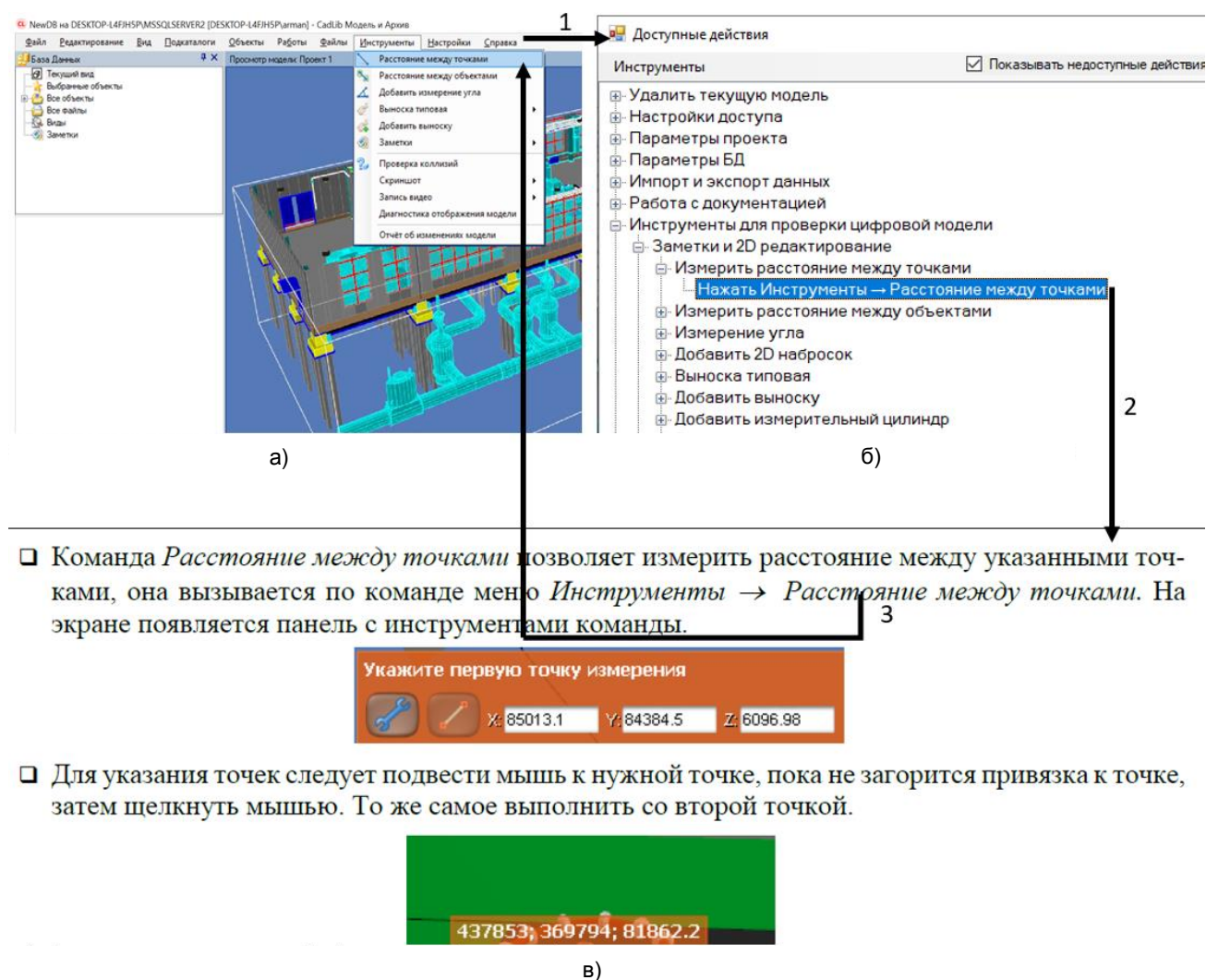
САПР. Кроме того, использование различных моделей для представления сценариев действий пользователя и текущего контекста (правил продукции и онтологий соответственно) усложняет вывод контекстных рекомендаций.

Этот последний недостаток преодолен в СКП, разработанной нами для уже упоминавшейся САПР МиА. Здесь в качестве модели представления сценариев действий из текущего контекста были использованы сети Петри (СП) [3], применение которых полностью оправдало себя в системах управления потоками работ – workflow [4].

СКП МиА отображает в иерархическом списке доступные из текущего контекста действия с возможностью быстрого перехода к соответствующему пункту справки (рис. 1,б,в). Представленный на рис. 1 фрагмент иллюстрирует ранее описанную операцию измерения расстояния между точками. Предполагается, что пользователь, не знающий, как выполнить то или иное действие, вызывает СКП (стрелка №1).

В отображаемом списке уровень абстракции операций уменьшается при движении вниз по иерархии. На нижнем уровне представлены элементарные действия (нажатие кнопок и т.п.). После того как пользователь нашел интересующую его операцию, он может открыть справочный файл с необходимым позиционированием с помощью СКП (стрелка №2) и выполнить описанное действие (стрелка №3).

Список действий обновляется при изменении состояния графического интерфейса либо данных проекта. Например, после выбора пункта меню «Расстояние между точками» пользователю предоставляется возможность выбрать первую точку (рис. 2,а) и СКП обновляет список доступных действий (рис. 2,б). Можно сделать вывод, что отображаются все прикладные задачи, доступные из текущего контекста с указанием первого необходимого элементарного действия, что сокращает время доступа к необходимым пунктам справочного файла.

