14. *Veselov G.E., Popov A.N., Radionov I.A., Mushenko A.S.* Adaptive Power Saving Control for Traction Asynchronous Electrical Drive: Synergetic Approach, *Proc. of IEEE «EnergyCon 2014», Dubrovnik, Croatia, 13-16 May 2014,* pp. 1446-1453.
15. *Popov Andrey, Radionov Ivan, Mushenko Alexey.* Synergetic synthesis of power saving control for locomotive asynchronous drive systems, *Proceedings of 6th ICUMT-2014, 6-8 October 2014, St. Petersburg, Russia,* pp. 546-550.
16. *Kreerenko Evgeny.* Synthesis of Control Laws Sea Launch Aerospace System on the Basis of Super-heavy Amphibian Aircraft, *Proceedings CHAOS2014 Conference, June 7–10, 2014, Lisbon, Portugal,* 2014, pp. 39-47.
17. *Kobzev V.A., Fortinov L.G., Glombinskiy E.N.* Kompleksnaya sistema dlya zapuska tyazhelykh vozdushno-kosmicheskikh samoletov mnogorazovogo ispol'zovaniya na okolozemnuyu orbitu, supertyazhelyy reaktivnyy samolet-amfibiya dlya nee (varianty) i sposob osushchestvleniya zapuska [A comprehensive system to run heavy aerospace aircraft reusable in earth orbit, heavyweight jet amphibian aircraft for it (versions) and method of implementation of the launch]. Patent RF, No. 2397922, priority from 30.07.2008.
18. *Byushgens G.S., Studnev R.V.* Aerodinamika samoleta: Dinamika prodol'nogo i bokovogo dvizheniya [Aerodynamics of the airplane: longitudinal and lateral Dynamics of the movement]. Moscow: Mashinostroenie, 1979, 352 p.
19. *Krasovskiy N.N.* Teoriya upravleniya dvizheniem [Theory of motion control]. Moscow: Nauka, 1968, 475 p.
20. *Meshcherskiy I.V.* Raboty po mekhanike tel peremennoy massy [Works on mechanics of bodies of variable mass]. 2nd ed. Moscow: GITTL, 1952, 281 p.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор И.М. Першин.

Колесников Анатолий Аркадьевич – Южный федеральный университет; e-mail: anatoly.kolesnikov@gmail.com; 347900, г. Таганрог, ул. Чехова, 2; тел.: 88634360707; кафедра синергетики и процессов управления; д.т.н.; профессор.

Динчари Оксана Сергеевна – e-mail: Sapphire-13@mail.ru; тел.: 89064147472; кафедра синергетики и процессов управления; аспирант.

Креренко Евгений Сергеевич – AVIAOK; e-mail: talla92xlc@gmail.com; 347900, г. Таганрог, ул. Греческая, 74; тел.: 89064526211; инженер-конструктор.

Kolesnikov Anatoliy Arkad'evich – Southern Federal University; e-mail: anatoly.kolesnikov@gmail.com; 2, Checkhov street, Taganrog, 347928, Russia; phone: +78634360707; the department of synergetics and control; dr. of eng. sc.; professor.

Dinchari Oksana Sergeevna – e-mail: Sapphire-13@mail.ru; phone: +79064147472; the department of synergetics and control; postgraduate student.

Kreerenko Evgeny Sergeevich – AVIAOK; e-mail: talla92xlc@gmail.com; 74, Grecheskaya str., 347900, Taganrog, Russia; phone: +79064526211; design engineer.

УДК 681.5: 621.3.078

А.А. Кузьменко, А.С. Синицын, А.А. Синицына

РОБАСТНОЕ УПРАВЛЕНИЕ ЭНЕРГОУСТАНОВКОЙ «АСИНХРОНИЗИРОВАННЫЙ ГЕНЕРАТОР – ВЕТРОТУРБИНА»: ИНТЕГРАЛЬНАЯ АДАПТАЦИЯ*

В последние годы возобновляемые источники энергии становятся все более важными благодаря их огромному вкладу в повышение независимости энергетической отрасли от невозобновляемых ресурсов и защиту окружающей среды. Все большее применение в качестве

* Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта №13-08-01008-а.

