

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПРЕДЕЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ РЕЖИМОВ ДЛЯ ОБЕСПЕЧЕНИЯ УСПЕШНОЙ РЕСИНХРОНИЗАЦИИ ОБЪЕКТОВ РАСПРЕДЕЛЕННОЙ ГЕНЕРАЦИИ В УСЛОВИЯХ ПРЕДПРИЯТИЯ ЧЕРНОЙ МЕТАЛЛУРГИИ

О.В. Газизова, А.В. Малафеев, Ю.Н. Кондрашова

*Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова,
г. Магнитогорск*

Развитие объектов распределенной генерации и усложнение конфигурации электрической сети приводит к повышению числа возможных аварийных режимов промышленных систем электроснабжения. При коротком замыкании в связи с энергосистемой или снижении частоты в питающей сети электростанция с частью электроприемников выходит на отдельную работу. После отключения поврежденных линий должна быть выполнена автоматическая ресинхронизация узла с сетью. С целью исследования подобных аварийных режимов разработан алгоритм расчета переходных электромеханических процессов в промышленных системах электроснабжения. На основе созданного алгоритма разработан программный комплекс, позволяющий исследовать подобные электромеханические режимы. В связи с тем, что выход на отдельную работу может осуществляться при различном составе источников электроэнергии и нагрузки, была получена методика определения предельных небалансов мощностей при заданном времени работы автоматического повторного включения. Исследования производились на примере промышленной электростанции, имеющей в своем составе генераторы разной мощности и питающей энергоемкую промышленную нагрузку. Разработаны мероприятия по повышению результирующей устойчивости в условиях заданной промышленной системы электроснабжения. Созданный программный комплекс может быть использован в качестве советчика диспетчера для повышения эффективности управления режимами собственных электростанций промышленного предприятия.

Ключевые слова: распределенная генерация, отдельная работа, ресинхронизация, результирующая устойчивость.

Введение

В условиях развития современной энергетики одной из тенденций является внедрение объектов распределенной генерации такими крупными потребителями электроэнергии, как металлургические предприятия. В качестве источников питания используются газотурбинные, парогазовые, газопоршневые и паротурбинные электростанции.

Помимо аварийных режимов при параллельной работе с электроэнергетической системой в таких сетях возможны режимы, связанные с отделением собственных электростанций от энергосистемы и последующей ресинхронизацией. Это наиболее сложные режимы с точки зрения сохранения динамической устойчивости при выходе на отдельную работу и результирующей устойчивости в момент ресинхронизации.

Как показывает опыт эксплуатации, в ряде случаев выход на отдельную работу сопровождается нарушением устойчивости синхронных генераторов в узле, что приводит к нарушению электроснабжения ответственных потребителей, необходимости останавливать отдельные генераторы и повторно их индивидуально синхронизировать с

сетью. При коротких замыканиях в питающей сети на напряжениях 110–220 кВ и срабатывании делительной автоматики ущерб от недоотпуска электроэнергии в результате нарушения динамической и результирующей устойчивости может быть весьма существенным. В связи с этим исследование подобных режимов представляет интерес с целью определения условий, способствующих сохранению устойчивости. К этим условиям следует отнести небаланс активной и реактивной мощности при отделении от энергосистемы, исходную загрузку генераторов, длительность короткого замыкания, время действия автоматического повторного включения и ряд других. Разработка соответствующего программного комплекса позволит анализировать подобные режимы и разрабатывать мероприятия по повышению устойчивости системы электроснабжения.

Исследованию динамической и результирующей устойчивости посвящено большое число отечественных и зарубежных работ [1–8]. Однако они или ориентированы на крупные энергосистемы, или отражают процессы в простейшей схеме «генератор – ЛЭП – энергосистема». Поэтому с целью

повышения эффективности управления режимами промышленных систем электроснабжения, имеющих собственные электростанции, появляется необходимость расчета и анализа подобных режимов. Существующие программные комплексы, например, DlgSILENT PowerFactory, ETAP и другие, упомянутые в [9, 10], в основном предназначены для расчета режимов крупных электроэнергетических систем. В их возможностях не упоминается анализ режимов выхода на раздельную работу промышленных систем электроснабжения.

Методология (основная часть)

Выход на раздельную работу электростанции может происходить при двух видах аварийных ситуаций. Во-первых, при коротком замыкании [11]. В результате короткого замыкания углы роторов растут относительно вектора напряжения энергосистемы и при выходе на раздельную работу в благоприятных условиях генераторы начинают втягиваться в синхронизм друг относительно друга. Скорости роторов генераторов в режиме короткого замыкания увеличиваются, а при выходе на раздельную работу на изменение скоростей оказывает влияние небаланс потребляемых и генерируемых мощностей в узле. В режиме выхода на раздельную работу генераторы успевают несколько раз провернуться относительно вектора напряжения энергосистемы, поэтому успешность ресинхронизации обеспечивается в том числе фазой повторного включения.

Во-вторых, отключение электростанции от энергосистемы может произойти в результате снижения частоты в сети. При таких условиях во время раздельной работы генераторы должны втянуться в синхронизм друг относительно друга. Изменение углов роторов генераторов относительно вектора напряжения энергосистемы также зависит от небаланса мощностей при выходе на раздельную работу. В общем случае, чем больше небаланс, тем больше число циклов и амплитуда качаний в узле при ресинхронизации.

Как показали расчеты, результирующая устойчивость выше в избыточном узле, когда генерируемая мощность превышает нагрузку на 10–15%. В этом случае быстро устанавливаются нормальные параметры режима и узел готов к ресинхронизации. Одним из необходимых условий при этом является правильное действие автоматических регуляторов возбуждения и скорости. Отказ хотя бы одного из регуляторов или его неправильная работа приведут к нарушению динамической устойчивости генераторов при раздельной работе. Возможным неблагоприятным последствием для узла при существенном избытке мощности является нарушение устойчивости генераторов друг относительно друга. В дефицитном – при небольших дефицитах активной и реактивной мощности за счет регулирующего эффекта нагрузки – может

наступить установившийся режим [12, 13]. При большом дефиците новый установившийся режим невозможен.

