

Моделирование аварийных режимов в системах электроснабжения, оснащенных установками распределенной генерации

Ю.Н. Булатов^{1 a}, А.В. Крюков^{2,3 b}, Е.А. Алексеенко^{4 c}

¹Братский государственный университет, ул. Макаренко 40, Братск, Россия

²Иркутский государственный университет путей сообщения, ул. Чернышевского 15, Иркутск, Россия

³Иркутский национальный исследовательский технический университет, ул. Лермонтова 83, Иркутск, Россия

⁴Восточно-Сибирская дирекция по энергообеспечению Трансэнерго ОАО РЖД, ул. Образцова 20, Иркутск, Россия

^abulatovyura@yandex.ru, ^band_kryukov@mail.ru, ^calev_ia@mail.ru

Статья поступила 8.12.2016, принята 14.01.2017

Применение установок распределенной генерации (РГ), в том числе на основе возобновляемых энергоресурсов, позволяет стабилизировать уровни напряжения, уменьшать потери в сетях и освободить пропускные способности связей. В системах электроснабжения железных дорог (СЭЖД) на основе РГ можно улучшить качество электроэнергии, повысить эффективность и бесперебойность обеспечения потребителей электроэнергией. Однако при наличии РГ возникает проблема, связанная с ростом токов короткого замыкания за счет появления дополнительных источников энергии. Для ее решения необходима разработка методов моделирования аварийных режимов в СЭЖД, оснащенных установками распределенной генерации. В статье представлены результаты исследований аварийных режимов в системах электроснабжения, вызванных короткими замыканиями. Моделировался отдельный район электроснабжения нетяговых потребителей, присоединенный к тяговой подстанции через вставку постоянного тока и включающий следующие установки РГ: турбогенератор мини-теплоэлектростанции; гидрогенератор микро-ГЭС; ветрогенерирующая установка (ВГУ) на базе синхронной машины; ВГУ на основе машины постоянного тока и солнечная электростанция. Результаты моделирования позволили сделать следующие выводы: при использовании установок РГ увеличиваются токи короткого замыкания, что требует дополнительной проверки коммутационного оборудования и изменения уставок релейной защиты для обеспечения селективности; применение вставки постоянного тока позволяет значительно ограничить токи короткого замыкания, даже при наличии подпитки со стороны установок РГ; при двухфазном коротком замыкании наблюдается значительное искажение синусоидальности кривых токов, протекающих от источников РГ.

Ключевые слова: системы электроснабжения железных дорог; установки распределенной генерации; аварийные режимы.

Emergency operation modeling in power supply systems equipped with installations of distributed generation

Yu.N. Bulatov^{1 a}, A.V. Kryukov^{2,3 b}, E.A. Alekseenko^{4 c}

¹Bratsk State University, 40, Makarenko St., Bratsk, Russia

²Irkutsk State Transport University, 15, Chernyshevskiy St., Irkutsk, Russia

³Irkutsk National Research Technical University, 83, Lermontov St., Irkutsk, Russia

⁴Eastern Siberian Power Supply Directorate of TransEnerg, JSC RZD, 20, Obratsov St., Irkutsk, Russia

^abulatovyura@yandex.ru, ^band_kryukov@mail.ru, ^calev_ia@mail.ru

Received 8.12.2016, accepted 14.01.2017

The use of distributed generation (DG) plants, including the plans working on renewable energy, allows to stabilize voltage levels, reduce losses in networks and release bandwidth connections. The use of DG plants in railroad power supply systems (RPSS) makes it possible to improve power quality, increase efficiency and continuity of electrical supply. But, while using DG plants, due to the appearance of additional energy sources, there is a problem associated with the growth of short-circuit currents. To solve this problem, it is necessary to develop simulation methods of emergency modes in RPSS equipped with distributed generation. The article presents the research results obtained by testing the power systems emergency modes caused by short circuits. The separate power supply area (PSA) of non-tractive consumers was modeled. It was connected to the traction substation by inserting direct current (IDC) and comprising the following RG plants: a turbogenerator of mini heat and power plant; a hydrogenerator of micro hydroelectric power station; a wind turbine on the basis of the synchronous machine; a wind turbine on the basis of DC machines; a solar power station. The simulation results led to the following conclusions: DG plants increase short-circuit currents, which requires an additional verification of switching equipment and the change of the settings of relay protection for selectivity; DC link can significantly limit the use of short-circuit currents, even if there is some DG plants feeding; a two-phase short circuit provokes a significant distortion of sinusoidal curves of the currents leaking from the DG sources.

Keywords: railroad power supply systems; distributed generation plants; emergency modes.

Введение

В современных условиях потребители электроэнергии (ЭЭ) могут создавать эффективные установки распределенной генерации (РГ), конкурирующие с централизованной выработкой ЭЭ [1–6]. Наряду с установками РГ индивидуального использования могут формироваться их объединения в микроэнергосистемы. Реализация технологий распределенной генерации связана с необходимостью адаптации к рыночным условиям, а также с ужесточением экологических нормативов, стимулирующих использование возобновляемых источников энергии.

На основе элементов силовой электроники возможно подключать установки РГ к электроэнергетической системе (ЭЭС) через вставки постоянного тока. Это позволяет обеспечить высокое качество электроэнергии и надежность электроснабжения, а также ограничить мощность короткого замыкания (КЗ) на шинах источников РГ [4; 7]. Кроме того, при объединении устано-

вок РГ в микроэнергосистемы (сетевые кластеры) открываются возможности для оптимизации режимов по критерию энергетической эффективности.

Однако появление дополнительных источников энергии может привести к росту токов короткого замыкания в сетях потребителей электроэнергии. Поэтому задача адекватного моделирования аварийных режимов в системах электроснабжения, вызванных короткими замыканиями, приобретает в условиях ввода установок РГ особую актуальность.

В статье представлены результаты моделирования аварийных режимов в сетевых кластерах, предназначенных для электроснабжения нетяговых потребителей железных дорог переменного тока.

Методика моделирования. Исследования проводились в системе MATLAB применительно к структурной схеме, представленной на рис. 1.

