УДК 621.311.238:681.513.6

ИССЛЕДОВАНИЕ ПАРАМЕТРИЧЕСКОЙ АДАПТАЦИИ РЕГУЛЯТОРА ГАЗОТУРБИННОЙ УСТАНОВКИ ЭЛЕКТРОСТАНЦИИ МОЩНОСТЬЮ 6 МВТ

Кавалеров Б.В., Бахирев И.В., Басаргин Ш.Д.

ФГБОУ ВО «Пермский национальный исследовательский политехнический университет», Пермь, e-mail: kbv@pstu.ru

В жизни человека энергия является главным фактором существования. Благодаря электроэнергии развитие и прогресс человечества ускоряются. Но системы производства и распределения электроэнергии не обладают абсолютной надежностью. Вырабатываемая электроэнергия проходит долгий путь от электростанции через передающие подстанции к конечному потребителю, и чем дальше от источника, тем хуже качество и надёжность электроснабжения. В статье рассмотрено улучшение качества электроэнергии, а именно по частоты сети, путем использования Smart Grid. В данной статье используется система с идентификатором, приведены его характеристики, особенности и математическое описание применяемого метода управления. Исследование и сравнительный анализ проводился с помощью математического моделирования в среде Simulink Matlab. Проанализировав результаты математического моделирования видно, что качество сети заметно улучшилось, тем самым доказывая, что идентификационный метод справляется с задачей оптимизации электроэнергии по частоте.

Ключевые слова: интеллектуальная сеть, адаптивное управление, газотурбинная установка, синхронный генератор, математическое моделирование

UNIFIED QUALITY TRANSIENTS FOR AUTOMATED TESTING OF GAS TURBINES POWER

Kavalerov B.V., Bakhirev I.V., Basargin Sh.D.

Federal State Educational Institution of Higher Education «Perm National Research Polytechnic University», Perm, e-mail: kbv@pstu.ru

In human life energy is the main factor of existence. Thanks to the electric power development and progress of mankind accelerate. But production systems and distributions of the electric power have no absolute reliability. The developed electric power goes a long way from power plant through the transferring substations to the final consumer, and the farther from a source, the quality and reliability of power supply are worse. In article improvement of quality of the electric power, namely on frequencies of network, by Smart Grid use is considered. In this article the system with the identifier is used, its characteristics, features and the mathematical description of the applied method of management are provided. The research and the comparative analysis was conducted by means of mathematical modeling in the environment of Simulink Matlab. Having analysed results of mathematical modeling it is visible that quality of network considerably improved, thereby proving that the identification method copes with a task of optimization of the electric power on frequency.

Keywords: intelligent network, the adaptive control, gas-turbine installation, the synchronous generator, math modeling

Электроснабжение определяется двумя факторами [9] – качеством электроэнергии и её надёжностью. Даже самые лучшие системы производства электроэнергии и её распределения не могут быть полностью надёжными источниками высококачественного электропитания. Вырабатываемая электроэнергия проходит долгий путь от электростанции через передающие подстанции к конечному потребителю, и чем дальше от источника, тем больше риск возникновения проблем с качеством и надёжностью электроснабжения.

Важным направлением улучшения качества электроэнергии и ее надежности является концепция «Интеллектуальной сети», или Smart Grid.

В России идея Smart Grid в настоящее время выступает в качестве концепции интеллектуальной активно-адаптивной сети, которую можно описать следующими признаками [7]:

- насыщенность сети активными элементами, позволяющими изменять топологические параметры сети;
- большое количество датчиков, измеряющих текущие режимные параметры для оценки состояния сети в различных режимах работы энергосистемы;
- система сбора и обработки данных (программно-аппаратные комплексы), а также средства управления активными элементами сети и электроустановками потребителей;
- наличие необходимых исполнительных органов и механизмов, позволяющих в режиме реального времени изменять топологические параметры сети, а также взаимодействовать со смежными энергетическими объектами;
- средства автоматической оценки текущей ситуации и построения прогнозов работы сети;
- высокое быстродействие управляющей системы и информационного обмена.

Еще одна потребность в «Smart Grid» связана с так называемыми возобновляемыми источниками энергии [12]. И у нас, и в Европе [11] много говорят, что нужно уходить от углеродной энергетики, связанной со сжиганием органического топлива, и переходить на альтернативную энергетику – солнечную, ветровую, водородную и т.д.

