

Использование прогностических регуляторов для улучшения качества процессов управления асинхронизированными гидрогенераторами*

Ю.Н. БУЛАТОВ ^{1, a}, А.В. КРЮКОВ ^{2, 3, b}, К.В. СУСЛОВ ^{3, 4, c},
Э.К. ШУМАНСКИЙ ^{1, d}

¹ 665709, РФ, г. Братск, ул. Макаренко, 40, Братский государственный университет

² 664074, РФ, г. Иркутск, ул. Чернышевского, 15, Иркутский государственный университет путей сообщения

³ 664074, РФ, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, Иркутский национальный исследовательский технический университет

⁴ 111250, РФ, г. Москва, ул. Красноказарменная, 14, Национальный исследовательский университет «МЭИ»

^a bulatovyura@yandex.ru ^b and_kryukov@mail.ru ^c dr.souslov@yandex.ru

^d shumanskij@yandex.ru

Внедрение в электроэнергетические системы установок распределенной генерации требует решения задач по развитию систем управления в нормальных, аварийных и послеаварийных режимах с целью повышения надежности и устойчивости. В установках распределенной генерации могут использоваться асинхронизированные генераторы, имеющие преимущества по сравнению с синхронными машинами. Однако их применение требует разработки современных систем автоматического управления. В статье рассматривается распределительная электрическая сеть с установками распределенной генерации на базе асинхронизированных генераторов, при этом особое внимание уделено разработке моделей систем автоматического управления асинхронизированных генераторов.

Цель исследований состояла в определении эффектов от применения для управления асинхронизированными генераторами прогностических регуляторов. Для этого было выполнено моделирование нормального, аварийного и послеаварийного режимов электрической сети, в состав которой входили два асинхронизированных генератора, приводимых во вращение гидротурбинами. В узле подключения питающей электроэнергетической системы генерировались третья и пятая гармоники. В качестве возмущения рассматривалось трехфазное короткое замыкание в сети 35 кВ длительностью в одну секунду. Полученные результаты позволили сделать следующие выводы: использование прогностических регуляторов улучшает качество электроэнергетики. Коэффициенты гармоник напряжения снижаются на 7,35 %, а коэффициенты несимметрии по обратной последовательности – на 50 %. Прогностические регуляторы частоты асинхронизированного генератора с фиксированным временем прогноза, рассчитанным по предлагаемой методике, повышают эффективность управления. Так, например, длительность переходного

* Статья получена 06 марта 2024 г.

процесса для первого асинхронизированного генератора уменьшается на треть, а максимальное отклонение частоты – на 20 %. Степень его затухания увеличивается на 33 %.

Ключевые слова: электроэнергетическая система, установки распределенной генерации, асинхронизированные гидрогенераторы, прогностические регуляторы, автоматический регулятор частоты вращения, гармонические искажения, качество электроэнергии, моделирование

ВВЕДЕНИЕ

Нарастающие темпы использования в электроэнергетических системах (ЭЭС) распределенной генерации (РГ) [1–5] требуют решения задач по развитию систем управления с целью повышения надежности и устойчивости, а также улучшения качества электроэнергии и снижения ее нерациональных расходов. В установках РГ могут использоваться различные электромеханические преобразователи, например синхронные, асинхронные и асинхронизированные генераторы (АСГ) [6]. АСГ в виде машин двойного питания [7] могут применяться на тепловых, гидравлических, гидроаккумулирующих, приливных и ветровых электростанциях [8, 9], в преобразователях частоты [10] и для компенсации реактивной мощности [11, 12]. В отличие от синхронного генератора АСГ имеет более сложную схему с несколькими обмотками возбуждения переменного тока [13]. Магнитное поле АСГ формируется внешним источником варьiruемой частоты (рис. 1) и перемещается относительно ротора.

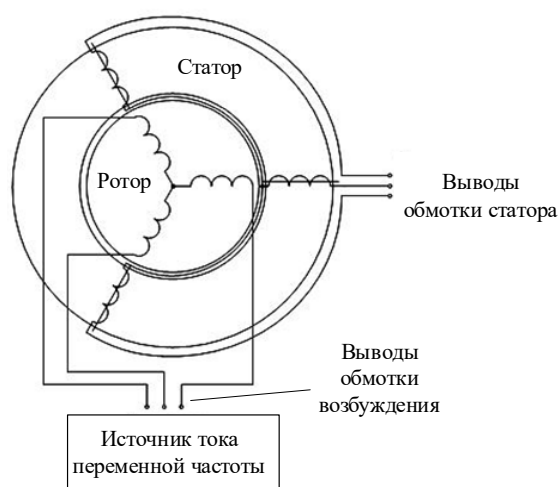


Рис. 1. Схема АСГ

Fig. 1. ASG scheme

По сравнению с синхронной машиной АСГ отличается следующими положительными свойствами [11, 12, 14]:

- повышенная динамическая устойчивость;
- большой диапазон регулирования реактивной мощности;
- стабильность генерируемого напряжения по амплитуде и частоте.

Благодаря этим свойствам применение АСГ в установках РГ является целесообразным. Однако для эффективного использования таких агрегатов требуется разработка современных систем автоматического управления (САУ). Цель представленных ниже результатов исследований состояла в определении эффектов от применения в АСГ прогностических регуляторов (ПР) [15–17]. Ниже приведено описание предлагаемых моделей САУ для АСГ, работающих в условиях гармонических искажений; рассмотрен метод определения времени прогноза для регулятора скорости вращения ротора, а также выполнено моделирование нормальных и аварийных режимов работы исследуемой ЭЭС.

