

## ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКА

---

УДК 621.3

**Юлия Николаевна Кондрашова**

ФГБОУВО «Магнитогорский государственный технический университет имени Г.И. Носова», кандидат технических наук, доцент кафедры электроснабжения промышленных предприятий, Россия, Магнитогорск, e-mail: rotjuil720@mail.ru

**Ольга Викторовна Газизова**

ФГБОУВО «Магнитогорский государственный технический университет имени Г.И. Носова», кандидат технических наук, доцент кафедры электроснабжения промышленных предприятий, Россия, Магнитогорск, e-mail: logan\_b\_7@mail.ru

**Алексей Вячеславович Малафеев**

ФГБОУВО «Магнитогорский государственный технический университет имени Г.И. Носова», кандидат технических наук, доцент кафедры электроснабжения промышленных предприятий, Россия, Магнитогорск, e-mail: malapheev\_av@mail.ru

### **Повышение эффективности противоаварийной автоматики при перспективном подключении источников распределенной генерации**

#### **Авторское резюме**

**Состояние вопроса.** Совершенствование энергоемких технологических процессов промышленных предприятий требует повышения надежности и экономичности электроснабжения потребителей. В связи с этим в энергетической отрасли осваивается одно из приоритетных направлений, связанных с повсеместным внедрением источников распределенной генерации. Данная тенденция имеет не только положительные аспекты, она усложняет управление нормальными, аварийными и послеаварийными режимами систем электроснабжения предприятий черной металлургии. При внедрении новых источников распределенной генерации в условиях сложнзамкнутой системы электроснабжения необходимо оценить уровень токов короткого замыкания для проверки электрооборудования и остаточные напряжения на шинах ответственных потребителей черной металлургии, определить предельные времена отключения генераторов и оценить их устойчивость при выходе на раздельную работу.

**Материалы и методы.** Алгоритм автоматизированного поиска точки раздела при аварийном выходе на раздельную работу в зависимости от баланса мощностей в целях сохранения устойчивости разработан на основе сочетания методов последовательного эквивалентирования и последовательных интервалов.

**Результаты.** В целях повышения надежности ответственных потребителей разработан алгоритм автоматического поиска точки раздела при работе делительной автоматики в зависимости от баланса мощностей для сохранения устойчивости генераторов. Разработано оригинальное программное обеспечение для оценки эффективности противоаварийной автоматики многоуровневой сложнзамкнутой системы электроснабжения металлургического предприятия.

**Выводы.** Выполненные расчеты и анализ аварийных и послеаварийных режимов предназначены для разработки комплексного подхода, содержащего совокупность мероприятий для обеспечения надежности и сохранения устойчивости ответственных потребителей в режиме автоматического поиска.

**Ключевые слова:** энергоемкий потребитель, объекты распределенной генерации, динамическая устойчивость, надежность потребителей, противоаварийная делительная автоматика

**Julia Nikolaevna Kondrashova**

Magnitogorsk State Technical University, Candidate of Engineering Sciences, (PhD), Associate Professor of Power Supply of Industrial Enterprises Department, Russia, Magnitogorsk, e-mail: rotjuil720@mail.ru

**Olga Viktorovna Gazizova**

Magnitogorsk State Technical University, Candidate of Engineering Sciences, (PhD), Associate Professor of Power Supply of Industrial Enterprises Department, Russia, Magnitogorsk, e-mail: logan\_b\_7@mail.ru

**Alexey Vacheslavovich Malafeev**

Magnitogorsk State Technical University, Candidate of Engineering Sciences, (PhD), Associate Professor of Power Supply of Industrial Enterprises Department, Russia, Magnitogorsk, e-mail: malapheev\_av@mail.ru

## **Improving the efficiency of emergency control systems for future-oriented connection of sources of distributed generation**

### **Abstract**

**Background.** Improvement of energy-intensive technological processes of industrial enterprises requires increasing the reliability and efficiency of power supply of consumers. In this regard, one of the priority areas associated with introduction of the sources of distributed generation is mainstreamed in energy industry. This trend has both beneficial and negative impacts. It makes difficult to control normal, emergency, and post-emergency modes of power supply systems of enterprises of ferrous metallurgy. When new sources of distributed generation are introduced under the conditions of complex closed-loop power supply system, it is necessary to assess the level of short-circuit currents to check the electrical equipment and residual voltages across the busbars of the consumers of ferrous metallurgy. Also, it is necessary to determine the critical time of generators dropping and evaluate the stability in case of isolated operation.

**Materials and methods.** An algorithm has been developed for automated search of a dividing point in case of an emergency and isolated operation depending on the power balance to maintain stability. It is based on a combination of the method of successive network reduction and step-by-step method.