Одним из возможных направлений развития электрических сетей в рамках концепции «умной сети» является использование адаптивного управлений генерирующими модулями электросетей. Такие генерирующие модули смогут в перспективе самоприспосабливаться к изменяющимся режимам работы с целью поддержания заданного качества и надежности электроснабжения.

В статье [2] рассматривалось адаптивное управление газотурбинными установками электростанций с помощью сигнальной настройки. В настоящей статье исследуется адаптивное управление с параметрической настройкой [4].

Системы адаптивного управления

Можно выделить несколько вариантов построения систем адаптивного управления [1].

Адаптивные системы [10] управления с идентификатором (АСИ) – новый класс систем управления, появление которых вызвано необходимостью управлять нестационарными объектами и объектами, передаточные функции которых заранее точно не известны.

Функционирование АСИ осуществляется в двух режимах: обучения и управления. Оба режима выполняются автоматически. Самообучение осуществляется в блоках идентификации. По окончании процесса обучения система автоматически переходит на режим управления, при осуществлении которого процесс оперативной идентификации автоматически продолжается, что обеспечивает отслеживание изменяющихся в процессе функционирования объекта текущих значений параметров.

Одним [3] из факторов, сужающим область применения идентификационного подхода к задачам адаптивного управления, является требование к точности выдаваемых идентификатором оценок параметров. Такие требования обычно формируются в виде выполнения условий состоятельности оценок, сходимости оценок к истинным значениям, ограниченности ошибок оценивания по какой-либо норме.

Идентификационный [5] подход к задаче синтеза регулятора называют также непрямым, в отличие от прямого подхода, когда настраивается не модель объекта, а непосредственно коэффициенты регулятора. В отличие от альтернативных схем системы с идентификатором более универсальны. Идентификатор в качестве датчика параметрических возмущений может применяться для решения ряда важных задач обслуживания систем управления, например для диагностики медленных параметрических отказов.

Математическое описание применяемого метода

Если разработать разностную схему для численного интегрирования, то реализация данного беспоискового алгоритма идентификации с адаптивной моделью (БАИАМ) в программном виде, как легко видеть, требует вычислительной производительности лишь в полтора-два раза большей той, которая необходима для моделирования идентифицируемого объекта в реальном времени. Однако здесь требуется высокая степень непосредственной наблюдаемости объекта (измерение x, u, измерение или вычисление $\dot{x}$).

Настройка параметров регулятора соответствует следующему уравнению [10]:

$$\dot{\boldsymbol{\delta}} = -\,\mathbf{B}^{\mathrm{T}}\,\mathbf{P}\Delta\mathbf{x}\mathbf{v}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{\Gamma};\ \boldsymbol{\Gamma} = \mathrm{diag}\{\gamma_1,\ldots,\gamma_{n+m}\};$$

$$\gamma_i > 0; \qquad (1)$$

где $\mathbf{v}$ – расширенный вектор состояния, $\boldsymbol{\delta}$ – матрица настраиваемых параметров [10].

Исследование и сравнительный анализ

Проведем сравнительный анализ выбранного метода с помощью математического моделирования. Рассмотрим отдельный генерирующий модуль, состоящий из электрической нагрузки, ГТУ, синхронного генератора (СГ).

Адаптивное управление происходит по формуле (14).

Синхронный генератор и электрическая нагрузка моделируются с помощью полных уравнений Парка-Горева с учетом демпферных токов при общепринятых допущениях [6]. ГТУ моделируется с помощью следующих уравнений с учетом нелинейных зависимостей между переменными. В операторной форме уравнения СГ имеют вид

$$\begin{aligned} U_d &= -p\psi_d - \psi_q p\gamma - I_d r;\\ U_d &= \psi_d p\gamma - p\psi_q - I_q r;\\ U_0 &= -p\psi_0 - I_0 r_0,\\ U_f &= p\psi_d + I_f r_f;\\ 0 &= p\psi_d + I_d r;\\ 0 &= p\psi_q + I_q r. \end{aligned} \qquad (2)$$

Моделирование при нагрузке в 3 МВт

В начале модельного эксперимента достигается режим холостого хода, и момент времени 5 с подается нагрузка на СГ в виде

активной мощности (Р) равной 3 МВт, т.е. 50 % от номинального значения, время моделирования равняется 20 секундам.

