

Газизова О.В., Соколов А.П., Патшин Н.Т., Кондрашова Ю.Н.

Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова



АНАЛИЗ ДОПУСТИМОСТИ РЕЖИМА ПОТЕРИ ВОЗБУЖДЕНИЯ СИНХРОННОГО ГЕНЕРАТОРА В УСЛОВИЯХ ПРОМЫШЛЕННОЙ СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ СЛОЖНОЙ КОНФИГУРАЦИИ

Современные условия функционирования крупных промышленных предприятий требуют обеспечения высокой надежности электроснабжения потребителей при снижении себестоимости потребляемой электроэнергии. Эти требования обеспечиваются за счет широкого внедрения собственных источников электрической энергии. К ним относятся теплоэлектростанции, газотурбинные, газопоршневые и парогазовые электростанции. В то же время происходит существенное усложнение конфигурации промышленной сети и возможных аварийных режимов. Одним из аварийных режимов в таких сетях является потеря возбуждения синхронного генератора. Допустимость подобного режима оговаривается нормативными документами. В такой ситуации генератор переходит в режим асинхронного хода и потребляет реактивную мощность из сети. Целью данной работы является выявление допустимости работы синхронного генератора определенное время в режиме асинхронного хода в результате потери возбуждения. Разработан алгоритм расчета переходного электромеханического процесса синхронного генератора, учитывающий потерю возбуждения машины. Исследования производятся для различных эксплуатационных режимов промышленной электростанции с учетом исходной загрузки генератора с помощью программного комплекса «КАТРАН». Результаты расчета позволяют определить нагрузку генераторов по активной мощности, при которой возможна работа синхронного генератора в режиме асинхронного хода без возбуждения.

Ключевые слова: промышленный синхронный генератор, переходный электромеханический режим, программное обеспечение, автоматический регулятор возбуждения, параллельная работа, раздельная работа, потеря возбуждения, асинхронный ход.

ВВЕДЕНИЕ

Исследованию статической, динамической и результирующей устойчивости синхронных машин посвящено большое число трудов как отечественных [1-5], так и зарубежных [6-16]. В частности, подробно произведен анализ режима трехфазного короткого замыкания и последующего его отключения, а также режимы асинхронного хода и ресинхронизации [1], [3], [6], [15]. Большое количество отечественных трудов посвящено вопросам эксплуатации объектов распределенной генерации [17-19]. В отдельных трудах рассмотрены вопросы передачи электрической энергии в промышленных сетях [20] и их надежности [21].

Асинхронный ход синхронного генератора может протекать в двух видах. Во-первых, асинхронный ход при наличии возбуждения. Такой режим сопровождается существенным изменением напряжения и токов синхронной машины и не является длительно допустимым.

Асинхронный ход генератора при потере возбуждения сопровождается потреблением из сети реактивной мощности и снижением выработки активной мощности в сеть. Допустимость такого режима зависит от типа и системы охлаждения генератора. Так, для турбогенераторов с косвенным охлаждением допускается работа в режиме асинхронного хода до 30 минут [1]. При этом должна быть снижена его вырабатываемая мощность до 50-70 %, а ток статора не должен превышать 110 % от номинального. Турбогенераторы, имеющие непосредственное охлаждение, могут работать в режиме асинхронного хода не до 15 минут при снижении мощности турбины до 40-55 %. При этом напряжение на выводах генератора от энергосистемы не

должно снижаться более чем на 30% от номинального. В противном случае может нарушиться устойчивость работы синхронных машин в данном узле.

Таким образом, возможность работы синхронного генератора в режиме асинхронного хода при потере возбуждения зависит от большого количества факторов, в том числе исходного режима работы и мощности питающей энергосистемы.

Для анализа подобного режима была разработана соответствующая математическая модель, учитывающая затухание магнитного потока в обмотке возбуждения. Модель была учтена в алгоритме расчета переходного электромеханического процесса при параллельной и раздельной работе с энергосистемой.

Разработанный на кафедре ЭПП МГТУ им. Г.И. Носова программный комплекс «КАТРАН» позволяет рассчитывать режимы асинхронного хода и ресинхронизации с учетом потери возбуждения синхронной машины, а также оценивать допустимость подобных режимов.