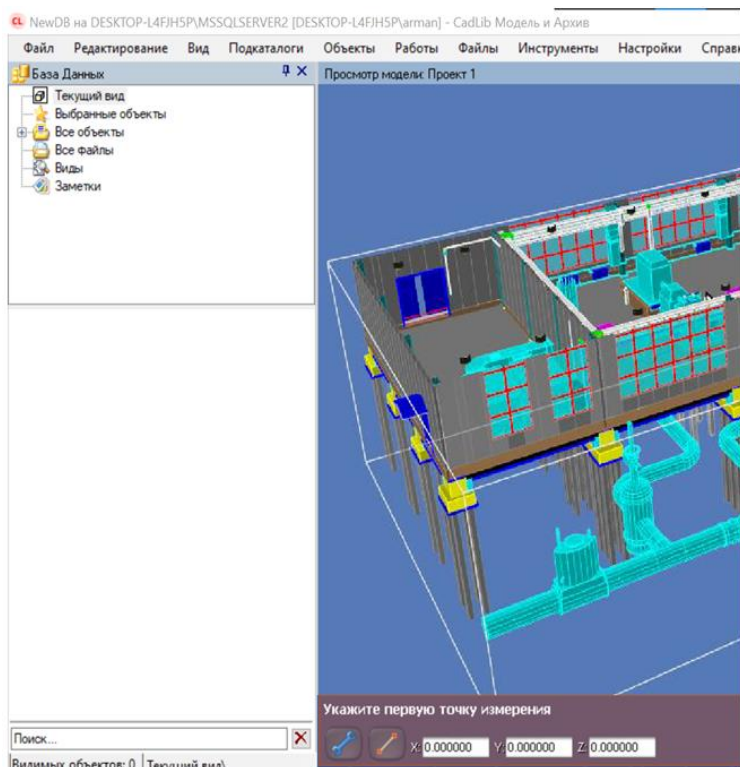


□ Команда *Расстояние между точками* позволяет измерить расстояние между указанными точками, она вызывается по команде меню *Инструменты → Расстояние между точками*. На экране появляется панель с инструментами команды.

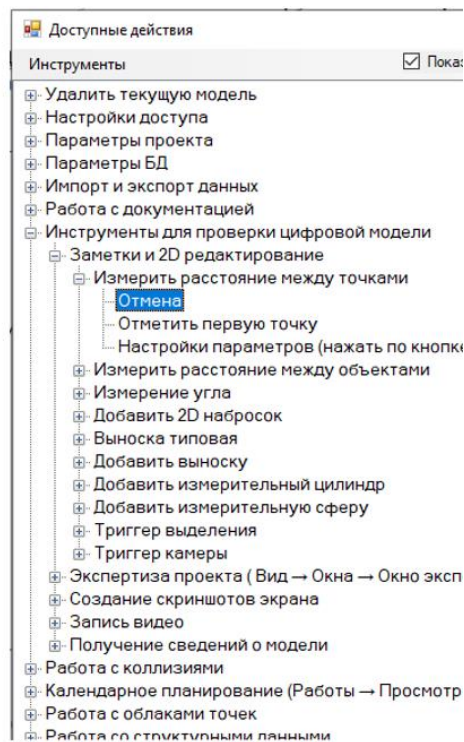
□ Для указания точек следует подвести мышь к нужной точке, пока не загорится привязка к точке, затем щелкнуть мышью. То же самое выполнить со второй точкой.

Рис. 1. Измерение расстояния между точками: а – интерфейс МиА. Просмотр модели; б – доступные действия для текущего контекста; в – фрагмент справочного файла для действия «Расстояние между точками»





а)



б)

Рис. 2. Измерение расстояния между точками: а – измерение расстояния между точками; б – доступные действия для текущего контекста

В рамках обсуждавшихся подходов СКП отображают текущий контекст приложения на позиции справочного ресурса, которые соответствуют описанию действий, непосредственно доступных из текущего контекста. В то же время проектные операции реализуются в конкретной САПР цепочками элементарных действий пользователя. Такая особенность организации взаимодействия проектировщика с системой требует механизма пошаговой помощи, основанной на генерации цепочки действий, необходимых для выполнения запрошенной операции из текущего контекста.

Многошаговые СКП действуют подобно автомобильным навигаторам, которые формируют рекомендованный маршрут между парой заданных на карте точек через множество промежуточных пунктов и динамически изменяют его в случае отклонений. Эффект сокращения затрат времени на поиск контекстной справочной информации в этом случае проявляется тем сильнее, чем больше длина цепочки [5].

При использовании в качестве модели сценариев действий проектировщика сетей Петри задача построения цепочек действий на СП может быть решена двумя способами. Первый способ – это анализ достижимости целевого (возникшего в результате выполнения запрошенной операции) контекста из текущего. Хотя анализ достижимости является частью стандартной аксиоматики СП, он основан на применении стратегии исчерпывающего пере-

бора и является неэффективным в вычислительном отношении. В [6] для построения цепочек действий, необходимых для выполнения запрошенной операции, предложен метод инверсии СП. Данный метод реализует ограниченный перебор, что обеспечивает меньшие, по сравнению с исчерпывающим перебором, вычислительные затраты. Для примера рассмотрим операцию экспорта объектов заранее созданной выборки в файл CDE в «CADLib Модель и Архив» – инструменте для управления BIM-проектом объектов капитального строительства и технологического оборудования крупных промышленных предприятий [1]. Обсудим запрос целевой маркировки, обусловленной срабатыванием перехода *Click Publish Catalog Data*. в сети сценария (рис. 3).

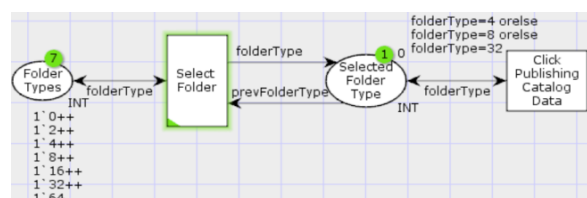


Рис. 3. Фрагмент СП «Экспорт каталога»

В случае использования стратегии исчерпывающего поиска состояний СП с учетом недетерминизма выбора маркеров и переходов



для срабатывания будут перебраны все семь возможных значений маркеров в позиции *Selected Folder Type*.

Результат поиска инвертированной СП совпадает с результатом исчерпывающего поиска состояний СП. Преимуществом инвертированной СП является то, что множество допустимых значений переменной *folderType* в области видимости перехода *clickPublishCatalogData* сразу ограничивается значениями 4, 8 и 32 (согласно охранному выражению). Таким образом, количество рассматриваемых вариантов сразу уменьшается с семи до трех.

При наличии в рассматриваемой для запрошенной операции подсети нескольких переходов с охранными выражениями количество ветвей, которые необходимо рассмотреть, равно произведению всех возможных вариаций, в том числе значений переменных на охранных выражениях. Таким образом, вычислительная сложность поиска инвертированной СП значительно ниже исчерпывающего перебора.

