

## МЕТОДИКА И СРЕДСТВА ВСЕРЕЖИМНОГО АНАЛИЗА УСТОЙЧИВОСТИ УЗЛОВ СИНХРОННОЙ ДВИГАТЕЛЬНОЙ НАГРУЗКИ И УСЛОВИЙ РАБОТЫ ОБОРУДОВАНИЯ СИСТЕМ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ

**В.А. Сулайманова**

ORCID: 0000-0001-7430-7492 e-mail: [venera20@tpu.ru](mailto:venera20@tpu.ru)

Томский политехнический университет

*Томск, Россия*

**А.С. Гусев**

ORCID: 0000-0003-0814-2356 e-mail: [gusev\\_as@tpu.ru](mailto:gusev_as@tpu.ru)

Томский политехнический университет

*Томск, Россия*

**Р.А. Уфа**

ORCID: 0000-0002-8975-2748 e-mail: [hecn@tpu.ru](mailto:hecn@tpu.ru)

Томский политехнический университет

*Томск, Россия*

**С.А. Литвинов**

e-mail: [litvinovsa95@mail.ru](mailto:litvinovsa95@mail.ru)

ООО «Газпром добыча Ямбург»

*Новый Уренгой, Россия*

Предложены средства всережимного анализа устойчивости узлов двигательной нагрузки и условий работы оборудования систем электроснабжения на основе комплексного подхода к моделированию. Данный подход объединяет методы математического и физического моделирования, а также способ непрерывного неявного параллельного интегрирования дифференциальных уравнений. Представлена методика всережимного анализа устойчивости узлов двигательной нагрузки и условий работы оборудования, необходимая для проведения исследований процессов функционирования двигательной нагрузки и другого оборудования систем электроснабжения, участвующего в обеспечении надежной работы двигателей. Проведен всережимный анализ устойчивости узлов синхронной двигательной нагрузки и условий работы оборудования систем электроснабжения в соответствии с представленной методикой. Предложенные средства и методика обеспечивают получение информации о процессах торможения, успешного и неуспешного самозапуска синхронных двигателей, что позволяет выявлять конкретные причины нарушения устойчивости, условия работы оборудования и меры по сохранению устойчивой работы. Представ-

ленные результаты исследований устойчивости на примерах узлов синхронной двигательной нагрузки системы электроснабжения Томского нефтехимического комбината демонстрируют воспроизведение процессов и режимов в синхронных двигателях и другом оборудовании, а также необходимость применения конкретных мер для сохранения надежной работы синхронных двигателей и другого оборудования систем электроснабжения.

**Ключевые слова:** достоверность, моделирование, самозапуск, синхронные двигатели, системы электроснабжения, устойчивость узлов двигательной нагрузки.

**Для цитирования:** Сулайманова В.А., Гусев А.С., Уфа Р.А., Литвинов С.А. Методика и средства всережимного анализа устойчивости узлов синхронной двигательной нагрузки и условия работы оборудования систем электроснабжения // Интеллектуальная Электротехника. 2022. № 4. С. 112-125.  
DOI: 10.46960/2658-6754\_2022\_4\_112

## **METHODOLOGY AND TOOLS OF COMPREHENSIVE ANALYSIS OF SYNCHRONOUS MOTOR LOAD NODES STABILITY AND EQUIPMENT OPERATION CONDITION OF POWER SUPPLY SYSTEMS**

**V.A. Sulaymanova**

ORCID: **0000-0001-7430-7492** e-mail: **venera20@tpu.ru**  
Tomsk Polytechnic University  
*Tomsk, Russia*

**A.S. Gusev**

ORCID: **0000-0003-0814-2356** e-mail: **gusev\_as@tpu.ru**  
Tomsk Polytechnic University  
*Tomsk, Russia*

**R.A. Ufa**

ORCID: **0000-0002-8975-2748** e-mail: **hecn@tpu.ru**  
Tomsk Polytechnic University  
*Tomsk, Russia*

**S.A. Litvinov**

e-mail: **litvinovsa95@mail.ru**  
LLC «Gazprom Dobycha Yamburg»  
*Novy Urengoy, Russia*

**Abstract.** The behavior of synchronous motor load nodes of power supply systems in various operating modes affects the efficiency and safety of the functioning of industrial enterprises. Therefore, a reliable analysis of the processes in synchronous motors, taking into account the driven mechanisms, relay protection and automation, as well as in other equipment of power supply systems that occur with various short-term power supply failures, is relevant task. In this paper the tools of the comprehensive analysis of synchronous motor load nodes stability and equipment operating condition based on an integrated approach to simulation are proposed. This approach combines methods of mathematical and physical simulation, as well as unlimited implicit parallel integration method of differential equation systems. The methodology of the comprehensive analysis of synchronous motor load nodes stability and equipment operating condition is presented which is necessary for research of the processes of functioning of the motor load and other equipment involved in ensuring reliable operation of the motors.