УЧЕТ ПОТЕРИ ВОЗБУЖДЕНИЯ В МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ГЕНЕРАТОРА

Математическому моделированию синхронных генераторов посвящено большое число трудов [1-6]. В общем случае математическое моделирование синхронных генераторов с целью расчета переходных режимов может производиться тремя способами, в зависимости от поставленной задачи.

Первым способом является непосредственное определение потокосцеплений, то есть прямое решение системы уравнений Парка-Горева во времени. Такой подход в сочетании с методами численного интегрирования дает очень точные результаты, но является весьма трудоемким и слабо применим в чистом виде для расчета режимов сложносвязанных

систем. В основном он применяется для анализа эксплуатационных режимов отдельных машин с учетом подробных характеристик систем автоматического регулирования.

Другой способ используется в расчетах режимов сложных электроэнергетических систем в сочетании с протяженными линиями электропередачи. При этом имеет место использование эквивалентов отдельных электростанций или их групп, что является достаточным для данной задачи. Особое внимание при данном подходе уделяется устойчивости протяженных линий электропередачи.

Третий способ подразумевает представление отдельных генераторов и их регуляторов внешними характеристиками, позволяет определить устойчивость в отдельно взятом узле, например промышленной электростанции. Источники распределенной генерации в таком узле, как правило, разнотипные и имеют определенную электрическую удаленность относительно друг друга. Поскольку развитие промышленной генерации существенно усложняет аварийные и эксплуатационные режимы систем электроснабжения, то такой подход является оправданным.

В данной статье использован последний метод. В этом случае в математической модели генератор представляется не напрямую потокоцеплениями, а переходными (сверхпереходными) ЭДС, пропорциональными соответствующим потокоцеплениям. Для использования подобного подхода сначала рассчитывается установившийся режим [22-24]. Данный подход используется для анализа динамической устойчивости и изложен в трудах [25-30].

Так, поток реакции статора определяется током статора, который может быть получен из расчета переходного режима на каждом шаге переходного процесса и определяет полную ЭДС машины $E_{(n)} = E_{q(n)} + jE_{d(n)}$. Поток обмотки возбуждения определяется вынужденной ЭДС машины $E_{qe(n)}$. Очевидно, что потеря возбуждения синхронного генератора сопровождается постепенным снижением вынужденной ЭДС до нуля. И генератор из синхронного режима переходит в асинхронный.

При длительном переходном процессе сверхпереходными составляющими можно пренебречь, поэтому в расчет режима генератор задается переходными ЭДС $E'_{(n)} = E'_{q(n)} + jE'_{d(n)}$, пропорциональными суммарному потокоцеплению по продольной и поперечной осям соответственно. На каждом шаге расчета учитывается изменение переходных ЭДС с учетом изменения потока реакции статора и обмотки возбуждения.

Одновременно на суммарный магнитный поток начинает оказывать влияние магнитный поток, обусловленный асинхронными мощностями, изменение которых учитывается по продольной и поперечной осям. При этом условно принято, что одна из осей связана с действительной осью, другая – с мнимой.

На **рис. 1** показан алгоритм расчета переходного режима, учитывающий потерю возбуждения синхронного генератора. В нем показано определение начальных значений ЭДС и их изменение во времени.

На **рис. 1** приняты следующие обозначения: ОКЗ – отношение короткого замыкания, о.н.е.; x_d, x'_d, x''_d –

синхронное индуктивное, переходное и сверхпереходное сопротивления, о.н.е.; T'_{d0}, T''_{d0} – постоянные времени синхронной машины при разомкнутой обмотке статора при наличии и отсутствии демпферных контуров, с; T_d, T'_d – переходная и сверхпереходная постоянные времени синхронной машины при замкнутой обмотке статора, с; T_a – постоянная времени обмотки статора, с, P_T, Q_T – действительная нагрузка генераторов, о.н.е., $U_{(n)}, I_{(n)}, I_{d(n)}, I_{q(n)}$ – текущие напряжение и ток и его составляющие для обмотки статора; $\varphi_{(n)}, \delta_{(n)}$ – углы нагрузки и ротора, о.н.е.

В соответствии с уровнем напряжения на выводах обмотки статора определяется асинхронная активная $P_{ac(n)}$ и реактивная $Q_{ac(n)}$ мощности и приращение активной $\Delta E'_{ac(n)}$ и реактивной $\Delta E''_{ac(n)}$ составляющей переходной ЭДС на каждом интервале расчета с учетом того, что действительные и мнимые составляющие переходной ЭДС равны переходным ЭДС по продольной и поперечной оси соответственно, а система осей d и q связана с полем статора, а не ротора. Асинхронная мощность, в свою очередь, делится на мощность намагничивания и рассеяния $Q_{\mu(n)}, Q_{рас(n)}$, которые определяются скользящим s .