**Results.** To improve the reliability of essential consumers, the authors have developed an algorithm for automatic search for the dividing point during operation of emergency control system depending on the power balance to maintain stability. The authors have developed proprietary software to assess the effectiveness of emergency automation equipment of multi-level complex closed-loop power supply system of metallurgical enterprise.

**Conclusions.** Performed calculations and analysis of emergency and post-emergency modes are designed to develop a comprehensive approach of a set of measures to ensure the reliability and stability of essential consumers in the mode of automatic search.

**Key words:** energy-intensive consumer, distributed generation facilities, dynamical stability, reliability of consumers, emergency control system

**DOI:**10.17588/2072-2672.2022.2.029-037

**Введение.** Как показывает современное состояние энергетики и ресурсов энергосбережения РФ, важной задачей развития в области электроэнергетики России является последовательная интеллектуализация систем электроснабжения. При этом, согласно проекту Энергетической стратегии России на период до 2035 года, необходимы разработка и внедрение современных технологий, обеспечивающих эффективность

управления режимами, повышение надежности и безопасности. В условиях расширения собственной энергетической базы промышленных предприятий особый интерес представляют анализ последствий выхода на отдельную работу генераторов собственных нужд электростанций в различных условиях и оценка эффективности точки делительной автоматики. Проводимые исследования являются актуальными и в

дальнейшем позволят оценить и спрогнозировать варианты рабочих схем и выдать рекомендации по конфигурации промышленных энергоузлов для реализации их в общей энергосистеме. Комплекс мер позволит предотвратить развитие, снизить возникшие последствия аварий и повысить показатели качества электроэнергии путем обеспечения бесперебойности основных производственных цехов технологического процесса.

Расчеты для данных исследований предполагается производить с помощью оригинального программного обеспечения с использованием разработанного авторами алгоритма автоматического поиска точки раздела при работе делительной автоматики в зависимости от баланса мощностей в целях сохранения устойчивости генераторов.

**Методы исследования.** В общем случае крупный промышленный энергоузел представляет собой сложный многоступенчатый объект, сочетающей в себе разные функциональные назначения и объекты с разным номинальным напряжением. Особый интерес представляет внедрение разнородных объектов распределенной генерации в составе крупных энергоузлов предприятий черной металлургии, имеющих собственные источники распределенной генерации и связь с энергосистемой большой мощности. Как правило, в таких узлах вся вырабатываемая электроэнергия затрачивается на собственные цеха. Такая электроэнергия на порядок дешевле покупной, поскольку общая доля российских электростанций работает на природном газе, который в последнее время имеет динамику роста цен для промышленных предприятий. Основная же часть используемого газа на этих электростанциях является вторичным энергоресурсом – это доменный и коксовый газы. Максимальная мощность генерирующего оборудования на промышленных электростанциях, как правило, изменяется от 4 до 60 МВт. Большую долю составляют конденсационные паровые турбины, часть которых работает в теплофикационном режиме. Также на промышленной площадке присутствуют и генераторы с противодавлением. Вырабатываемая электроэнергия по классу напряжения различна и составляет от 3,15 до 10,5 кВ с дальнейшей трансформацией на 110 кВ. Схема электроснабжения промышленного энергоузла подключена к энергосистеме напряжением 220 и 500 кВ. Основное пита-

ние он получает с подстанций связи напряжением 500/220/110 кВ.

Как и в любом металлургическом производстве черной металлургии, покрывающем затраты на электроэнергию в соответствии с собственными потребностями, четко прослеживается, что режим работы металлообрабатывающего производства и металлообработки производителя полного металлургического цикла, начиная с подготовки железорудного сырья и заканчивая глубокой переработкой черных металлов, зависит от режима работы системы электроснабжения. Так, отключение электроэнергии приводит к нарушению технологических процессов, что ведет к значительным материальным затратам и временному простоям оборудования до нескольких месяцев. Наличие собственной электростанции и сети небольшой протяженности приводит к большим значениям токов короткого замыкания и низким остаточным напряжениям. Присутствует зависимость режима от напряжения энергосистемы, что объясняется неполным использованием функции регулирования реактивной мощности в электростанциях из-за высокой нагрузки на генератор по активной мощности. Для данной системы электроснабжения характерно наличие множества потребителей электроэнергии с разной установленной мощностью. Иногда установленная мощность агрегата может превышать номинальную мощность генератора, поэтому двигатели высокого напряжения следует рассматривать индивидуально. Наличие крупномасштабных энергоустановок на ограниченных территориях промышленной зоны и короткие связи между источниками энергии создают специфические условия работы для всей энергосистемы промышленного энергоузла. Создаются сложные условия для работы релейной защиты и противоаварийной автоматики. Таким образом, изучение этого объекта непременно сыграет положительную роль для повышения эффективности оперативной диспетчеризации систем электроснабжения и объектов распределенной генерации.