Однако аксиомы инверсии, во-первых, не являются частью стандартной модели СП, во-вторых, для раскрашенных СП, которые используются в качестве модели представления сценария, они строятся на ряде допущений, касающихся областей определения маркеров и вида выражений на дугах и переходах. В [6] первая проблема была решена путем разработки внешнего по отношению к модели СП способа описания и механизма интерпретации данных аксиом на объектно-ориентированном языке программирования C#. Но при таком подходе вновь возникает проблема «двуязычия»: с одной стороны, для описания СП используются декларации языка XML, с другой – процедурный язык для описания аксиом инверсии и зависящего от этих аксиом механизма их интерпретации. Необходимость подстраивать механизм интерпретации под изменяющееся количество и формулировки аксиом является главным недостатком данного подхода, осложняющим встраивание СКП в различные САПР.

В связи с этим целью данного исследования является обеспечение необходимой гибкости системы контекстной помощи за счет использования единой модели представления знаний о сценарии действий пользователя, аксиом инверсии, определенных на модели сценария, и унифицированного механизма интерпретации этих аксиом в контексте модели сценария.

**Материалы и методы.** В рамках данного исследования предлагается использовать язык логического программирования PROLOG<sup>3</sup> в качестве средства описания СП, так как именно логическая модель адекватно учитывает декларативную и процедурную семантику СП.

Развернутая аргументация этого тезиса приведена ниже.

Для иллюстрации семантики СП рассмотрим фрагмент модели (рис. 3) с текущей разметкой со значением 32 в позиции *Selected Folder Type*.

1. С точки зрения декларативной семантики модель СП – граф  $(P, T, F, M, \mu)$ , устанавливающий отношение  $F \subseteq (P \times T) \cup (T \times P)$  [4] – множество дуг, которые связывают элементы из множеств позиций  $P$  и переходов  $T$ , и определяющий функцию отображения множества маркеров на множество позиций  $\mu: M \rightarrow P$  [4].

Для рассматриваемого примера:

- $P = \{\text{Folder Types}, \text{Selected Folder Type}\};$
- $T = \{\text{Select Folder}, \text{Click Publish Catalog Data}\};$
- $F =$ 
  - $\{(\text{Folder Types}, \text{Select Folder}),$
  - $(\text{Select Folder}, \text{Folder Types}),$
  - $(\text{Select Folder}, \text{Selected Folder Type}),$
  - $(\text{Selected Folder Type}, \text{Select Folder}),$
  - $(\text{Selected Folder Type}, \text{Click Publish Catalog Data}),$
  - $(\text{Click Publish Catalog Data}, \text{Selected Folder Type})\};$
- $M = \{0, 2, 4, 8, 16, 32, 32, 64\};$
- $\mu = \{(\text{Folder Types}, \{0, 2, 4, 8, 16, 32, 64\}),$   
 $(\text{Selected Folder Type}, \{32\})\}.$

2. С точки зрения процедурной семантики СП могут быть описаны следующим образом [4]:

а) переход  $t \in T$  активен, если во всех входных позициях  $p \in P \mid (p, t) \in F$  есть маркеры  $m \in M$ , значение которых удовлетворяет выражениям на дугах и охранным выражениям переходов;

б) если переход  $t \in T$  активен из состояния  $M_1$ , его срабатывание переведет СП в состояние  $M_2$ . Это можно обозначить как  $M_1 \xrightarrow{t} M_2$ ;

с) состояние  $M_n$  достижимо из состояния  $M_1$ , если существует последовательность переходов  $\sigma = \{t_1 t_2 \dots t_n\}$  такая, что  $M_1 \xrightarrow{t_1} M_2 \xrightarrow{t_2} \dots \xrightarrow{t_n} M_n$ . Иными словами  $M_1 \xrightarrow{\sigma} M_n$ ;

д) построение всех возможных последовательностей срабатываний переходов при анализе достижимости  $M_1 \xrightarrow{\sigma} M_n$  базируется на использовании стратегии исчерпывающего поиска состояний СП. В общем случае выбор перехода СП для активации не детерминирован.

Для логических языков программирования, в частности для PROLOG, также характерно сочетание декларативной и процедурной семантик.

<sup>3</sup> ISO/IEC 13211-1:1995 /Cor 3:2017 Information technology – Programming languages – Prolog – Part 1: General core.

**Декларативная семантика** логической программы (ЛП) – это описание отношений (предикатов) между объектами (термами). Поэтому структура и состояние СП – отношения между объектами конкретной предметной области – естественно описываются в виде утверждений для предикатов логического языка.

Например, фрагмент СП, представленный на рис. 3, может быть описан в PROLOG следующим образом:

Позиции (Название, Маркировка):

- *place(selectedFolderType, [32]).*
- *place(folderTypes, [0,2,4,8,16,32,64]).*

Переходы (Название, Входные дуги, Выходные дуги, Переменные в области видимости, Переменные в охранном выражении):

- *transition(selectFolder).*
- *transition(clickPublishCatalogData).*

Дуги (ID, Позиция, Переход, Направление, Переменная):

- *arc("ID10", selectedFolderType, clickPublishCatalogData, 1, folderType).*
- *arc("ID11", selectedFolderType, clickPublishCatalogData, -1, folderType).*
- *arc("ID14", folderTypes, selectFolder, -1, folderType).*
- *arc("ID15", folderTypes, selectFolder, 1, folderType).*
- *arc("ID16", selectedFolderType, selectFolder, -1, folderType).*
- *arc("ID17", selectedFolderType, selectFolder, 1, prevFolderType).*

Таким образом, отношения СП естественным образом описываются в формате утверждений PROLOG.

**Процедурная семантика** логической программы – это аксиомы метода резолюций, определяющие смену состояний управления (аксиомы выбора и решения вызова) и данных (аксиомы унификации) в процессе выполнения запроса к ЛП. Построенная на этих аксиомах машина вывода использует универсальную для любых предикатов логической программы стратегию исчерпывающего поиска для построения траектории управления и универсальную для любых термов логической программы процедуры связывания и освобождения данных, реализующей аксиомы унификации. Так как статус активности переходов является частным случаем состояния управления, а текущая разметка СП – это частный случай состояния связанных данных, применение универсальной стратегии исчерпывающего поиска для анализа динамики СП является обоснованным.

Например, предикаты проверки активности перехода могут быть реализованы следующим образом:

```
may_be_fired(Transition) : –
    transition(Transition, InputList),
    contains_tokens(InputList).
```

Иными словами, переход активен, если по всем входным дугам (*InputList*) есть необходимые маркеры.