1. ОПИСАНИЕ МОДЕЛЕЙ САУ АСГ И МЕТОДА НАСТРОЙКИ ПРОГНОСТИЧЕСКОГО РЕГУЛЯТОРА

Исследования проводились на модели электрической сети, схема которой показана на рис. 2. В ее состав входили два АСГ, приводимые во вращение гидротурбинами. В узле, отвечающем точке подключения питающей ЭЭС, генерировались третья и пятая гармоники (рис. 3). В установившемся режиме суммарные коэффициенты гармонических искажений при отключенных АСГ в сети 35 кВ имели следующие значения: $K_{Uab} = 11,26 \%$, $K_{Ubc} = 11,26 \%$, $K_{Uca} = 11,26 \%$. Мощности нагрузок, указанные на рис. 2, задавались так: $S_{H1} = 17 + j2,6 \text{ МВ} \cdot \text{А}$; $S_{H2} = 0,065 + j0,01 \text{ МВ} \cdot \text{А}$; $S_{H3} = 1 + j0,1 \text{ МВ} \cdot \text{А}$; $S_{H4} = 0,065 + j0,01 \text{ МВ} \cdot \text{А}$. В качестве возмущения рассматривалось трехфазное короткое замыкание (КЗ) на воздушной линии (ВЛ) и ее отключение с двух сторон через одну секунду.

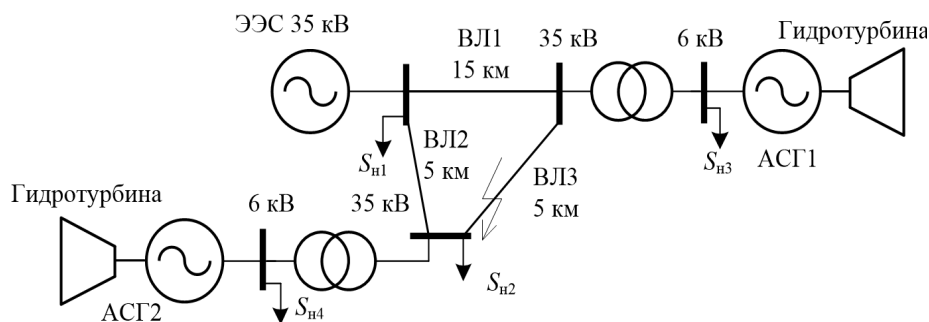


Рис. 2. Схема исследуемой электрической сети

Fig. 2. Scheme of the electrical network under study

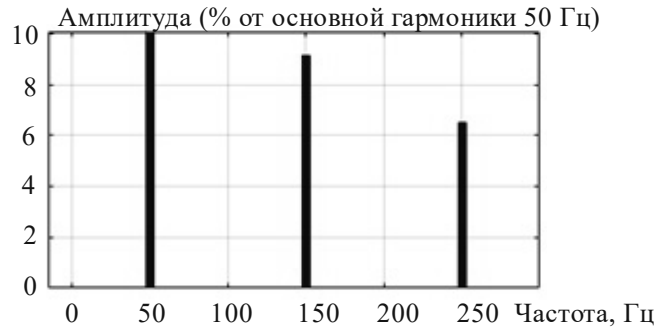


Рис. 3. Спектр гармоник питающего напряжения

Fig. 3. Supply voltage harmonic spectrum

Модель рассматриваемой электрической сети с АСГ и регуляторами была реализована в системе MatLab. Для АСГ применялись модели асинхронных машин с фазным ротором, имеющие следующие параметры: номинальная мощность $P_H = 1000$ кВт; синхронная частота вращения $n_0 = 1000$ об/мин; КПД $\eta = 95,5$ %; коэффициент мощности $\cos \varphi = 0,858$; номинальное напряжение и ток $U_H = 6$ кВ; $I = 119$ А; кратность пускового тока и момента соответственно 6,5 и 1,3; число пар полюсов $p_g = 3$; момент инерции ротора $J = 276$ кг·м². Для указанных данных с помощью специализированной программы [18] были рассчитаны параметры модели АСГ.

В системе возбуждения АСГ [19] применялся управляемый инвертор, получающий питание от регулируемого источника напряжения. В качестве первичного двигателя использовалась гидротурбина, в модели которой учитывался сервомотор с регулятором, описываемый передаточной функцией (ПФ) [20]:

$$W(p) = \frac{0,1p + 1}{(0,1p + 1)(0,25p + 1) + p},$$

где p – оператор Лапласа.

Гидротурбина учитывалась следующей ПФ [21]:

$$W_T(p) = \frac{1 - a \cdot 0,344p}{1 + a \cdot 0,172p},$$

где a – положение открытия направляющего аппарата турбины (изменяется в диапазоне 0...1).

Автоматическое регулирование частоты вращения (АРЧВ) АСГ выполнялось типовыми и прогностическими ПИД-регуляторами, которые имели в своем составе последовательно включенное прогнозирующее звено с передаточной функцией $T_{пр}p + 1$, где $T_{пр}$ – время прогноза, и усилитель с передаточной функцией $\frac{1}{0,001p + 1}$ (рис. 4). При моделировании использовались следующие параметры АРЧВ, рассчитанные с помощью программы настройки

ПИД-регулятора из пакета Simulink Control Design системы Matlab: $K_p = 0,01$; $K_i = 0,001$; $T_i = 0,1$ с; $K_d = 0,6$; $T_d = 1$ с.