Регулятор частоты вращения свободной турбины

$$W_{\text{СТ}}(\text{p}) = k_{\text{П}} \frac{k_i + k_f \text{p}}{k_i + \text{p}}, \quad (3)$$

передаточная функция дозатора газа:

$$W_G(\text{p}) = \frac{1 + T_{\text{Д}}\text{p}}{\text{p}} k_{\text{Д}}. \quad (4)$$

В первую очередь рассмотрим алгоритм настройки линейной модели в процессе управления. В [8] он рассмотрен для линейного объекта и линейной модели, имеющих в пространствах состояний следующий вид:

$$\dot{x} = Ax + Bu, y = Cx, \quad (5)$$

$$\dot{x}^{\text{M}} = A^{\text{M}} x^{\text{M}} + B^{\text{M}} u, \quad (6)$$

где вектор x представлен в следующем виде: $x_1 = n_{\text{СТ}}$, $x_2 = n_{\text{ТК}}$, x_3 – выход интегратора регулятора дозатора газа, x_4 – выход интегратора регулятора $n_{\text{СТ}}$.

Алгоритм настройки будет иметь следующий вид:

$$\dot{A}^{\text{M}} = \Delta z (K * x)^{\text{T}}, \dot{B}^{\text{M}} = \Delta z (D * u)^{\text{T}}, \quad (7)$$

$$\Delta z = \Delta \dot{x} - A^{\text{M}} \Delta x = \Delta A x + B u, \quad (8)$$

$$\Delta x = x - x^{\text{M}}, \Delta A = A - A^{\text{M}}, \Delta B = \Delta B + B^{\text{M}}, \quad (9)$$

где K, D – положительно-определенные диагональные матрицы заданных постоянных коэффициентов. Все векторы x, x^{M}, u, $\dot{x}$, $\dot{x}^{\text{M}}$ считаются непосредственно наблюдательными (измеряемыми). Устойчивость процесса идентификации обеспечивается благодаря функции Ляпунова.

После моделирования были получены следующие результаты. На рис. 1 изображена активная мощность, на 2 напряжение, на рис. 3 приведен график расхода топлива необходимого для ГТУ, на 4 частота вращения свободной турбины и на рис. 5 частота вращения турбокомпресссора.