В качестве объекта исследования была выбрана паровоздуховная электростанция (ПВЭС-3), основной задачей которой является обеспечение бесперебойного снабжения обогащенного кислородом дутья на доменную печь. В настоящее время в рассматрива-

емом энергоузле функционируют ПВЭС-1,2, обеспечивающие цех, помимо электро-энергии, дутьем. Кроме трех воздуходувок, будут дополнительно установлены два генератора суммарной установленной мощностью 100 МВт (рис. 1). Их работа будет осуществляться через силовые трансформаторы на ОРУ-110 кВ. Особенно примечательно то, что на то же ОРУ-110 кВ в дальнейшем предполагается подключение двух газовых утилизационных бескомпрессорных турбин (ГУБТ) с максимальной мощностью 20 МВт каждая. В настоящее время такое решение зарекомендовало себя как актуальное и полезное, особенно в связи с действием положения об экологической политике стандарта ISO 14001. Все вышесказанное открывает новые перспективы к обеспечению долговечности электрооборудования и бесперебойной работе устройств технологической линии черной металлургии. Само же ОРУ-110 кВ ПВЭС-3 будет присоединяться в общую энергосистему посредством врезки в две линии связи 110 кВ, врезанные между одной из существующих собственных электростанций ЦЭС и подстанцией № 96.

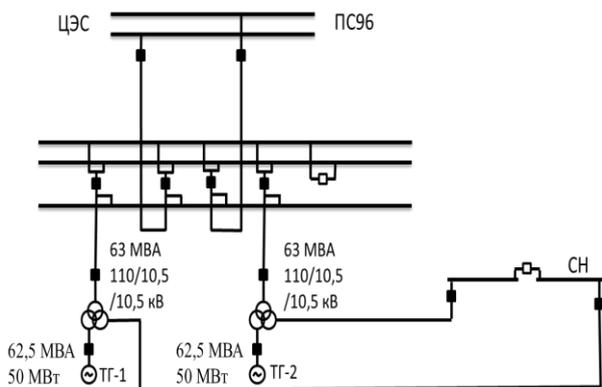


Рис. 1. Высоковольтная схема ПВЭС-3

Чтобы оценить актуальность исследований на реальной промышленной паровоздуходувной электростанции ПВЭС-2, был произведен анализ аварийных ситуаций. Результаты обработки статистических данных по аварийным ситуациям, произошедшим в период с 2016 и по 1 квартал 2021 года, сведены в таблицу, в которой отмечены наиболее значимые аварийные ситуации, связанные с выходом из строя цехового оборудования, с указанием места и события.

### Аварийные ситуации на ПВЭС-1, 2

Участок	Место	Событие
ПС № 25	Дымосос-3Б	Ремонт электрического кабеля
ПС № 25	ф.25-17 (ф.26-24 рабочий ввод)	Ремонт масляного выключателя
Турбинный участок	Турбогенератор-1	Сброс нагрузки (потеря возбуждения)
Турбинный участок	Турбогенератор-4	Определение поврежденного кабеля
Котельный участок	Котел-7	КЗ на выводах двигателя дутьевого вентилятора 7Б
Котельный участок	Дутьевой вентилятор-7А	Ремонт кабеля
Электротехнический участок	Трансформатор-10	Пробой изоляции. Перенапряжение
Турбинный участок	Турбогенератор-3	Ремонт системы возбуждения
Турбинный участок	Турбогенератор-3	КЗ обмотки ротора
Турбинный участок	Турбогенератор-2	КЗ статора
Турбинный участок	Турбогенератор-1	Ремонт системы возбуждения (разрыв обмотки возбуждения)
Турбинный участок	Турбогенератор-4	Устранение действия дифференциальной защиты отключения турбогенератора от сети
Турбинный участок	Турбогенератор-4	Ремонт системы возбуждения
Котельный участок	Котел-1	КЗ на выводах двигателя дутьевого вентилятора 1А 90 (КЗ вывод двигателя)
Котельный участок	Котел-3	КЗ на дымосос 3А (КЗ статора на ротор)
Электротехнический участок	Ячейка 11 (ДБ-75 25 кВА)	Ремонт вентилятора обдува электродвигателя
Турбинный участок	ПС 25, 26 (1,2,3 системы шин)	КЗ на линии 110 кВ
Котельный участок	Котел-6	КЗ на выводах двигателя дутьевого вентилятора 6А
Турбинный участок	Турбогенератор-2	Падение изоляции обмотки ротора
Турбинный участок	Турбогенератор-4	Короткое замыкание на линии
Турбинный участок	Турбогенератор-3	Возгорание высоковольтного ввода

Анализ полученных данных показывает, что возникновение коротких замыканий является одной из частых причин нарушения электроснабжения ответственных потребителей производственных механизмов. Подобные аварии могут приводить к длительным простоям цеховых электроприемников, что обуславливает актуальность проводимых исследований.