Для исследования таких режимов на кафедре электроснабжения промышленных предприятий МГТУ им. Носова творческим коллективом разработан алгоритм, представленный на рис. 1. Он основан на модифицированном методе последовательного эквивалентирования, предназначенном для расчета установившихся режимов в сложнозамкнутых системах, а также методе последовательных интервалов для расчета переходных электромеханических процессов. Основными достоинствами сочетания указанных методов являются приведение на каждом шаге расчета к взаимодействию одномашинной системы (генератор, синхронный двигатель и т. д.) с эквивалентными характеристиками остальной части системы, полученными при расчете установившегося режима. Разработанный алгоритм позволяет исследовать переходный электромеханический процесс выхода электростанции на раздельную работу с электроэнергетической системой. При этом учитываются индивидуальные технические характеристики генераторов и крупных электродвигателей, обобщенной нагрузки, которые задаются статическими или динамическими характеристиками в зависимости от условий расчета.

Используемые для расчета электромеханических переходных процессов математические модели генераторов и двигателей разработаны в соответствии с классической литературой [1] и представлены в работах [14–16].

Учет действия регуляторов возбуждения при расчете установившихся режимов раздельной работы выражается в использовании их коэффициентов статизма. Расчет режима методом последовательного эквивалентирования ведется в несколько итераций. Изначально все генераторы замещаются балансирующими узлами и вводятся в расчет своими номинальными параметрами, нагрузки вводятся своими математическими ожиданиями с учетом регулирующего эффекта, после чего производится первая итерация расчета режима. По результатам вычисления определяются выдаваемые генераторами мощности, по которым в соответствии со статическими характеристиками генераторов определяются частота и напряжение сети.

Учет действия автоматических регуляторов возбуждения в расчете переходного режима происходит при расчете сверхпереходных (переходных) ЭДС синхронных генераторов по поперечной оси. Приращение сверхпереходной ЭДС зависит от двух потоков – реакции статора и обмотки возбуждения. Поток обмотки возбуждения соответствует вынужденная ЭДС E_{qe} , изменяющаяся в соответствии с используемым на генераторе законом АРВ. При расчете сверхпереходного режима на каждом интервале определяются приращения

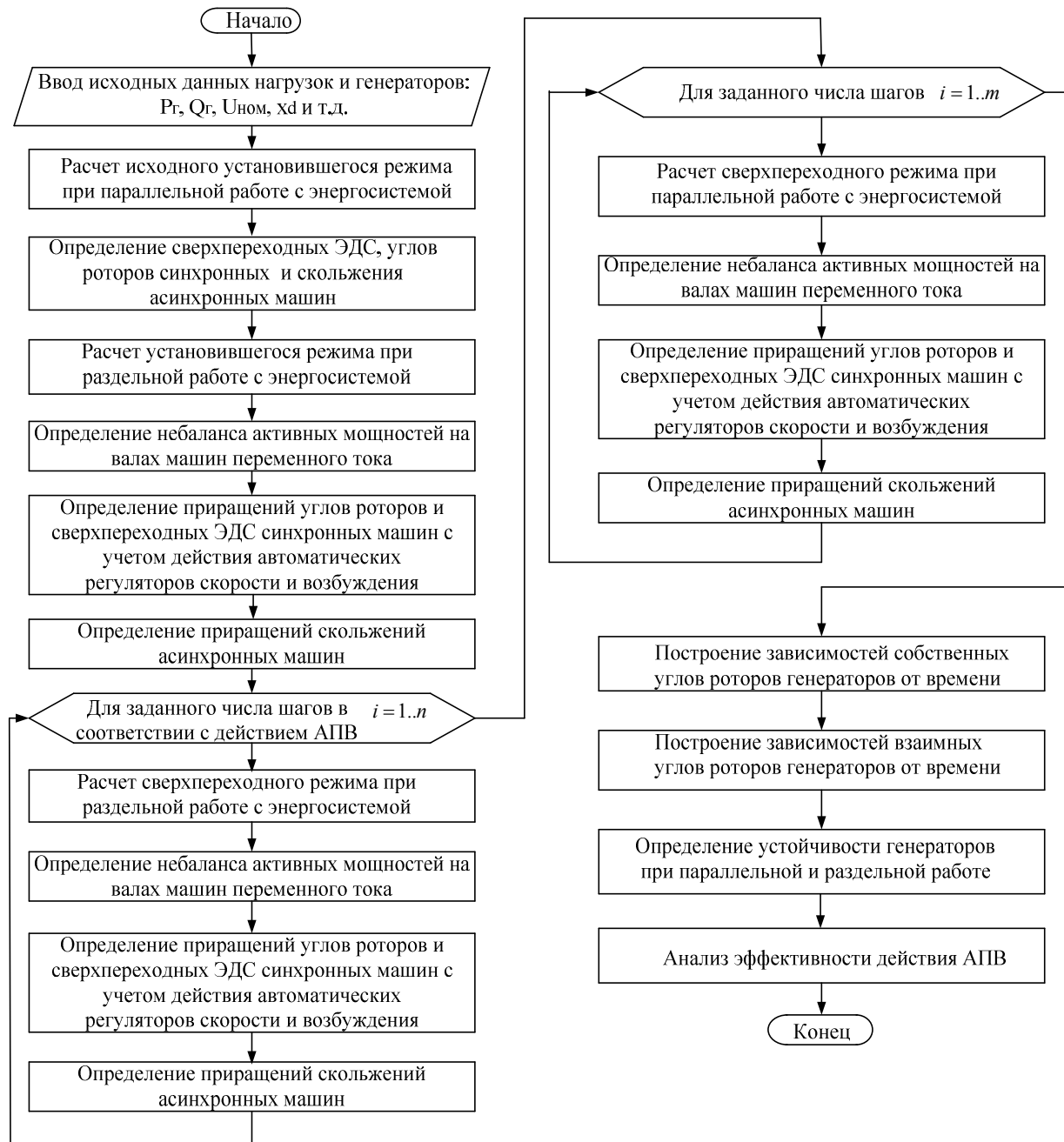


Рис. 1. Алгоритм определения параметров режима выхода электростанции на раздельную работу и последующей ресинхронизации

сверхпереходных ЭДС согласно методике, приведенной в [1, 11].