The purpose: comprehensive analysis of synchronous motor load nodes stability and equipment operating condition of power supply systems in accordance with the presented methodology. The practical significance: the proposed tools and methodology provide sufficiently complete and reliable information about the processes of braking, successful and unsuccessful self-start of synchronous motors, which allows to identify specific causes of stability violations, operating conditions of equipment and measures to maintain stable operation. The presented results of the stability research using examples of synchronous motor load nodes of the Tomsk petrochemical combine demonstrate the reproduction of processes and modes in synchronous motors and other equipment, as well as the need to apply specific measures to preserve the reliable operation of synchronous motors and other equipment of power supply systems.

**Keywords:** reliability, simulation, self-start, synchronous motors, power supply system, motor load nodes stability.

**For citation:** V.A. Sulaymanova, A.S. Gusev, R.A. Ufa and S.A. Litvinov, "Methodology and tools of comprehensive analysis of synchronous motor load nodes stability and equipment operation condition of power supply systems", *Smart Electrical Engineering*, no. 4, pp. 112-125, 2022. DOI: 10.46960/2658-6754\_2022\_4\_112

## I. Введение

Применяемые в настоящее время методики и различные программно-вычислительные комплексы (ПВК) расчета режимов и процессов в электроэнергетических системах (ЭЭС) при проектировании, исследовании и эксплуатации для анализа устойчивости узлов двигательной нагрузки часто не обеспечивают необходимой полноты и достоверности данного анализа. Вместе с тем, данный анализ в значительной мере определяет технологическую, экономическую эффективность и нередко безопасность функционирования предприятий, особенно нефте-, газо-, химической и энергетической отраслей [1, 2]. Главной причиной этого являются неизбежно используемые во всех современных ПВК декомпозиция режимов и процессов, а также существенные упрощения математических моделей оборудования систем

электрооборудования (СЭС) ЭЭС. Согласно теории методов дискретизации, для обыкновенных дифференциальных уравнений [3-6] применение декомпозиции и упрощений обусловлены ограничительными условиями их применимости. Кроме этого, неотъемлемым является неопределимая методическая ошибка, присущая численным методам интегрирования дифференциальных уравнений [3]. Все это указывает на проблему полноты и достоверности получаемой с помощью ПВК информации о процессах в двигателях, другом оборудовании и СЭС ЭЭС в целом, а соответственно выполняемого на основе этой информации указанного анализа.

Для решения обозначенной проблемы предлагается комплексный подход к моделированию, позволяющий применять эффективные методы, способы и средства, обеспечивающие достаточно полное воспроизведение процессов на неограниченном интервале в двигателях и СЭС ЭЭС в целом при различных нормальных и аномальных режимах работы.

## **II. Средства всережимного анализа устойчивости узлов синхронной двигательной нагрузки и условий работы оборудования систем электрооборудования**

Комплексный подход объединяет аналоговое, цифровое и физическое моделирование, которые в совокупности исключают следующие ограничения, влияющие на надежное решение проблемы.

1. Применение всережимных бездекомпозиционных моделей, достаточно полно и достоверно описывающих спектр нормальных, аномальных квазиустановившихся и переходных процессов в двигателях с учетом приводимых механизмов (ПМ), релейной защиты и автоматики (РЗА) в СЭС ЭЭС.

2. Способ методически точного непрерывного неявного параллельного интегрирования систем дифференциальных уравнений математически моделируемого оборудования на неограниченном интервале в реальном времени.

3. Естественное взаимодействие моделируемого оборудования и адекватное воспроизведение всевозможных коммутаций осуществляется на физическом уровне.

4. Цифровой уровень используется для управления параметрами, настройками, состоянием оборудования и информационного взаимодействия в среде моделирования.