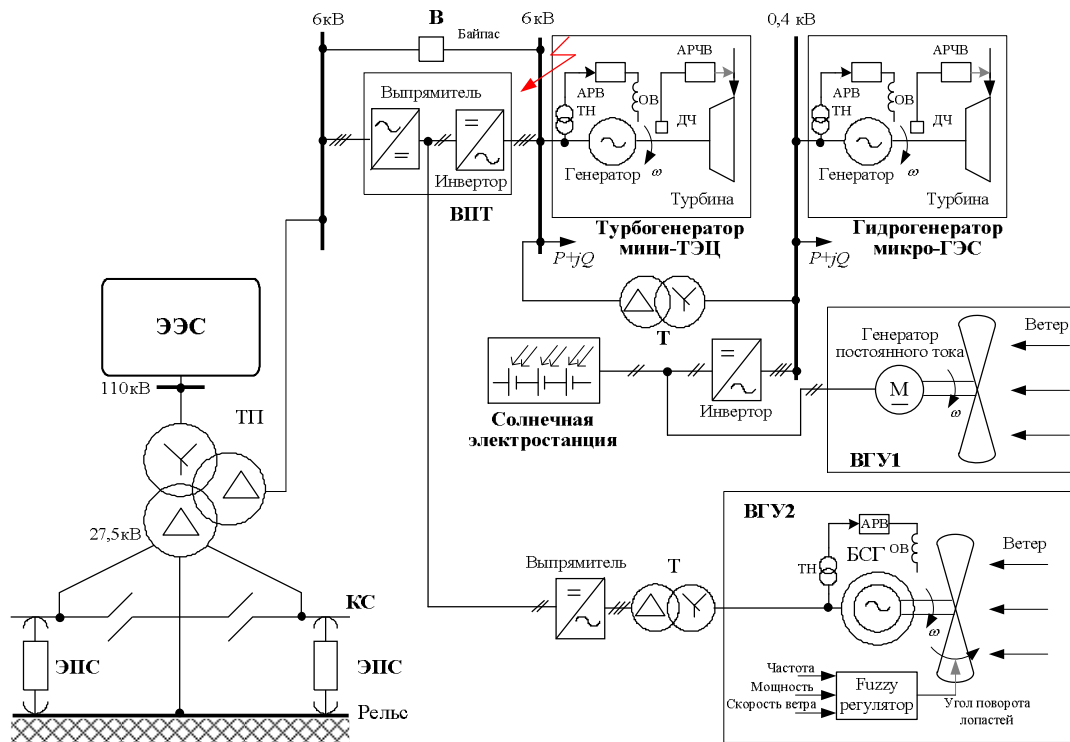


Рис. 1. Фрагмент системы электроснабжения, оснащенной установками РГ: АРВ — автоматический регулятор возбуждения; АРЧВ — автоматический регулятор частоты вращения; БСГ — безредукторный синхронный генератор; В — выключатель; ВГУ — ветрогенерирующая установка; ВПТ — вставка постоянного тока; ДЧ — датчик частоты вращения; КС — контактная сеть; ОВ — обмотка возбуждения; Т — трансформатор; ТН — трансформатор напряжения; ТП — тяговая подстанция; ЭПС — электроподвижной состав

Моделировался отдельный район электроснабжения (РЭС) нетяговых потребителей с суммарной мощностью 2,6 МВ·А, присоединенный к тяговой подстанции через вставку постоянного тока (ВПТ) и включающий следующие установки РГ: турбогенератор мини-ТЭЦ с мощностью 3,125 МВ·А и напряжением 6 кВ; гидрогенератор микро-ГЭС с мощностью 0,25 МВ·А и напряжением 0,4 кВ; ветрогенерирующая установка (ВГУ) на базе синхронной машины с мощностью в 1 МВ·А; ВГУ на основе машины постоянного тока мощностью 200 кВт и солнечная электростанция (СЭС) мощностью

107,5 кВт. При этом СЭС и ВГУ на основе машины постоянного тока работают через общий инвертор на шины 0,4 кВ, а ВГУ на базе синхронной машины подключена через трансформатор и выпрямитель к ВПТ. Основная нагрузка в РЭС сосредоточена на шинах 6 кВ. Установки РГ, работающие на возобновляемых источниках энергии, связаны через трансформатор с сетью 6 кВ.

Турбогенератор, приводимый во вращение паровой турбиной с промежуточным отбором пара, моделировался стандартным блоком библиотеки SymPower-

Systems системы MATLAB — Synchronous Machine pu Fundamental. Структурная схема паровой турбины представлена на рис. 2. При моделировании использовались следующие параметры турбогенератора: $X_d = 2,34$ о.е., $E_q = 1,25$ о.е., $U_g = 1$ о.е., $T_{je} = 8,669$ с, $\delta = 46,9$ эл. град.

Для тиристорного возбудителя использовалась модель апериодического звена первого порядка с коэффициентом k_e , постоянной времени T_e и блоком ограничения напряжения [8]. При моделировании принимались следующие значения параметров: $k_e = 1$; $T_e = 0,025$ с.

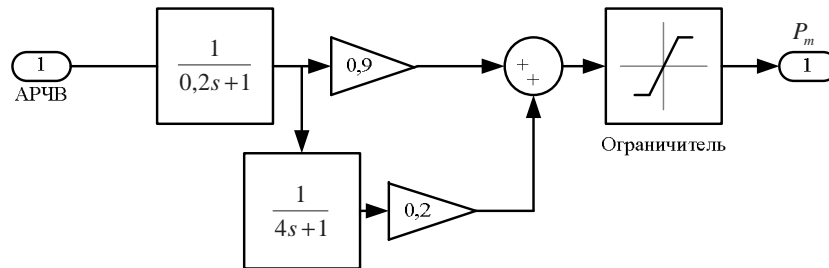


Рис. 2. Структурная схема модели паровой турбины с учетом промежуточного отбора пара

Генератор, приводимый во вращение гидротурбиной, моделировался стандартным блоком Synchronous Machine pu Standart. Структурная схема гидротурбины представлена на рис. 3 а. Модель состоит из главного сервомотора, структурная схема которого показана на рис. 3 б. Сервомотору, охваченному изодромной обратной связью, отвечает передаточная функция $\frac{1}{T_c s + 1}$, характерная для регуляторов гидротурбин. Постоянная времени сервомотора принималась равной 0,25 с. Изодромный регулятор моделировался следующей передаточной функцией:

где nu — коэффициент усиления изодрома (при моделировании принимался равным 10 о.е.); T_i — постоянная времени изодрома (при моделировании принималась равной 0,1 с).

$$W(s) = \frac{nu \cdot T_i s}{T_i s + 1},$$

где nu — коэффициент усиления изодрома (при моделировании принимался равным 10 о.е.); T_i — постоянная времени изодрома (при моделировании принималась равной 0,1 с).