Вынужденная ЭДС изменяется с учетом постоянной времени возбудителя T_e :

$$E_{qe(n)} = E_{qe(n-1)} + \frac{(E_{pez(n)} - E_{qe(n-1)}) \Delta t}{T_e} \quad (1)$$

При работе АРВ ЭДС, которую пытается установить регулятор, определяется [10]:

$$E_{per(n)} = E_{per(0)} + \frac{E_{qe ном}}{U_{ном}} \times$$

$$\begin{aligned} & \times \left(K_{0I} \left(\frac{I_0 \sin \varphi_0 - I_{(n)cp} \sin \varphi_{(n)}}{I_0 \sin \varphi_0} \right) + \right. \\ & + K_{0U} \left(\frac{U_0 - U_{(n)cp}}{U_0} \right) - K_{0\delta} \left(\frac{\delta_0 - \delta_{(n-1)}}{\delta_0} \right) + \\ & \left. + K_{0\Delta U} \left(\frac{U_{(n)} - U_{(n-1)}}{U_0 \Delta t} \right) \right), \quad (2) \end{aligned}$$

где K_{0I} – коэффициент усиления по отклонению тока; K_{0U} – коэффициент усиления по отклоне-

нию напряжения на выводах обмотки статора; $K_{0\delta}$ – коэффициент усиления по отклонению угла ротора синхронного генератора; $K_{0\Delta U}$ – коэффициент усиления по скорости отклонения напряжения; I_0 – ток статора в нормальном режиме работы.

Учет автоматических регуляторов скорости осуществляется на этапе определения мощности турбины и определения приращения угла ротора δ . Мощность, развиваемая турбиной, с учетом действия регулятора скорости в этом случае определяется [1]:

$$P_{T(n)} = P_{T0} \frac{\omega(n)}{\omega(0)} - P_{рег(n-1)} - \frac{P_{Тном}}{\sigma T_s} \frac{\Delta\delta(n)}{360f_0} (1 + s(n)) =$$

$$= \frac{\Delta t}{T_s} P_{рег(n-1)} \left(\frac{1 + s(n)}{1 + s(n-1)} \right), \quad (3)$$

где P_{T0} – исходная мощность турбины; $\omega(0)$ – исходная скорость; $\omega(n)$ – скорость на n -м интервале; σ – степень неравномерности регулятора; T_s – постоянная времени сервомотора; $s(n) = -\Delta\delta(n)/(\omega_0\Delta t)$ – скольжение на n -м интервале; f_0 – исходная частота.

На основе алгоритма разработана методика определения небаланса мощности при выходе на раздельную работу с учетом времени ресинхронизации. Методика приведена на рис. 2. Разработан-

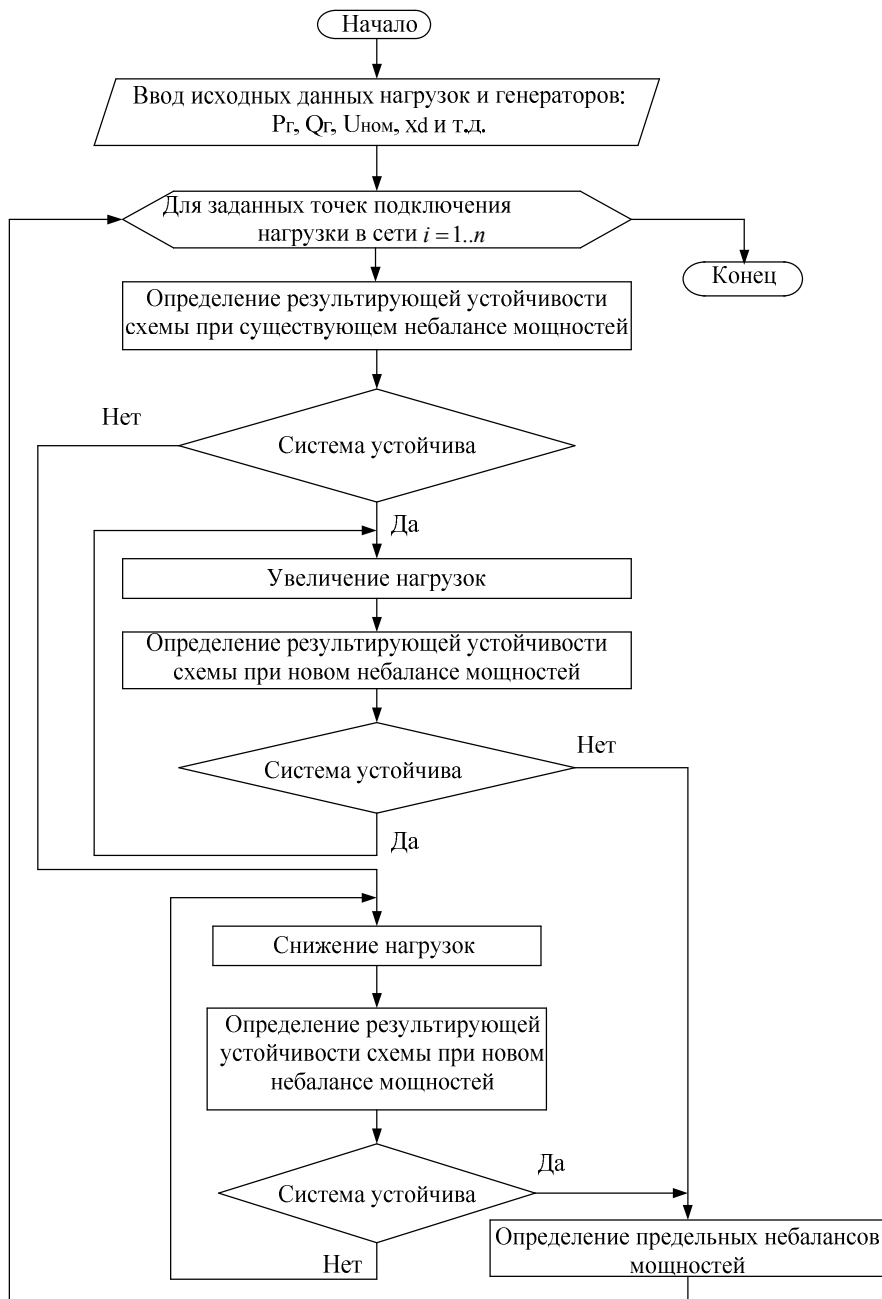


Рис. 2. Методика определения предельных небалансов мощностей при заданном времени работы автоматического повторного включения

ная методика позволяет выполнять анализ устойчивости промышленных систем электроснабжения как при выходе на раздельную работу, так и при отделении от электроэнергетической системы и последующей ресинхронизации. Ее использование дает возможность определить требуемое время ресинхронизации в зависимости от величины небалансов мощностей в точках связи с энергосистемой, а также от загрузки каждого из генераторов по активной и реактивной мощности. Для определения предельных режимов работы используется метод последовательного утяжеления, применение которого подразумевает подключение и последовательное увеличение активных и реактивных нагрузок в различных точках системы электроснабжения.