В соответствии с данным подходом, создан экспериментальный образец – Всережимный моделирующий комплекс реального времени (ВМК РВ) ЭЭС [7, 8], прошедший опытную эксплуатацию в Тюменской и Томской ЭЭС. Данный комплекс обеспечивает:

- достаточно полное и достоверное воспроизведение в реальном времени и на неограниченном интервале непрерывного спектра нормальных,

анормальных квазиустановившихся и переходных процессов в электрических машинах, другом оборудовании и СЭС ЭЭС в целом;

- решение задач исследования, проектирования и эксплуатации, включая анализ устойчивости узлов двигательной нагрузки и условий работы оборудования СЭС.

Основу ВМК РВ ЭЭС составляют совокупность специализированных процессоров (СП), которые специализированы по виду моделируемого силового трехфазного оборудования (электрическая машина [9], трансформатор, линия электропередачи и др.), и информационно-управляющая система:

- СП обеспечивают моделирование процессов, протекающих в оборудовании и СЭС ЭЭС в целом и методически точное решение на неограниченном интервале в реальном времени систем дифференциальных уравнений;
- коммутатор трехфазных узлов обеспечивает соединение всех СП согласно моделируемой схеме;
- микропроцессоры СП соединены с сервером для информационного обмена посредством центральных процессоров, сетевых коммутаторов и локальной компьютерной сети;
- на сервере установлено специализированное программное обеспечение, в котором реализуются все информационно-управляющие возможности.

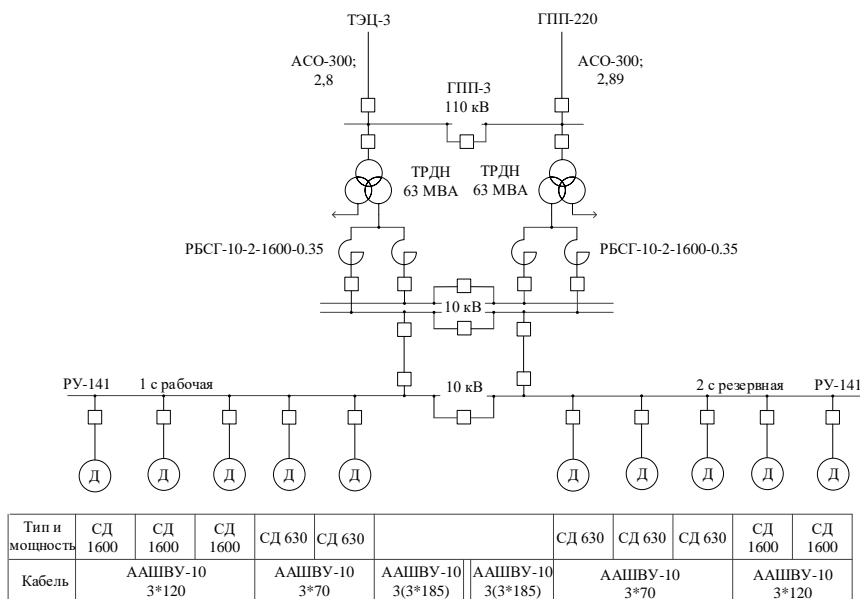
### **III. Методика и исследования всережимного анализа устойчивости узлов синхронной двигательной нагрузки и условий работы оборудования**

Для проведения исследований сформулированы основные положения методики всережимного анализа устойчивости узлов синхронной двигательной нагрузки и условий ее обеспечения.

1. Воспроизводится исходный квазиустановившийся режим конкретной схемы СЭС ЭЭС при наличии данных оперативно-информационного комплекса (ОИК) с их учетом, позволяющий оценить параметры всех типов двигательной нагрузки.
2. Выявляются уровень снижения или исчезновения и время восстановления напряжения, влияющие на устойчивость узлов двигательной нагрузки в конкретной схеме СЭС ЭЭС, а также максимальные токи короткого замыкания (КЗ) и самозапуска с учетом действия РЗ, автоматического повторного включения (АПВ), автоматического включения резервного питания (АВР).
3. Анализируются аварийные условия работы оборудования, участвующего в обеспечении устойчивости узлов двигательной нагрузки, главным образом термическая стойкость кабелей ввода и присоединений двигателей.

4. Моделируются мероприятия для сохранения устойчивости узлов двигательной нагрузки и условий работы другого оборудования в конкретной схеме СЭС ЭЭС.

Исследования проведены на примерах узлов синхронных двигателей (СД) насосов оборотного водоснабжения СЭС Томского нефтехимического комбината (ТНХК) Томской ЭЭС (рис. 1).



