УДК 621.313

Леонид Тимурович Тухватуллин
ФГБОУ ВО «Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева–КАИ», аспирант кафедры электрооборудования, Россия, Казань, телефон (843) 231-03-63, e-mail: TukhvatullinLT@stud.kai.ru

Руслан Геннадьевич Исаков
ФГБОУ ВО «Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева–КАИ», кандидат технических наук, доцент кафедры электрооборудования, Россия, Казань, телефон (843) 231-03-63, e-mail: ruslanisakov@yandex.ru

Методика оценки эффективности мероприятий для обеспечения устойчивости технологического процесса промышленных предприятий при провалах напряжения

Авторское резюме

Состояние вопроса. На сегодняшний день нарушения работы промышленных предприятий зачастую связаны с возникновением в сетях электроснабжения кратковременных провалов напряжения. Существует множество различных технических решений, позволяющих устранять провалы в течение короткого периода времени. Однако выбор того или иного противоаварийного мероприятия в большинстве случаев не согласуется с устойчивостью технологического процесса предприятия. Вследствие этого возникает ситуация, когда, несмотря на быстрое устранение провала напряжения, производственный процесс все равно нарушается, приводя к браку продукции и убыткам. В связи с этим основной целью данного исследования является обеспечение устойчивой работы электротехнического комплекса со сложным технологическим циклом при провалах напряжения.
Материалы и методы. Представленная методика базируется на концепции времени устойчивости технологического процесса, разработанной международной исследовательской группой CIGRE, CIRED и UIE. Она позволяет произвести выбор наиболее эффективного мероприятия по устранению провалов напряжения на заданном промышленном предприятии, основываясь на определении критического времени устойчивости технологического процесса. Для апробации методики применено имитационное моделирование работы электротехнического комплекса нефтеперерабатывающего предприятия в программе PSCAD.
Результаты. В результате моделирования получены значения критических времен устойчивости технологических агрегатов, определено критическое время устойчивости технологического процесса. Рассмотрены временные сценарии устранения короткого замыкания средствами релейной защиты и автоматизации с помощью диаграмм Ганта. Разработанная методика апробирована на практическом примере. Продемонстрирована ее эффективность при повышении устойчивости технологического процесса при провалах напряжения.
Выводы. Разработанная методика позволяет повысить устойчивость работы промышленного предприятия со сложным технологическим циклом. С ее помощью можно выбрать наиболее эффективные противоаварийные мероприятия, направленные на обеспечение стабильности напряжения в электротехническом комплексе производства. Полученные результаты могут быть использованы инженерными организациями, проектирующими системы электроснабжения промышленных предприятий.

Ключевые слова: провалы напряжения, технологическая устойчивость, асинхронный двигатель, электротехнический комплекс, технологический процесс

Leonid Timurovich Tukhvatullin
Kazan National Research Technical University, Postgraduate Student of Electrical Equipment Department, Russia, Kazan, telephone (843) 231-03-63, e-mail: TukhvatullinLT@stud.kai.ru

Ruslan Gennadevich Isakov
Kazan National Research Technical University, Candidate of Engineering Sciences (PhD), Associate Professor of Electrical Equipment Department, Russia, Kazan, telephone (843) 231-03-63, e-mail: ruslanisakov@yandex.ru

Methodology to assess the effectiveness of measures to ensure the stability of technological process of industrial enterprises during voltage dips

Abstract

Background. Today, industrial plant disruptions are often associated with short-term voltage dips in power grids. Numerous technical solutions exist to resolve these dips within a short period of time. However, the choice of a particular emergency response in most cases is not consistent with the stability of the enterprise technological process. Conse-

© Тухватуллин Л.Т., Исаков Р.Г., 2026
Вестник ИГЭУ, 2026, вып. 5, с. 72–78.

quently, despite the rapid clearing of the voltage dip, the production process is still disrupted, leading to product defects and losses. Therefore, the primary goal of this study is to ensure the stable operation of electrical equipment with complex technological processes during voltage dips.
Materials and methods. The presented methodology is based on the process stability time concept developed by the international research group CIGRE, CIRED, and UIE. It enables to selection of the most effective measure to mitigate voltage dips at a given industrial facility, based on determining the critical process stability time. Simulation of the electrical system of an oil refinery using PSCAD has been used to test the methodology.
Results. As a result of the modeling, values of the critical stability times of process units have been obtained, and the critical stability time of the technological process has been determined. Short-circuit clearance time scenarios using relay protection and automation systems have been examined using Gantt charts. The developed methodology has been validated through a practical example. Its effectiveness to enhance the resilience of the technological process against voltage dips has been demonstrated.
Conclusions. The developed methodology enhances the operational stability of an industrial enterprise with a complex technological cycle. It enables the selection of the most effective emergency response measures aimed at ensuring voltage stability of electrical power system. The results obtained can be used by engineering companies that design power supply systems for industrial enterprises.