Алгоритм положен в основу программного комплекса «КАТРАН», предназначенного для расчета переходных и установившихся режимов промышленных систем электроснабжения при параллельной и раздельной работе с энергосистемой [17–20].

Программа отличается возможностью расчета режима выхода на раздельную с энергосистемой работу, позволяет исследовать переходные

процессы в сложнзамкнутых системах, имеющих несколько балансирующих узлов и большое число электрических [21–25]. При числе элементов 3000–4000 расчет установившегося режима происходит за 2–3 с. Заявленная точность учета автоматических регуляторов генераторов достаточна, так как для исследования режима ресинхронизации требуется выполнение совокупности расчетов сверхпереходных промежуточных режимов при большом числе элементов сети, что при более подробном учете регуляторов приведет к большему времени счета.

Исследования проводились на примере системы электроснабжения промышленного предприятия, имеющего в составе собственные электростанции с генераторами разной мощности. Схема электрических соединений приведена на рис. 3.

На рис. 4 показано изменение взаимных углов роторов при выходе на раздельную работу электростанции в результате отключения выключателей связи с энергосистемой. Предельный небаланс мощностей, при котором устойчивость сохранилась, составил 20 % от установленной. Небаланс по реактивной мощности был близок к нулю.

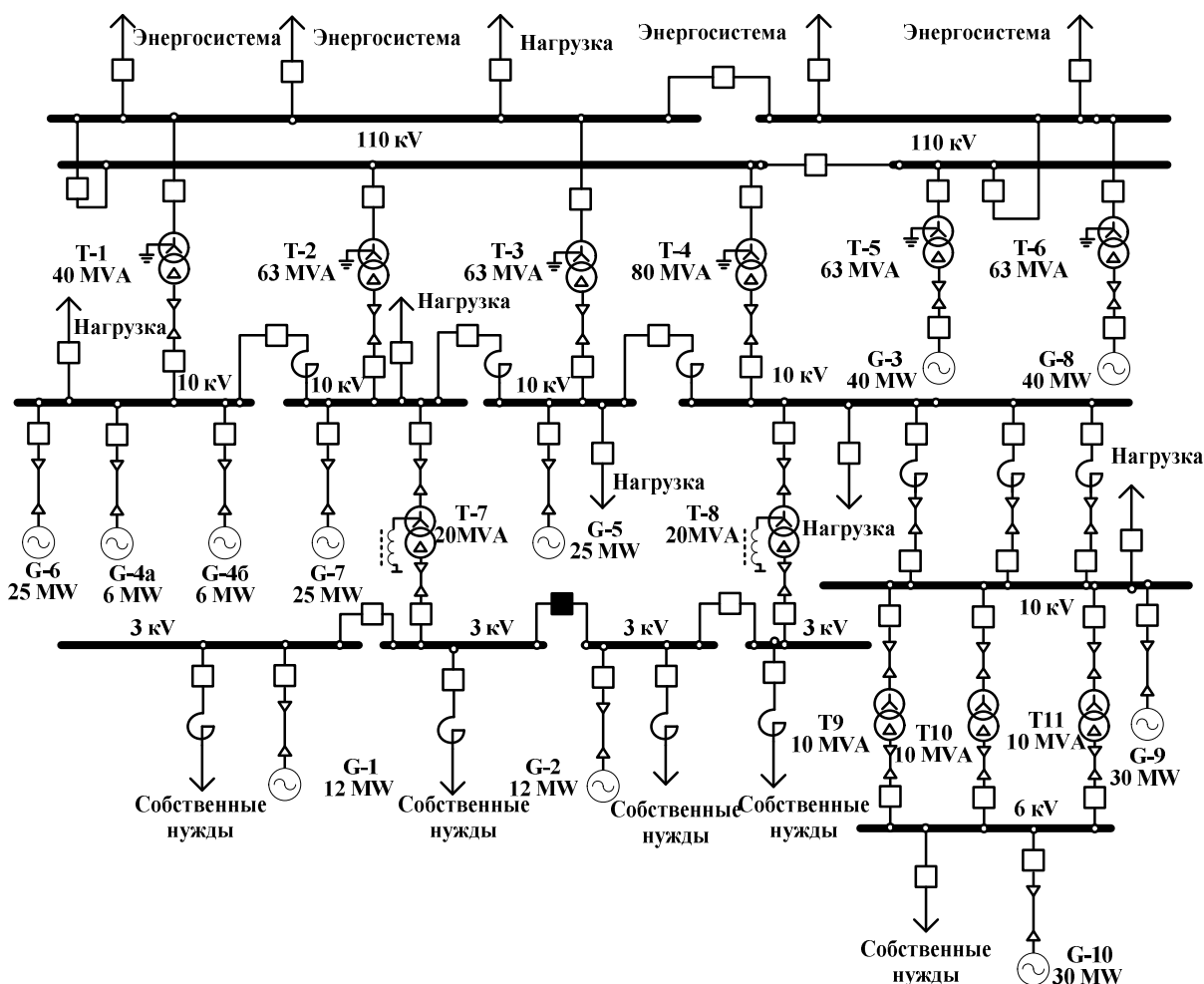


Рис. 3. Исследуемая схема электроснабжения

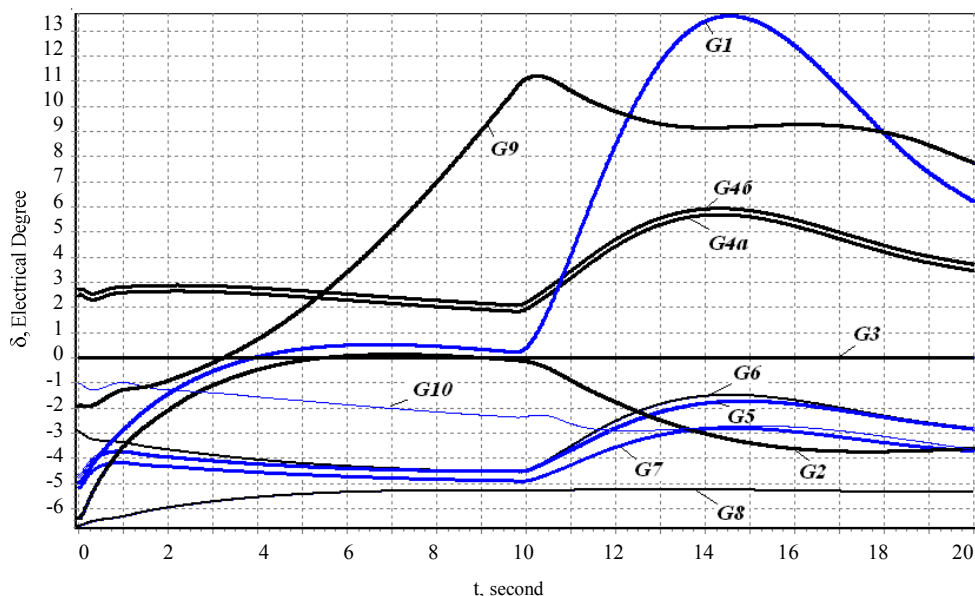


Рис. 4. Изменение взаимных углов роторов во времени

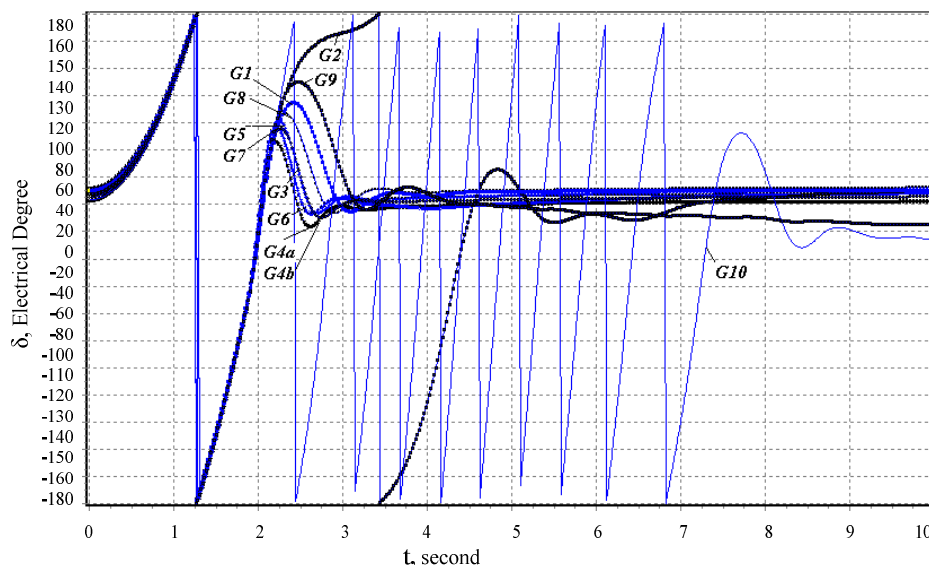


Рис. 5. Изменение собственных углов роторов во времени

Изменение собственных углов роторов в режиме отделения от энергосистемы и последующей ресинхронизации через 1,85 с приведено на рис. 5.

После нескольких проворотов углов роторов относительно вектора напряжения энергосистемы нормальная работа в результате действия АПВ восстанавливается.

Способность к ресинхронизации у генераторов теряется с повышением их электрической удаленности от шин связи с энергосистемой. Наихудшей устойчивостью обладает генератор G10, удаленный от энергосистемы через два трансформатора и реактор.

Использование методики определения времени работы автоматического повторного включения

позволило определить режимы успешной ресинхронизации. Для рассматриваемого примера ресинхронизация имела место через 1,85 с после отделения от энергосистемы при балансе реактивных и небалансе активных мощностей 20 % от установленной мощности генераторов узла.