генераторов находят асинхронизированные генераторы (АСГ). Используемые методы управления АСГ обладают существенным недостатками – они опираются на линеаризованное математическое описание АСГ и законы управления относятся к классу ПИД-регуляторов. Робастность систем управления АСГ пытаются обеспечить за счет использования традиционных линейных регуляторов и методов теории адаптивного управления, нечетких систем управления и искусственных нейронных сетей. Принципиально новым подходом в современной теории управления является синергетическая теория управления (СТУ), которая базируется на обеспечении устойчивости движения объекта за счет соответствующего синтеза нелинейных законов робастного и адаптивного управления, обеспечивающих как выполнение целей управления – технологических инвариантов, так и подавление наихудших возмущений. Основной целью данной работы является синтез законов робастного управления энергосистемой «АСГ – ветротурбина», построенных в соответствии с принципом интегральной адаптации СТУ. Полученные синергетические законы обеспечивают перевод системы из произвольного начального состояния в допустимой области в конечное состояние, характеризуемое желаемой реактивной мощностью и оптимальной частотой вращения ротора. При этом обеспечивается компенсация внешнего кусочно-постоянного возмущения, действующего на АСГ. Для демонстрации эффективности полученных синергетических законов робастного управления выполнено сравнение с традиционными ПИ-законами. Это сравнение показывает, что при схожих динамических характеристиках переходных процессов, традиционные законы не обеспечивают желаемого значения реактивной мощности и оказываются работоспособны в меньшем диапазоне изменения скорости ветра.

Энергосистема; асинхронизированный генератор; ветротурбина; робастное управление; синергетическая теория управления; интегральная адаптация; инвариант.

A.A. Kuz'menko, A.S. Sinitsyn, A.A. Sinitsyna

ROBUST CONTROL FOR POWER SYSTEM «DFIG – WIND TURBINE»: INTEGRAL ADAPTATION

In recent years renewable energy sources are becoming increasingly important due to their huge contribution to the independence of the energy sector from non-renewable resources and environment protection. In this case perspective generators are doubly-fed induction generators (DFIG). Used DFIG control methods have significant disadvantages: they are based on the linearized DFIG model and control laws belong to the PID-regulator class. Usually traditional linear regulators and methods of adaptive control, fuzzy control and neural networks are used to ensure DFIG robustness. A fundamentally new approach to modern control theory is the synergetic control (SC). One is based on the sustainability of the object movement by the relevant synthesis of nonlinear robust and adaptive control laws. They provide both the control objectives – technological invariants, and the worst disturbances suppression. The main purpose of this work is the robust control laws synthesis for power system consisting of DFIG and wind turbine. These laws built in accordance with the SC integrated adaptation principle. Power system synergetic laws provide both system movement from an arbitrary initial state in a valid field to the final state, characterized by the desired reactive power and optimum rotor speed values, and the worst disturbance compensation. To demonstrate the effectiveness of the obtained robust control laws they are compared with traditional PI-regulators. This comparison shows that with similar the transients dynamic characteristics of traditional laws do not provide the desired value of the reactive power and they are less efficient in the range of wind speed.

Power system; doubly-fed induction generator; wind turbine; robust control; synergetic control; integrated adaptation principle; invariant.

Введение. Несомненно, энергия играет важную роль в обеспечении экономического роста и технического прогресса современного общества. В последние годы возобновляемые источники энергии становятся все более важными благодаря их огромному вкладу как в повышение независимости энергетической отрасли от традиционных невозобновляемых ресурсов, так и в защиту окружающей среды. Среди возобновляемых источников энергии энергия ветра составляет бо́льшую часть. Современные технологии и информационно-управляющие системы приводят к заметному росту числа энергосистем, использующих энергию ветра не только для быто-