Key words: voltage dips, process stability, asynchronous motor, electrical complex, technological process

DOI: 10.17588/2072-2672.2026.5.072-078

Введение. Одной из наиболее актуальных проблем современной промышленности является нарушение устойчивой работы технологических процессов, вызванное кратковременными провалами напряжения в сети. В частности, даже кратковременное нарушение электроснабжения на объектах нефтепромышленности Крайнего Севера вызывает замораживание водопроводов, быстрый ремонт которых затруднителен в виду географической удаленности [1]. На сегодняшней день существует множество различных технических решений, позволяющих обеспечивать стабильность напряжения при аварийных ситуациях на энергообъектах [2]. Тем не менее зачастую данные мероприятия остаются неэффективными по причине того, что на стадии их проектирования в должной мере не учитывается технологическая устойчивость критически важных объектов промышленного предприятия. Вследствие чего распространенной становится ситуация несогласованности работы электрических и технологических защит. Например, при возникновении провала напряжения на предприятии автоматика, защищающая технологическую часть производства, отключает электродвигатель раньше, чем успевают сработать устройства РЗА по устранению КЗ, вызвавшего провал [3]. Это вызывает нарушение всего технологического процесса, приводя к убыткам, браку продукции и даже гибели людей [4]. Для решения данной проблемы необходимо проводить совместную оценку технологической и динамической устойчивости электротехнического комплекса при провалах напряжения.

Методы исследования. Для решения поставленной задачи была разработана методика, позволяющая выбирать наиболее эффективное техническое решение с точки зрения обеспечения устойчивости технологического процесса при провалах напряжения.

В ее основе лежит концепция времени устойчивости технологического процесса, которую разработала международная совместная рабочая группа CIGRE, CIRED и UIE [5, 6]. На ее основе можно определить критическое время устойчивости технологического агрегата (рис. 1). Под технологическим агрегатом понимается связка «электродвигатель–приводной механизм».

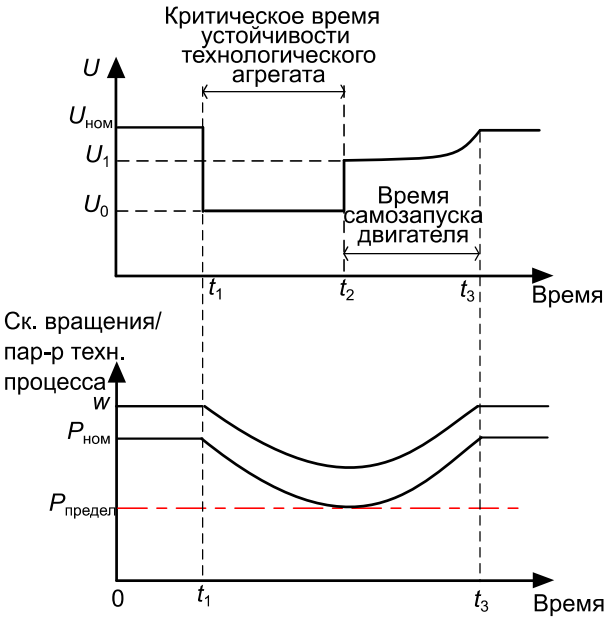


Рис. 1. Определение критического времени устойчивости технологического агрегата

Параметр технологического процесса (давление центробежного насоса) p в о.е. зависит от скорости вращения двигателя w в о.е. согласно формуле

$$p = w^2. \quad (1)$$

Провал напряжения начинается в момент времени t_1, вызывая замедление двигателя и снижение параметра процесса. В момент t_2 провал устраняется. Критическое время устойчивости технологического агрегата определяет-

ся как максимальная длительность провала напряжения, когда одновременно обеспечивается самозапуск электродвигателя и параметр процесса не пересекает предельную границу значения $p_{предел}$, ниже которой технологический процесс нарушается [7].

Упрощенная блок-схема разработанной методики представлена на рис. 2.