Анализ аварийных инцидентов, произошедших с электрооборудованием, показывает, что основная часть аварий в большинстве случаев связана с дефектами непосредственно самих генераторов. Например, за рассмотренный период произошло девять аварий, основная их часть приходится на потерю возбуждения генератора, а именно: короткое замыкание в обмотке ротора; неисправность станции возбуждения; неисправность самого возбудителя. В остальных случаях это повреждение обмотки статора. На втором месте – инциденты, связанные с повреждением кабельных и воздушных линий электропередач. На третьем месте – неисправности силовых трансформаторов. Диаграмма аварийности электрооборудования ПВЭС-1,2 приведена на рис. 2.

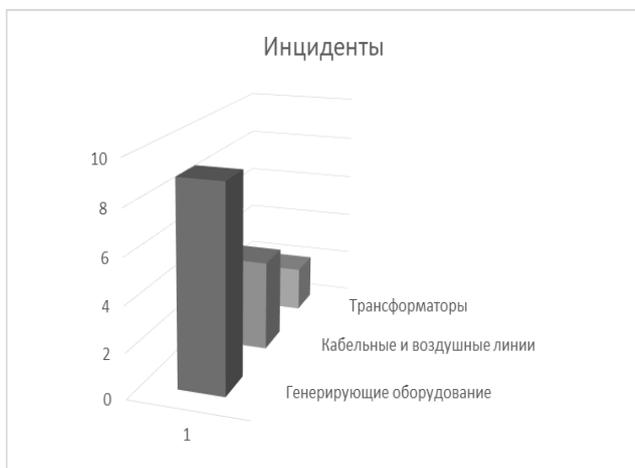


Рис. 2. Диаграмма аварийности электрооборудования ПВЭС-1,2

Особый интерес представляют аварийные ситуации, связанные с выходом узла на раздельную работу из режима короткого замыкания. Так, короткое замыкание может возникнуть в результате повреждения изоляции, перенапряжений, ударов молнии и т.д. Как показывает практика, деление автоматически происходит по шинам связи с энергосистемой ОРУ-110 кВ и данные шины автоматически становятся точкой

отделения от энергосистемы. Соответственно, длительность короткого замыкания определяет параллельную работу с энергосистемой. Следующим этапом работает дифференциальная защита шин, и электростанция выходит на раздельную работу. Связь между источниками осуществляется по шинам генераторного напряжения. Машины при этом должны втянуться в синхронизм относительно друг друга, затем должна быть обеспечена достаточная статическая устойчивость послеаварийного режима. Основной проблемой таких режимов у собственных электростанций является сбалансированность генерируемых и потребляемых активных и реактивных мощностей, что не всегда будет обеспечено, так как ремонты генераторов в летнее время существенно изменяют состав работающих источников и ухудшают устойчивость. Кроме того, нормативные документы, как правило, предполагают сбалансированность генерируемых и потребляемых мощностей с учетом заранее выбранных точек делительной автоматики, а шины с коротким замыканием не рассматривают.

Вопросам анализа динамической и результирующей устойчивости электроэнергетических систем посвящено значительное количество работ как зарубежных [1–6], так и отечественных ученых [7–12]. На рис. 3 показан алгоритм автоматизированного поиска точки раздела при аварийном выходе на раздельную работу в зависимости от баланса мощностей в целях сохранения устойчивости. Данный алгоритм актуален как при выходе на раздельную работу в результате снижения частоты в системе, так и при работе дифференциальной защиты шин при отключении короткого замыкания с последующим отделением от энергосистемы. Необходимость разработки алгоритма обусловлена также тем, что при внедрении источников распределенной генерации в сложносвязанной промышленной системе электроснабжения в течение суток могут существенно изменяться нагрузки цехов и, как следствие, потокораспределение мощностей в сети. При выходе на раздельную работу сохранение баланса мощностей генераторов и нагрузки в выделенном узле является одним из условий сохранения устойчивости и возможности последующей ресинхронизации с энергосистемой. В целях обеспечения такого баланса возможно применение циф-

ровых двойников, позволяющих на основе информации о нагрузках и сведениях о составе генераторов выбирать либо точки деления с энергосистемой, либо отключение нагрузок или перевод их на резервные источники в процессе отключения от сети.