**Рис. 1. Схема узла СД насосов оборотного водоснабжения СЭС ТНХК:**  
ТЭЦ – теплоэлектроцентраль; ГПП – главная понизительная подстанция;  
РУ – распределительное устройство; Д – двигатель

**Fig. 1. Scheme of the synchronous motors of pumps for recycling water supply of power supply systems of the Tomsk petrochemical plant:**

CHPP – combined heat and power plant; GPP – main step-down substation;  
RU – switchgear; D – engine

Режимные параметры СД, а также приведенные осциллограммы нормального пуска (рис. 2) позволяют оценить и подтвердить соответствие моделируемых СД данным технического паспорта завода-изготовителя.

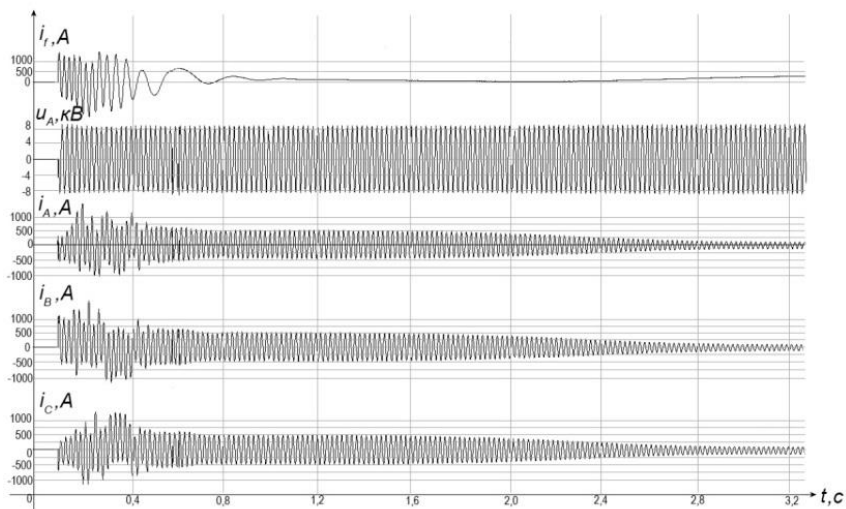
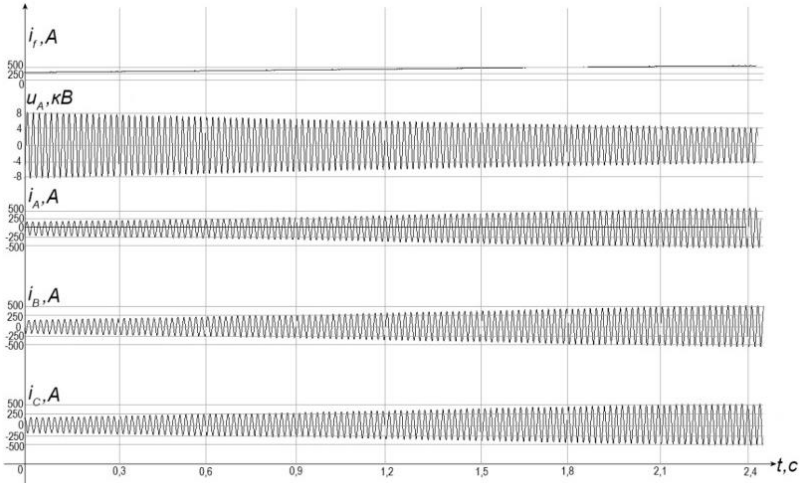