После определения нового значения переходной ЭДС определяется в соответствии с численным решением уравнения движения ротора новое значение угла ротора, и с новыми параметрами рассчитывается новый режим. Разработанный алгоритм может быть использован для методов численного интегрирования. В данном случае расчет ведется сочетанием методов последовательного эквивалентирования для расчета установившихся режимов и методом последовательных интервалов для расчета переходного электрохимического процесса.

РЕАЛИЗАЦИЯ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ В ПРОГРАММНОМ КОМПЛЕКСЕ «КАТРАН»

Расчет режимов осуществляется с помощью программного комплекса «КАТРАН», разработанного на кафедре ЭПП МГТУ им. Г.И. Носова. В качестве примера взята промышленная тепловая электростанция (ТЭЦ), схема электрических соединений которой представлена на **рис. 2**.

В случае потери возбуждения генератор из перевозбужденного состояния переходит в недо возбужденное и, как видно из **таблицы**, начинает потреблять реактивную мощность из сети, что объясняется возникновением асинхронного режима работы синхронного генератора. В таком режиме работы, как показано на **рис. 3**, у генератора Г-8, потерявшего возбуждение, значительно увеличивается угол нагрузки по отношению к другим генераторам, не потерявшим возбуждение. При этом значения переходной ЭДС и переходной ЭДС в поперечной оси стремятся к нулю.

При проведении исследований выполняется расчет режима при параллельной работе с энергосистемой и выбирается генератор, у которого произошла потеря возбуждения. Далее выполняется расчет во временном цикле 10 с и снимаются основные показания аварийного режима. Аналогичные расчеты повторяются для всех генераторов выбранной электростанции.