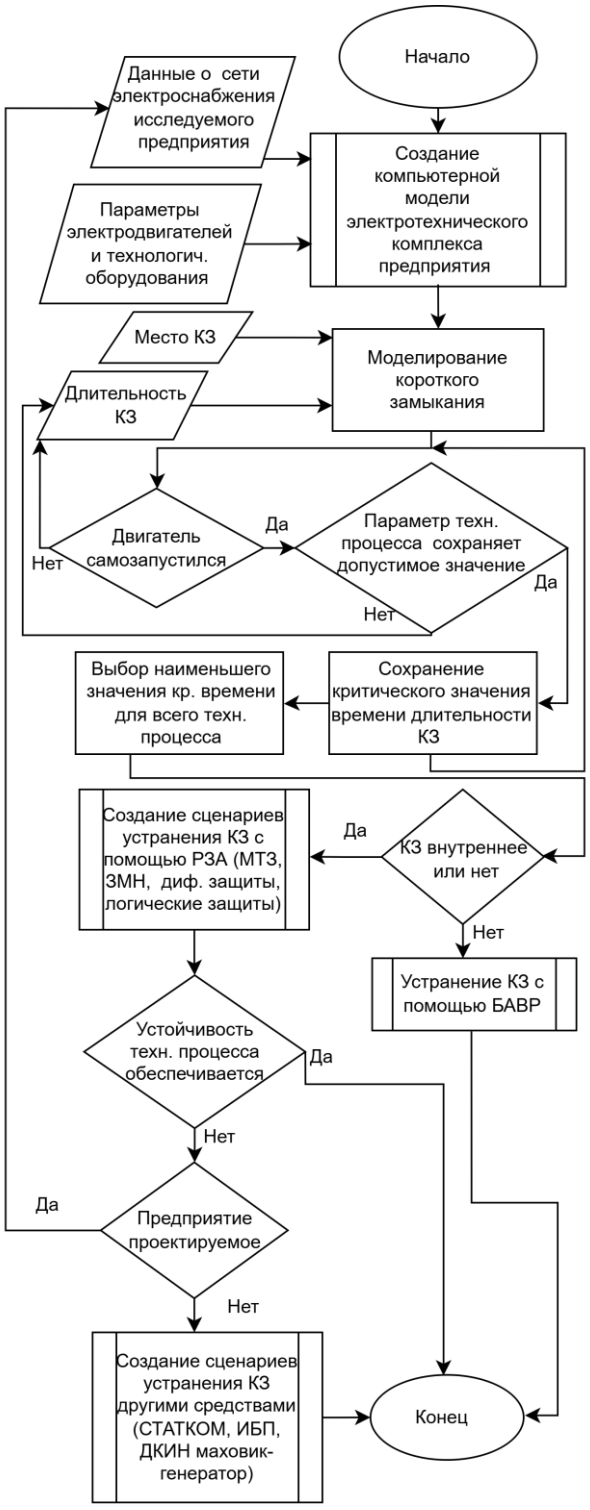


Рис. 2. Блок-схема методики оценки эффективности мероприятий по обеспечению устойчивости технологического процесса промышленных предприятий при провалах напряжения

На первоначальном этапе необходимо создать математическую модель исследуемого электротехнического комплекса предприятия с помощью компьютерной программы (PSCAD, MATLAB и др.). Исходными данными для нее являются данные о сети электроснабжения, ее топология, параметры электродвигателей (мощность, тип двигателя, коэффициент загрузки), информация о приводных механизмах (тип механизма, электромеханическая постоянная времени).

На втором этапе производится моделирование короткого замыкания, вызывающего провал напряжения в сети. Для этого в модели задается место возникновения КЗ и его длительность. Для каждого технологического агрегата, участвующего в технологическом процессе, определяется критическое время устойчивости (рис. 1). Найденные значения сохраняются, и из них выбирается наименьшее, которое будет определять устойчивость рассматриваемого технологического процесса.

Следующий этап включает в себя выбор противоаварийных мероприятий на основе найденного критического времени. Если КЗ произошло во внешней сети, то единственным возможным способом будет использование быстродействующего автоматического ввода резерва (БАВР). В случае внутреннего КЗ сначала создаются сценарии его устранения с помощью традиционных средств РЗА (максимальная токовая защита, защита минимального напряжения, дифференциальные защиты, логические защиты). Для удобства визуализации данных временные сценарии формируются в виде диаграмм Ганта. Если выбранное противоаварийное мероприятие обеспечивает восстановление напряжения за время, меньшее или равное критическому времени устойчивости технологического процесса, то процесс выбора считается завершенным. Если нет, то для вновь проектируемого предприятия есть возможность изменить структуру самой сети и провести моделирование заново. Для уже существующего предприятия разрабатываются противоаварийные мероприятия более дорогостоящими средствами (СТАТКОМ, ИБП, ДКИН, маховик-генератор и др.).

Для апробации разработанной методики выбрана часть электротехнического комплекса нефтеперерабатывающего предприятия (рис. 3).

Асинхронные двигатели Д1-Д10 с одинаковой мощностью 650 кВт являются частью исследуемого технологического процесса. Двигатели Д6-Д10 выполняют резервную функцию, поэтому их работа не рассматривается в контексте используемой методики. Двигатели Д1-Д5 являются критически важными для процесса, и каждый из них приводит в движение центробежный насос. Для демонстрации эффективности представленной методики смоделирован сценарий возникновения трехфазного КЗ на землю в конце отходящей от ГПП1 кабельной линии $L_1 = 1{,}5$ км.