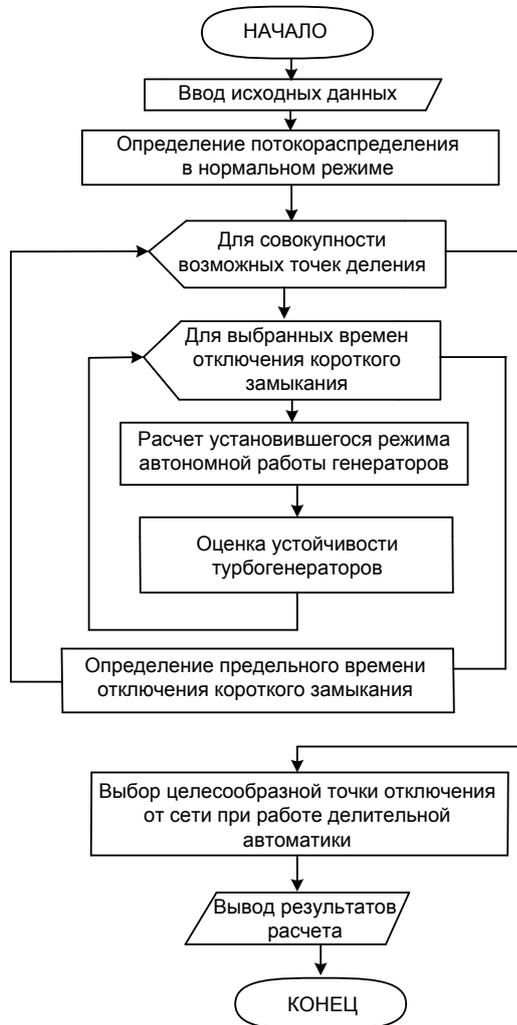


Рис. 3. Алгоритм автоматизированного поиска точки раздела при работе делительной автоматики в зависимости от баланса мощностей

На этапе планирования эксплуатационных режимов предполагается предварительный расчет установившегося режима в соответствии с имеющимися нагрузками, при котором определяется потокораспределение в сети. Далее для выбранных ранее возможных точек действия делительной автоматики определяется динамическая устойчивость синхронных генераторов в режиме короткого замыкания и его последующего отключения с выходом на раздельную работу. По результатам совокупности расчетов определяется критическое время отключения короткого замыкания в зависимости от конфигурации сети.

Затем происходит выбор конфигурации сети с учетом предельного времени отключения. Полученный алгоритм в сочетании с разработанным с участием авторов оригинальным программным обеспечением расчета режимов позволит повысить устойчивость заводских синхронных генераторов и снизить количество аварийных простоев электроприемников металлургических цехов.

С учетом данных положений были проведены исследования на электростанции ПВЭС-3. Расчет токов режимов короткого замыкания и выхода на раздельную работу проводился с помощью оригинального программного комплекса [13–15]. Особенности математического моделирования промышленных электроприемников изложены в [15–17]. В таких режимах большое значение имеет правильная работа систем регулирования возбуждения и скорости [18–20].

**Результаты исследования.** Как показывают расчеты, при выходе на раздельную работу генераторов ПВЭС-3 при коротком замыкании максимальное время отключения составляет 0,4 с. Во всех режимах зафиксировано увеличение напряжения на секциях сборных шин 110 кВ на 10–15 %, что свидетельствует об избытке реактивной мощности, возникающем вследствие отключения части нагрузки, а также увеличение частоты примерно на 0,3 %, что свидетельствует о незначительном переизбытке активной мощности, возникающем вследствие отключения части нагрузки, и об эффективной работе регулятора скорости.

На рис. 4 и 5 изображены взаимные углы в режиме раздельной работы ПВЭС-3 при коротком замыкании на линии 110 кВ ЦЭС – ПС № 96 относительно ТГ1 ПВЭС-3.

При выходе на раздельную работу основными показателями устойчивости являются не собственные, а взаимные углы генераторов относительно друг друга. Программное обеспечение [21] позволяет анализировать изменение углов во времени и судить о результирующей устойчивости при выходе на раздельную работу. На взаимные углы существенно влияет время отключения КЗ, так как генераторы не существенно удалены от шин ЦЭС и ПС № 96 (см. рис. 1). При увеличении времени отключения короткого замыкания наблюдается выпадение генераторов из синхронизма (рис. 5).

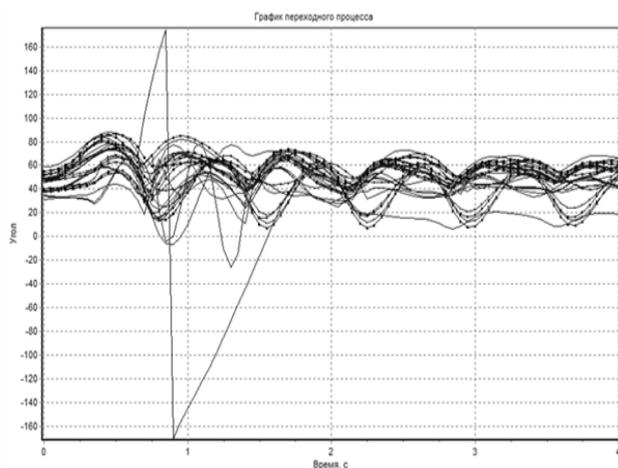


Рис. 4. Взаимные углы генераторов относительно ТГ1 ПВЭС-3 при выходе на раздельную работу при  $t_{\text{предел.откл}} = 0,4$  (возможный вариант №1 и №2)