Расчет напряжения производился по формуле

$$U = \frac{\left(\sqrt{(U_d^{\,2} + U_q^{\,2})}\right)}{\sqrt{2}}. \quad (10)$$

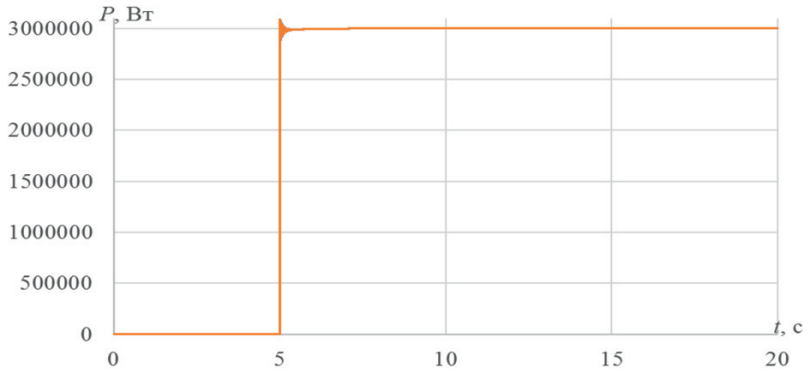

Рис. 1. Активная мощность, подаваемая на СГ

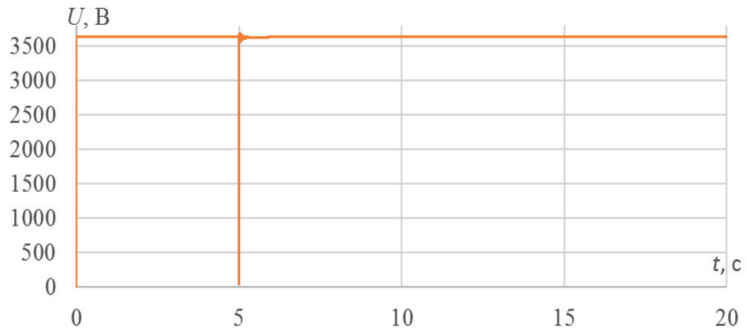

Рис. 2. Напряжение

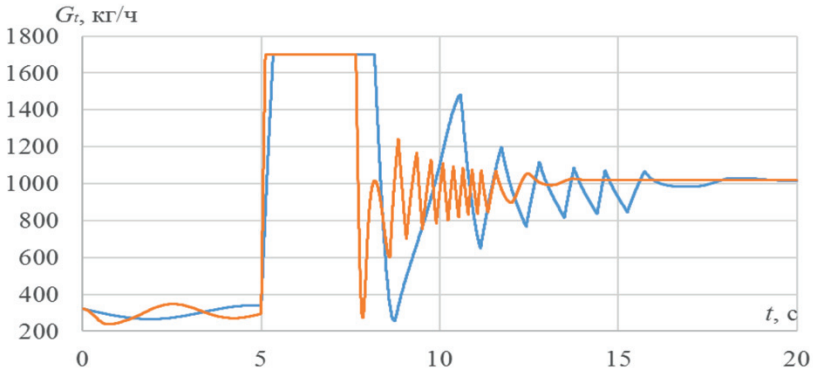

Рис. 3. Расход топлива ГТУ. – без адаптации, – с адаптацией

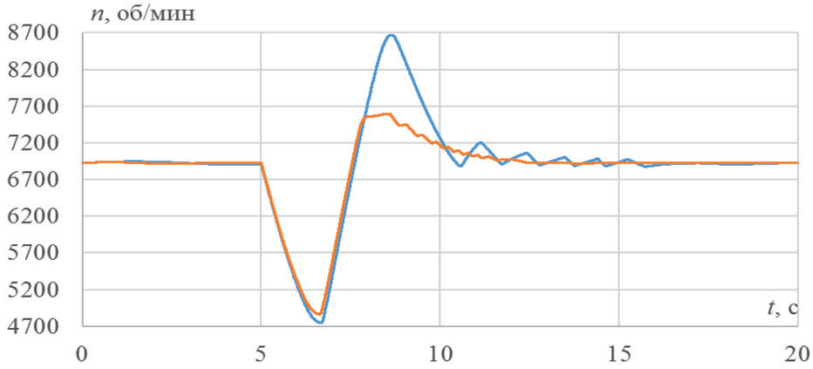

Рис. 4. Частота вращения свободной турбины. – без адаптации, – с адаптацией

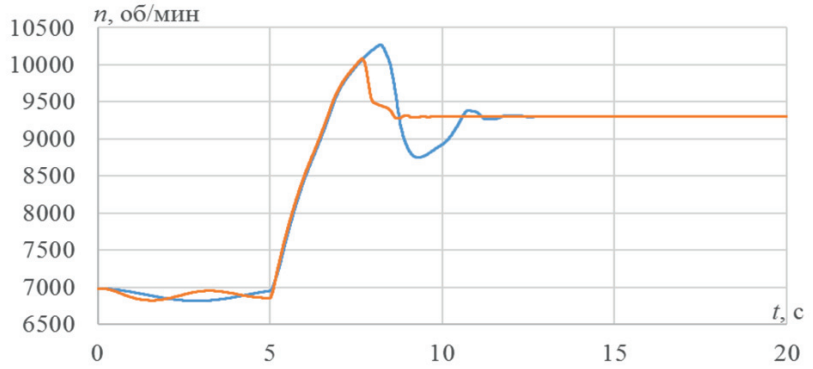

Рис. 5. Частота вращения турбокомпресссора. – без адаптации, – с адаптацией

В ходе моделирования нагрузки в 50% от номинального значения не было выявлено влияние введения адаптивного регулятора на характер напряжения.

Заключение

Проанализировав результаты моделирования, видим что качество генерируемой электроэнергии по частоте стало лучше. Частота вращения свободной турбины непосредственно преобразуется в частоту тока электрогенератора. Показатели регулирования частоты вращения свободной турбины ГТУ улучшились, а именно время переходного процесса на 36%, с первоначальных 11 секунд до 7 секунд. Отклонение по ча-

стоте при первом колебании с адаптацией меньше на 3 %, а при втором колебании уже на 71 %. Также положительным результатом является уменьшение расхода топлива, время переходного процесса улучшилось на 38 % (с 8 до 13 секунд). Конечно, отклонение по частоте при первом колебании с адаптацией не изменилось, но уже при втором колебании уже на 71 %.

Список литературы

1. Адаптивное управление. Википедия, свободная энциклопедия. https://ru.wikipedia.org/wiki/Адаптивное_управление/ (30.04.2016).