Рис. 2. Осциллограммы нормального пуска СД

Fig. 2. Oscillograms of synchronous motor normal start

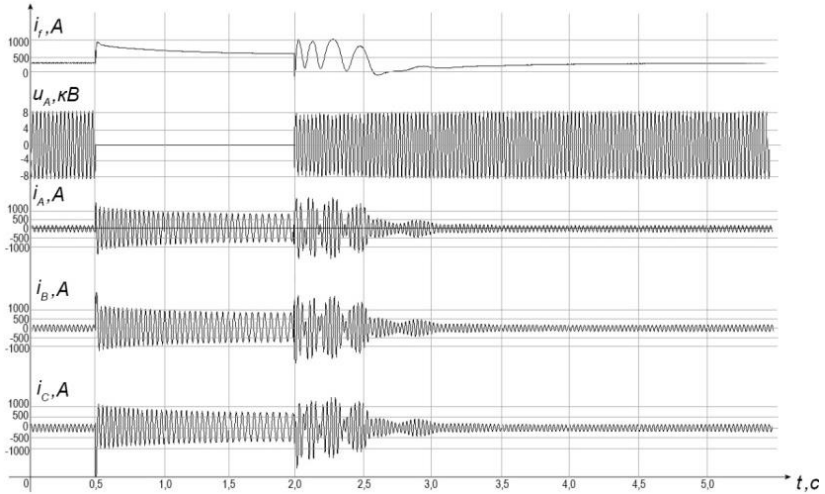
При снижении напряжения на шинах до  $0,7U_n$  и  $0,5U_n$  (рис. 3) токи статора СД увеличиваются, при этом синхронный режим СД сохраняется, а термические условия эксплуатации обмоток не превышают допустимых значений. Пусковые органы защит от перегрузок СД срабатывают, токи срабатывания 160 А и 75 А. Однако отключение в течение уставок времени данных защит  $t_{cp} = 10$  с не происходит, так как удаленное КЗ за это время устраняется соответствующими средствами РЗА. Максимальная токовая защита (МТЗ) ввода не срабатывает, так как уставка защиты равна 2800 А, а суммарные токи всех СД составляют 874 А и 1539 А. Кроме этого, контроль снижения напряжения обеспечивает защита минимального напряжения (ЗМН), действующая на отключение всех СД, у которой стандартный расчет уставок  $U_{cp} = 0,7U_{ном}$ ,  $t_{cp} = 0,5$  с и подлежит корректировке.

При исчезновении напряжения на шинах рабочей секции (рис. 4) все СД начинают тормозиться. После восстановления напряжения в течение 1,5 с происходит успешный самозапуск всех СД с различными токами самозапуска в зависимости от степени торможения и длительности аварийного режима.



**Рис. 3. Осциллограммы процессов в СД при снижении  
Напряжения на шинах питания до  $0,5U_n$**

**Fig. 3. Oscillograms of synchronous motor processes  
with a voltage reduction on power bus to  $0,5U_n$**



**Рис. 4. Осциллограммы процессов в СД при трехфазном КЗ  
на шинах питания**

**Fig. 4. Oscillograms of synchronous motor processes  
with three-phase short circuit on power bus**



Успешная ресинхронизация СД при работе АВР (рис. 5, 6) возможна при  $t_{\text{АВР}} < 2,5$  с. Однако в зависимости от уровней напряжения СД и резервной секции и угла  $\delta$  между ними, самозапуски происходят с различными значениями токов самозапуска, в том числе, превышающими ток срабатывания МТЗ ввода [10]. Также необходимо учесть, что максимально допустимые токи включения СД превышают пусковые в 1,7 раза и определяют условия эксплуатации обмоток СД [11]. Согласно результатам моделирования, АВР необходимо производить с  $t_{\text{АВР}} < 0,1$  с. Данное условие обеспечивают современные устройства АВР с силовым тиристорным коммутатором, управляемым микропроцессорным блоком (ТАВР).