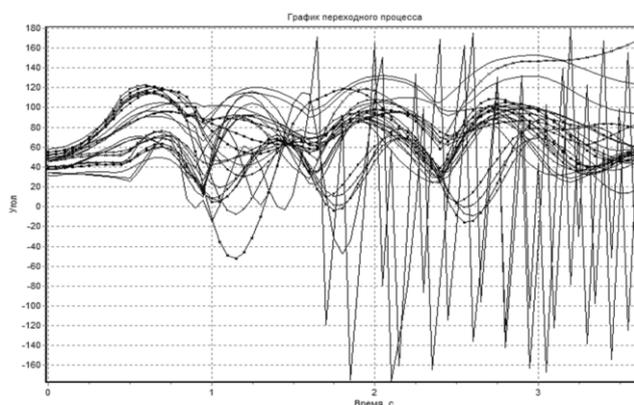


Рис. 5. Взаимные углы генераторов ПВЭС-3 при выходе на раздельную работу при  $t_{\text{предел.откл}} = 0,5$

**Выводы.** В ходе исследований проблемы влияния источников распределенной генерации на надежность и устойчивость систем электроснабжения сложной конфигурации предприятий черной металлургии установлено, что их внедрение наряду с повышением бесперебойности питания ответственных потребителей и экономичности вызывает существенное усложнение возможных нормальных эксплуатационных и аварийных режимов.

Разработанный алгоритм автоматизированного поиска точки раздела при работе делительной автоматики в зависимости от баланса мощностей в целях сохранения устойчивости и оригинальное программное обеспечение для оценки эффективности противоаварийной автоматики многоуровневой сложноразветвленной системы электроснабжения металлургического предприятия могут быть использованы в каче-

стве рекомендаций в схеме для реализации установившихся и переходных режимов, а также для изменения проверки уставок релейной защиты и делительной автоматики на действующем объекте.

Одним из основных мероприятий при этом станет определение эффективной конфигурации при выходе на раздельную работу, что снизит время простоев промышленных потребителей в случае развития аварийных ситуаций.

### Список литературы

1. Shi X., Mu S. Research on Measures to Improve Stability of the Power System // Applied Mechanics and Materials. – 2015. – Vol. 742. – P. 648–652.
2. Power System Stability Enhancement Using FACTS Controllers in Multimachine Power Systems / Y. Welhazi, T. Guesmi, I. Ben Jaoued, H.H. Abdallah // J. Electrical Systems. – 2014. – No. 10–3. – P. 276–291.
3. Harikrishna D., Srikanth N.V. Dynamic Stability Enhancement of Power Systems Using Neural-Network Controlled Static-Compensator // TELKOMNIKA. – March, 2012. – Vol. 10, no. 1. – P. 9–16.
4. Boudour M., Hellal A. Power System Dynamic Security Mapping Using Synchronizing and Damping Torques Technique // The Arabian Journal for Science and Engineering. – 2005. – Vol. 30, no. 1B.
5. Post-disturbance transient stability assessment of power systems by a self-adaptive intelligent system / R. Zhang, Y. Xu, Z. Dong, K. Wong // The Institution of Engineering and Technology IET Gener. Transm. Distrib. – 2015. – Vol. 9, issue 3. – P. 296–305.
6. Trajectory sensitivity analysis on the equivalent one-machine-infinite-bus of multi-machine systems for preventive transient stability control / Y. Xu, Z.Y. Dong, J. Zhao, et al. // The Institution of Engineering and Technology IET Gener. Transm. Distrib. – 2015. – Vol. 9, issue 3. – P. 276–286.
7. Жданов П.С. Вопросы устойчивости энергетических систем / под ред. Л.А. Жукова. – М.: Энергия, 1979. – 456 с.
8. Кимбарк Э. Синхронные машины и устойчивость электрических систем. – М.; Л.: Госэнергоиздат, 1960. – 392 с.
9. Казовский Е.Я. Переходные процессы в электрических машинах переменного тока. – М.; Л.: Изд-во Академии наук СССР, 1962. – 625 с.
10. Ковач К.П., Рац И. Переходные процессы в машинах переменного тока. – М.; Л.: Госэнергоиздат, 1963. – 744 с.
11. Абрамович Б.Н., Устинов Д.А., Поляков В.Е. Динамическая устойчивость электромеханических комплексов с синхронными

и асинхронными двигателями на предприятиях с непрерывным технологическим циклом // Промышленная энергетика. – 2011. – № 4. – С. 21–23.

12. **Гусев Ю.П., Каюмов А.Г.** Влияние динамической несинфазности синхронных генераторов на токи коротких замыканий в электроэнергетических системах // Электричество. – 2021. – № 3. – С. 26–32.