На основании описанной топологии СП, а также правил ее поведения возможен поиск цепочек действий для перехода из текущего состояния в запрошенное. При этом обработка будет производиться с учетом недетерминизма выбора перехода для активации и маркеров, так как недетерминизм решения вызовов – встроенный механизм пролога. Например, при срабатывании перехода *Select Folder* выбор маркера из позиции *Folder Types* недетерминирован, т.е. переменной *folderType* может быть присвоено любое значение из множества  $\mu(folderType)$ .

Таким образом, СП естественным образом описываются средствами логического языка программирования PROLOG. Кроме того, использование логического языка для описания СП обеспечивает необходимую гибкость в реализации аксиом инверсии [7], так как аксиомы метода резолюций универсально применимы к любой логической модели. Следовательно, добавление в эту модель аксиом инверсии не повлечет за собой изменения машины вывода.

Еще одним достоинством данного подхода является возможность быстрой интеграции машины вывода в программные приложения, написанные на объектно-ориентированных языках программирования. Например, свободно распространяемый проект с открытым исходным кодом CSharpProlog<sup>4</sup> позволяет использовать программы на языке PROLOG в приложениях на языке с#.

**Результаты.** Основными результатами данного исследования являются:

1. **Предикатная модель аксиом инверсии.** Запрос на поиск цепочек переходов предполагает последовательное движение по инвертированным дугам из позиций целевой разметки в позиции текущей разметки. На каждом шаге топологического анализа возникает виртуальная разметка  $M_n$  такая, что  $M_1 \xrightarrow{\sigma} M_n$ , где  $\sigma$  – список переходов, активация которых переводит СП из текущего состояния в состояние  $M_n$ . Анализ завершается, когда целевая разметка  $M_G \subseteq M_n$ . Динамическая траектория выполнения запроса представляет собой И/ИЛИ дерево инверсных срабатываний (рис. 6), такое, что активация переходов снизу вверх (с учетом параллельных ветвей, связанных условием И) приводит к целевой разметке.

2. **Метод линеаризация дерева для генерации множества вариантов цепочек дей-**

<sup>4</sup> CSharpProlog: [библиотека классов]. – URL: <https://github.com/jsakamoto/CSharpProlog/> (дата обращения: 28.12.2022).

ствий. Под линеаризацией И/ИЛИ дерева понимается отображение квазипараллельных действий (срабатываний переходов СП) в линейную структуру (цепочку).

Для сформулированных аксиом приняты следующие ограничения:

1) СП – плоская. Представление иерархической СП в предикатной форме необоснованно усложнило бы формирование логической программы. При инверсном анализе подстановочные переходы могут быть рассмотрены как обычные. При необходимости внутренняя структура такого перехода может быть рассмотрена отдельно;

2) в охранных выражениях допустимо использовать операторы «=», «И», «ИЛИ»;

3) в выражениях на дугах из позиции в переход допускается только одна переменная для типизированных позиций.

Ограничения второе и третье связаны с тем, что СКП не ограничивает действия пользователя, а только регистрирует их выполнение.

Аксиомы инверсии функционально делятся на 3 группы. Аксиомы первой группы определяют условия получения маркера из позиции. Аксиомы второй группы определяют условия срабатывания перехода, ссылаясь при этом на аксиомы первой группы. Аксиомы третьей группы определяют варианты связывания переменных на дугах СП в процессе виртуальной разметки позиций. При записи этих аксиом будем использовать следующие обозначения:

unit – черно-белый маркер;  
any – любое типизированное значение;  
Var – название переменной;  
empty – пустое выражение на дуге;  
[] – пустой список;  
[P|C] – разделение списка на первый элемент и остальные.

Аксиомы первой группы представлены следующими утверждениями:

1. Черно-белый маркер может быть взят из позиции  $P$ , если маркировка этой позиции не пуста:

получить\_маркер( $P, unit$ ): –  
маркировка( $P, M$ ),  $M \neq \emptyset$ .

2. Типизированный маркер может быть взят из позиции  $P$ , если маркировка этой позиции содержит маркер с запрошенным значением:

получить\_маркер( $P, Value$ ): –  
маркировка( $P, M$ ),  $Value \in M$ .

3. Типизированный маркер может быть взят из позиции  $P$ , если по одной из входных дуг в нее может быть доставлен маркер с запрошенным значением:

получить\_маркер( $P, Value$ ): –  
дуга( $T, P, Var$ ),  
связать( $T, Var, Value$ ),  
активировать\_переход( $T$ ).

4. Типизированный маркер может быть взят из позиции  $P$ , если маркировка этой позиции не пуста:

получить\_маркер( $P, any$ ): –  
маркировка( $P, M$ ),  $M \neq \emptyset$ .

5. Типизированный маркер может быть взят из позиции  $P$ , если он может быть помещен туда в результате срабатывания перехода:

получить\_маркер( $P, any$ ): –  
дуга( $T, P, Var$ ),  
связать( $T, Var, any$ ),  
активировать\_переход( $T$ ).

Аксиомы связывания переменных в области видимости перехода представлены следующими утверждениями:

1. Переменные в области определения перехода  $T$  могут быть связаны со значениями, если каждая переменная в области видимости может быть связана со значением:

связать( $T, Var, Value$ ): –  
переход( $T, Vars, GuardVars$ ),  
связать\_переменные( $T, Vars, VarValues$ ,  
 $GuardVars, [(Var, Value)]$ ).

2. Список переменных может быть связан со значениями, если первая переменная участвует в охранным выражении, запрошенное для нее значение удовлетворяет охранным выражению и оставшийся список переменных может быть связан со значениями:

связать\_переменные( $T, [Var|Vars]$ ,  
 $VarValues, GuardVars$ ,  
 $RequestedValues$ ): –  
 $Var \in GuardVars$ ,  
 $(Var, Value) \in RequestedValues$ ,  
охранное\_выражение( $T, Var, Value$ ),  
вставить( $((Var, Value), VarValues)$ ),  
связать\_переменные( $T, Vars$ ,  
 $GuardVars$ ,  
 $RequestedValues$ ).