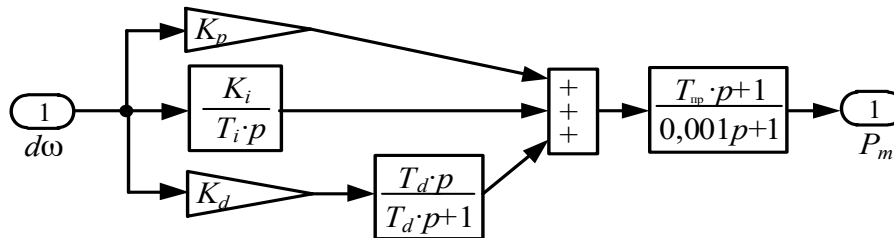


Рис. 4. Схема прогностического АРЧВ

Fig. 4. Scheme of the predictive automatic speed controller (ASC)

В отличие от синхронной машины у АСГ отсутствует связь передаваемой мощности со значениями угла нагрузки δ , при этом имеется необходимость обеспечивать устойчивость по скорости вращения ротора. При ее снижении увеличивается скольжение s и асинхронный момент. Значение s , при котором этот параметр имеет максимальную величину, называется критическим [22] и определяется по выражению

$$s_{кр} = \frac{1}{\omega_S \sigma T}, \quad (1)$$

где ω_S – синхронная скорость; $\sigma = \frac{x'}{x}$ – коэффициент магнитного рассеяния, зависящий от синхронного x и переходного x' реактивных сопротивлений; T – постоянная времени обмоток возбуждения.

При значениях скольжения $s = \frac{\omega - \omega_S}{\omega_S}$, больших критического, АСГ теряет устойчивость. Возможность работы АСГ с отрицательным s , т. е. со скоростью ниже синхронной, существенно увеличивает его динамическую устойчивость [22]. Поэтому ниже рассматривается работа АСГ с установившемся значением $s_0 = -0,05$, т. е. со скоростью вращения ротора $\omega = 0,95$ о. е. Поскольку предельное значение s в аварийном режиме определяет текущая частота вращения ротора ω , то постоянную времени прогнозирующего звена $T_{пр}$ АРЧВ предлагается рассчитывать по величине начального заданного скольжения s_0 :

$$T_{пр} = \frac{1}{|s_0 f_S|}, \quad (2)$$

где f_S – номинальная частота в электрической сети, Гц.

В рассматриваемом примере $T_{пр} = \frac{1}{|-0,05 \cdot 50|} = 0,4$ с.

2. РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ И ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ

В результате моделирования установившегося режима были определены суммарные коэффициенты гармоник напряжения при различных типах АРЧВ АСГ, которые представлены в табл. 1. Из нее видно, что применение АСГ даже с обычными регуляторами в рассматриваемой сети позволяет снизить коэффициенты гармоник K_U на 32,2 %, а использование прогностических АРЧВ дополнительно улучшает качество электроэнергии (КЭ). Величины K_U по фазам уменьшаются на 7,35 %, а коэффициент несимметрии по обратной последовательности K_{2U} снижается на 50 %. Результаты моделирования в виде динамики изменения скорости вращения ротора АСГ и частоты в сети при трехфазном КЗ на ВЛ 3 длительностью в одну секунду представлены на рис. 5 и 6. Результаты сравнения работы типовых и прогностических АРЧВ показывают улучшение процессов регулирования при использовании последних (табл. 2): для АСГ1 время переходного процесса уменьшилось на 28 %, для АСГ2 – на 8 %; для АСГ1 максимальное отклонение скорости вращения ротора снизилось на 20,5 %, для АСГ2 – на 20 %; для АСГ1 степень затухания колебаний улучшилась на 33,3 %, а для АСГ2 наблюдается ухудшение этого показателя на 6,7 %.

Таблица 1

Table 1

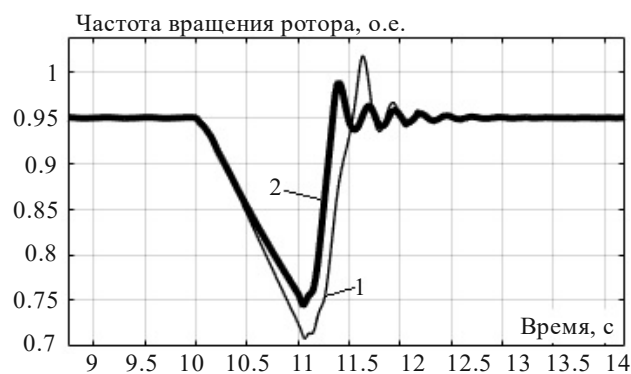
Показатели КЭ в сети 6 кВ при работе АСГ с различными типами АРЧВ

Power quality indicators in a 6 kV network when ASG operates with various ASC types