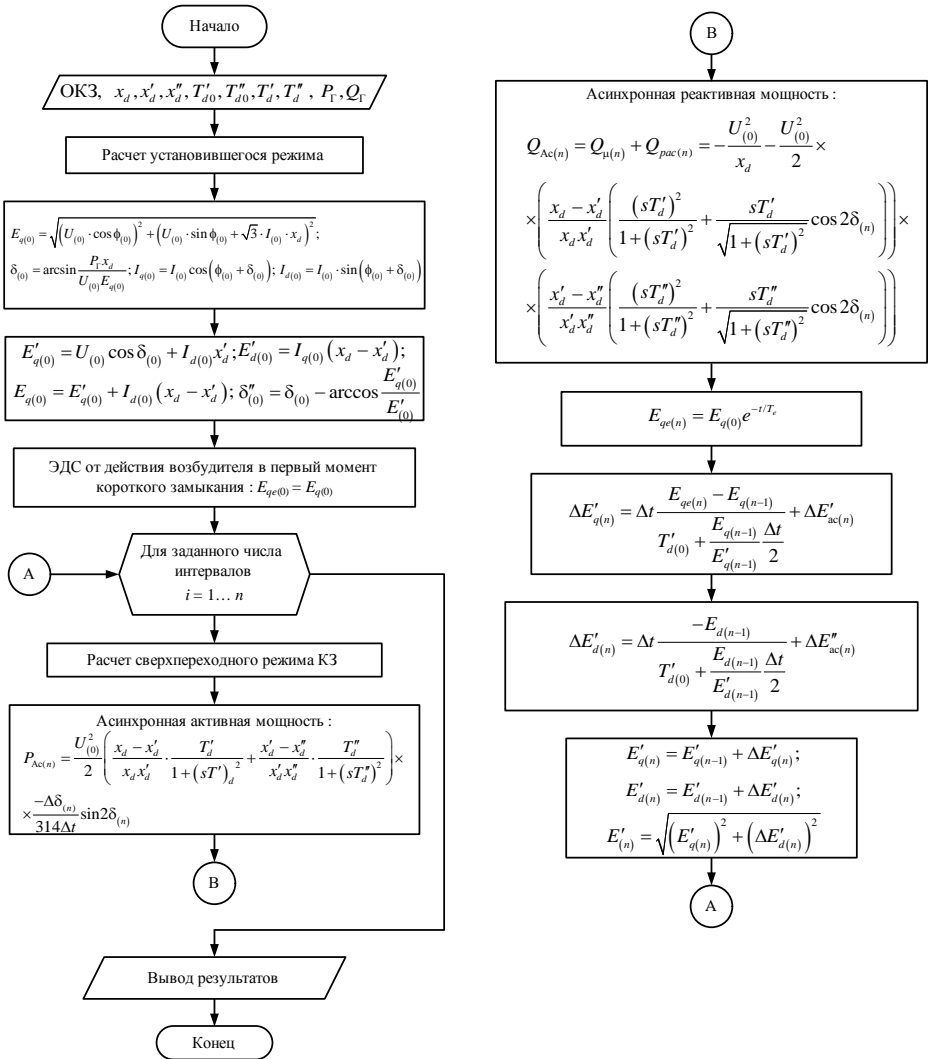


Рис. 1. Алгоритм расчета параметров генератора

В таблице расчетная мощность принимается равной номинальной мощности генератора. По рассчитанному доаварийному установившемуся режиму определялись значения напряжения, а также действительные значения активной и реактивной мощности.

Аварийный ток $I_{п.авар}$, послеаварийное напряжение $U_{п.авар}$, послеаварийные активная $P_{п.авар}$ и реактивная мощности $Q_{п.авар}$ определяются в ходе расчета переходного режима при потере возбуждения одного из генераторов. По полученным токам определяется, на сколько возрос послеаварийный ток по отношению к номинальному току.

Для уменьшения процента перегрузки снижалась

выдаваемая активная мощность генератора, который вышел из синхронизма, и определялось рекомендуемое значение активной мощности в послеаварийном режиме, обеспечивающей значение послеаварийного тока с допустимым процентом перегрузки.

Проведенные расчеты позволяют судить о работе синхронного генератора в режиме асинхронного хода при потере возбуждения. Поскольку в подобном режиме машина потребляет асинхронную реактивную мощность и вырабатывает активную, то имеется возможность регулирования только активной мощности посредством регулятора скорости с целью обеспечения допустимого тока обмотки статора генератора.