Исходная загрузка по активной и реактивной мощности оказывает значительное влияние на динамическую и результирующую работу генераторов, особенно если они являются электрически удаленными от других генераторов или связи с энергосистемой. Снижение загрузки генератора по активной мощности или повышение загрузки по реактивной хотя бы на 10 % может снизить время стягивания генератора в синхронизм. Расчеты по-

казали, что если генератор G10 загружен на 105 % от номинальной активной мощности, то успешной ресинхронизации с сетью не происходит. При загрузке генератора на 93 % он после нескольких прорывов втягивается в синхронизм.

Разработанный программный комплекс позволяет исследовать переходные режимы ресинхронизации, когда один или несколько источников питания выходят под нагрузкой на отдельную работу и через определенное время происходит повторная ресинхронизация. Оперативный персонал может использовать программу в режиме «советчика диспетчера» для предотвращения ошибочных решений. При анализе возможных аварийных ситуаций своевременное вмешательство в работу систем электроснабжения повысит надежность и экономичность за счет снижения аварийного ущерба [26–29].

Заключение

Увеличение доли промышленных объектов распределенной генерации в общем числе источников питания приводит к усложнению возможных эксплуатационных режимов и требует наличия математического аппарата и программного обеспечения для анализа переходных режимов выхода собственной электростанции с нагрузкой на отдельную работу и ее последующей ресинхронизации с энергосистемой.

Разработан алгоритм анализа таких режимов, позволяющий учитывать характеристики связей с энергосистемой, генераторов, обобщенных и индивидуальных нагрузок в условиях сложносвязанной промышленной системы электроснабжения. Получена методика определения предельных небалансов мощностей при заданном времени работы автоматического повторного включения, позволяющая выявить режимы, при которых динамическая и результирующая устойчивость сохраняются.

Разработанный программный комплекс позволяет рассчитывать переходные режимы ресинхронизации с энергосистемой в условиях распределенной генерации, определять наиболее целесообразные режимы с точки зрения сохранения устойчивости и может быть предложен в качестве советчика диспетчера собственных электростанций промышленных предприятий. Это позволит повысить эффективность управления аварийными и эксплуатационными режимами промышленных генераторов и снизит затраты от недоотпуска электроэнергии при аварийных отключениях источников питания.

Литература

1. Жданов, П.С. *Вопросы устойчивости энергетических систем* / П.С. Жданов; под ред. Л.А. Жукова. – М.: Энергия, 1979. – 456 с.
2. Kothari, D.P. *Power System Engineering* / D.P. Kothari, I.J. Nagrath. – Second Edition. – New

Delhi: Tata McGraw-Hill Publishing Company Limited, 2008.