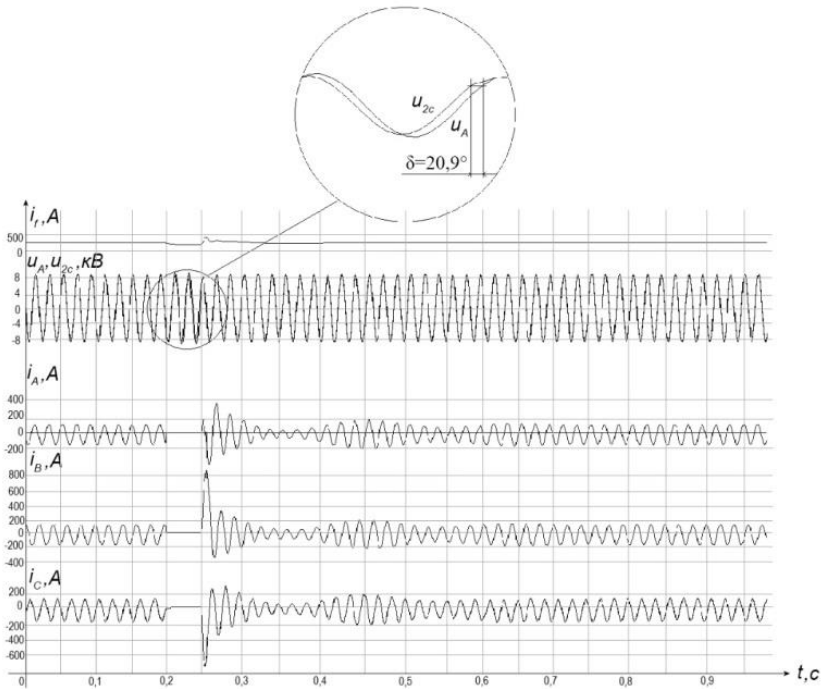
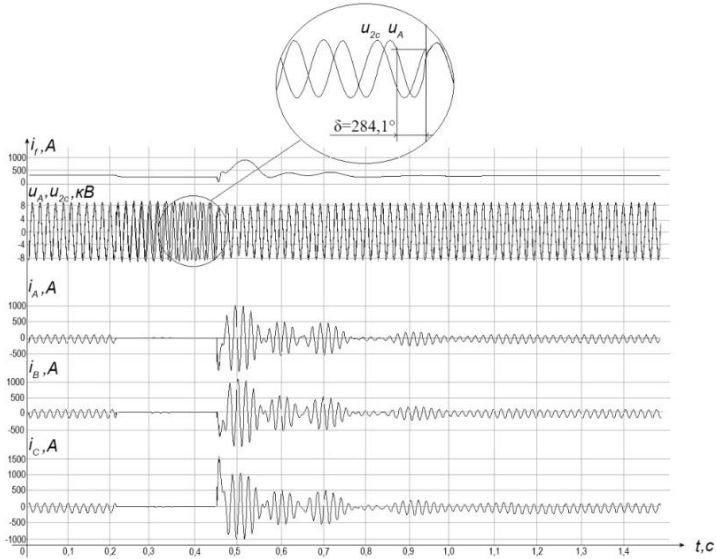


Рис. 5. Осциллограммы процессов в СД при действии АВР между секциями РУ  $t_{\text{АВР}} = 0,05$  с

Fig. 5. Oscillograms of synchronous motor processes with action of automatic to reserve source between switchgear sections  $t_{\text{ARS}} = 0,05$  s



**Рис. 6. Осциллограммы процессов в СД при действии АВР между секциями РУ  $t_{ABP} = 0,26$  с**

**Fig. 6. Oscillograms of synchronous motor processes with action of automatic to reserve source between switchgear sections  $t_{ARS} = 0,26$  s**

Для определения термической стойкости кабеля ввода и присоединений СД рассмотрены токи трехфазного КЗ на шинах рабочей секции РУ и создаваемые ими тепловые импульсы. Тепловой импульс определяется:

$$B = \int_0^{t_u} i^2 dt, \quad (1)$$

где  $i$  – мгновенное значение тока;  $t_u$  – длительность протекания тока.

Минимальное сечение жилы кабеля по условию термической стойкости определяется:

$$S_{\min} = \frac{\sqrt{B}}{C}, \quad (2)$$

где  $C = 90$  – коэффициент соответствующий максимально допустимой температуре  $T = 200$  °C для рассматриваемого типа кабелей, т.е. с алюминиевыми жилами, бумажной изоляцией и до 10 кВ включительно [12].