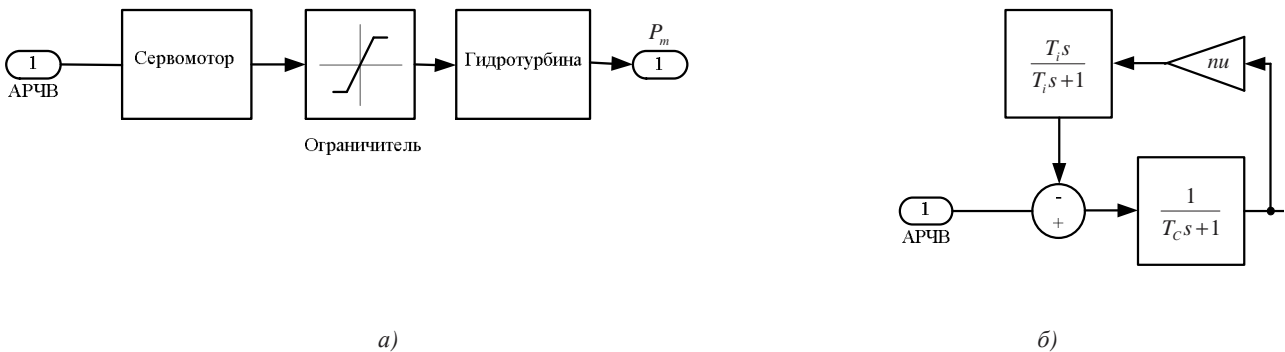


Рис. 3. Структурная схема модели гидротурбины (а) и главного сервомотора (б) в MATLAB

Гидравлическая турбина моделировалась передаточной функцией, учитывающей гидроудар [9]:

$$W_T(s) = \frac{1 - a_{уст} T_B s}{1 + 0,5 a_{уст} T_B s},$$

где T_B — постоянная времени гидротурбины (при моделировании принималась равной 0,344 с); $a_{уст}$ — положение открытия направляющего аппарата (принимает значения в диапазоне 0...1).

При моделировании использовались следующие параметры гидрогенератора: $X_d = 2,84$ о.е., $E_q = 1,1$ о.е., $U_g = 1$ о.е., $T_{je} = 3,779$ с, $\delta = 37,5$ эл. град.

Блок, обозначенный на рис. 1 как ВГУ1, моделировался с использованием стандартных элементов библиотеки SymPowerSystems системы MATLAB: ветротурбины (Winde turbine) и машины постоянного тока (DC Machine) с независимым возбуждением. Схема модели ВГУ в MATLAB представлена на рис. 4.

Модель солнечной электростанции реализована с использованием блока PV Array системы MATLAB, построенного на основе 100 параллельных и 10 последовательных солнечных фотоэлектрических модулей, соединенных между собой. Схема модели солнечной электростанции представлена на рис. 5 а, принципиальная электрическая схема отдельного модуля — на рис. 5 б.

Вставка постоянного тока, обеспечивающая связь установки РГ с системой тягового электроснабжения,

моделировалась с помощью стандартных блоков библиотеки силовой электроники пакета SymPower-Systems. ВПТ позволяет повысить качество электроэнергии, придает электроснабжению потребителей характер гарантированного питания [4; 7], а также, как

показано ниже, обеспечивает ограничение токов короткого замыкания.

Схемы исследуемой модели СЭЖД с установками РГ, реализованными в среде MATLAB, представлены на рис. 6–10.

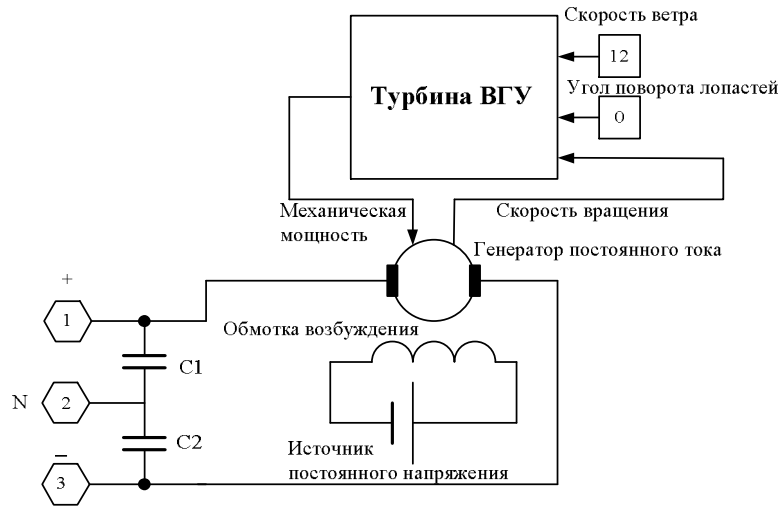


Рис. 4. Схема модели ВГУ

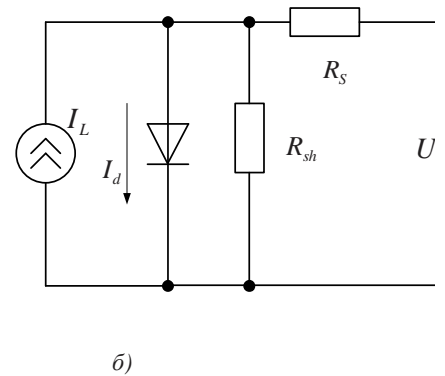
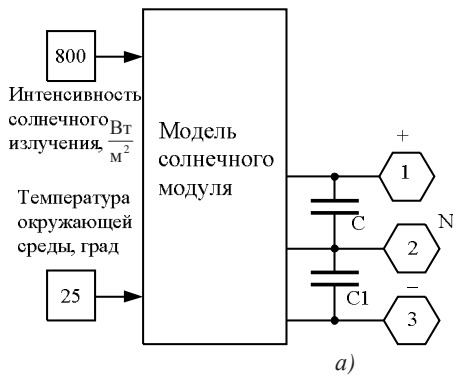


Рис. 5. Схема модели солнечной электростанции (а) и принципиальная электрическая схема фотоэлектрического модуля (б)