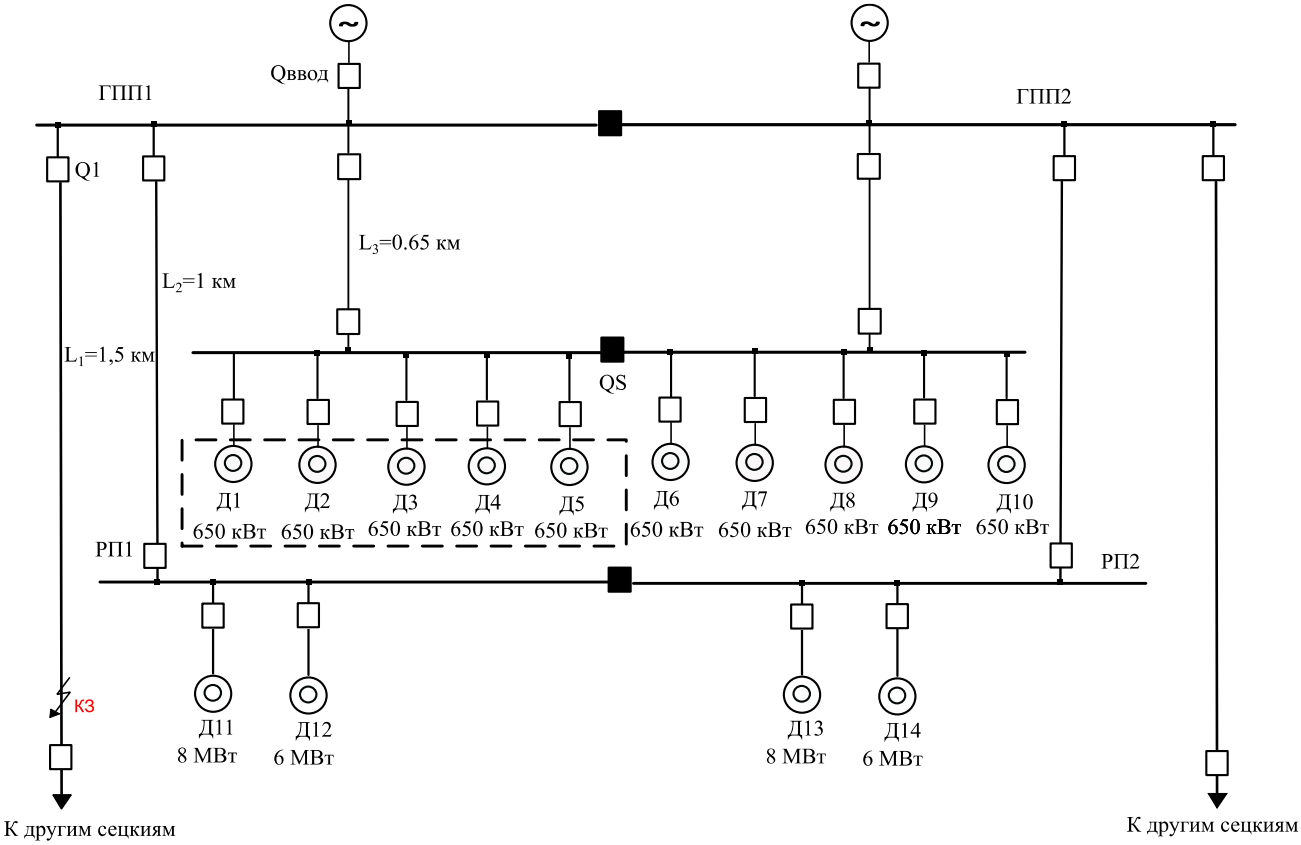


Рис. 3. Упрощенная часть схемы электроснабжения электротехнического комплекса нефтеперерабатывающего предприятия