13. **Kondrashova Y.N., Gazizova O.V., Malapheev A.V.** Increasing the efficiency of power resource management as a solution of issues of the power supply system stability // *Procedia Engineering*. – 2015. – Vol. 128. – P. 759–763.

14. **Gazizova O.V., Kondrashova Y.N., Sokolov A.P.** Analysis of Short Circuit Transients with Separate Operation of Iron and Steel Industry Power Plant with Account of Dynamic Characteristics of Industrial Load // *Proceedings – 2019 International Ural Conference on Electrical Power Engineering, UralCon 2019*. – 2019. – P. 7–12.

15. **Газизова О.В., Кондрашова Ю.Н., Малафеев А.В.** Повышение эффективности управления режимами электростанций промышленного энергоузла за счет прогнозирования статической и динамической устойчивости при изменении конфигурации сети // *Электротехнические системы и комплексы*. – 2016. – № 3(32). – С. 27–38.

16. **Gazizova O.V., Malafeyev A.V., Kondrashova Y.N.** Mathematical simulation of the operating emergency conditions for the purpose of energy efficiency increase of thermal power plants management // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering Ser. "International Conference on Mechanical Engineering, Automation and Control Systems 2015, MEACS 2015"*. – 2016. – С. 012056.

17. **Повышение** качества электропитания современного ГОКа / Г.П. Корнилов, И.Р. Абдулвелеев, Ю.Н. Кондрашова, К.Э. Одинцов // *Горный журнал*. – 2020. – № 12. – С. 82–86.

18. **Анализ** допустимости режима потери возбуждения синхронного генератора в условиях промышленной системы электроснабжения сложной конфигурации / О.В. Газизова, А.П. Соколов, Н.Т. Патшин, Ю.Н. Кондрашова // *Электротехнические системы и комплексы*. – 2019. – № 2(43). – С. 12–18.

19. **Sokolov A.P., Gazizova O.V., Kondrashova Y.N.** Study of the Transients with the Loss of Field of the Synchronous Generator in the Industrial Electric Power Station // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. International Scientific-Practical Conference on Quality Management and Reliability of Technical Systems 2019*. – 2019. – С. 012033.

20. **Sokolov A.P., Gazizova O.V.** Improving the Accuracy Mathematical Modeling of Transients Emergency Mode Industrial Facilities Distributed Generation // *2018 International Youth Scientific and*

*Technical Conference Relay Protection and Automation, RPA 2018*. – 2018. – С. 8537190.

21. **Свидетельство** о регистрации программы для ЭВМ RU 2019610251. Комплекс автоматизированного режимного анализа КАТРАН 10.0 / В.А. Игуменцев, А.В. Малафеев, Е.А. Панова и др. Заявка № 2018661952 от 29.10.2018; опубл. 09.01.2019.

## References

1. Shi, X., Mu, S. Research on Measures to Improve Stability of the Power System. *Applied Mechanics and Materials*, 2015, vol. 742, pp. 648–652.

2. Welhazi, Y., Guesmi, T., Ben Jaoued, I., Abdallah, H.H. Power System Stability Enhancement Using FACTS Controllers in Multimachine Power Systems. *J. Electrical Systems*, 2014, no. 10–3, pp. 276–291.

3. Harikrishna, D., Srikanth, N.V. Dynamic Stability Enhancement of Power Systems Using Neural-Network Controlled Static-Compensator. *TELKOMNIKA*, March 2012, vol. 10, no. 1, pp. 9–16.

4. Boudour, M., Hellal, A. Power System Dynamic Security Mapping Using Synchronizing and Damping Torques Technique. *The Arabian Journal for Science and Engineering*, 2005, vol. 30, no. 1B.

5. Zhang, R., Xu, Y., Dong, Z.Y., Wong, K. Post-disturbance transient stability assessment of power systems by a self-adaptive intelligent system. *The Institution of Engineering and Technology IET Gener. Transm. Distrib.*, 2015, vol. 9, issue 3, pp. 296–305.

6. Xu, Y., Dong, Z.Y., Zhao, J., Xue, Y., Hill, D.J. Trajectory sensitivity analysis on the equivalent one-machine-infinite-bus of multimachine systems for preventive transient stability control. *The Institution of Engineering and Technology IET Gener. Transm. Distrib.*, 2015, vol. 9, issue 3, pp. 276–286.

7. Zhdanov, P.S. *Voprosy ustoychivosti energeticheskikh sistem* [Issues of stability of power systems]. Moscow: Energiya, 1979. 456 p.

8. Kimbark, E. *Sinkhronnye mashiny i ustoychivost' elektricheskikh sistem* [Synchronous machines and stability of the electrical systems]. Moscow; Leningrad: Gosenergoizdat, 1960. 392 p.

9. Kazovskiy, E.Ya. *Perekhodnye protsessy v elektricheskikh mashinakh peremennogo toka* [Transients in AC electric machines]. Moscow; Leningrad: Izdatel'stvo Akademii nauk SSSR, 1962. 625 p.