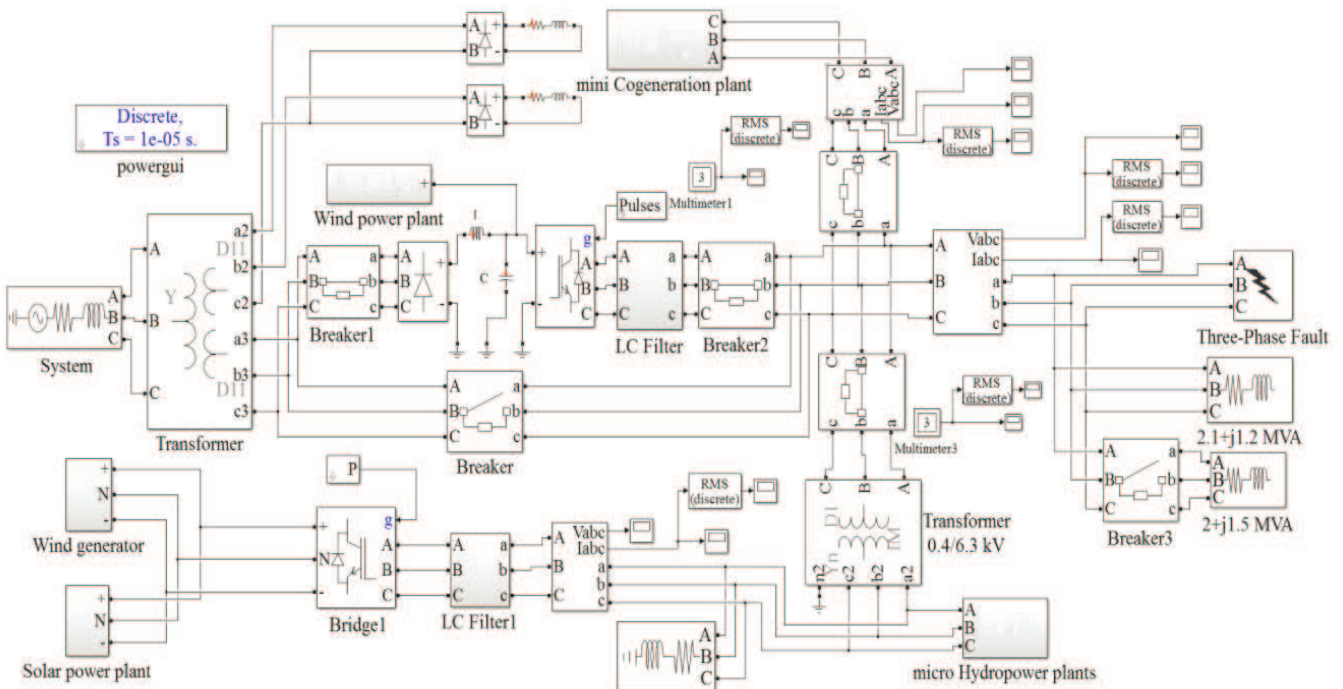


Рис. 6. Схема исследуемой модели в MATLAB

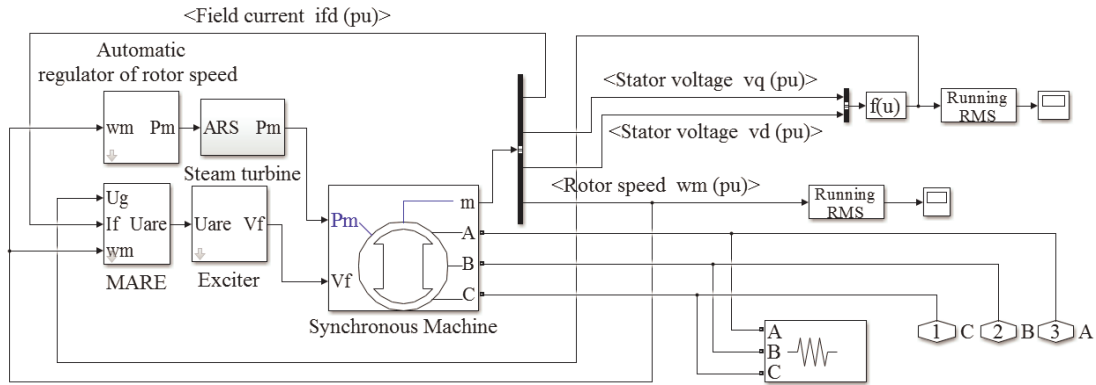


Рис. 7. Схема мини-ТЭЦ в MATLAB

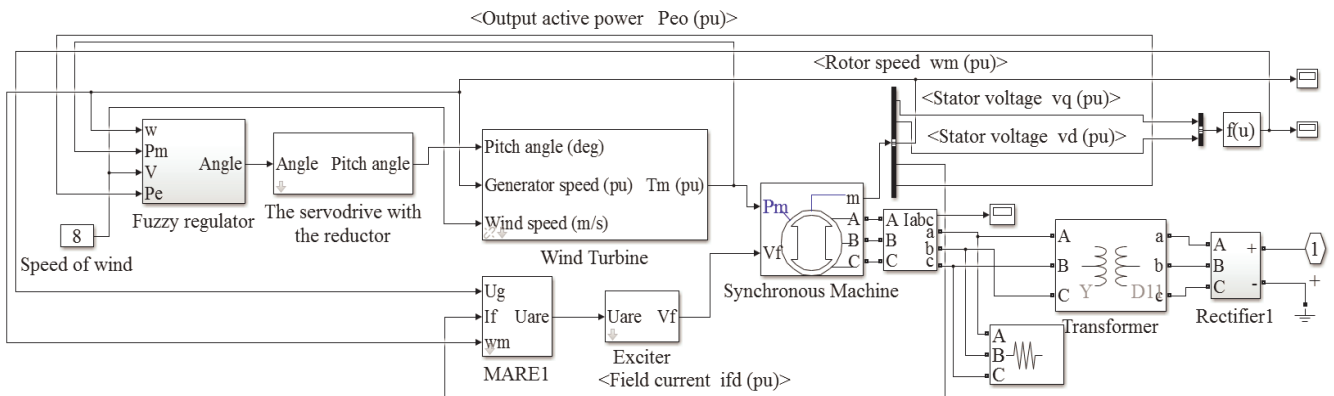


Рис. 8. Схема модели ВГУ на основе синхронной машины в MATLAB

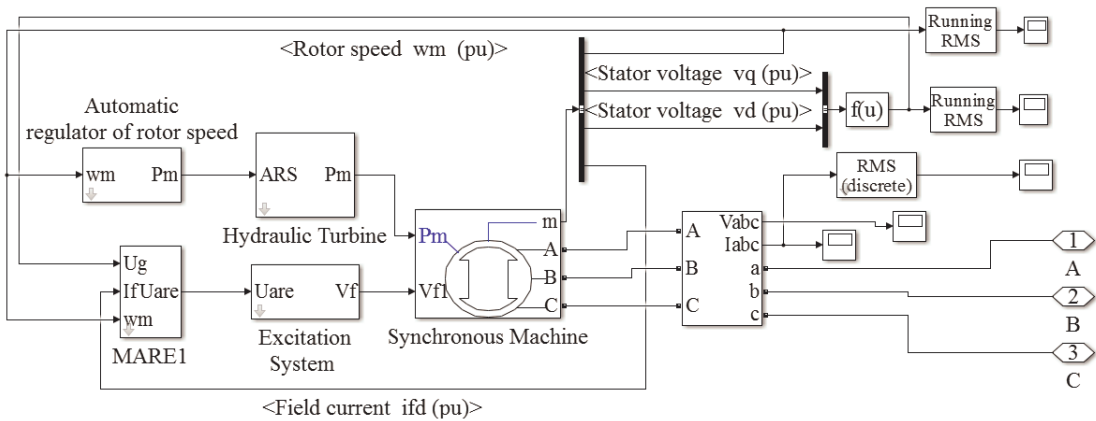


Рис. 9. Схема микро-ГЭС в MATLAB

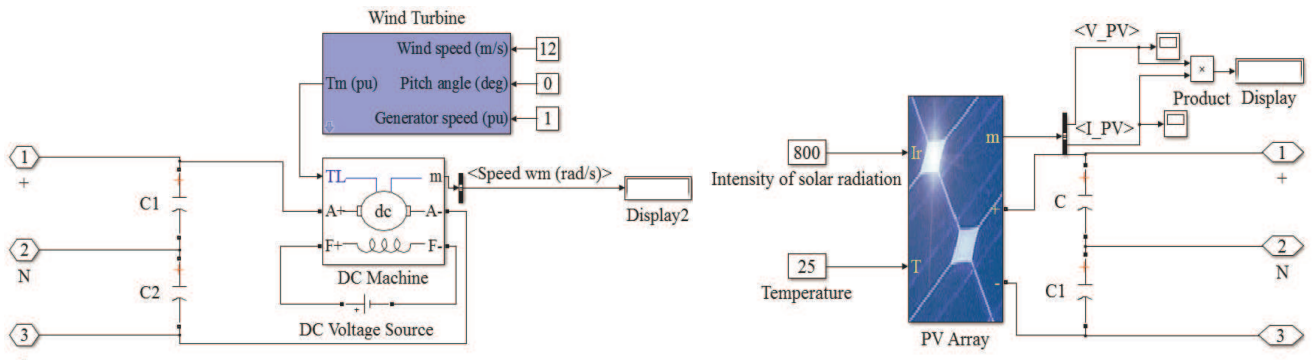


Рис. 10. Схема модели ветрогенератора (а) и солнечной электростанции (б) в MATLAB

Описание используемых при моделировании автоматических регуляторов возбуждения (АРВ) и частоты вращения (АРЧВ) генераторов мини-ТЭЦ и микро-ГЭС, а также нечеткого (fuzzy) регулятора мощности ВГУ на основе синхронной машины приведены в работах [3; 4; 7; 10; 11]. При моделировании оптимизация настроек регуляторов не выполнялась, а использовалась технология прогностических алгоритмов [12–15].

Результаты моделирования. При моделировании рассматривались режимы двухфазного КЗ на шинах 6 кВ главного распределительного пункта РЭС в следующих вариантах работы установок РГ (см. рис. 1):