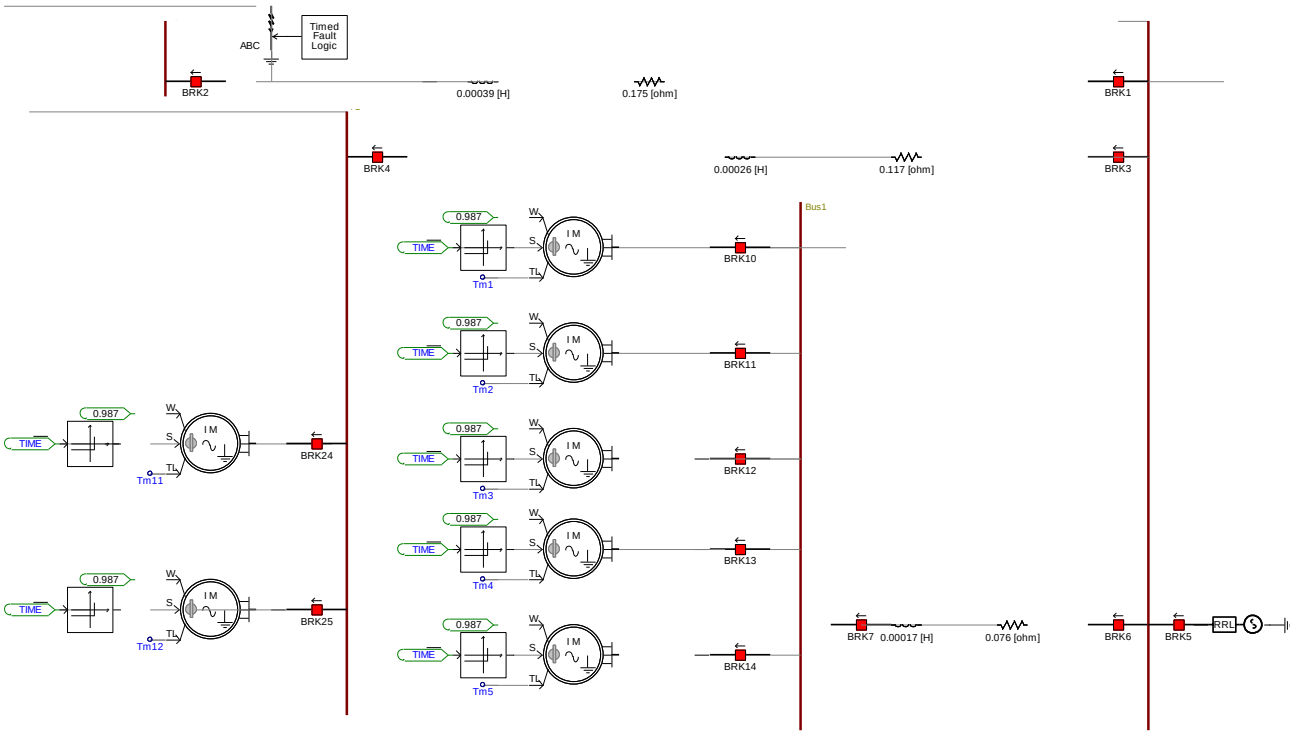


Рис. 4. Имитационная модель исследуемого электротехнического комплекса в программе PSCAD