2. Бахирев И.А., Басаргин Ш.Д., Кавалеров Б.В. Адаптивное управление газотурбинной установкой с эталлонной моделью и сигнальной настройкой // Системы управления и информационные технологии. – 2015. – Т. 60, № 2. – С. 71–76.

3. Боронников А. М. Способы реализации адаптивной системы управления с идентификатором и эталонной моделью // XII Всероссийское совещание по проблемам управления. – 2014.

4. Борцов Ю.А., Поляхов Н.Д., Путов В.В. Электромеханические системы с адаптивным и модельным управлением. – Л.: Энергоатомиздат. Ленингр. отделение, 1984. – 216 с.

5. Бунич А.Л. Системы управления с идентификатором. Ч. I // Проблемы управления. – 2005.

6. Веников В.А. Переходные электромеханические процессы в электрических системах. – М.: Высш. шк., 1985. – 536 с.

7. Дорофеев В.В., Макаров А.А. Активно- адаптивная сеть – новое качество ЕЭС России // Энергоэксперт. – 2009. – № 4 (15).

8. Красовский А.А. Справочник по теории автоматического управления. изд. Наука – 1987. – 711 с.

9. Критерии качества электроэнергии (2016): http://www.tdm.ru/solutions/Problems/Problems.php/ (29.04.2016).

10. Райбман Н.С., Чадеев В.М. О концепции адаптивных систем управления с идентификатором, Автомат. и телемех. – 1982. – № 3. – С. 54–60.

11. European SmartGrids Technology Platform. Vision and Strategy for Europe's Electricity Networks of the Future. – Luxembourg: Office for Official Publications of the European Communities, 2006.

12. Hongwei Li, Member, Rongxing Lu, Member, Liang Zhou, Member, Bo Yang, Member, Xuemin (Sherman) Shen. An Efficient MerkleTree-Based Authentication Scheme for Smart Grid//Systems Journal, IEEE. – 2014. – № 8. – P. 655–663.

References

1. Adaptivnoe upravlenie. Vikipedija, svobodnaja jenciklopedija. https://ru.wikipedia.org/wiki/Adaptivnoe_upravlenie/ (30.04.2016).

2. Bahirev I.A., Basargin Sh.D., Kavalerov B.V. Adaptivnoe upravlenie gazoturbinnoj ustanovkoj s jetallonnoj modelju i signalnoj nastrojkoj // Sistemy upravlenija i informacionnye tehnologii. 2015. T. 60, no. 2. pp. 71–76.

3. Boronnikov A. M. Sposoby realizacii adaptivnoj sistemy upravlenija s identifikatorom i jetalonnoj modelju // XII Vserossijskoe soveshhanie po problemam upravlenija. 2014.

4. Borcov Ju.A., Poljahov N.D., Putov V.V. Jelektromehanicheskie sistemy s adaptivnym i modelnym upravleniem. L.: Jenergoatomizdat. Leningr. otdelenie, 1984. 216 p.

5. Bunich A.L. Sistemy upravlenija s identifikatorom. Ch. I // Problemy upravlenija. 2005.

6. Venikov V.A. Perehodnye jelektromehanicheskie processy v jelektricheskih sistemah. M.: Vyssh. shk., 1985. 536 p.

7. Dorofeev V.V., Makarov A.A. Aktivno- adaptivnaja set novoe kachestvo EJeS Rossii // Jenergojekspert. 2009. no. 4 (15).

8. Krasovskij A.A. Spravochnik po teorii avtomaticheskogo upravlenija. izd. Nauka 1987. 711 s.

9. Kriterii kachestva jelektrojenergii (2016): http://www.tdm.ru/solutions/Problems/Problems.php/ (29.04.2016).

10. Rajbman N.S., Chadeev V.M. O koncepcii adaptivnyh sistem upravlenija s identifikatorom, Avtomat. i te- lemeh. 1982. no. 3. pp. 54–60.

11. European SmartGrids Technology Platform. Vision and Strategy for Europes Electricity Networks of the Future. Luxembourg: Office for Official Publications of the European Communities, 2006.

12. Hongwei Li, Member, Rongxing Lu, Member, Liang Zhou, Member, Bo Yang, Member, Xuemin (Sherman) Shen. An Efficient MerkleTree-Based Authentication Scheme for Smart Grid//Systems Journal, IEEE. 2014. no. 8. pp. 655–663.