1. Установки РГ и ВПТ отключены, включен байпас.
2. Включены мини-ТЭЦ и байпас, ВПТ отключена.
3. Включены мини-ТЭЦ и ВПТ.

4. Включены ВПТ, мини-ТЭЦ, микро-ГЭС, СЭС и ВГУ 1.

5. Включены ВПТ и все установки РГ.

Генераторы мини-ТЭЦ и микро-ГЭС были оснащены прогностическими АРВ и АРЧВ [15]. Для ВГУ2 использовался нечеткий регулятор [3; 11].

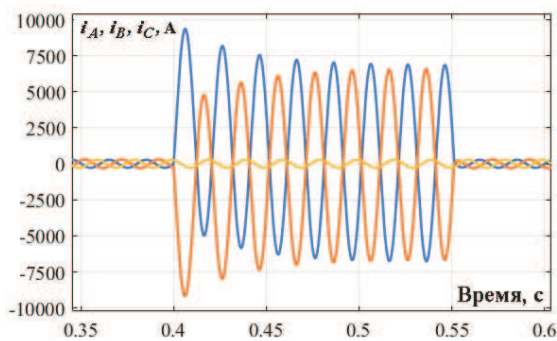
Результаты моделирования аварийного режима (АР) для режима 1 представлены на рис. 11.

Результаты моделирования АР для режима 2 проиллюстрированы на рис. 12, 13.

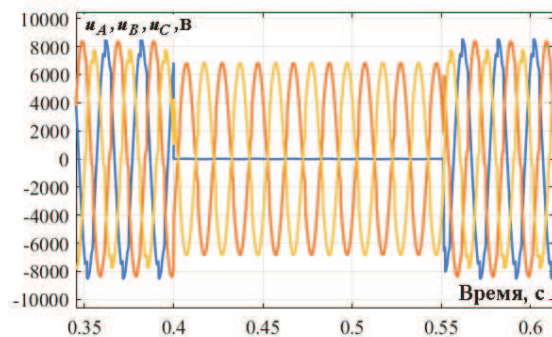
Результаты моделирования АР для режима 3 представлены на рис. 14, 15.

Результаты моделирования АР для режима 4 проиллюстрированы на рис. 16, 17.

Результаты моделирования АР для режима 5 представлены на рис. 18, 19.

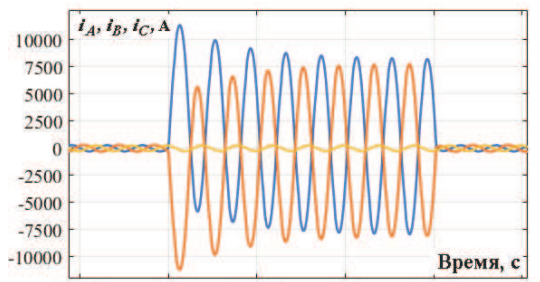


а)

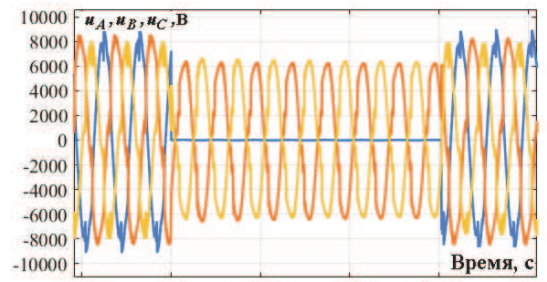


б)

Рис. 11. Осциллограммы токов (а) и напряжений (б) на шинах нетягового потребителя при двухфазном КЗ