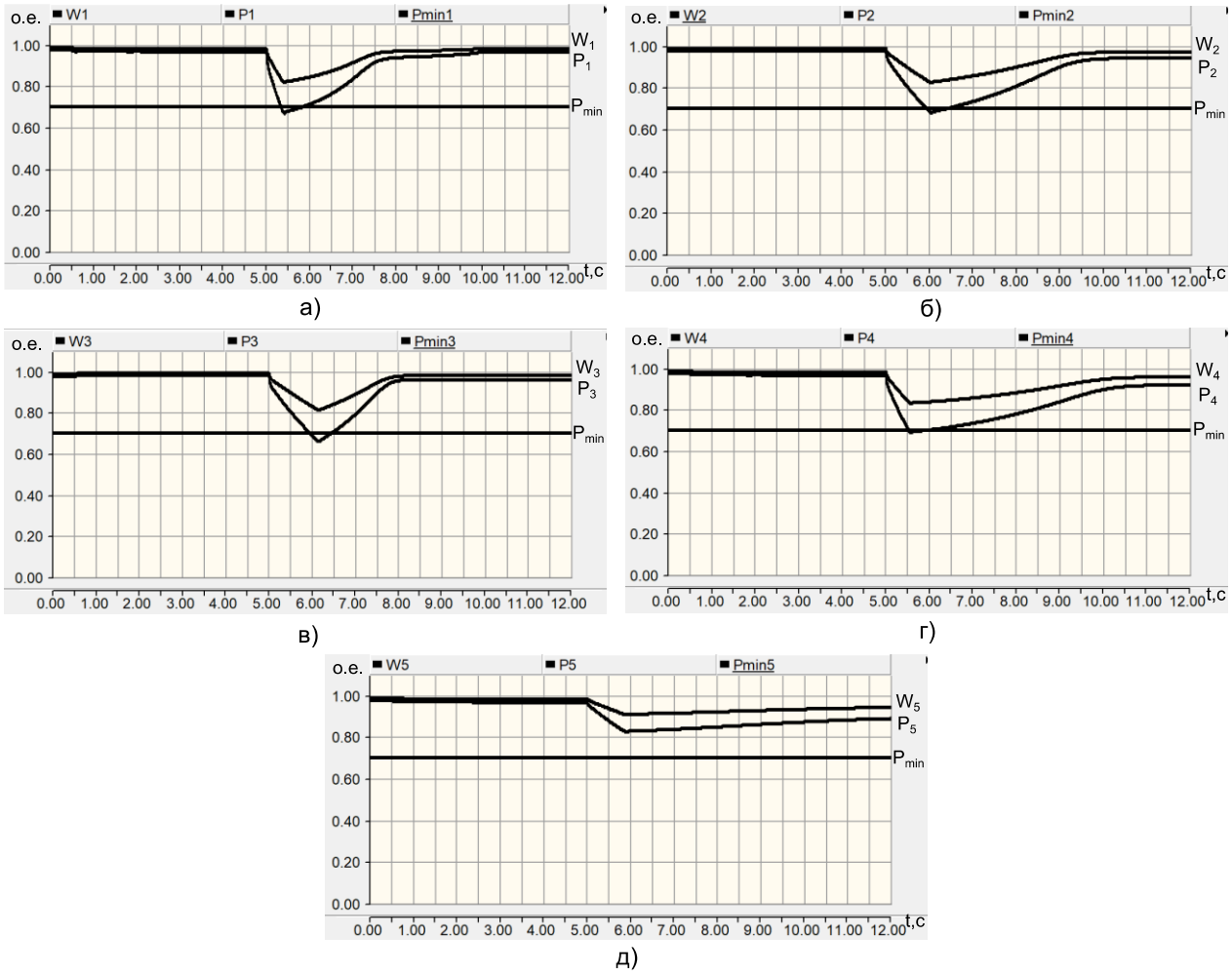


Рис. 5. Результаты моделирования для каждого технологического агрегата: а – ТА1 при $t_{провала}$ = 0,37 с; б – ТА2 при $t_{провала}$ = 1 с; в – ТА3 при $t_{провала}$ = 1,12 с; г – ТА4 при $t_{провала}$ = 0,53 с; д – ТА5 при $t_{провала}$ = 0,82 с

Согласно блок-схеме на рис. 2, на первом этапе создается компьютерная модель исследуемого электротехнического комплекса. В качестве инструмента для компьютерного моделирования выбрана программа PSCAD. Имитационная модель показана на рис. 4. Вводными данными модели являются топология сети электроснабжении предприятия, длины линий, мощности асинхронных двигателей и информация об участвующих в технологическом процессе приводных механизмах (в данном случае центробежных насосах). Значения электромеханических постоянных времени T_j для технологических агрегатов (номер агрегата соответствует номеру двигателя) представлены в табл. 1.

Таблица 1. **Значения электромеханических постоянных времени технологических агрегатов T_j**

ТА 1	ТА 2	ТА 3	ТА 4	ТА 5
2 с	4 с	3 с	3 с	10 с

Результаты исследования. В результате имитационного моделирования работы технологических агрегатов ТА1-ТА5 с нагрузкой в виде центробежного насоса при возникновении КЗ [8] были найдены значения критических времен устойчивости агрегатов (рис. 5), удовлетворяющих показанным на рис. 1 условиям, т.е. когда одновременно обеспечивается самозапуск асинхронных двигателей и сохраняется технологическая устойчивость процесса. В качестве предельного значения $p_{предел}$ для давления в насосах выбрано значение 0,7 $p_{ном}$. Для технологической защиты, реагирующей на отклонение давления, на всех агрегатах выбрана выдержка времени, равная 0,5 с. Защиты от перегрузки, отключающие двигатели при неудачном самозапуске, работают с выдержкой времени 12 с. Второй двигатель Д2 загружен на 80 %, третий Д3 – на 60 %, остальные – на 100 %. Результаты отображены в табл. 2.

Таблица 2**. Значения критических времен устойчивости технологических агрегатов**

ТА 1	ТА 2	ТА 3	ТА 4	ТА 5
0,37 с	1 с	1,12 с	0,53 с	0,82 с

Согласно полученным значениям, наименьшим критическим временем 0,37 с обладает агрегат ТА1. Оно принимается за крити-

ческое время провала напряжения для всего исследуемого технологического процесса. Это то время, в течение которого должно обеспечиваться восстановление стабильности напряжения на предприятии.

В виду того что нарушение работы было вызвано возникновением КЗ в сети внутреннего электроснабжения, рассматриваются сценарии его устранения с помощью традиционных средств РЗА.

Одним из наиболее распространенных типов противоаварийных устройств в сетях напряжением 10 кВ является максимальная токовая защита (МТЗ) [9]. На рис. 6 показан временной сценарий (в секундах) устранения КЗ с помощью МТЗ в виде диаграммы Ганта.

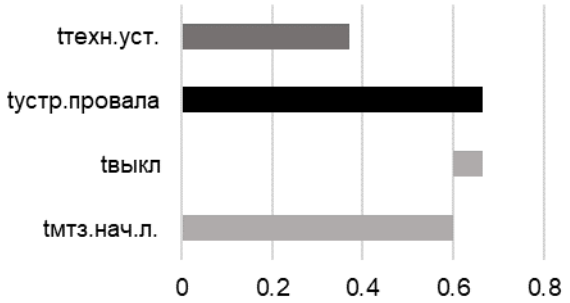


Рис. 6. Временной сценарий устранения КЗ с помощью МТЗ

При возникновении КЗ в начале линии L_1 срабатывает реле с выдержкой времени $t_{\text{мтз нач. л}}$ = 0,6 с и отключает линию силовым вакуумным выключателем $Q1$, время действия которого $t_{\text{выкл}}$ = 0,065 с.