4. Ковач К.П., Рац И. Переходные процессы в машинах переменного тока. М.-Л.: Госэнергоиздат, 1963. 744 с.
5. Казовский Е.Я. Переходные процессы в электрических машинах переменного тока. М.-Л.: Изд-во Академии наук СССР, 1962. 625 с.
6. Kothari D.P., Nagrath I.J. Power System Engineering – Second Edition. – New Delhi: Tata McGraw-Hill Publishing Company Limited, 2008.
7. Xiufeng Shi, Shiguang Mu. Research on Measures to Improve Stability of the Power System – Applied Mechanics and Materials, vol. 742 (2015), pp 648-652.
8. 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 Issue 10, pp. 977-985.
9. Xiufeng Shi, Shiguang Mu. Research on Measures to Improve Stability of the Power System. Applied Mechanics and Materials. Vol. 742 (2015). P. 648-652.
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 Issue 1. P. 38-47.
11. Hari Krishna D., Srikanth N.V. Dynamic Stability Enhancement of Power Systems Using Neural-Network Controlled Static-Compensator // TELKOMNIKA. Vol.10. No.1, March 2012. P. 9-16.
12. Boudour Mohamed, Hella Abdelhafid. Power System Dynamic Security Mapping Using Synchronizing and Damping Torques Technique // The Arabian Journal for Science and Engineering. 2005. Vol. 30. Number 1B.
13. Sujatha, Er.S. Transient Stability Enhancement of Tneb 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 Issue 1. P. 85-91.
14. Zhang Rui, Yan Xu, Zhao Yang Dong, Kit Po. Wong 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, Iss. 3, pp. 296–305.
15. Welhazı Yosra, Tawfik Guesmi, Imen Ben Jaoued, Hsan Hadj Abdallah. Power System Stability Enhancement Using FACTS Controllers in Multimachine Power Systems // J. Electrical Systems. 10-3 (2014): 276-291.
16. Akagi Hirofumi Kenji Takahashi, Toshiaki Kobayashi, Hiroaki Sugihara, Takaaki Kai Analysis of an Adjustable Speed Rotary Condenser for Power System Stabilization // Electrical Engineering in Japan. Vol. 133. No.1, 2000.
17. Варганова А.В. Алгоритм внутриверсионной оптимизации режимов работы котлоагрегатов и турбогенераторов промышленных электростанций // Промышленная энергетика. 2018. № 1. С. 17–22.
18. 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 // International Conference on Mechanical Engineering, Automation and Control Systems (MEACS). 2015.
19. 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. Vol. 85. No 12. P. 748-751.
20. 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. P. 951-955.
21. Karandaeв A.S., Khramshin V.R., Evdokimov S.A., Kondrashova Yu.N., Karandaeва O.I. Metodology of calculation of the reliability indexes and life time of the electric and mechanical systems. // Proceedings of 2014 International Conference on Mechanical Engineering, Automation and Control Systems, MEACS 2014. P. 1-6.
22. 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 6 сб. Сер. "International Conference on Mechanical Engineering, Automation and Control Systems 2015, MEACS 2015". 2016. P. 012056.
23. Оценка регулирующего эффекта выпрямительной нагрузки для определения параметров установившихся режимов систем электроснабжения промышленных предприятий // Н.А. Николаев, О.В. Буланова, А.В. Малафеев, Ю.Н. Кондрашова, В.М. Тарасов // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. 2011. №4. С. 115-118.
24. Комплексная оценка эффективности токовых и дистанционных защит в сетях 110-220 кВ в условиях магнитного энергетического узла / Б.И. Заславец, В.А. Игуменцев, Н.А. Николаев, А.В. Малафеев, О.В. Буланова, Ю.Н. Ротанова, Е.А. Панова // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Энергетика. 2011. № 15. С. 14-21.
25. Малафеев А.В., Буланова О.В., Ротанова Ю.Н. Исследование динамической устойчивости систем электроснабжения промышленных предприятий с собственными электростанциями при отделении от энергосистемы в результате короткого замыкания // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника. 2008. № 17(117). С. 72-74.
26. Анализ переходных режимов систем электроснабжения промышленных предприятий, имеющих в своем составе объекты малой энергетики / О.В. Буланова, А.В. Малафеев, Ю.Н. Ротанова, В.М. Тарасов // Промышленная энергетика. 2010. №4. С. 22-28.
27. Increasing the efficiency of power resource management as a solution of issues of the power supply system stability. Kondrashova Y.N., Gazizova O.V., Malafeyev A.V. Procedia Engineering 2015. T.128. С. 759-763.
28. Газизова О.В., Малафеев А.В., Кондрашова Ю.Н. Определение предельных параметров режимов для обеспечения успешной ресинхронизации объектов распределенной генерации в условиях предприятия черной металлургии // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Энергетика. 2016. Т.16. №4. С. 12-22.
29. 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.
30. Малафеев А.В., Буланова О.В., Кондрашова Ю.Н. Исследование влияния автоматических регуляторов промышленных генераторов на параметры переходных процессов коротких замыканий и выхода на раздельную работу // Главный энергетик. 2011. №3. С. 26-29.

Поступила в редакцию 21 января 2019 г.

INFORMATION IN ENGLISH

ANALYSIS OF PERMISSIBILITY OF THE EXCITATION LOSS MODE OF THE SYNCHRONOUS GENERATOR IN THE CONDITIONS OF THE INDUSTRIAL ELECTRICAL SUPPLY SYSTEM

Olga V. Gazizova

Ph.D. (Engineering), Associate Professor, Department of Electric Power Supply of Industrial Enterprises, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. E-mail: logan_b_7@mail.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9416-672X>

Alexandr P. Sokolov

Undergraduate student, Department of Electric Power Supply of Industrial Enterprises, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9397-8291>

Nicolay T. Patshin

Ph.D. (Engineering), Associate Professor, Department of Electric Power Supply of Industrial Enterprises, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.

Yulia N. Kondrashova

Ph.D., Associate Professor, Department of Electric Power Supply of Industrial Enterprises, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5280-5666>

Modern operating conditions of large industrial enterprises require the provision of high reliability of power supply to consumers while reducing the cost of the electricity consumed. These requirements are ensured by the widespread introduction of own sources of electrical energy. These include combined heat and power plants, gas turbines, gas pistons and steam and gas power plants. At the same time, there is a significant complication of the industrial network configuration and possible emergency modes.