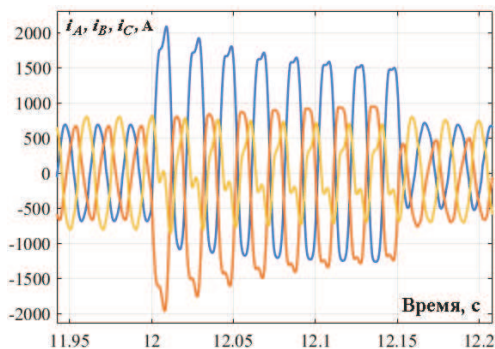


а)

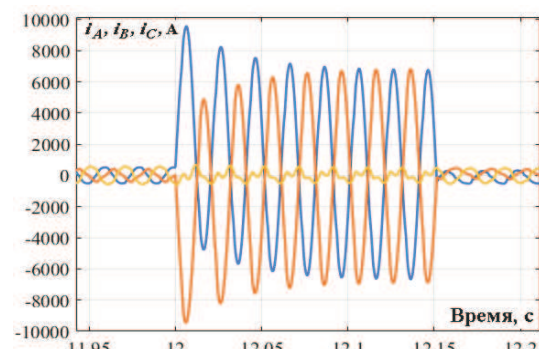


б)

Рис. 12. Осциллограммы токов (а) и напряжений (б) на шинах нетягового потребителя при двухфазном КЗ



а) от мини-ТЭЦ



б) от ТП

Рис. 13. Осциллограммы токов при двухфазном КЗ

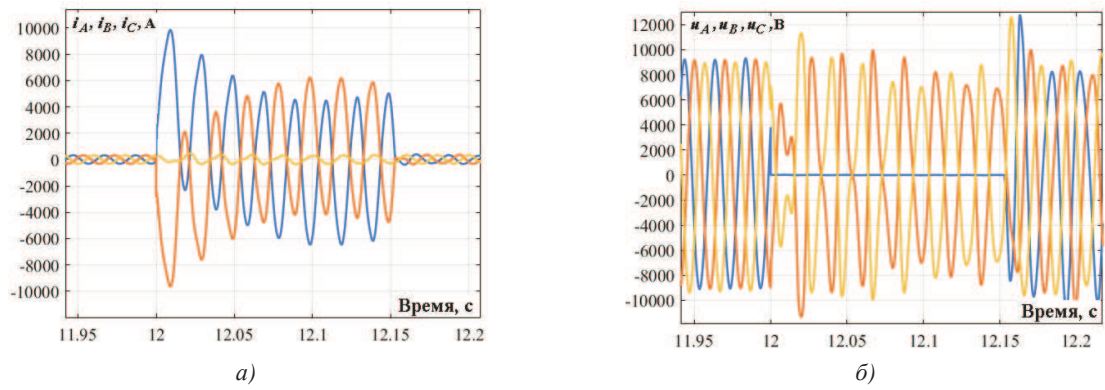


Рис. 14. Осциллограммы токов (а) и напряжений (б) на шинах нетягового потребителя при двухфазном КЗ

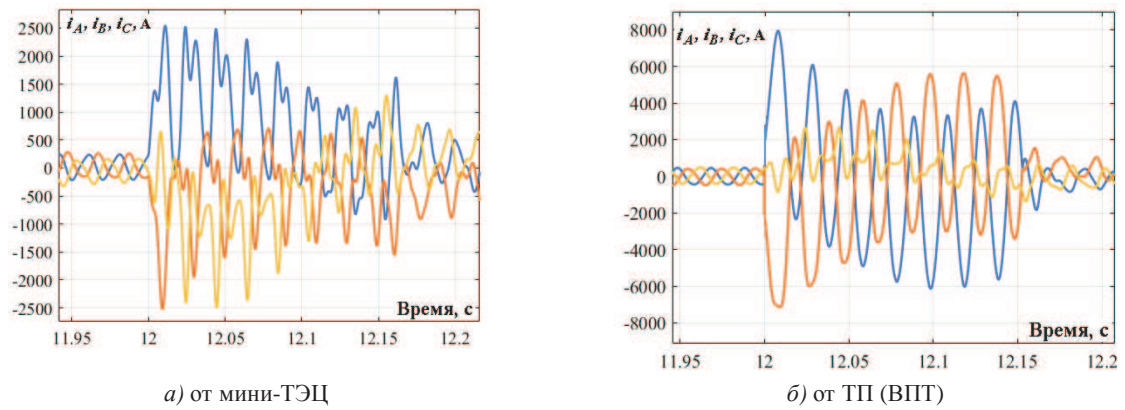


Рис. 15. Осциллограммы токов при двухфазном КЗ

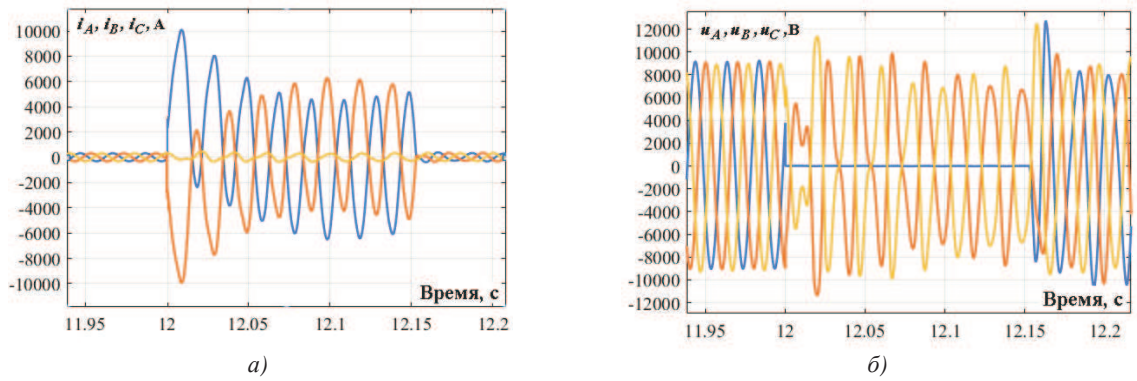


Рис. 16. Осциллограммы токов (а) и напряжений (б) на шинах нетягового потребителя при двухфазном КЗ