3. Переменные списка могут быть связаны значениями, если первая переменная может быть связана значением в соответствии с охранным выражением и переменные в оставшейся части списка также могут быть связаны со значениями:

связать\_переменные( $T, [Var|Vars]$ ,  
 $GuardVars, RequestedValues$ ): –  
 $Var \in GuardVars$ ,  
охранное\_выражение( $T, Var, Value$ ),  
вставить( $((Var, Value), VarValues)$ ),  
связать\_переменные( $T, Vars$ ,  
 $GuardVars$ ,  
 $RequestedValues$ ).

4. Переменные списка могут быть связаны значениями, если первая переменная может быть связана запрошенным значением и переменные в оставшейся части списка также могут быть связаны со значениями:

связать\_переменные( $T, [Var|Vars],$   
 $GuardVars, RequestedValues$ ): –  
 $(Var, Value) \in RequestedValues,$   
 вставить( $(Var, Value), VarValues$ ),  
 связать\_переменные( $T, Vars,$   
 $GuardVars,$   
 $RequestedValues$ ).

5. Список переменных может быть связан со значениями, если для первой переменной не запрошено значение, тогда она связывается со значением *any* и оставшийся список переменных может быть связан со значениями:

связать\_переменные( $T, [Var|Vars],$   
 $GuardVars, RequestedValues$ ): –  
 вставить( $(Var, any), VarValues$ ),  
 связать\_переменные( $T, Vars,$   
 $GuardVars,$   
 $RequestedValues$ ).

Аксиомы активации переходов представлены следующими утверждениями:

1. Переход  $T$  может быть активирован, если можно взять маркеры из всех входных позиций с учетом запрошенных значений переменных:

активировать\_переход( $T, VarValues$ ): –  
 переход( $T, InputArcs$ ),  
 получить\_маркеры\_по\_дугам( $InputArcs,$   
 $VarValues$ ).

2. По дугам могут быть взяты маркеры с запрошенными значениями переменных, если:

- 1) первая дуга связана с черно-белой позицией и из нее можно получить черно-белый маркер;
- 2) по остальным дугам могут быть взяты маркеры:

получить\_маркеры\_по\_дугам( $[Arc|Arcs],$   
 $VarValues$ ): –  
 дуга( $Arc, P, T, empty$ ),  
 получить\_маркер( $P, unit$ ),  
 получить\_маркеры\_по\_дугам( $Arcs,$   
 $VarValues$ ).

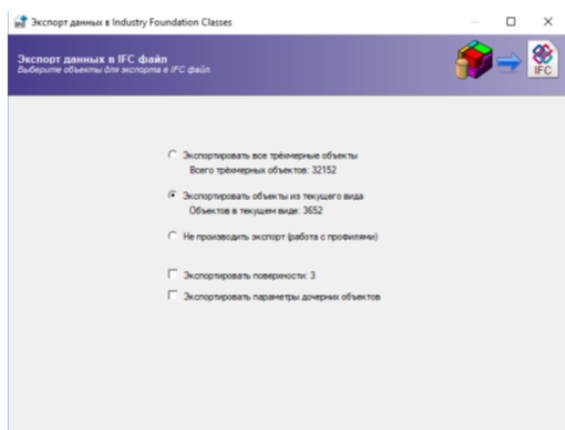
3. По дугам могут быть взяты маркеры с запрошенными значениями переменных, если:

- 1) первая дуга связана с типизированной позицией и из нее можно получить маркер со значением в соответствии с выражением на дуге;
- 2) по остальным дугам могут быть взяты маркеры:

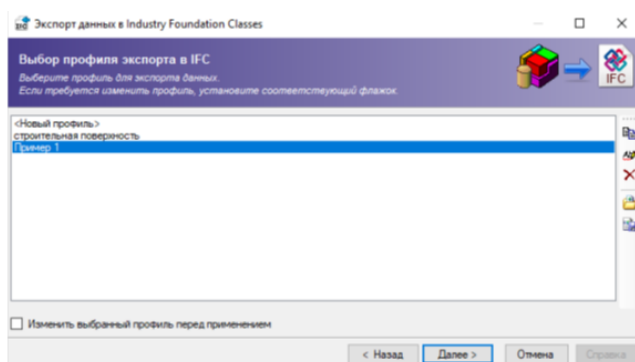
получить\_маркеры\_по\_дугам( $[Arc|Arcs],$   
 $VarValues$ ): –  
 дуга( $Arc, P, T, Var$ ),  
 $(Var, Value) \in VarValues,$   
 получить\_маркер( $P, Value$ ),  
 получить\_маркеры\_по\_дугам( $Arcs,$   
 $VarValues$ ).

В процессе выполнения запроса на построение цепочек рекомендованных действий формируется динамическая траектория выполнения запроса в виде дерева, дуги которого могут быть объединены связками «И»–«ИЛИ». Связка «И» отражает условие наличия маркеров во всех входных позициях активного перехода. Связка «ИЛИ» отражает альтернативные условия маркировки позиции в результате срабатывания любого из переходов, для которых она является выходной. В МиА у пользователя есть возможность экспортировать объекты в формате IFC. В процессе выполнения цепочки действий, полученной в результате запроса КП «Экспорт в IFC», пользователь может выбрать объекты для экспорта (рис. 4,а) или осуществить работу с профилями экспорта (редактирование, добавление и т.д.) (рис. 4,б). И/ИЛИ дерево для соответствующей СП (рис. 5) приведено на рис. 6.

Для удобства сопоставления СП и построенного на нем дерева И/ИЛИ для запроса «Экспорт в IFC» его узлы изображены в соответствии со стандартом визуализации СП – позиции представлены в виде овалов, переходы – в виде прямоугольников. Ветви, объединенные условием «И», соединены дугой у корня.