One of the emergency modes in such networks is the loss of excitation of the synchronous generator. The admissibility of such a regime is specified by regulatory documents. In this situation, the generator goes into asynchronous mode and consumes reactive power from the network. The purpose of this work is to identify the admissibility of the synchronous generator operation for a certain time in the asynchronous mode as a result of the loss of excitation. An algorithm has been developed to calculate the transient electromechanical process of a synchronous generator taking into account the loss of machine excitation. Investigations have been carried out for various operating modes of an industrial power plant taking into account the initial generator load using the KATRAN software. The calculation results allow determining the generator load by active power at which the synchronous generator can operate in the asynchronous mode without excitation.

Keywords: industrial synchronous generator, transient electromechanical mode, software, automatic excitation controller, parallel operation, separate operation, loss of excitation, asynchronous operation.

REFERENCES

- Meleshkin G.A., Merkur'yev G.V. *Ustoychivost energosistem* [Stability of power systems]. Monograph. Book 1. S.Peterburg: Center for training of energy personnel, 2006. 369 p. (In Russian)
- Zhdanov P.S. *Voprosy ustoychivosti energeticheskikh sistem* [Questions of stability of power systems] / Ed. L.A. Zhukov. Moscow: Energy, 1979. 456 p. (In Russian)
- Kimbar'k E. *Sinkhronnye mashiny i ustoychivost elektricheskikh sistem* [Synchronous machines and stability of electrical systems]. Moscow; Leningrad: Gosenergoizdat, 1960. 392 p. (In Russian)
- Kovach K.P., Raz J. *Perekhodnye protsessy v mashinakh peremennogo toka* [Transients in AC machines]. Moscow; Leningrad: Gosenergoizdat, 1963, 744 p. (In Russian)
- Kazovsky E.Y. *Perekhodnye protsessy v mashinakh peremennogo toka* [Transients in electric machines AC]. Moscow; Leningrad: Publishing House of the USSR Academy of Sciences, 1962. 625 p. (In Russian)
- Kothari D.P., Nagrath I.J. *Power System Engineering*. Second Edition. New Delhi: Tata McGraw-Hill Publishing Company Limited, 2008.
- Xiufeng Shi, Shiguang Mu/ Research on Measures to Improve Stability of the Power System. *Applied Mechanics and Materials*, vol. 742 (2015)? pp. 648-652.
- 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 Issue 10, pp. 977-985.
- Xiufeng Shi, Shiguang Mu. Research on Measures to Improve Stability of the Power System. *Applied Mechanics and Materials*, vol. 742 (2015), pp. 648-652.
- Satheesh, A. Maintaining Power System Stability with Facts Controller using Bees Algorithm and NN. *Journal of Theoretical and Applied Information Technology*. 10th March 2013, vol. 49 Issue 1, pp. 38-47.
- Harikrishna, D. Dynamic Stability Enhancement of Power Systems Using Neural-Network Controlled Static-Compensator / D. Harikrishna, N.V. Srikanth *TELKOMNIKA*. vol.10, no.1, March 2012, pp. 9-16.
- Boudour Mohamed, Hellal Abdelhafid. Power System Dynamic Security Mapping Using Synchronizing and Damping Torques Technique. *The Arabian Journal for Science and Engineering*, 2005, vol. 30, number 1B.
- Sujatha Er.S., Anitha Dr.R., Selvakumar Er.S. Transient Stability Enhancement of Theb 400 kV Transmission Network with SVC. *Journal of Theoretical and Applied Information Technology*, 10th May 2014, vol. 63 Issue 1, pp. 85-91.
- Rui Zhang, Yan Xu, Zhao Yang Dong, Kit Po Wong. 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, Iss. 3, pp. 296-305.
- Welhazi Yosra, Tawfik Guesmi, Imen Ben Jaoued, Hsan Hadj Abdallah. Power System Stability Enhancement Using FACTS Controllers in Multimachine Power Systems. *J. Electrical Systems*, 10-3 (2014): pp. 276-291.