Используемые типы регуляторов у АСГ	Показатели качества электроэнергии			
	Коэффициенты гармоник напряжения, %			K_{2U} , %
	$K_{UAB(n)}$	$K_{UBC(n)}$	$K_{UCA(n)}$	
1. Без использования АСГ	11,03	11,03	11,03	0
2. АСГ с обычными АРЧВ (ПИД-регулятор)	7,48	7,48	7,48	0,02
3. АСГ с прогностическими АРЧВ	6,93	6,93	6,93	0,01
Разница по пунктам 1 и 2, %	32,2	32,2	32,2	–
Разница по пунктам 2 и 3, %	7,35	7,35	7,35	50



а



б

Рис. 5. Частота вращения ротора:

а – для АСГ 1; б – для АСГ 2; 1 – использовался обычный АРЧВ (ПИД-регулятор); 2 – использовался прогностический АРЧВ

Fig. 5. Rotor speed:

a is for ASG 1; b is for ASG 2; 1 is for a conventional ASC (PID-controller); 2 is for a prognostic ASC

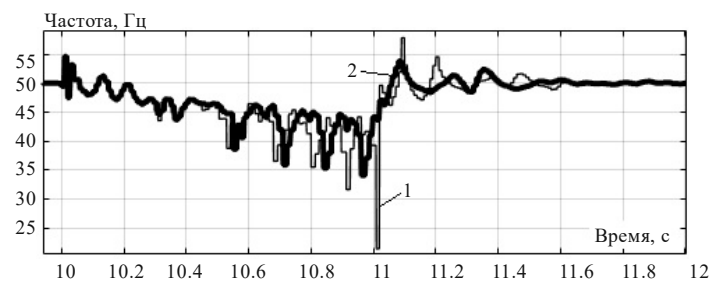


Рис. 6. Изменение частоты напряжения в сети при КЗ на линии и ее отключении через 1 с:

1 – использовался обычный АРЧВ (ПИД-регулятор); 2 – использовался прогностический АРЧВ

Fig. 6. Change in the voltage frequency in the network during a short circuit on the line and its shutdown after 1 s:

1 is for a conventional ASC (PID-controller); 2 is for prognostic ASC

Таблица 2

Table 2

Некоторые показатели качества регулирования частоты вращения ротора АСГ

Some quality indicators of ASG rotor speed control

Показатель качества регулирования	Виды регуляторов		Разница показателей, %
	Обычные АРЧВ (ПИД-регуляторы)	Прогностические АРЧВ с фиксированным временем прогноза	
1. Время переходного процесса частоты вращения ротора АСГ 1, с	2,5	1,8	28,0
2. Максимальное отклонение частоты вращения ротора АСГ 1 от номинального значения, о. е.	0,22	0,175	20,5
3. Степень затухания колебаний частоты вращения ротора АСГ1 μ , о. е.	0,48	0,64	33,3
4. Время переходного процесса частоты вращения ротора АСГ 2, с	2,5	2,3	8,0
5. Максимальное отклонение частоты вращения ротора АСГ 2 от номинального значения, о. е.	0,25	0,2	20,0
6. Степень затухания колебаний частоты вращения ротора АСГ2 μ , о. е.	0,75	0,7	6,7

Примечание: $\mu = 1 - \frac{h_{\max 2}}{h_{\max 1}}$, где $h_{\max 1}$ – амплитуда первого колебания; $h_{\max 2}$ – амплитуда

второго колебания.

Результаты моделирования рассматриваемого аварийного режима для значений времени прогноза $T_{\text{пр}}$, отличающихся от рассчитанных по предлагаемой методике, представлены на рис. 7. Увеличение $T_{\text{пр}}$ в десять раз позволяет снизить максимальное отклонение скорости вращения ротора АСГ на 56 %. Однако после отключения КЗ возникают колебания с частотой 4 Гц, которые с увеличением постоянной времени прогноза АРЧВ усиливаются и достигают при $T_{\text{пр}} = 10$ с больших значений (рис. 7. б).