а)



б)

Рис. 4. Экспорт в IFC: а – выбор параметра экспорта; б – работа с профилями экспорта

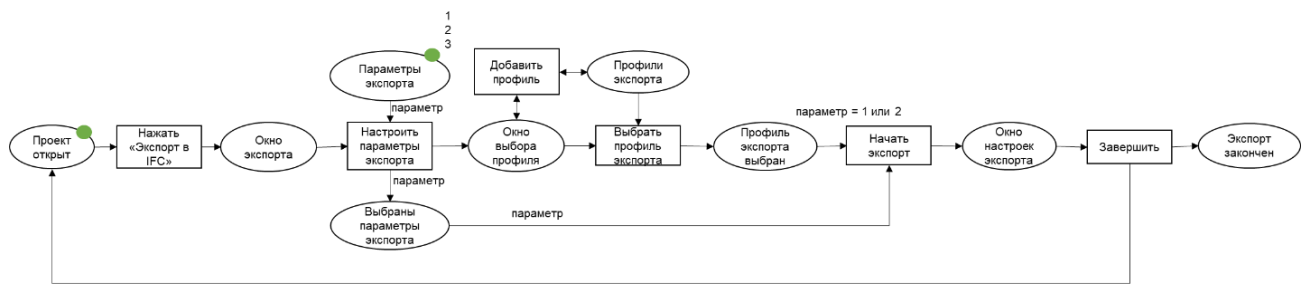


Рис. 5. СП «Экспорт в IFC»

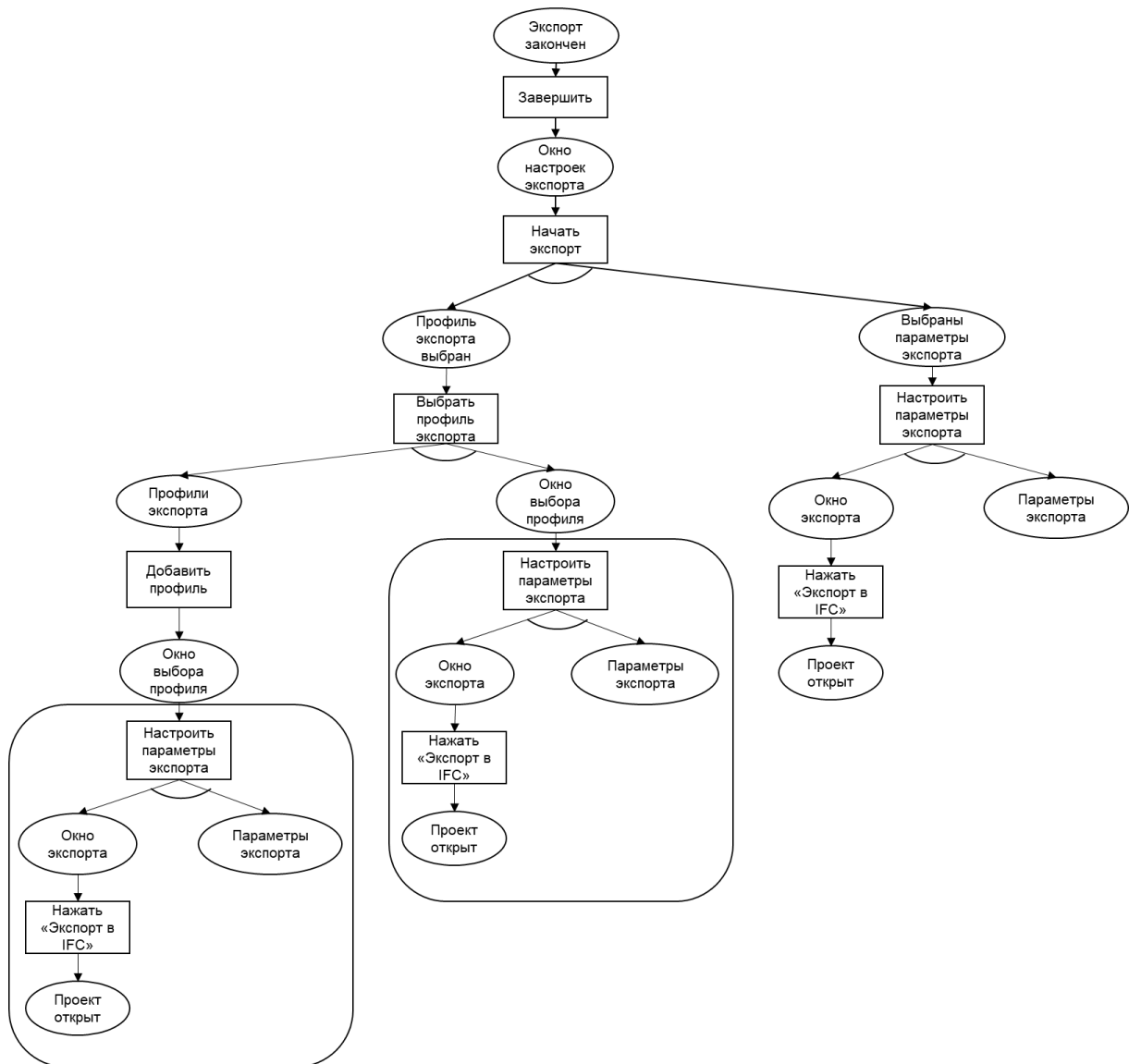


Рис. 6. И/ИЛИ дерево

При построении данного дерева в момент рассмотрения перехода «Выбрать профиль экспорта» две подветви объединяются с учетом того, что множество переходов в одной является подмножеством переходов в другой (выделены скругленными прямоугольниками). Результат объединения представлен на рис. 7,а. Далее объединяются две ветви при рассмотрении перехода «Начать экспорт», в результате чего образуется одна цепочка действий (рис. 7,б).

Так как недетерминированный выбор перехода для активации осуществляется за счет внутренних механизмов PROLOG, то осуществлять отдельно необходимо только объединение квазипараллельных веток. При описании аксиом попарного объединения цепочек переходов используются следующие обозначения:

- $\sigma_1$  – список переходов из первой подветви;
- $\sigma_2$  – список переходов из второй подветви;
- $\sigma$  – объединенная цепочка переходов.

Ниже приведены аксиомы попарного объединения:

$\sigma = \sigma_2$ , если  $\sigma_1 = \emptyset$ ;  
 $\sigma = \sigma_1$ , если  $\sigma_2 = \emptyset$ ;  
 $\sigma = \sigma_2$  или  $\sigma = \sigma_1 \cup \sigma_2$  или  $\sigma = \sigma_2 \cup \sigma_1$ ,  
 если  $\sigma_1 \subseteq \sigma_2$ ;  
 $\sigma = \sigma_1$  или  $\sigma = \sigma_1 \cup \sigma_2$  или  $\sigma = \sigma_2 \cup \sigma_1$ ,  
 если  $\sigma_2 \subseteq \sigma_1$ ;  
 $\sigma = \sigma_1 \cup \sigma_2$  или  $\sigma = \sigma_2 \cup \sigma_1$ , если  $\sigma_2 \not\subseteq \sigma_1$   
 и  $\sigma_1 \not\subseteq \sigma_2$ .