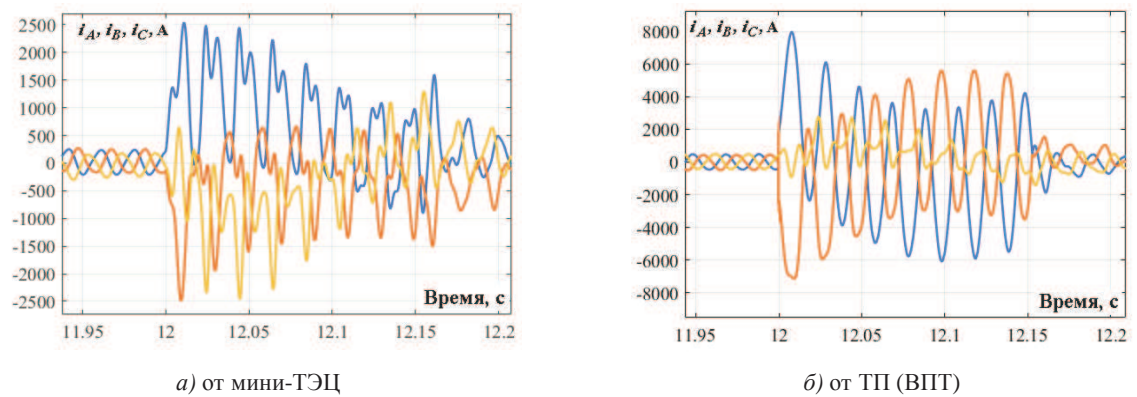


Рис. 17. Осциллограммы токов при двухфазном КЗ

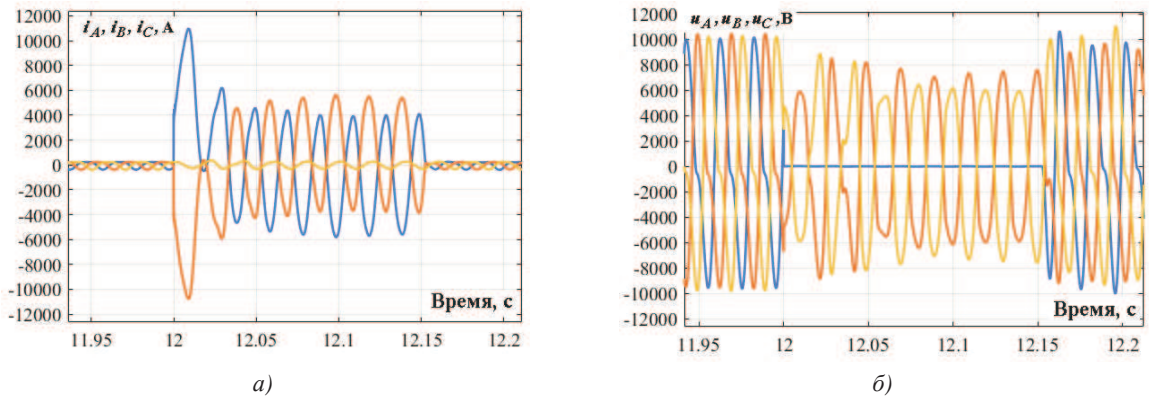


Рис. 18. Осциллограммы токов (а) и напряжений (б) на шинах нетягового потребителя при двухфазном КЗ

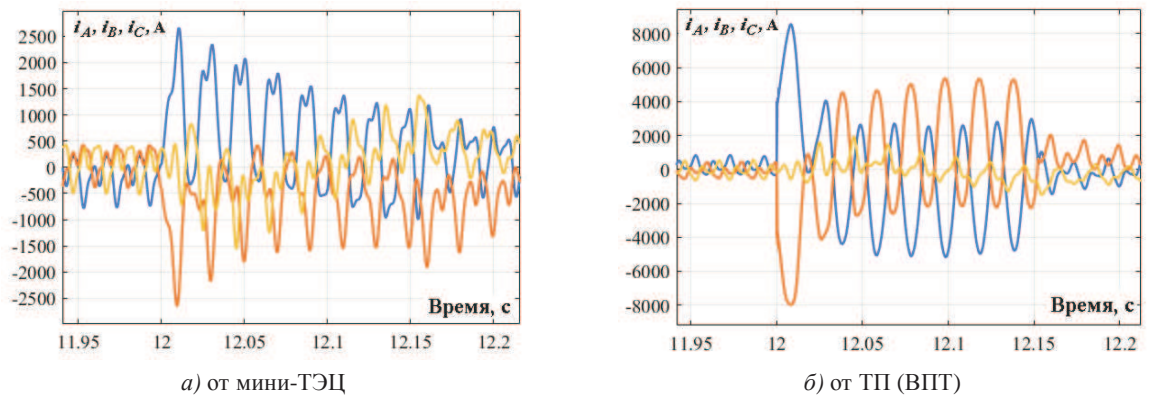


Рис. 19. Осциллограммы токов при двухфазном КЗ

Сводные результаты моделирования представлены в табл. 1.

Таблица 1

Сводная таблица токов двухфазного короткого замыкания на шинах 6 кВ нетягового потребителя

Режим работы	Направления токов	Ударный ток, кА			Периодический ток в начальный момент времени (действующее значение), кА		
		i_A		i_C	I_A		•
1	Токи в месте КЗ	9,43	9,24	0,28	5,64	5,52	0,2
	Токи в месте КЗ	11,36	11,2	0,81	6,90	6,8	0,5
2	Токи от мини-ТЭЦ	2,09	1,97	0,27	1,33	1,21	0,19
	Токи от ТП	9,57	9,46	0,68	5,63	5,61	0,36
3	Токи в месте КЗ	9,88	9,69	0,2	6,2	6,15	0,18
	Токи от мини-ТЭЦ	2,55	2,52	2,42	1,67	1,25	1,26
	Токи от ТП (ВПП)	7,94	7,17	2,64	4,95	5,03	1,33
4	Токи в месте КЗ	10,11	9,93	0,46	6,33	6,28	0,24
	Токи от мини-ТЭЦ	2,54	2,49	0,64	1,4	1,24	0,5
	Токи от ТП (ВПП)	7,97	7,17	0,93	5,01	4,95	1,41
	Токи от микро-ГЭС, СЭС и ВГУ1 на стороне 6 кВ	0,31	0,29	0,12	0,16	0,15	0,06
5	Токи в месте КЗ	11,0	10,8	0,36	7,08	7,03	0,17
	Токи от мини-ТЭЦ	2,66	2,65	0,83	1,49	1,38	0,66
	Токи от ТП	8,55	7,98	0,97	5,61	5,47	0,71
	Токи от микро-ГЭС, СЭС и ВГУ1 на стороне 6 кВ	0,30	0,30	0,16	0,15	0,15	0,07

Заключение

Анализируя полученные результаты, можно сделать следующие выводы:

1. При использовании установок распределенной генерации увеличиваются токи короткого замыкания, что требует дополнительной проверки коммутационного оборудования и модификации уставок релейной защиты для обеспечения селективности.