вых нужд, но и в промышленных целях. В соответствии с годовым отчетом Wind Global Energy Council в 2014 г. мощность установленных ветротурбин достигла 369,6 ГВт [1]. В настоящее время существуют несколько типов генераторов, используемых в качестве преобразователей энергии ветра [2, 3]: индукционные генераторы с короткозамкнутым ротором и фазным ротором, синхронные генераторы с фазным ротором и с постоянными магнитами, генераторы постоянного тока, переменные реактивные генераторы, генераторы с прямым приводом и др. Наиболее распространенные из них – синхронные генераторы. Однако все более и более популярными в области возобновляемых источников энергии становятся индукционные машины, особенно асинхронизированные [3]. Простые индукционные машины имеют некоторые недостатки, такие как потребление реактивной мощности и нерегулируемый уровень напряжения при переменной скорости вращения ротора. Эти проблемы преодолены путем внедрения асинхронизированных генераторов (АСГ) с соответствующими системами управления [3, 4] (в зарубежной литературе АСГ называют doubly-fed induction generator – DFIG). Реализация такого рода генераторов в области возобновляемых систем преобразования энергии резко возрастает в связи с их многочисленными преимуществами, такими как низкая стоимость и компактность, устранение внешнего источника постоянного тока, способность вырабатывать максимальную мощность при различной скорости ветра, возможность раздельного управления активной и реактивной мощностью, а это, в свою очередь, существенно расширяет возможности такой энергосистемы для повышения устойчивости в целом и устраняет необходимость иметь компенсатор реактивной мощности.

В течение последних 20 лет стоимость электроэнергии, произведенной ветротурбинами, снизилась приблизительно на 90 % [1]. Постоянные усовершенствования открывают новые горизонты для более безопасного и надежного будущего энергии ветра, предлагая лучшее качество для жизни в менее загрязненной окружающей среде. Всемирный потенциал использования ветроэнергетики резко возрос за последние 20 лет. Этот факт подтверждается тем, что установленная мощность имела ежегодный прирост около 30% в течение последнего десятилетия [1]. Тем не менее, такие темпы роста были немного сокращены в 2010 и 2011 гг. во время глобального экономического кризиса, но согласно [1] в 2015 г. эта мощность составит уже 425 ГВт.

Основные методы управления АСГ были предложены еще в 60-х гг. XX в. Ботвинником М.М. и развиты его учениками [5–7]. Однако и в настоящее время используемые методы обладают существенным недостатками – они опираются на линеаризованное математическое описание АСГ и законы управления, как правило, имеют жесткую линейную структуру – относятся к классу ПИД-регуляторов [2, 8]. А это не может обеспечить расширения области устойчивого функционирования АСГ. Их широкое распространение обусловлено их схемной простотой, простейшей программной реализацией закона регулирования, не требующей измерения всех переменных состояния АСГ, сравнительно простой настройкой регулятора под конкретный *линейный* объект. Недостатком этих регуляторов является невысокое качество регулирования, особенно для сложных объектов, имеющих в своем составе нелинейные статические и динамические элементы и звенья запаздывания. Настройка коэффициентов ПИД-регулятора является т.н. «творческим» процессом и во многом определяется практическим опытом наладчика. В настоящее время робастность систем управления АСГ пытаются обеспечить за счет использования традиционных линейных регуляторов и методов теории адаптивного управления [9], нечетких систем управления или искусственных нейронных сетей [10–12]. Однако в нечетких системах возникает известная проблема «проклятия размерности» – число правил пропорционально степени числа входных переменных. Отдельно необходимо отметить набирающий силу подход к обеспечению робастности АСГ, связанный с реализацией скользящего управления [13, 14]. Однако, несмотря на