16. Akagi Hirofumi, Takahashi Kenji, Kobayashi Toshiaki, Sugihara Hiroaki, Kai Takaki/ Analysis of an Adjustable Speed Rotary Condenser for Power System Stabilization. *Electrical Engineering in Japan*, vol. 133, no. 1, 2000.
17. Varganova A.V. Algorithm of intra-station optimization of the operating modes of boiler units and turbogenerators at industrial power plants. *Promyshlennaya energetika* [Industrial power engineering], 2018, no. 1, pp. 17-22. (In Russian)
18. 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. *International Conference on Mechanical Engineering, Automation and Control Systems (MEACS)*. 2015.
19. Shevchenko A.F. Construction and Design Features of Permanent Magnet electric Motors for General Industrial Purposes / Shevchenko A.F., Pristup A.G., Novokreshchenov O.I., Toporkov D.M., Korneev V.V. *Russian Electrical Engineering*, 2014, vol. 85, no. 12, pp. 748-751.
20. 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.
21. Karandaev A.S., Khramshin V.R., Evdokimov S.A., Kondrashova Yu.N., Karandaeva O.I. Methodology of calculation of the reliability indexes and life-time of the electric and mechanical systems. *Proceedings of 2014 International Conference on Mechanical Engineering, Automation and Control Systems, MEACS 2014*, pp. 1-6.
22. Gazizova O.V., Malafeyev A.V., Kondrashova Yu.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 Series. "International Conference on Mechanical Engineering, Automation and Control Systems 2015, MEACS 2015"*. 2016, pp. 012056.
23. Nikolaev N.A., Bulanov O.V., Malafeev A.V., Kondrashova Yu.N., Tarasov V.M. Qualification regulating rectification effect for load-defined division parameters established modes of power supply systems of industrial enterprises. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Elektromekhanika*. [Proceedings of the higher educational institutions. Electromechanics], 2011, no. 4, pp. 115-118. (In Russian)
24. Zaslavets B.I., Igumenshev V.A., Nikolaev N.A., Malafeev A.V., Bulanova O.V., Rotanova Yu.N., Panova E.A. Comprehensive evaluation of current and for the remote-shield networks 110-220 kV in terms of energy Magnitogorsk node. *Vestnik Yuzhno-Uralskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Energetika*. [Bulletin of South Ural State University. Series: Energy], 2011, no. 15, pp. 14-21. (In Russian)
25. Malafeev A.V., Bulanova O.V., Rotanova Yu.N. Research of dynamical stability of industrial power systems with own power stations at separation from the electric system in the result of short-circuit failure. *Vestnik Yuzhno-Uralskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Kompyuternye tekhnologii, upravlenie, radioelektronika* [Bulletin of the South Ural State University. Series "Computer Technologies, Automatic Control & Radioelectronics"], 2008, no. 17(117), pp. 72-74. (In Russian)
26. Bulanova O.V., Malafeev A.V., Rotanova Yu.N., Tarasov V.M. Analysis of transient modes of power supply systems of industrial enterprises having in its composition objects small energy. *Promyshlennaya energetika* [Industrial Power Engineering], 2010, no. 4, pp. 22-28. (In Russian)
27. Kondrashova Yu.N., Gazizova O.V., Malafayev 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, pp. 759-763.
28. 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. *Vestnik Yuzhno-Uralskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Energetika*. [Bulletin of South Ural State University. Series "Power Engineering"], 2016, vol. 16, no. 4, pp. 12-22. (In Russian)
29. Gazizova O.V., Kondrashova Yu.N., Malafeyev A.V. Increase of Effective Management of Modes of Electric Power Plants Due to Forecasting of Static and Dynamic Stability at Change of Network Configuration. *Elektrotekhnicheskie sistemy i komplekсы* [Electrotechnical Systems and Complexes], 2016, no. 3(32), pp. 27-38. (In Russian)
30. Malafeev A.V., Bulanova O.V., Kondrashova Yu.N. The study of the influence of automatic regulators of industrial generators on the parameters of transients of short circuits and output to separate operation. *Glavnyi energetik* [Head power engineer], 2011, no. 3, pp. 26-29. (In Russian)

Газизова О.В., Соколов А.П., Патшин Н.Т., Кондрашова Ю.Н. Анализ допустимости режима потери возбуждения синхронного генератора в условиях промышленной системы электроснабжения сложной конфигурации // Электротехнические системы и комплексы. 2019. № 2(43). С. 12-18. [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2019-2\(43\)-12-18](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2019-2(43)-12-18)

Gazizova O.V., Sokolov A.P., Patshin N.T., Kondrashova Yu.N. Analysis of Permissibility of the Excitation Loss Mode of the Synchronous Generator in the Conditions of the Industrial Electrical Supply System. *Elektrotekhnicheskie sistemy i komplekсы* [Electrotechnical Systems and Complexes], 2019, no. 2(43), pp. 12-18. (In Russian). [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2019-2\(43\)-12-18](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2019-2(43)-12-18)