Анализ полученных результатов (рис. 6) показывает, что результирующее время устранения провала напряжения $t_{\text{устр. провала}}$ значительно больше по величине значения критического времени устойчивости технологического процесса $t_{\text{техн. уст}}$. Следовательно, МТЗ не подходит для защиты оборудования от провалов напряжения.

Дифференциальная защита линий (ДЗЛ) является эффективной и быстродействующей защитой, обладающей абсолютной селективностью [10]. Это техническое решение позволяет устранить КЗ за короткий период времени, сравнивая токи в начале и конце линии [11].

На рис. 7 изображена временная диаграмма Ганта, демонстрирующая сценарий устранения (в секундах) провала напряжения с помощью ДЗЛ.

В момент начала провала напряжения возникает ток КЗ, на который реагирует ДЗЛ за время $t_{\text{дзл}}$ = 0,025 с и подает сигнал на отключение линии выключателем $Q1$, срабатывающим за время $t_{\text{выкл}}$ = 0,065 с. Таким образом, время устранения провала меньше критического времени $t_{\text{устр. провала}} < t_{\text{техн. уст}}$, что обеспечивает сохранение устойчивости исследуемого технологического процесса.

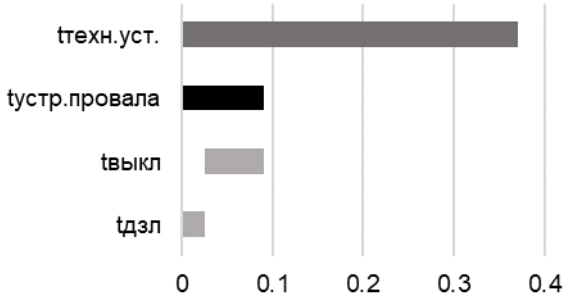


Рис. 7. Временной сценарий устранения КЗ с помощью ДЗЛ

Выводы. Разработанная методика оценки эффективности мероприятий для обеспечения устойчивости технологического процесса промышленных предприятий при провалах напряжения по результатам проведенного исследования показала свою эффективность. Предлагаемая методика может быть использована на существующих или вновь проектируемых предприятиях со сложным технологическим циклом.

Список литературы

1. **Королёва О.А.** Категории надежности электроснабжения кустов добывающих скважин нефтегазовых месторождений // PROНЕФТЬ. Профессионально о нефти. – 2018. – № 1. – С. 73–76. DOI: 10.24887/2587-7399-2018-1-73-76.

2. **Тухватуллин Л.Т., Исаков Р.Г.** Способы повышения стабильности напряжения в системе электроснабжения промышленных предприятий // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. – 2025. – Т. 27, №. 3. – С. 82–101. DOI: 10.30724/1998-9903-2025-27-3-82-101.

3. **Гуревич Ю.Е., Кабиков К.В.** Особенности электроснабжения, ориентированного на бесперебойную работу промышленного потребителя. – М.: Элекс-КМ, 2005. – 407 с.

4. **Николаев А.А., Денисевич А.С., Ивекеев В.С.** Повышение устойчивости работы преобразователей частоты с активными выпрямителями при коммутациях электрооборудования электросталеплавильного комплекса // Вестник ИГЭУ. – 2019. – Вып. 5. – С. 48–58. DOI: 10.17588/2072-2672.2019.5.048-058.

5. **CIGRE/** CIRED/ UIE joint working group C4.110, voltage dip immunity of equipment in installations – Main contributions and conclusions / M. Bollen, M. Stephens, S.Z. Djokic, et al. // CIRED 2009 – 20th International Conference and Exhibition on Electricity Distribution. Part 1. – Prague, Czech Republic, 2009. – P. 1–4. DOI: 10.1049/cp.2009.0584.

6. **Kang Z., Yuan T., Liu J.** Assessment and Treatment of Voltage Sag Based on Electric-Process PIT // 21st International Conference on Harmonics and Quality of Power (ICHQP). – Chengdu, China, 2024. – P. 730–735. DOI: 10.1109/ICHQP61174.2024.10768758.

7. **Тухватуллин Л.Т., Исаков Р.Г.** Определение критического времени устойчивости работы технологического агрегата при провалах напряжения // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. – 2026. – Т. 69, № 1. – С. 85–92. DOI: 10.17213/0136-3360-2026-1-85-92.

8. **Свидетельство** о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2025694425 Российская Федерация. Имитационная модель технологического агрегата с нагрузкой в виде центробежного насоса для исследования устойчивости при провалах напряжения / Л.Т. Тухватуллин, Р.Г. Исаков; опубл. 05.12.2025.

9. **Мультичастотная** направленная защита от замыканий на землю в некомпенсированных сетях 6–10 кВ / К.С. Алёшин, Н.В. Кузьмина, А.А. Сёмушкин и др. // Вестник ИГЭУ. – 2025. – Вып. 5. – С. 39–49. DOI: 10.17588/2072-2672.2025.5.039-049.