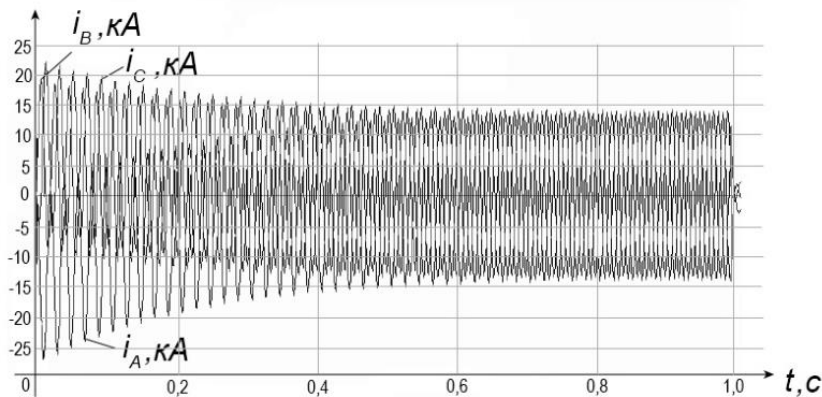


Рис. 7. Оциллограммы токов в кабеле ввода

Fig. 7. Oscillograms of currents in the input cable

Результаты моделирования КЗ и расчеты тепловых импульсов демонстрируют соответствие кабеля ввода ААШВУ  $3(3 \cdot 185)$  мм<sup>2</sup> условию термической стойкости в течение 7 с, что не препятствует разрешению самозапусков СД. Для присоединений СД минимально допустимое сечение составляет 70 мм<sup>2</sup>, кабели присоединений ААШВУ-10 (3 · 120) и ААШВУ-10 (3 · 70) удовлетворяют этому условию. Основными мероприятиями по обеспечению надежной работы СД СЭС ТНХК являются изменение существующих уставок ЗМН  $U_{cp} \leq 0,5U_{ном}$ ,  $t_{cp} \geq 10$  с и замена АВР на ТАВР  $t_{БАВР} < 0,1$  с.

#### IV. Выводы

Предложены средства гибридного моделирования ВМК РВ ЭЭС, позволяющие получать достаточно полную и достоверную информацию о спектре нормальных, анормальных квазиустановившихся и переходных процессов в узлах двигательной нагрузки с учетом приводимых механизмов, средств РЗА, другого оборудования и СЭС ЭЭС в целом. Результаты могут быть использованы для проведения всережимного анализа устойчивости узлов двигательной нагрузки и условий работы оборудования СЭС ЭЭС.

На основе предложенного подхода сформулирована методика всережимного адекватного анализа устойчивости узлов двигательной нагрузки и условий работы другого оборудования. Полученные результаты реализации методики демонстрируют адекватное воспроизведение процессов торможения, успешного или неуспешного самозапуска СД с учетом приводимых механизмов, АВР, РЗА в СЭС ЭЭС, а также определение токов самозапуска и

трехфазных КЗ, оказывающих влияние на электродинамические и термические условия эксплуатации оборудования СЭС ЭЭС.

*Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования РФ, Госзадание НАУКА НОВОЕ, № FSWW-2020-0017.*

© Сулайманова В.А., 2022

© Гусев А.С., 2022

© Уфа Р.А., 2022

© Литвинов С.А., 2022

*Поступила в редакцию 27.09.2022*

*Received 27.09.2022*

### **Библиографический список**

- [1] Гуревич Ю.Е., Кабиков К.В. Особенности электроснабжения, ориентированного на бесперебойную работу промышленного потребителя. М.: Элекс-КМ, 2005. – 407 с.
- [2] Носов К.Б., Дворак Н.М. Способы и средства самозапуска электродвигателей. М.: Энергоатомиздат, 1992. – 144 с.
- [3] Холл Дж., Уатт Дж. Современные численные методы решения обыкновенных дифференциальных уравнений. М.: Мир, 1979. – 312 с.
- [4] Вержбицкий В.М. Численные методы (математический анализ и обыкновенные дифференциальные уравнения). М.: Оникс 21 век, 2005. – 400 с.
- [5] Бабушка И., Витасек Э., Прагер М. Численные процессы решения дифференциальных уравнений. М.: Мир, 1969. – 368 с.
- [6] Хемминг Р.В. Численные методы для научных работников и инженеров. М.: Наука, 1972. – 400 с.
- [7] Андреев М.В., Боровиков Ю.С., Гусев А.С., Сулайманов А.О., Суворов А.А., Рубан Н.Ю., Уфа Р.А. Концепция и базовая структура всережимного моделирующего комплекса // Газовая промышленность. 2017. № 5 (752). С. 18-27.
- [8] Андреев М.В., Боровиков Ю.С., Гусев А.С., Сулайманов А.О., Суворов А.А., Рубан Н.Ю., Уфа Р.А. Практическое применение всережимного моделирующего комплекса электроэнергетических систем // Газовая промышленность. 2017. № 6 (753). С. 94-104.
- [9] Сулайманова В.А., Гусев А.С., Киевец А.В., Андреев М.В. Проблема адекватного анализа устойчивости узлов двигательной нагрузки систем электроснабжения, условий ее обеспечения и средства ее решения // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2018. Т. 22. № 4. С. 172-182.
- [10] Слударж М.И. Режимы работы, релейная защита и автоматика синхронных электродвигателей. М.: Энергия, 1977. – 216 с.
- [11] Голоднов Ю.М. Самозапуск электродвигателей. М.: Энергоатомиздат, 1985. – 136 с.
- [12] Конюхова Е.А. Электроснабжение объектов. М.: Академия, 2013. – 320 с.