его достоинства, следует отметить, что опять же синтез законов управления осуществляется по линейной или линеаризованной модели АСГ (например, через линеаризацию обратной связью). Имеется ряд работ посвященных использованию для управления АСГ пассивного управления, например, [15, 16], призванному обеспечивать стабилизацию частоты вращения ветротурбины через балансировку энергии. В целом, указанные подходы к решению современной сложной проблемы управления АСГ оказываются практически малопригодными для нелинейной модели энергосистемы «АСГ – ветротурбина». Таким образом, все вышесказанное обуславливает актуальность данного исследования и необходимость перехода на новые концептуальные основы, используя возможности новых перспективных направлений современной теории управления и идеологию нелинейной динамики и синергетики. Принципиально новым подходом в современной теории управления является синерго-кибернетический подход, который базируется на обеспечении устойчивости движения объекта за счет соответствующего синтеза нелинейных законов робастного и адаптивного управления, обеспечивающих как выполнение целей управления – технологических инвариантов и подавление наихудших возмущений, так и максимальную область асимптотической устойчивости замкнутой системы. Синергетическая теория управления (СТУ) и ее основной метод – метод аналитического конструирования агрегированных регуляторов (АКАР), впервые развиты научной школой ЮФУ [17, 18] и нашли обширное применение в различных областях современной техники – авиации, энергетике, электромеханике и т.д. Основные особенности СТУ применительно к проблеме синтеза нелинейных законов управления сложными техническими объектами состоят: во-первых, в кардинальном изменении целей поведения синтезируемых систем; во-вторых, в непосредственном учете естественных свойств нелинейных объектов; в-третьих, в формировании нового механизма генерации обратных связей, т.е. законов управления [17].

В СТУ иным способом обеспечения робастности нелинейных систем является использование принципа интегральной адаптации, подробно изложенного в [17, 18]. Принцип интегральной адаптации заключается в построении «гарантирующих регуляторов», обеспечивающих компенсацию наихудших возмущений – *«… возмущений, которые за наименьшее время отклоняют объект управления на максимальное возможное расстояние от желаемого состояния в его фазовом пространстве*» [17]. Указанное определение означает, что наихудшие возмущения – это кусочно-постоянные возмущения вида $M_i^{\sup}(t) = M_{i0}\operatorname{sign}\mu(t)$ со случайным изменением величины $M_{i0} = \text{const}$ на соответствующем интервале и знака функции $\mu(t)$. Для компенсации кусочно-постоянных возмущений «гарантирующий регулятор» должен включать в себя интегратор [17], т.е. реализовывать астатический закон управления. Аналогично, для компенсации линейного возмущения «гарантирующий регулятор» должен включать в себя уже два интегратора. Согласно идеологии метода АКАР для парирования внешних и параметрических возмущений необходимо каждое из них представить в виде динамической модели, на выходе которой формируется аппроксимированное возмущение соответствующего класса. При этом в структуру этих моделей, согласно принципу интегральной адаптации, должны входить желаемые инварианты [18, 19]. Так, если рассматриваются кусочно-постоянные возмущения, то такими моделями будут уравнения вида

$$\dot{z}_i(t) = \Phi_i, \tag{1}$$

где z_i – динамическая переменная модели (оценка) возмущения, Φ_i – функция переменных состояния исходного объекта, отражающая желаемый инвариант.

Таким образом, для использования принципа интегральной адаптации для синтеза робастных законов управления необходимо: 1) каждое из возмущений представить его моделью вида (1). Соответствующие модели возмущений добав-

ляются к уравнениям объекта управления, образуя расширенную систему; 2) для расширенной системы осуществляется синтез законов управления в соответствии с базовой процедурой метода АКАР. Отметим, что в отличие от базовой процедуры метода АКАР при синтезе законов управления в соответствии с принципом интегральной адаптации финишные макропеременные всегда должны иметь структуру

$$\psi = \Phi + \sum_{i=1}^{k} \beta_i z_i , \qquad (2)$$

здесь β_i – постоянные коэффициенты; k – количество переменных состояния в модели соответствующего возмущения. В базовой процедуре метода АКАР второе слагаемое в (2) отсутствует.

Итак, основной целью данной работы является синтез законов робастного управления энергосистемой «АСГ – ветротурбина», построенных в соответствии с принципом интегральной адаптации СТУ. Для демонстрации эффективности полученных законов управления будет выполнено сравнение с традиционными законами.