С помощью CSharpProlog возможна организация СКП, представленная на рис. 8. По запросу способа выполнения операции «Экспорт в IFC» СКП генерирует альтернативные цепочки возможных действий. Каждый из элементов цепочки представляет собой ссылку на описание способа выполнения элементарного действия в файле справки МиА. В данном примере использованы отекстовки из файла конфигурации, которые могут изменяться в зависимости от значения переменной при активации перехода.

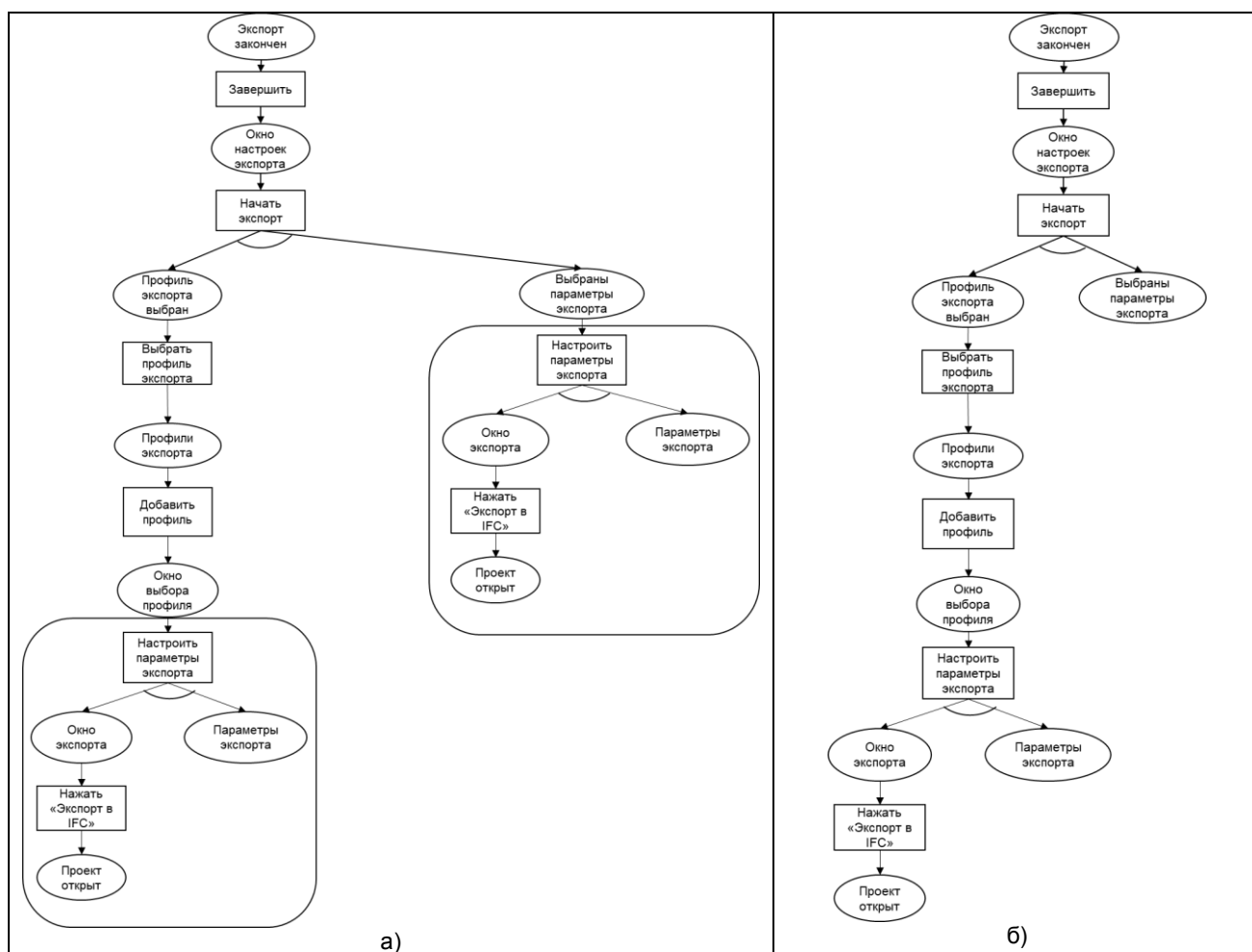


Рис. 7. Этапы объединения ветвей И/ИЛИ дерева: а – И/ИЛИ дерево после объединения ветвей; б – финальная цепочка действий

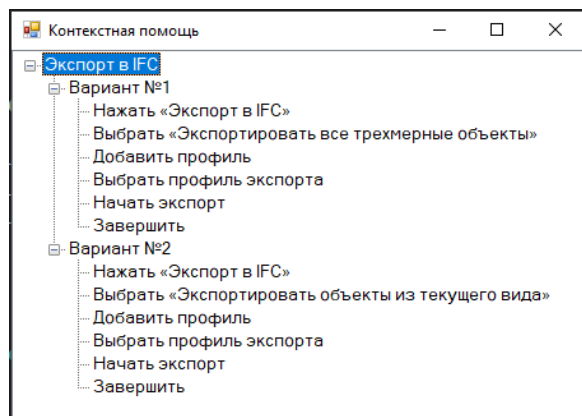


Рис. 8. Окно контекстной помощи

Двойной клик по узлу представленного дерева приведет к открытию файла справки с нужным позиционированием.

**Выводы.** Экспериментальное исследование программной реализации предложенной единой модели представления знаний о сценарии действий пользователя, аксиом инверсии, определенных на модели сценария, и унифицированного механизма интерпретации этих аксиом в контексте модели сценария обеспечивает возможность организации системы пошаговой контекстной помощи (СПКП). Данный подход позволяет добавлять и редактировать аксиомы инверсии без изменения машины вывода. Таким образом, цель исследования –

обеспечение необходимой гибкости системы контекстной помощи – достигнута.

Достоверность результатов исследования подтверждается как обоснованным выбором апробированных инструментов (СП для представления моделей сценариев действий пользователя, логический язык программирования PROLOG для предикатной формы представления СП и аксиом инверсии), так и совпадением результата их применения с ожидаемым.