3. Xiufeng, Shi. *Research on Measures to Improve Stability of the Power System* / Shi Xiufeng, Mu Shiguang // *Applied Mechanics and Materials*. – 2015. – Vol. 742. – P. 648–652. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMM.742.648

4. Hazarika, D. *New Method for Monitoring Voltage Stability Condition of a Bus of an Interconnected Power System Using Measurements of the bBus Variables* / D. Hazarika // *IET Generation, Transmission & Distribution*. – Oct 2012. – Vol. 6, iss. 10. – P. 977–985. DOI: 10.1049/iet-gtd.2011.0786

5. Веников, В.А. *Переходные электромеханические процессы в электрических системах* / В.А. Веников. – 2-е изд. – М.: Высшая школа, 1970. – 472 с.

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

7. *Trajectory Sensitivity Analysis on the Equivalent One-machine-infinite-bus of Multi-machine Systems for Preventive Transient Stability Control* / Yan Xu, Zhao Yang Dong, Junhua Zhao et al. // *The Institution of Engineering and Technology IET Gener. Transm. Distrib.* – 2015. – Vol. 9, iss. 3. – P. 276–286. DOI: 10.1049/iet-gtd.2014.0263

8. *Construction and Design Features of Permanent Magnet electric Motors for General Industrial Purposes* / A.F. Shevchenko, A.G. Pristup, O.I. Novokreshchenov et al. // *Russian Electrical Engineering*. – 2014. – T. 85, № 12. – С. 748–751. DOI: 10.3103/SI06837121412013X

9. *Transient Stability Enhancement of Tneб 400 kV Transmission Network with SVC* / Er.S. Sujatha, Dr.R. Anitha, Dr.P. Selvan, Er.S. Selvakumar // *Journal of Theoretical and Applied Information Technology*. – 10th May 2014. – Vol. 63, iss. 1. – P. 85–91.

10. Satheesh, A. *Maintaining Power System Stability with Facts Controller using Bees Algorithm and NN* / A. Satheesh, T. Manigandan // *Journal of Theoretical and Applied Information Technology*. – 10th March 2013. – Vol. 49, iss. 1. – P. 38–47.

11. Ротанова, Ю.Н. *Исследование динамической устойчивости систем электроснабжения промышленных предприятий с собственными электростанциями при отделении от энергосистемы в результате короткого замыкания* / А.В. Малафеев, О.В. Буланова, Ю.Н. Ротанова // *Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника»*. – 2008. – № 17 (117). – С. 72–74.

12. *Анализ статической устойчивости генераторов* / А.В. Малафеев, О.В. Газизова, А.В. Кочкина, Е.А. Гринчак // *Главный энергетик*. – 2013. – № 7. – С. 17–25.

13. *Исследование сходимости метода расче-*

та установившихся режимов систем электро-снабжения при работе отдельно с энергосистемой / О.В. Буланова, В.А. Игуменцев, А.В. Малафеев, Ю.Н. Ротанова // *Электротехнические системы и комплексы*. – 2005. – № 10. – С. 129–134.

14. Расчет динамических характеристик синхронных и асинхронных двигателей промышленных предприятий с целью анализа устойчивости систем электроснабжения / В.А. Игуменцев, А.В. Малафеев, О.В. Буланова, Ю.Н. Ротанова // *Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова*. – 2006. – № 2. – С. 71–75.

15. Влияние высоковольтных двигателей собственных нужд на надежность системы электроснабжения собственных нужд ТЭЦ ОАО «ММК» / А.В. Малафеев, О.И. Карандаева, Ю.Н. Ротанова, О.В. Буланова // *Электротехнические системы и комплексы*. – 2009. – № 17. – С. 96–104.

16. Анализ режимов несимметричных коротких замыканий в сложных системах электроснабжения с собственными электростанциями / А.В. Малафеев, О.В. Буланова, Е.А. Панова, М.В. Григорьева // *Промышленная энергетика*. – 2010. – № 3. – С. 26–31.

17. Определение асинхронной мощности синхронных генераторов в расчетах электромеханических переходных процессов при несимметричных режимах / О.В. Буланова, А.В. Малафеев, Н.А. Николаев и др. // *Электрика*. – 2010. – № 8. – С. 24–26.

18. Гамазин, С.И. Переходные процессы в системах промышленного электроснабжения, обусловленные электродвигательной нагрузкой / С.И. Гамазин, В.А. Ставцев, С.А. Цырук. – М.: Изд-во МЭИ, 1997. – 424 с.

19. Малафеев, А.В. Алгоритм расчета сложносимметричных режимов систем электроснабжения промышленных предприятий / А.В. Малафеев, Е.А. Панова // *Главный энергетик*. – 2011. – № 3. – С. 35–39.

20. Исследование эффективности работы делительной автоматики в системе электроснабжения промышленного предприятия черной металлургии / О.В. Газизова, А.В. Малафеев, В.М. Тарасов, М.А. Извольский // *Промышленная энергетика*. – 2012. – № 10. – С. 12–17.

21. Оценка эффективности релейной защиты в сетях 110–220 кВ сложных систем электроснабжения промышленных предприятий с собственными электростанциями / В.А. Игуменцев, Б.И. Заславец, Н.А. Николаев и др. – *Магнитогорск, Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та*. – 2011. – 141 с.

22. Kornilov, G.P. The Algorithm of Economically Advantageous Overhead Wires Cross Section Selection Using Corrected Transmission Lines Mathematical Models / G.P. Kornilov, E.A. Panova, A.V. Varganova // *Procedia Engineering*. – 2015. – Т. 129. – С. 951–955. DOI: 10.1016/j.proeng.2015.12.142

23. Малафеев, А.В. Оптимизация загрузки генераторов собственных электростанций ОАО «ММК» с учетом потерь активной мощности в распределительной сети путем декомпозиции общей задачи / А.В. Малафеев, А.В. Хламова, М.И. Краснов // *Главный энергетик*. – 2011. – № 3. – С. 54–57.

24. Mathematical Modeling of Synchronous Generators in Out-of-balance Conditions in the Task of Electric Power Supply Systems Optimization / A.V. Varganova, E.A. Panova, N.A. Kurilova, A.T. Nasibullin // *International Conference on Mechanical Engineering, Automation and Control Systems (MEACS)*. – 2015. DOI: 10.1109/MEACS.2015.7414907

25. Исследование влияния ввода в работу перспективной воздушной линии на режимы промышленного энергетического узла / Ю.Н. Кондрашова, О.В. Газизова, М.М. Гладышева, И.М. Галлулин // *Международный научно-исследовательский журнал*. – 2014. – № 4-2 (23). – С. 35–37.