Постановка задачи. Математическая модель АСГ может быть представлена в виде обобщенной модели электрической машины с симметричными двухфазными системами обмоток на статоре и роторе, имеющих постоянные параметры [5, 6]. Дополнив модель АСГ уравнениями динамики ветротурбины [20], получим общую нелинейную модель исследуемой энергосистемы:

$$\begin{aligned}
&\dot{i}_d(t) = A\left(\left(\omega_R x_a^2 - x_a^2 + x_f x_s\right) i_q + x_a u_{fd} - x_a r_f i_{fd} + x_a \omega_R x_f i_{fq} + u_d x_f + r_s i_d x_f\right);\\
&\dot{i}_q(t) = A\left(\left(-\omega_R x_a^2 + x_a^2 - x_f x_s\right) i_d + x_a u_{fq} - x_a r_f i_{fq} - x_a \omega_R x_f i_{fd} + u_q x_f + r_s i_q x_f\right);\\
&\dot{i}_{fd}(t) = A\left(\left(-x_a^2 - \omega_R x_f x_s + x_f x_s\right) i_{fq} - x_s u_{fd} + x_s r_f i_{fd} - x_a u_d - r_s i_d x_a - \omega_R x_a i_q x_s\right);\\
&\dot{i}_{fq}(t) = A\left(\left(x_a^2 + \omega_R x_f x_s - x_f x_s\right) i_{fd} - x_s u_{fq} + x_s r_f i_{fq} - x_a u_q - r_s i_q x_a + \omega_R x_a i_d x_s\right);\\
&\dot{\delta}(t) = \omega_R - 1;\\
&2H_g \dot{\omega}_R(t) = -M_{sh} + M_e - F(t);\\
&2H_T \dot{\omega}_T(t) = -M_{sh} + M_m ,
\end{aligned} \qquad (3)$$

где i_d, i_q, i_{fd}, i_{fq} – токи обмоток статора и ротора в осях dq соответственно; ω_R – частота вращения ротора АСГ; ω_T – частота вращения вала ветротурбины; M_m – механический момент на валу ветротурбины; M_{sh} – механический момент на распределительном валу; M_e – электрический момент на валу АСГ; H_g, H_T – коэффициент инерции ротора АСГ и ветротурбины; u_{fd}, u_{fq} – напряжения возбуждения (управления); r_s, r_f – активные сопротивления обмоток статора и ротора соответственно; x_s – реактивное сопротивление статора; x_f – реактивные сопротивления обмоток ротора; x_a – взаимная индуктивность ротора и статора; u_d, u_q – напряжения, приложенные к соответствующим обмоткам статора; $F(t)$ – внешнее неизмеряемое возмущение, связанное с изменением нагрузки АСГ и имеющее кусочно-постоянный характер и неизвестную максимальную амплитуду; δ – угол между системой координат, связанной с напряжением в точке подключения к сети потребителя и синхронно вращающимся потокосцеплением статора АСГ; $A = \left(x_a^2 - x_f x_s\right)^{-1}$.

Для модели (3) определим выражения для моментов:

$$M_{sh} = K_s\delta + D\left(\omega_T - \omega_R\right);$$
$$M_e = i_q\left(x_s i_d + x_a i_{fd}\right) - i_d\left(x_s i_q + x_a i_{fq}\right);$$
$$M_m = 0{,}5\rho\pi R_b^2 C_p\left(\lambda\right)V_w^3 / S_b\omega_T,$$

где K_s, D – известные постоянные коэффициенты; ρ – плотность воздушного потока; R_b – радиус лопастей ветротурбины; S_b – номинальная мощность ветротурбины, отнесенная к мощности генератора; V_w – скорость ветра; $C_p(\lambda)$ – нелинейная функция коэффициента полезности ветротурбины:

$$C_p\left(\lambda\right) = c_1\left(\frac{c_2}{\lambda_i} - c_3\varphi_b - c_4\right)e^{\frac{-c_5}{\lambda_i}}, \quad (4)$$

где $\lambda_i = \left(\frac{1}{\lambda + c_6\varphi_b} - \frac{c_7}{\varphi_b^3 + 1}\right)^{-1}$; $\lambda = \omega_T R_b / V_w$ – эмпирические функции эффективности лопастей; $c_i, i = 1..7$ – известные постоянные коэффициенты, φ_b – угол установки лопастей.