10. **Новый** принцип осуществления токовой дифференциальной защиты для линий электропередачи ультравысокого напряжения / Д. Хо, Ю. Ли, Б. Ли, Ш. Сюе // Электричество. – 2015. – № 2. – С. 17–22.

11. **Левиуш А.И.** Дифференциальная защита линий электропередач // Релейная защита и автоматизация. – 2014. – № 4(17). – С. 30–34.

References

1. Koroleva, O.A. Kategorii nadezhnosti elektrosnabzheniya kustov dobyvayushchikh skvazhin neftegazovykh mestorozhdeniy [Power supply reliability category of oil and gas fields consumers]. *PRONEFT'. Professional'no o nefti*, 2018, no. 1, pp. 73–76. DOI: 10.24887/2587-7399-2018-1-73-76.

2. Tukhvatullin, L.T., Isakov, R.G. Sposoby povysheniya stabil'nosti napryazheniya v sisteme elektrosnabzheniya promyshlennykh predpriyatiy [Ways to improve voltage stability in the power supply system of industrial enterprises]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Problemy energetiki*, 2025, issue 27, no. 3, pp. 82–101. https://doi.org/10.30724/1998-9903-2025-27-3-82-101

3. Gurevich, Yu.E., Kabikov, K.V. *Osobennosti elektrosnabzheniya, orientirovannogo na bespereboynuyu rabotu promyshlennogo potrebitelya* [Features of power supply aimed at uninterrupted operation of industrial consumers]. Moscow: Eleks-KM, 2005. 407 p.

4. Nikolaev, A.A., Denisevich, A.S., Ivekeev, V.S. Povyshenie ustoychivosti raboty preobrazovateley chastoty s aktivnymi vypryamitelyami pri kommutatsiyakh elektrooborudovaniya elektrostaleplavil'nogo kompleksa [Improving of operation stability of frequency converters with active rectifiers in electric steel-making complex electrical equipment switching]. *Vestnik IGEU*, 2019, issue 5, pp. 48–58. DOI: 10.17588/2072-2672.2019.5.048-058.

5. Bollen, M., Stephens, M., Djokic, S.Z., Neumann, R., McEachern, A., Milanović, J.V., Gordon, J.M.R., Brumsickle, B., Ethier, G., Zavoda, F., Stockman, K. CIGRE/ CIRED/ UIE joint working group C4.110, voltage dip immunity of equipment in installations – Main contributions and conclusions. *CIRED 2009 – 20th International Conference and Exhibition on Electricity Distribution. Part 1.* Prague, Czech Republic, 2009, pp. 1–4. DOI: 10.1049/cp.2009.0584.

6. Kang, Z., Yuan, T., Liu, J. Assessment and Treatment of Voltage Sag Based on Electric-Process PIT. *21st International Conference on Harmonics and Quality of Power (ICHQP).* Chengdu, China, 2024, pp. 730–735. DOI: 10.1109/ICHQP61174.2024.10768758.

7. Tukhvatullin, L.T., Isakov, R.G. Opredelenie kriticheskogo vremeni ustoychivosti raboty tekhnologicheskogo agregata pri provalakh napryazheniya [Determination of the critical time of stability of operation of a technological unit during voltage dips]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Elektromekhanika*, 2026, vol. 69, no. 1, pp. 85–92. DOI: 10.17213/0136-3360-2026-1-85-92.

8. Tukhvatullin, L.T., Isakov, R.G. *Imitatsionnaya model' tekhnologicheskogo agregata s nagruzkoy v vide tsentrobezhnogo nasosa dlya issledovaniya ustoychivosti pri provalakh napryazheniya* [Simulation model of a process unit with a centrifugal pump load for studying stability during voltage dips]. Svidetel'stvo o gosudarstvennoy registratsii programmy dlya EVM RF [Certificate of State Registration of Computer Program in Russia]. No. 2025694425, 2025.

9. Aleshin, K.S., Kuz'mina, N.V., Semushkin, A.A., Shadrikova, T.Y., Shuin, V.A. Mul'tichastotnaya napravlennaya zashchita ot zamykaniy na zemlyu v nekompensirovannykh setyakh 6–10 kV [Multi-frequency directional protection against earth faults in uncompensated 6–10 kV networks]. *Vestnik IGEU*, 2025, issue 5, pp. 39–49. DOI: 10.17588/2072-2672.2025.5.039-049.

10. Ho, D., Li, Yu., Li, B., Syue, Sh. Novyy printsip osushchestvleniya tokovoy differentsial'noy zashchity dlya liniy elektroperedachi ul'travysokogo napryazheniya [A New Principle for Implementing Differential Current Protection for Extra-High-Voltage Power Lines]. *Elektrichestvo*, 2015, no. 2, pp. 17–22.

11. Leviush, A.I. Differentsial'naya zashchita liniy elektroperedach [Differential Protection of Power Lines]. *Releynaya zashchita i avtomatizatsiya,* 2014, no. 4(17), pp. 30–34.