26. Анализ интенсивности отказов частотно-регулируемых электроприводов районных тепловых станций при нарушениях электроснабжения / В.Р. Храмин, К.Э. Одинцов, А.Р. Губайдуллин и др. // *Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия «Энергетика»*. – 2014. – Т. 14, № 2. – С. 68–79.

27. Методика прогнозирования остаточного ресурса электрооборудования при эксплуатации / К.Э. Одинцов, Ю.Н. Ротанова, О.И. Карандаева и др. // *Известия Тульского государственного университета. Технические науки*. – 2010. – № 3-1. – С. 192–198.

28. Разработка методики прогнозирования отказов сложных электротехнических систем на примере электрических систем / Ю.Н. Кондрашова, М.М. Гладышева, Арт.А. Николаев, А.А. Николаев // *Технические науки: от теории к практике*. – Новосибирск: НП «СибАК». – 2014. – № 33. – С. 101–108.

29. Methodology of Calculation of the Reliability Indexes and Life Time of the Electric and Mechanical Systems / A.S. Karandaev, V.R. Khramshin, S.A. Evdokimov et al. // *Proceedings of 2014 International Conference on Mechanical Engineering, Automation and Control Systems, MEACS*. – 2014. – С. 1–6. DOI: 10.1109/MEACS.2014.6986866

Ольга Викторовна Газизова, канд. техн. наук, доцент, кафедра «Электроснабжение промышленных предприятий», Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, г. Магнитогорск; logan_b_7@mail.ru.

Алексей Вячеславович Малафеев, канд. техн. наук, доцент, кафедра «Электроснабжение промышленных предприятий», Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, г. Магнитогорск; malapheev_av@mail.ru.

Кондрашова Юлия Николаевна, канд. техн. наук, кафедра «Электроснабжение промышленных предприятий», Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, г. Магнитогорск; rotjuil720@mail.ru.

Поступила в редакцию 30 сентября 2016 г.

DOI: 10.14529/power160402

DETERMINATION OF LIMIT MODE PARAMETERS TO ENSURE SUCCESSFUL RESYNCHRONIZATION OF DISTRIBUTED GENERATION UNITS AT IRON AND STEEL WORKS

O.V. Gazizova, logan_b_7@mail.ru,

A.V. Malafeyev, malapheev_av@mail.ru,

Yu.N. Kondrashova, rotjuil720@mail.ru

Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russian Federation

Development of distributed generation units and complication of electric network configuration result in growing number of possible emergency modes of industrial power supply systems. The plant and some consumers switch to separate operation at short circuits of the power supply system or frequency drop in the supply network. After the damaged lines have been switched off, automatic resynchronization of the network node is required. The algorithm for calculating transient electromechanical processes in industrial power supply systems has been developed to investigate these emergency modes. Based on the above algorithm, the authors have elaborated a software package to explore these electromechanical modes. As switch to a separate operation is possible with various power supply and load configurations, the methods determining the limit power imbalances at the set time of automatic reconnection have been obtained. Experiments were carried out at the industrial power plant including different power generators that provide energy-intensive industrial load. Developed activities will increase sustainability of this power supply system. The proposed software package can be used as an advising tool for control engineers to increase mode management efficiency of auxiliary industrial power plants.

Keywords: distributed generation, separate work, resynchronization, resulting sustainability.

References

1. Zhdanov P.S. *Voprosy ustoychivosti energeticheskikh sistem* [Issues of Power System Sustainability]. Moscow, Energy Publ., 1979. 456 p.
2. Kothari D.P., Nagrath I.J. [Power System Engineering]. Second Edition, New Delhi: Tata McGraw-Hill Publishing Company Limited, 2008.
3. Shi Xiufeng, Mu Shiguang [Research on Measures to Improve Stability of the Power System]. *Applied Mechanics and Materials*, 2015, vol. 742, pp. 648–652. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMM.742.648
4. Hazarika D. [New Method for Monitoring Voltage Stability Condition of a Bus of an Interconnected Power System Using Measurements of the Bus Variables]. *IET Generation, Transmission & Distribution*. Oct 2012, vol. 6, iss. 10, pp. 977–985. DOI: 10.1049/iet-gtd.2011.0786
5. Venikov V.A. *Perekhodnye elektromekhanicheskie protsessy v elektricheskikh sistemakh* [Transient Electromechanical Phenomena in Electrical Systems]. Moscow, Higher school Publ., 1970. 472 p.
6. 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.
7. Yan Xu, Zhao Yang Dong, Junhua Zhao, Yusheng Xue, David John Hill [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, iss. 3, pp. 276–286. DOI: 10.1049/iet-gtd.2014.0263

8. Shevchenko A.F., Pristup A.G., Novokreshchenov O.I., Toporkov D.M., Korneev V.V. [Construction and Design Features of Permanent Magnet Electric Motors for General Industrial Purposes]. *Russian Electrical Engineering*, 2014, iss. 85. no. 12, pp. 748–751. DOI: 10.3103/S106837121412013X

9. Sujatha Er.S., Anitha Dr.R., Selvan Dr.P., Selvakumar Er.S. [Transient Stability Enhancement of Tneб 400 kV Transmission Network with SVC]. *Journal of Theoretical and Applied Information Technology*, 10th May 2014, vol. 63, iss. 1, pp. 85–91.

10. Satheesh A., Manigandan T. [Maintaining Power System Stability with Facts Controller using Bees Algorithm and NN]. *Journal of Theoretical and Applied Information Technology*, 10th March 2013, vol. 49, iss. 1, pp. 38–47.

11. Malafeev A.V., Bulanova O.V., Rotanova Yu.N. [Research of Dynamical Stability of Industrial Power Systems with Auxiliary Power Plants Separated from Power Supply System due to Short-Circuit Failure]. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Computer Technologies, Automatic Control & Radioelectronics*, 2008, no. 17 (117), pp. 72–74. (in Russ.)

12. Malafeev A.V., Gazizova O.V., Kochkina A.V., Grinchak E.A. [Analysis of Static Stability of Synchronous Generators]. *Chief Power Engineer*, 2013. no. 7, pp. 17–25. (in Russ.)

13. Malafeev A.V., Bulanova O.V., Igumenshev V.A., Rotanova Yu.N. [Re-search of Convergence of Calculation Method for Steady-state Modes of Power Supply Systems Operated Separately from the Main Power Utility System]. *Electrotechnical Systems and Complexes*, 2005, no. 10, pp. 129–134. (in Russ.)