Полученные результаты могут быть использованы в процессе разработки и поддержки программных продуктов, в частности САПР, в качестве ядра СПКП. Данные приложения должны информировать СПКП о действиях пользователя, в результате чего будет обеспечено актуальное состояние СП. СПКП реализована в виде динамически подключаемой библиотеки (.dll) и позволяет использовать как встроенный пользовательский оконный интерфейс, так и методы генерации цепочек действий по запросу пользователя для отображения в любом другом виде. Программный интерфейс данной библиотеки предоставляет методы информирования о действиях пользователя (для активации переходов), инициализации начальной маркировки и запроса пошаговой контекстной помощи. Использование логической программы в качестве ядра системы обеспечено библиотекой CSharpProlog.

Дальнейшим направлением научного исследования является расширение аксиоматики инверсии за счет поддержки более широкого спектра маркеров, сложных арифметических и логических выражений на дугах и в охранных выражениях СП. Данные изменения позволят более полно использовать механизмы СП и упростить их структуру за счет более полного использования ограничений в виде охранных выражений и выражений на дугах.

#### Список литературы

1. CADLib Модель и Архив // CADmaster. – 2020. – № 2(93). – С. 70–74.

2. Crowley R., Medvedeva O. An intelligent tutoring system for visual classification problem solving // *Artificial Intelligence in Medicine*. – 2006. – No. 6. – P. 85–117.

3. Котов В.Е. Сети Петри. – М.: Наука, 1984. – 160 с.

4. Van der Aalst W.M.P. The application of Petri nets to workflow management // *Journal of circuits, systems, and computers*. – 1998. – Vol. 8, No. 01. – P. 21–66.

5. Пантелеев Е.Р., Мукучан А.А. Модель и метод построения контекстной помощи для отработки навыков оператора энергоблока на тренажере // *Вестник ИГЭУ*. – 2021. – Вып. 3. – С. 66–75. DOI: 10.17588/2072-2672.2021.3.066-075.

6. Метод формирования контекстной помощи пользователю компьютерного приложения в процессе решения прикладной задачи / Е.Р. Пантелеев, А.А. Мукучан, М.А. Кузнецов, А.Л. Алыкова // *Вестник ИГЭУ*. – 2020. – Вып. 5. – С. 64–76. DOI: 10.17588/2072-2672.2020.5.064-076.

#### References

1. CADLib Model' i Arkhiv [Model and Archive]. *CADmaster*, 2020, № 2(93), pp. 70–74.

2. Crowley, R., Medvedeva, O. An intelligent tutoring system for visual classification problem solving. *Artificial Intelligence in Medicine*, 2006, no. 6, pp. 85–117.

3. Kotov, V.E. *Seti Petri* [Petri nets]. Moscow: Nauka, 1984. 160 p.

4. Van der Aalst, W.M.P. The application of Petri nets to workflow management. *Journal of circuits, systems, and computers*, 1998, issue 8, no. 01, pp. 21–66.

5. Panteleev, E.R., Mukuchyan, A.A. Model' i metod postroeniya kontekstnoy pomoshchi dlya otrabotki navykov operatora energobloka na trenazhere [Model and method of contextual help to develop skills of a power unit operator using training simulator]. *Vestnik IGEU*, 2021, issue 3, pp. 66–75. DOI: 10.17588/2072-2672.2021.3.066-075.

6. Panteleev, E.R., Mukuchyan, A.A., Kuznetsov, M.A., Alykova, A.L. Metod formirovaniya kontekstnoy pomoshchi pol'zovatelyu komp'yuternogo prilozheniya v protsesse resheniya prikladnoy zadachi [Method of context-dependent assistance for software user solving an applied task]. *Vestnik IGEU*, 2020, issue 5, pp. 64–76, DOI: 10.17588/2072-2672.2020.5.064-076.



## ТРЕБОВАНИЯ К ОФОРМЛЕНИЮ СТАТЕЙ В ЖУРНАЛЕ «ВЕСТНИК ИВАНОВСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА»

В журнал принимаются рукописи в электронном виде. Средний объем статьи – 6 страниц. Статьи сопровождаются двумя рецензиями – кафедральной (с места работы автора с указанием даты обсуждения и номера протокола) и внешней.

### **Правила оформления статьи.**

Обязательно указывается УДК.

*Фамилия, имя, отчество* авторов полностью, место работы, должность, звание, ученая степень, страна и город, контактная информация (на русском и английском языках) располагаются по ширине страницы.

*Название статьи* (на русском и английском языках), *авторское резюме* (на русском и английском языках), ключевые слова (на русском и английском языках) располагаются по ширине страницы.

*Основной текст* располагается **в две колонки**, используется шрифт **Arial**, размер шрифта – **10**.

*Графики и рисунки* должны быть выполнены на компьютере, желательно в программах векторной графики либо в Word. Надписей на рисунках (кроме основополагающих понятий) быть не должно, они обозначаются цифрами и далее расшифровываются, а все расшифровки выносятся под рисунок, размер шрифта – 9 (шрифт **Arial**). Рисунки, так же, как и графики, должны быть **только черными**, любые другие цвета недопустимы.

*Формулы* набираются в редакторе формул Math Type (шрифт **Arial**), размер шрифта – **10**, располагаются в тексте в одну колонку.

В конце статьи размещаются пристатейные библиографические списки (на русском языке и References).

Примеры оформления авторского резюме и библиографических списков см. на сайте:

<http://vestnik.ispu.ru/ru/node/14>

*Редакционно-издательский отдел оставляет за собой право на редактирование статей.*

---

---

**ВЕСТНИК ИВАНОВСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА**

**Выпуск 3**

Издание зарегистрировано в Федеральной службе по надзору в сфере связи,  
информационных технологий и массовых коммуникаций.  
Свидетельство о регистрации ПИ № ФС77-82616 от 18.01.2022 г.

Подписано в печать 07.06.2023. Выход в свет 30.06.2023. Формат 60x84 <sup>1</sup>/<sub>8</sub>.  
Усл. печ. л. 9,3. Уч.-изд. л. 10,01. Тираж 100 экз. Цена свободная. Заказ

Адрес редакции и издательства: Ивановский государственный энергетический университет,  
153003, Ивановская область, г. Иваново, ул. Рабфаковская, 34.  
Типография ООО «ПресСто»: 153025, Ивановская обл., г. Иваново, ул. Дзержинского, 39, строение 8.