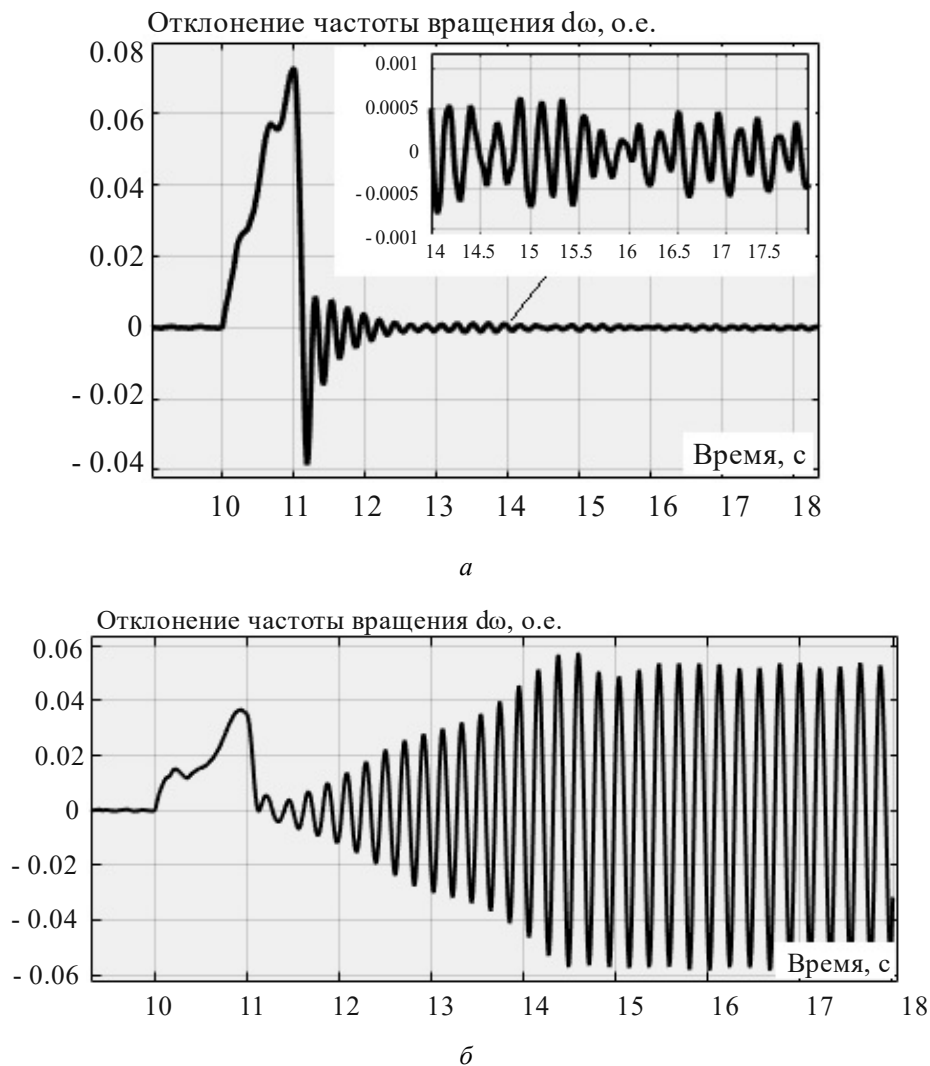


Рис. 7. Отклонение частоты вращения ротора АСГ 1 в режиме КЗ на ВЛ 3:

a – время прогноза $T_{пр} = 4$ с; $б$ – время прогноза $T_{пр} = 10$ с

Fig. 7. Deviation of ASG 1 rotor speed in a short circuit mode on the overhead line 3:

a is the forecast time $T_{пр} = 4$ s; $б$ is the forecast time $T_{пр} = 10$ s

По результатам моделирования можно заключить, что расчет времени прогноза по выражению (2) дает наибольшую эффективность системы регулирования в установившемся режиме. Большие положительные значения $T_{пр}$ (4 и 10 с, рис. 7) позволяют значительно уменьшить отклонение скорости вращения ротора АСГ, что способствует повышению динамической устойчивости. Этот эффект можно использовать в аварийных режимах и увеличивать $T_{пр}$ АРЧВ при близких КЗ, что открывает возможность разработки самонастраивающегося прогностического АРЧВ для АСГ.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По результатам моделирования работы АСГ с регуляторами возбуждения и скорости вращения ротора можно сделать следующие выводы.

1. Использование прогностических АРЧВ у АСГ улучшает качество электроэнергии: K_U снижается на 7,35 %, а коэффициент несимметрии напряжения по обратной последовательности K_{2U} уменьшается на 50 %.

2. Результаты сравнения типовых и прогностических АРЧВ показывают повышение эффективности управления при использовании последних. В рассматриваемом примере длительность переходного процесса для первого АСГ уменьшается на треть, максимальное отклонение частоты – на 20 %, а степень ее затухания увеличивается на 33 %.

3. Увеличение времени прогноза АРЧВ для АСГ позволяет более чем в полтора раза снизить максимальное отклонение скорости вращения ротора при близком КЗ, что способствует повышению динамической устойчивости машины.

4. Дальнейшие исследования необходимо проводить в направлении создания самонастраивающегося прогностического АРЧВ для АСГ, позволяющего изменять $T_{пр}$ для повышения эффективности работы системы регулирования.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Pilavachi P.A.* Mini- and micro-gas turbines for combined heat and power // *Applied Thermal Engineering*. – 2002. – Vol. 22 (18). – P. 2003–2014.
2. *Voropai N.I., Stychinsky Z.A.* Renewable energy sources: theoretical foundations, technologies, technical characteristics, economics. – Magdeburg: Otto-von-Guericke-Universität, 2010. – 223 p.
3. *Sikorski T., Rezmer J.* Distributed generation and its impact on power quality in low-voltage distribution networks // *Power Quality Issues in Distributed Generation* / ed. by J. Luszcz. – InTech, 2015. – DOI: 10.5772/61172.
4. Active distribution network expansion planning integrated with centralized and distributed Energy Storage System / X. Shen, S. Zhu, J. Zheng, Y. Han, Q. Li, J. Nong, M. Shahidehpour // *Power & Energy Society General Meeting (Denver, 26–30 July 2015)*. – Denver: IEEE, 2015. – DOI: 10.1109/PESGM.2015.7286069.
5. Integrating distributed generation into electric power systems: a review of drivers, challenges and opportunities / J. Lopes, N. Hatziaargyriou, J. Mutale, P. Djapic, N. Jenkins // *Electric Power Systems Research*. – 2007. – Vol. 77 (9). – P. 1189–1203.
6. *Лабунец И.А.* Асинхронизированные турбогенераторы. Новые технологии в энергетике. – М.: Изд-во РАО «ЕЭС России», 2002. – С. 139–144.
7. *Шакарян Ю.Г.* Асинхронизированная синхронная машина. – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 192 с.
8. *Голоднов Ю.М., Пиковский А.В.* Генераторы для ветровых, малых гидравлических и приливных электростанций. – М.: ВИНТИ, 1992. – 98 с. – (Итоги науки и техники. Нетрадиционные и возобновляемые источники энергии; т. 3).
9. *Bocquel A., Janning J.* Analysis of a 300 MW variable speed drive for pump-storage plant applications // *2005 European Conference on Power Electronics and Applications*. – Dresden, Germany, 2005. – P. 1–10. – DOI: 10.1109/epe.2005.219434.
10. *Цгоев Р.С.* Несинхронная параллельная работа ОЭС Сибири и Востока // *Электро. Электротехника, электроэнергетика, электротехническая промышленность*. – 2004. – № 1. – С. 4–6.
11. Перспективы применения асинхронизированных турбогенераторов в европейской зоне «ЕЭС России» / Г.А. Дмитриева, С.Н. Макаровский, А.Ю. Поздняков, З.Г. Хвоцинская, И.А. Лабунец, А.П. Лохматов, Ю.Г. Шакарян // *Электрические станции*. – 1997. – № 8. – С. 35–43.