10. Kovach, K.P., Rats, I. *Perekhodnye protsessy v mashinakh peremennogo toka* [Transients in AC machines]. Moscow; Leningrad: Gosenergoizdat, 1963. 744 p.

11. Abramovich, B.N., Ustinov, D.A., Polyakov, V.E. *Dinamicheskaya ustoychivost' elektromekhanicheskikh kompleksov s sinkhronnymi i asinkhronnymi dvigatelyami na predpriya-*

tiyakh s nepreryvnym tekhnologicheskim tsiklom [Dynamic stability of the electromechanical complexes with synchronous and induction motors at the enterprises with continuous technological cycle]. *Promyshlennaya energetika*, 2011, no. 4, pp. 21–23.

12. Gusev, Yu.P., Kayumov, A.G. Vliyaniye dinamicheskoy nesinfaznosti sinkhronnykh generatorov na toki korotkikh zamykaniy v elektroenergeticheskikh sistemakh [Influence of dynamic non-synchronous synchronous generators on the short-circuit currents in the electrical power systems]. *Elektrichestvo*, 2021, no. 3, pp. 26–32.

13. Kondrashova, Y.N., Gazizova, O.V., Malapheev, A.V. Increasing the efficiency of power resource management as a solution of issues of the power supply system stability. *Proceedia Engineering*, 2015, vol. 128, pp. 759–763.

14. Gazizova, O.V., Kondrashova, Y.N., Sokolov, A.P. Analysis of Short Circuit Transients with Separate Operation of Iron and Steel Industry Power Plant with Account of Dynamic Characteristics of Industrial Load. *Proceedings – 2019 International Ural Conference on Electrical Power Engineering, UralCon 2019*, 2019, pp. 7–12.

15. Gazizova, O.V., Kondrashova, Yu.N., Malafeev, A.V. Povysheniye effektivnosti upravleniya rezhimami elektrostantsiy promyshlennogo energouzla za schet prognozirovaniya staticheskoy i dinamicheskoy ustoychivosti pri izmenenii konfiguratsii seti [Increasing the efficiency of power plant modes control of industrial power plants by predicting static and dynamic stability when changing the network configuration]. *Elektrotekhnicheskie sistemy i komplekсы*, 2016, no. 3(32), pp. 27–38.

16. Gazizova, O.V., Malafeyev, A.V., Kondrashova, Y.N. Mathematical simulation of the operating emergency conditions for the purpose of energy efficiency increase of thermal power plants management. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering Ser. "International Conference on Mechanical*

*Engineering, Automation and Control Systems 2015, MEACS 2015"*, 2016, pp. 012056.

17. Kornilov, G.P., Abdulveleev, I.R., Kondrashova, Yu.N., Odintsov K.E. Povysheniye kachestva elektrosnabzheniya sovremennogo GOKa [Improvement of power supply quality of modern mining and processing plant]. *Gornyy zhurnal*, 2020, no. 12, pp. 82–86.

18. Gazizova, O.V., Sokolov, A.P., Patshin, N.T., Kondrashova, Yu.N. Analiz dopustimosti rezhima poteri vzbuzhdeniya sinkhronnogo generatora v usloviyakh promyshlennoy sistemy elektrosnabzheniya slozhnoy konfiguratsii [Analysis of admissibility of excitation loss mode of synchronous generator in conditions of industrial power supply system of complex configuration]. *Elektrotekhnicheskie sistemy i komplekсы*, 2019, no. 2(43), pp. 12–18.

19. Sokolov, A.P., Gazizova, O.V., Kondrashova, Yu.N. Study of the Transients with the Loss of Field of the Synchronous Generator in the Industrial Electric Power Station. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. International Scientific-Practical Conference on Quality Management and Reliability of Technical Systems 2019*, 2019, pp. 012033.

20. Sokolov, A.P., Gazizova, O.V. Improving the Accuracy Mathematical Modeling of Transients Emergency Mode Industrial Facilities Distributed Generation. *2018 International Youth Scientific and Technical Conference Relay Protection and Automation, RPA 2018*, 2018, pp. 8537190.

21. Igumenshchev, V.A., Malafeev, A.V., Panova, E.A., Varganova, A.V., Gazizova, O.V., Kondrashova, Yu.N., Zinov'ev, V.V., Yuldasheva, A.I., Krubtsova, A.A., Anisimova, N.A., Nasibullin, A.T., Tremasov, M.A., Shcherbakova, V.S., Bogush, V.K. Kompleks avtomatizirovannogo rezhimnogo analiza KATRAN 10.0 [Automated mode analysis complex KATRAN 10.0]. *Svidetel'stvo o registratsii programmy dlya EVM RU 2019610251* [Registration certificate for computer software RU 2019610251], 2018.