2. Применение вставки постоянного тока позволяет значительно ограничить токи в поврежденных фазах даже в условиях подпитки со стороны установок РГ. Таким образом, использование группы «выпрямитель – инвертор» является действенной мерой ограничения токов КЗ.

3. При двухфазном коротком замыкании наблюдается значительное искажение синусоидальности кривых тока, подтекающих от источников РГ. Это объясняется тем, что при несимметрии токов синхронные генераторы начинают генерировать в сеть высшие гармоники; при этом наибольшие искажения наблюдаются в неповрежденной фазе.

Литература

1. Rugthaicharoencheep N., Auchariyamet S. Technical and Economic Impacts of Distributed Generation on Distribution System // International Journal of Electrical, Computer, Energetic, Electronic and Communication Engineering. 2012. Vol. 6, № 4. P. 385-389.

2. Крюков А.В., Чан Зюй Хынг. Влияние установок распределенной генерации на качество электроэнергии в системах электроснабжения железных дорог // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2012. № 4 (36). С. 162-167.

3. Булатов Ю.Н., Крюков А.В., Чан Зюй Хынг. Интеллектуальные регуляторы для установок распределенной генерации // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2015. № 2 (46). С. 83-95.

4. Булатов Ю.Н., Крюков А.В., Чан Зюй Хынг. Сетевые кластеры в системах электроснабжения железных дорог. Иркутск: ИрГУПС, 2015. 205 с.

5. Buchholz B.M., Styczynski Z. Smart Grids – Fundamentals and Technologies in Electricity Networks. Springer Heidelberg New York Dordrecht London, 2014. 396 p.

6. Magdi S. Mahmoud, Fouad M. AL-Sunni Control and Optimization of Distributed Generation Systems. Cham: Springer International Publishing : Imprint: Springer, 2015. 578 p.

7. Булатов Ю.Н., Крюков А.В., Чан Зюй Хынг. Применение сетевых кластеров (microgrid) в системах электроснабжения железных дорог. Братск: БрГУ, 2016. 178 с.

8. Anderson P.M., Fouad A.A. Power System Control and Stability. Second Edition. IEEE Press, 2003. 688 p.

9. Стернинсон Л.Д. Переходные процессы при регулировании частоты и мощности в энергосистемах. М.: Энергия, 1975. 216 с.

10. Игнатъев И.В., Булатов Ю.Н. Модели и методы настройки систем регулирования возбуждения генераторов на основе экспериментальных данных. Братск: Изд-во БрГУ, 2016. 278 с.

11. Булатов Ю.Н., Крюков А.В., Чан Зюй Хынг. Нечеткие регуляторы для ветрогенерирующих установок // Изв. вузов. Проблемы энергетики. 2014. № 7-8. 2014. С. 60-69.

12. Пикина Г.А., Кузнецов М.С. Прогностические типовые алгоритмы регулирования // Теплоэнергетика. 2011. № 4. С. 61-66.

13. Durgaryan I.S., Pashchenko F.F., Pikina G.A., Pashchenko A.F. Information method of consistent identification of objects // Proceedings of the 2013 IEEE 8th Conference on Industrial Electronics and Applications, ICIEA 2013. P. 1325-1330.

14. Пикина Г.А. Принцип управления по прогнозу и возможность настройки систем регулирования одним параметром // Новое в российской электроэнергетике. 2014. № 3. С. 5-13.

15. Булатов Ю.Н., Крюков А.В., Нгуен Ван Хуан. Прогностические регуляторы для установок распределенной генерации // Системы. Методы. Технологии. 2016. № 1 (29). С. 63-69.

References

1. Rugthaicharoencheep N., Auchariyamet S. Technical and Economic Impacts of Distributed Generation on Distribution System // International Journal of Electrical, Computer, Energetic, Electronic and Communication Engineering. 2012. Vol. 6, № 4. P. 385-389.

2. Kryukov A.V., Chan Zyui Khyng. Influence of installations of the distributed generation on quality of the electric power in systems of electrical power supply of the railroads // Modern technologies. System analysis. Modeling. 2012. № 4 (36). P. 162-167.

3. Bulatov Yu.N., Kryukov A.V., Chan Zyui Khyng. Intelligent regulators for installations of the distributed generation // Modern technologies. System analysis. Modeling. 2015. № 2 (46). P. 83-95.

4. Bulatov Yu.N., Kryukov A.V., Chan Zyui Khyng. Network clusters in systems of electrical power supply of the railroads. Irkutsk: IrGUPS, 2015. 205 p.

5. Buchholz B.M., Styczynski Z. Smart Grids - Fundamentals and Technologies in Electricity Networks. Springer Heidelberg New York Dordrecht London, 2014. 396 p.

6. Magdi S. Mahmoud, Fouad M. AL-Sunni Control and Optimization of Distributed Generation Systems. Cham: Springer International Publishing: Imprint: Springer, 2015. 578 p.

7. Bulatov Yu.N., Kryukov A.V., Chan Zyui Khyng. Network clusters (microgrid) in systems of power supply of the railroads. Bratsk: BrGU, 2016. 178 p.

8. Anderson P.M., Fouad A.A. Power System Control and Stability. Second Edition. IEEE Press, 2003. 688 p.

9. Sterninson L.D. Transient phenomena in case of regulation of frequency and power in power supply systems. M.: Energiya, 1975. 216 p.

10. Ignat'ev I.V., Bulatov Yu.N. Models and methods of setting generator excitation control systems on the basis of experimental data. Bratsk: Izd-vo BrGU, 2016. 278 p.

11. Bulatov Yu.N., Kryukov A.V., Chan Zyui Khyng. Fuzzy regulators for wind generators // Proceedings of the higher educational institutions. Energy Sector Problems. 2014. № 7-8. 2014. P. 60-69..

12. Pikina G.A., Kuznetsov M.S. Application of the linear prognostic algorithms of regulation // Thermal Engineering. 2011. № 4. P. 61-66.

13. Durgaryan I.S., Pashchenko F.F., Pikina G.A., Pashchenko A.F. Information method of consistent identification of objects // Proceedings of the 2013 IEEE 8th Conference on Industrial Electronics and Applications, ICIEA 2013. P. 1325-1330.

14. Pikina G.A. Principle of control according to the forecast and a possibility of setup of systems of regulation by one parameter // New in Russian Electrical Power-Engineering. 2014. № 3. P. 5-13.

15. Bulatov Yu.N., Kryukov A.V., Nguen Van Kuan. Prognostic regulators for installations of the distributed generation // Systems. Methods. Technologies. 2016. № 1 (29). P. 63-69.