12. Шакарян Ю.Г., Лабунец И.А., Сокур П.В. Целесообразность и перспективы оснащения электростанций асинхронизированными турбо- и гидрогенераторами // Электросила: сборник. – СПб., 2003. – Вып. 42. – С. 35–43.
13. Гараев Ю.Н., Лоханин Е.К., Россковский Е.Л. Отличия синхронных машин продольно-поперечного возбуждения от асинхронизированных синхронных машин // Известия НТЦ Единой энергетической системы. – 2015. – № 2 (73). – С. 88–96.
14. An asynchronous synchronous machine to control a flexible grid operation / I.S. Suprunov, D.V. Dvorkin, A.N. Novikov, N.L. Novikov // E3S Web of Conferences. – 2020. – Vol. 216. – DOI: 10.1051/e3sconf/202021601039.
15. Camacho E.F., Bordons C. Model predictive control. – 2nd ed. – Springer, 2007. – 405 p.
16. Pashchenko F., Pikina G., Rodomanova Yu. Universal searchless method for parametric optimization of predictive algorithms // Proceedings of the 13th IEEE International Conference on Control & Automation (ICCA 2017, Macedonia). – IEEE, 2017. – P. 952–957. – DOI: 0.1109/ICCA.2017.8003189.
17. Булатов Ю.Н., Крюков А.В., Сулов К.В. Прогностическое управление турбогенераторной установкой на основе самонастраивающихся регуляторов // Энергетик. – 2023. – № 7. – С. 9–13.
18. Pedra J. On the determination of induction motor parameters from manufacturer data for electromagnetic transient programs // IEEE Transactions on Power Systems. – 2008. – Vol. 23 (4). – P. 1709–1718.
19. Булатов Ю.Н., Крюков А.В., Шуманский Э.К. Применение асинхронизированных генераторов в электрических сетях с пониженным качеством электроэнергии // Электричество. – 2021. – № 7. – С. 33–40.
20. Булатов Ю.Н., Крюков А.В., Нгуен Ван Х. Координация настроек автоматических регуляторов паротурбинной установки распределенной генерации // Вестник Иркутского государственного технического университета. – 2020. – Т. 24, № 1 (150). – С. 112–122.
21. Intelligent control of the regulators adjustment of the distributed generation installation / A.V. Kryukov, S.K. Kargapol'tsev, Yu.N. Bulatov, O.N. Skrypnik, B.F. Kuznetsov // Far East Journal of Electronics and Communications. – 2017. – Vol. 17, N 5. – P. 1127–1140.
22. Ботвинник М.М. Асинхронизированная синхронная машина: основы теории. – М.; Л.: Госэнергоиздат, 1963. – 70 с.

Булатов Юрий Николаевич, кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой энергетики Братского государственного университета. Основное направление научных исследований – моделирование и управление установками распределенной генерации и режимами электроэнергетических систем. Имеет более 200 публикаций. E-mail: bulatovyura@yandex.ru

Крюков Андрей Васильевич, доктор технических наук, профессор, профессор Иркутского государственного университета путей сообщения, профессор Иркутского национального исследовательского технического университета. Основное направление научных исследований – моделирование и управление режимами электроэнергетических систем и систем электроснабжения железных дорог. Имеет более 980 публикаций. E-mail: and_kryukov@mail.ru

Сулов Константин Витальевич, доктор технических наук, доцент, профессор кафедры гидроэнергетики и возобновляемых источников энергии Национального исследовательского университета «МЭИ», профессор кафедры электроснабжения и электротехники Иркутского национального исследовательского технического университета. Имеет более 500 публикаций. E-mail: dr.souslov@yandex.ru

Шуманский Эдуард Константинович, старший преподаватель кафедры управления в технических системах Братского государственного университета. Основное направление научных исследований – моделирование и управление установками малой генерации электроэнергии. Имеет более 20 публикаций. E-mail: shumanskij@yandex.ru

Bulatov Yuri N., PhD (Eng.), associate professor, Head of the Department of Energy at Bratsk State University. The main area of his scientific research is modeling and management of distributed generation plants and modes of electric power systems. He has more than 200 publications. E-mail: bulatovyura@yandex.ru