## References

- [1] Yu.E. Gurevich and K.V. Kabikov, *Osobennosti elektrosnabzheniya, orientirovanogo na bespereboynuyu raboty promyshlennogo potrebitelya* [Features of power supply focused on the uninterrupted operation of the industrial consumer]. Moscow: Eleks-KM, 2005 (in Russian).
- [2] K.V. Nosov and N.M. Dvorak, *Sposoby i sredstva samozapuska elektrodvigateley* [Methods and means of self-starting electric motors]. Moscow: Energoatomizdat, 1992 (in Russian).
- [3] J. Hall and J. Watt, *Sovremennye chislennyye metody resheniya obyknovennykh differentsial'nykh uravneniy* [Modern numerical methods for solving ordinary differential equations]. Moscow: Mir, 1979 (in Russian).
- [4] V.M. Verzhbitskiy, *Chislennyye metody (matematicheskiy analiz i obyknovennyye differentsial'nyye uravneniya)* [Numerical methods (mathematical analysis and ordinary differential equations)]. Moscow: Onyx 21st century, 2005 (in Russian).
- [5] I. Babuska, M. Prager and E. Vitasek, *Chislennyye protsessy resheniya differentsial'nykh uravneniy* [Numerical processes in differential equations]. Moscow: Mir, 1969 (in Russian).
- [6] R.W. Hamming, *Chislennyye metody dlya nauchnykh rabotnikov i inzhenerov* [Numerical methods for scientists and engineers]. Moscow: Nauka, 1972 (in Russian).
- [7] M.V. Andreev, Yu.S. Borovikov, A.S. Gusev, A.O. Sulaymanov, A.A. Suvorov, N.Yu. Ruban and R.A. Ufa, "Concept and basic structure of the all-mode modeling complex", *Gas Industry*, no. 5 (752), pp. 18-27, 2017.
- [8] M.V. Andreev, Yu.S. Borovikov, A.S. Gusev, A.O. Sulaimanov, A.A. Suvorov, N.Yu. Ruban and R.A. Ufa, "Practical application of the hybrid real-time power system simulator", *Gas Industry*, no. 6 (753), pp. 94-104, 2017.
- [9] V.A. Sulaymanova, A.S. Gusev, A.V. Kievets and M.V. Andreev, "Problem of adequate analysis of pss motor load node stability, its provision conditions and solution tools", *Proceedings of Irkutsk State Technical University*, vol. 22, no. 4, pp. 172-182, 2018. DOI: 10.21285/1814-3520-2018-4-172-182
- [10] M.I. Slodarch, *Rezhimy raboty, releynaya zashchita i avtomatika sinkhronnykh elektrodvigateley* [Operating modes, relay protection and automation of synchronous electric motors]. Moscow: Energiya, 1977 (in Russian).
- [11] Yu.M. Golodnov, *Samozapusk elektrodvigateley* [Self-starting of electric motors]. Moscow: Energoatomizdat, 1985 (in Russian).
- [12] E.A. Koniukhova, *Elektrosnabzhenie ob"ektov* [Power supply of objects]. Moscow: Academy, 2013 (in Russian).

**ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ  
INFORMATION ABOUT THE AUTHORS**

**Сулайманова Венера Алмазовна**, ассистент Томского политехнического университета, г. Томск, Российская Федерация

**Venera A. Sulaymanova**, assistant of the Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russian Federation

**Гусев Александр Сергеевич**, доктор технических наук, профессор Томского политехнического университета, г. Томск, Российская Федерация

**Aleksandr S. Gusev**, D. Sci. (Eng.), professor of the Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russian Federation

**Уфа Руслан Александрович**, кандидат технических наук, доцент Томского политехнического университета, г. Томск, Российская Федерация

**Ruslan A. Ufa**, Cand. Sci. (Eng.), associate professor of the Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russian Federation

**Литвинов Сергей Андреевич**, электромонтер Нефтегазодобывающего управления ООО «Газпром добыча Ямбург», Новый Уренгой, Российская Федерация

**Sergey A. Litvinov**, electrician of the Oil and Gas Production Administration, LLC «Gazprom Dobycha Yamburg», Novy Urengoy, Russian Federation