14. Bulanova O.V., Igumenshev V.A., Malafeev A.V., Rotanova Yu.N. [Calculation of Response Characteristics of the Synchronous and Asynchronous Motors of the Industrial Enterprises for Analysis of Power Supply System Sustainability]. *Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University*, 2006, no. 2, pp. 71–75. (in Russ.)

15. Bulanova O.V., Malafeev A.V., Karandaeva O.I., Rotanova Yu.N. [Influence of Auxiliary High-Voltage Motors on Reliability of Auxiliary Power Supply System at CHPP of OJSC Magnitogorsk Iron and Steel Works]. *Electrotechnical Systems and Complexes*, 2009, no. 17, pp. 96–104. (in Russ.)

16. Malafeev A.V., Bulanova O.V., Panova E.A., Grigoryeva M.V. [Analysis of Asymmetrical Short Circuit Modes in Complex Power Supply Systems with Auxiliary Power Plants]. *Industrial Power Engineering*, 2010, no. 3, pp. 26–31. (in Russ.)

17. Bulanova O.V., Malafeev A.V., Nicolayev N.A., Rotanova Yu.N., Panova E.A. [Determination of Asynchronous Power of Synchronous Generators in Calculations of Electromechanical Transient Phenomena in Asymmetrical Modes]. *Electricity*, 2010, no. 8, pp. 24–26. (in Russ.)

18. Gamazin S.I., Stavtsev V.A., Tsyruk S.A. *Perekhodnye protsessy v sistemakh promyshlennogo elektro-snabzheniya, obuslovlennye elektrodvigatel'noy nagruzkoy* [Transient Phenomena in Industrial Power Supply Systems Caused by Electromotive Loading]. Moscow, MPEI Publ., 1997. 424 p.

19. Malafeev A.V., Panova E.A. [Algorithm of Calculation of Complex Asymmetrical Modes of Power Supply Systems of Industrial Enterprises]. *Chief Power Engineer*, 2011, no. 3, pp. 35–39. (in Russ.)

20. Gazizova O.V., Malafeev A.V., Tarasov V.M., Izvolsky M.A. [Research of Overall Performance of Dividing Automatic Equipment in Power Supply System of Iron Works]. *Industrial Power Engineering*, 2012, no. 10, pp. 12–17. (in Russ.)

21. Igumenshev V.A., Zaslavets B.I., Nicolayev N.A., Malafeev A.V., Bulanova O.V., Kondrashova Yu.N., Panova E.A. *Otsenka effektivnosti releynoy zashchity v setyakh 110–220 kV slozhnykh sistem elektro-snabzheniya promyshlennykh predpriyatiy s sobstvennymi elektrostantsiyami* [Evaluation of Relay Scheme Performance within 110–220 kV Networks of Ppower Supply Systems of Iindustrial Eenterprises with Auxiliary Power Plants]. Magnitogorsk, Nosov Magnitogorsk State Technical University Publ., 2011. 141 p.

22. Kornilov G.P., Panova E.A., Varganova A.V [The Algorithm of Economically Advantageous Overhead Wires Cross Section Selection Using Corrected Transmission Lines Mathematical Models]. *Procedia Engineering*, 2015, vol. 129, pp. 951–955. DOI: 10.1016/j.proeng.2015.12.142

23. Malafeev A.V., Hlamova A.V., Krasnov M.I. [Optimized Loading of Auxiliary Power Plant Generators of OJSC Magnitogorsk Iron and Steel Works with Due Regard to Active Power Losses in the Distribution Network by Decomposition of the General Task]. *Chief Power Engineer*, 2011, no. 3, pp. 54–57. (in Russ.)

24. Varganova A.V., Panova E.A., Kurilova N.A., Nasibullin A.T. [Mathematical Modeling of Synchronous Generators in Out-of-balance Conditions in the Task of Electric Power Supply Systems Optimization]. *In Collection: International Conference on Mechanical Engineering, Automation and Control Systems (MEACS)*. 2015. DOI: 10.1109/MEACS.2015.7414907

25. Kondrashova Yu.N., Gazizova O.V., Gladysheva M.M., Galliulin I.M. [Research of Influence of Implementation of the Perspective Airline on Modes of the Industrial Energetic Hub]. *International Research Journal*, 2014, no. 4-2 (23), pp. 35–37. (in Russ.)

26. Khramshin V.R., Odintsov K.E., Gubajdullin A.R., Karandaeva O.I., Kondrashova Yu.N. [Fault Rate Analysis of Variable-Frequency Electric Drives in District Heating Stations under Power Supply Violations]. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Power Engineering*, 2014, iss. 14, no. 2, pp. 68–79. (in Russ.)

27. Odintsov K., Rotanova Yu., Karandayeva O., Mostovoy S., Shilyaev P. [Forecast of Electrical Equipment Remaining Life]. *News of Tula State University. Technical Sciences*, 2010, no. 3-1, pp. 192–198. (in Russ.)

28. Kondrashova Yu.N., Gladysheva M.M., Nicolaev Art.A., Nicolaev A.A. [Development of Methods for Forecast of Complex Electrotechnical System Failures through the Example of Electrical Networks]. *Technical Sciences: from Theory to Practice, Novosibirsk, NP "SibAK"*, 2014, no. 33, pp. 101–108. (in Russ.)

29. Karandaev A.S., Khramshin V.R., Evdokimov S.A., Kondrashova Yu.N., Karandaeva O.I. [Methodology of Calculation of the Reliability Indexes and Lifetime of the Electric and Mechanical Systems]. *In Collection: Proceedings of 2014 International Conference on Mechanical Engineering, Automation and Control Systems, MEACS 2014*. DOI: 10.1109/MEACS.2014.6986866

Received 30 September 2016

ОБРАЗЕЦ ЦИТИРОВАНИЯ

Газизова, О.В. Определение предельных параметров режимов для обеспечения успешной ресинхронизации объектов распределенной генерации в условиях предприятия черной металлургии / О.В. Газизова, А.В. Малафеев, Ю.Н. Кондрашова // Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика». – 2016. – Т. 16, № 4. – С. 12–22. DOI: 10.14529/power160402

FOR CITATION

Gazizova O.V., Malafeyev A.V., Kondrashova Yu.N. Determination of Limit Mode Parameters to Ensure Successful Resynchronization of Distributed Generation Units at Iron and Steel Works. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Power Engineering*, 2016, vol. 16, no. 4, pp. 12–22. (in Russ.) DOI: 10.14529/power160402