Kryukov Andrey V., D.Sc. (Eng.), Professor, professor, Irkutsk State Transport University, professor, Irkutsk National Research Technical University. The main area of his scientific research is modeling and control of modes of electric power systems and railway power supply systems. He has more than 980 publications. E-mail: and_kryukov@mail.ru

Suslov Konstantin V., D.Sc. (Eng.), associate professor, professor at the Department of Hydropower and Renewable Energy Sources of the National Research University "MPEI"; professor at the Department of Power Supply and Electrical Engineering of the Irkutsk National Research Technical University. He has more than 500 publications. E-mail: dr.souslov@yandex.ru

Shumansky Eduard K., senior lecturer, Department of Management in Technical Systems, Bratsk State University. The main direction of his scientific research is modeling and control of small-scale power generation plants. He has more than 20 publications. E-mail: shumanskij@yandex.ru

DOI: 10.17212/2782-2001-2024-2-7-20

The use of predictive regulators to improve the quality of asynchronous hydrogenerator control processes*

Yu.N. BULATOV^{1, a}, *A.V. KRYUKOV*^{2, 3, b}, *K.V. SUSLOV*^{4, c}, *E.K. SHUMANSKY*^{1, d}

¹ Bratsk State University, 40, Makarenko Street, Bratsk, Russian Federation

² Irkutsk State Transport University, 15, Chernyshevsky Street, Irkutsk, Russian Federation

³ Irkutsk National Research Technical University, 83, Lermontov Street, Irkutsk, Russian Federation

⁴ National Research University "MEI", 14, Krasnokazarmennaya Street, Moscow, Russian Federation

^a bulatovyura@yandex.ru ^b and_kryukov@mail.ru ^c dr.souslov@yandex.ru

^d shumanskij@yandex.ru

Abstract

The introduction of distributed generation (DG) plants into electric power systems (EPS) requires solving problems related to the development of control systems in normal, emergency and post-emergency modes in order to increase their reliability and stability. Asynchronous generators (ASG), which have advantages over synchronous machines can be used in DG plants. However, their application requires the development of modern automatic control systems (ACS). The article discusses a distribution electric network with DG plants based on ASG. At the same time, special attention is paid to the development of ACS ASG models.

The aim of the research was to determine the effects of the use of predictive regulators (PR) for ASG management. For this purpose, modeling of the normal, emergency and post-emergency modes of the electric network was performed, which included two ASGs driven by hydraulic turbines. The third and fifth harmonics were generated in the connection node of the power plant. A three-phase short circuit in a 35 kV network with a duration of one second was considered as a disturbance. The results obtained allowed us to draw the following conclusions: the use of PR improves the quality of electricity. The harmonic coefficients of the voltage are reduced by 7.35 %, and the voltage asymmetry coefficients in the reverse sequence are reduced by 50 %. Predictive frequency regulators of ASG with a fixed forecast time calculated according to the proposed methodology improve the control processes. For example, the duration of the transition process for the first ASG is reduced by a third, and the maximum frequency deviation is reduced by 20 %. The degree of its attenuation increases by 33 %.

* Received 06 March 2024.

Keywords: electrical power system, distributed generation plants, asynchronous hydro-generators, predictive regulators, automatic speed controller, harmonic distortion, power quality, modeling

REFERENCES

1. Pilavachi P.A. Mini- and micro-gas turbines for combined heat and power. *Applied Thermal Engineering*, 2002, vol. 22 (18), pp. 2003–2014.
2. Voropai N.I., Stychinsky Z.A. *Renewable energy sources: theoretical foundations, technologies, technical characteristics, economics*. Magdeburg, Otto-von-Guericke-Universität, 2010. 223 p.
3. Sikorski T., Rezmer J. Distributed generation and its impact on power quality in low-voltage distribution networks. *Power Quality Issues in Distributed Generation*. Ed. by J. Luszcz. InTech, 2015. DOI: 10.5772/61172.
4. Shen X., Zhu S., Zheng J., Han Y., Li Q., Nong J., Shahidehpour M. Active distribution network expansion planning integrated with centralized and distributed Energy Storage System. *Power & Energy Society General Meeting* (Denver, 26–30 July 2015). Denver, IEEE, 2015. DOI: 10.1109/PESGM.2015.7286069.
5. Lopes J., Hatziargyriou N., Mutale J., Djapic P., Jenkins N. Integrating distributed generation into electric power systems: a review of drivers, challenges and opportunities. *Electric Power Systems Research*, 2007, vol. 77 (9), pp. 1189–1203.
6. Labunets I.A. *Asinkhronizirovannye turbogeneratory. Novye tekhnologii v energetike* [Asynchronous turbogenerators. New technologies in the energy sector]. Moscow, RAO "UES of Russia" Publ., 2002, pp. 139–144.
7. Shakaryan Yu.G. *Asinkhronizirovannaya sinkhronnaya mashina* [Asynchronous synchronous machine]. Moscow, Energoatomizdat, 1984. 192 p.
8. Golodnov Yu.M., Pikovskii A.B. *Generatory dlya vetrovykh, malyykh gidravlicheskiykh i prilivnykh elektrostantsiy* [Generators for wind, small hydraulic and tidal power plants]. Moscow, VINITI Publ., 1992. 98 p.
9. Bocquel A., Janning J. Analysis of a 300 MW variable speed drive for pump-storage plant applications. *2005 European Conference on Power Electronics and Applications*, Dresden, Germany, 2005, pp. 1–10. DOI: 10.1109/epe.2005.219434.
10. Tsgoev R.S. Nesinkhronnaya parallel'naya rabota OES Sibiri i Vostoka [Non-synchronous parallel operation of the OES of Siberia and the East]. *Elektro. Elektrotehnika, elektroenergetika, elektrotehnicheskaya promyshlennost' = Elektro. Elektrotehnika, elektroenergetika, elektrotehnicheskaya promyshlennost'*, 2004, no. 1, pp. 4–6.
11. Dmitrieva G.A., Makarovskii S.N., Pozdnyakov A.Yu., Khvoshchinskaya Z.G., Labunets I.A., Lokmatov A.P., Shakaryan Yu.G. Perspektivy primeneniya asinkhronizirovannykh turbogeneratorov v evropeiskoi zone "EES Rossii" [Prospects for the use of asynchronous turbogenerators in the European zone "UES of Russia"]. *Elektricheskie stantsii = Power Plants*, 1997, no. 8, pp. 35–43. (In Russian).
12. Shakaryan Yu.G., Labunets I.A., Sokur P.V. Tselesoobraznost' i perspektivy osnashcheniya elektrostantsiy asinkhronizirovannymi turbo- i gidrogeneratorami [Expediency and prospects of equipping power plants with asynchronous turbo and hydro generators]. *Elektrosila: sbornik* [Power]. St. Petersburg, 2003, vol. 42, pp. 35–43.
13. Garaev Yu.N., Lokhanin E.K., Rossovskii E.L. Otlichiya sinkhronnykh mashin prodol'nopoperechnogo vzbuzhdeniya ot asinkhronizirovannykh sinkhronnykh mashin [Differences between synchronous machines of longitudinal-transverse excitation from asynchronous synchronous machines]. *Izvestiya NTC Edinoi energeticheskoi sistemy = STC of Unified Power System Proceedings*, 2015, no. 2 (73), pp. 88–96. (In Russian).
14. Suprunov I.S., Dvorkin D.V., Novikov A.N., Novikov N.L. An asynchronous synchronous machine to control a flexible grid operation. *E3S Web of Conferences*, 2020, vol. 216. DOI: 10.1051/e3sconf/202021601039.
15. Camacho E.F., Bordons C. *Model predictive control*. 2nd ed. Springer, 2007. 405 p.
16. Pashchenko F., Pikina G., Rodomanova Yu. Universal searchless method for parametric optimization of predictive algorithms. *Proceedings of the 13th IEEE International Conference on Control & Automation* (ICCA2017, Macedonia). IEEE, 2017, pp. 952–957. DOI: 0.1109/ICCA.2017.8003189.
17. Bulatov Yu.N., Kryukov A.V., Suslov K.V. Prognosticheskoe upravlenie turbogeneratornoi ustanovkoi na osnove samonastrayvayushchikhsya regulatorov [Predictive control of a turbogenerator

installation based on self-tuning regulators]. *Energetik = Power & Electrical engineering*, 2023, no. 7, pp. 9–13.

18. Pedra J. On the determination of induction motor parameters from manufacturer data for electromagnetic transient programs. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2008, vol. 23 (4), pp. 1709–1718.

19. Bulatov Yu.N., Kryukov A.V., Shumanskii E.K. Primenenie asinkhronizirovannykh generatorov v elektricheskikh setyakh s ponizhennym kachestvom elektroenergii [Application of asynchronous generators in electrical networks with reduced quality of electricity]. *Elektrichestvo = Electricity*, 2021, no. 7, pp. 33–40.

20. Bulatov Yu.N., Kryukov A.V., Nguen Van H. Koordinatsiya nastroek avtomaticheskikh regulyatorov paroturbinoi ustanovki raspredelennoi generatsii [Coordination of DG steam turbine plant automatic controller settings]. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Proceedings of Irkutsk State Technical University*, 2020, vol. 24 (1), pp. 112–122.

21. Kryukov A.V., Kargapol'cev S.K., Bulatov Yu.N., Skrypnik O.N., Kuznetsov B.F. Intelligent control of the regulators adjustment of the distributed generation installation. *Far East Journal of Electronics and Communications*, 2017, vol. 17, no. 5, pp. 1127–1140.

22. Botvinnik M.M. *Asinkhronizirovannaya sinkhronnaya mashina: osnovy teorii* [Asynchronous synchronous machine. Fundamentals of theory]. Moscow, Leningrad, Gosenergoizdat Publ., 1963. 70 p.

Для цитирования:

Использование прогностических регуляторов для улучшения качества процессов управления асинхронизированными гидрогенераторами / Ю.Н. Булатов, А.В. Крюков, К.В. Суслов, Э.К. Шуманский // Системы анализа и обработки данных. – 2024. – № 2 (94). – С. 7–20. – DOI: 10.17212/2782-2001-2024-2-7-20.

For citation:

Bulatov Yu.N., Kryukov A.V., Suslov K.V., Shumansky E.K. Ispol'zovanie prognosticheskikh regulyatorov dlya uluchsheniya kachestva protsessov upravleniya asinkhronizirovannymi gidrogeneratorami [The use of predictive regulators to improve the quality of asynchronous hydrogenerator control processes]. *Sistemy analiza i obrabotki dannykh = Analysis and Data Processing Systems*, 2024, no. 2 (94), pp. 7–20. DOI: 10.17212/2782-2001-2024-2-7-20.