Принимая, что сопротивление линии электропередач между генератором и точкой подключения к энергосети достаточно мало, уравнения напряжения на обмотках статора можно записать в следующем виде

$$u_d = U\cos\delta; \quad u_q = -U\sin\delta,$$

где $U = const$ – модуль напряжения энергосети.

Согласно [5, 6] реактивная мощность АСГ может быть рассчитана по следующему соотношению:

$$Q_s = i_q u_d - i_d u_q.$$

Из этого соотношения вытекает первый технологический инвариант для энергосистемы (3):

$$Q_s = Q_{ref}, \quad (5)$$

здесь Q_{ref} – желаемая реактивная мощность. Отметим, что для того, чтобы в энергосистеме с АСГ можно было исключить компенсатор реактивной мощности, необходимо выдерживать значение $Q_{ref} = 0$.

В силу особенностей АСГ, устойчивость его работы не зависит от изменения электрического угла δ, следовательно, для обеспечения устойчивости необходимо поддержание постоянной частоты вращения ротора в номинальном режиме, т.е. $\omega_R = const$. Так как АСГ может выдавать потребителям напряжение с синхронной частотой при наличии скольжения ротора, то имеется возможность оптимизации эффективности ветротурбины путем вычисления оптимальной частоты вращения для текущей скорости ветра, которая является измеряемой величиной. В [20] показано, что функции коэффициента полезности ветротурбины (4) от частоты вращения вала имеет один экстремум. Найдя закон управления, обеспечивающий выполнение технологического инварианта

$$\omega_T = \omega_{opt}, \quad (6)$$

появится возможность извлекать максимум энергии для текущей скорости ветра. Так, если коэффициент демпфирования D в системе (3) достаточно высок, можно сказать, что в переходных режимах $\omega_T \approx \omega_R$, а в установившихся скольжение

$s = \omega_T - \omega_R$ асимптотически стремится к нулю. Оптимальная частота вращения турбины является результатом решения уравнения $\partial C_p(t)/\partial\omega_T(t) = 0$:

$$\omega_{opt} = \frac{1}{B}\begin{pmatrix} -c_5c_3\varphi_b^5c_6 - c_6(c_5c_4 + c_2)\varphi_b^4 + c_5c_2\varphi_b^3 - c_5c_3\varphi_b^2c_6 - \\ -c_6((c_4 + c_2c_7)c_5 - c_2)\varphi_b + c_5c_2 \end{pmatrix}, \quad (7)$$

где $B = R_b(\varphi_b^4c_5c_3 + (c_5c_4 + c_2)\varphi_b^3 + \varphi_bc_5c_3 + (c_4 + c_2c_7)c_5 + c_2)$.

В данной работе будем полагать, что угол установки лопастей $\varphi_b = const$, т.е. отсутствует возможное регулирование углом установки лопастей ветротурбины, а скорость ветра полагается кусочно-постоянной функцией.

Постановка задачи управления заключается в следующем: необходимо синтезировать законы управления u_{fd}, u_{fq} энергосистемой (3) в функции переменных состояния, которые должны обеспечивать перевод системы из произвольного начального состояния в допустимой области в конечное состояние, характеризуемое желаемой реактивной мощностью (5) и оптимальной частотой вращения ротора (6), (7), при этом должна обеспечиваться компенсация внешнего кусочно-постоянного возмущения $F(t)$, действующего на АСГ.

Синтез законов управления. В соответствии с принципом интегральной адаптации СТУ в модели объекта управления (3) заменяем возмущение его оценкой (1), так как возмущение кусочно-постоянное. В итоге получаем расширенную систему для синтеза робастных законов управления энергосистемой «АСГ – ветротурбина»:

$$\begin{aligned}
&\dot i_d(t) = A\left(\left(\omega_R x_a^2 - x_a^2 + x_f x_s\right)i_q + x_a u_{fd} - x_a r_f i_{fd} + x_a\omega_R x_f i_{fq} + u_d x_f + r_s i_d x_f\right);\\
&\dot i_q(t) = A\left(\left(-\omega_R x_a^2 + x_a^2 - x_f x_s\right)i_d + x_a u_{fq} - x_a r_f i_{fq} - x_a\omega_R x_f i_{fd} + u_q x_f + r_s i_q x_f\right);\\
&\dot i_{fd}(t) = A\left(\left(-x_a^2 - \omega_R x_f x_s + x_f x_s\right)i_{fq} - x_s u_{fd} + x_s r_f i_{fd} - x_a u_d - r_s i_d x_a - \omega_R x_a i_q x_s\right);\\
&\dot i_{fq}(t) = A\left(\left(x_a^2 + \omega_R x_f x_s - x_f x_s\right)i_{fd} - x_s u_{fq} + x_s r_f i_{fq} - x_a u_q - r_s i_q x_a + \omega_R x_a i_d x_s\right);\\
&\dot\delta(t) = \omega_R - 1;\\
&2H_g\dot\omega_R(t) = -M_{sh} + M_e - z;\\
&2H_T\dot\omega_T(t) = -M_{sh} + M_m;\\
&\dot z(t) = \omega_R - \omega_{opt}.
\end{aligned} \quad (8)$$

Исходя из необходимости реализации инварианта (5), сформируем первую макропеременную:

$$\psi_1 = Q_s - Q_{ref}. \quad (9)$$

Для обеспечения максимальной эффективности ветротурбины и стабильной работы АСГ запишем вторую макропеременную:

$$\psi_2 = \omega_R - \omega_{opt} + \gamma\, z, \quad (10)$$

где $\gamma > 0$ – константа.

Следуя процедуре метода АКАР, вводим основные функциональные уравнения:

$$\begin{cases} T_1\dot\psi_1(t) + \psi_1 = 0; \\ \ddot\psi_2(t) + \xi_1\dot\psi_2(t) + \xi_2\psi_2 = 0, \end{cases} \quad (11)$$

где ξ_1, ξ_2, T_1 – положительные параметры регулятора.

Подставляем в (11) выражения (9) и (10). При этом раскрываем полные производные этих макропеременных с учетом правых частей расширенной системы (8). Полученные два алгебраических уравнения необходимо разрешить относительно неизвестных управлений u_{fd}, u_{fq}.

Моделирование замкнутой системы. Для того чтобы показать эффективность синергетического подхода, сравним полученные результаты с широко распространённым законом управления, базирующимся на четырех ПИ-регуляторах с нелинейными компонентами [21]:

$$\begin{aligned}
u_{fd} &= K_1\left(i_{d_ref} - i_{fd}\right) + x_1 - \left(\omega_R - 1\right)\left(x_a^2 - x_f x_s\right)x_s^{-1} i_{fq} + \\
&\quad + x_a x_s^{-2}\left(u_d x_s + r_s x_s i_d + \omega_R x_s^2 i_q + x_a\left(i_{fd} r_s + \omega_R x_s i_{fq}\right)\right); \\
u_{fq} &= K_3\left(i_{q_ref} - i_{fq}\right) + x_2 + \left(\omega_R - 1\right)\left(x_a^2 - x_f x_s\right)x_s^{-1} i_{fd} - \\
&\quad - x_a x_s^{-2}\left(-u_q x_s + \omega_R x_s^2 i_d + x_a\left(i_{fq} r_s + \omega_R x_s i_{fq}\right) + r_s x_s i_q\right); \\
i_{d_ref} &= K_5\left(Q_{ref} - Q_s\right) + x_3; \\
i_{q_ref} &= -K_7\left(\omega_{opt} - \omega_R\right) - x_4; \\
\dot{x}_1(t) &= K_2\left(i_{d_ref} - i_{fd}\right); \\
\dot{x}_2(t) &= K_4\left(i_{q_ref} - i_{fq}\right); \\
\dot{x}_3(t) &= K_6\left(Q_{ref} - Q_s\right); \\
\dot{x}_4(t) &= K_8\left(\omega_{opt} - \omega_R\right),
\end{aligned} \tag{12}$$

где i_{d_ref} – установка на входе первого ПИ-регулятора; i_{q_ref} – установка на входе второго ПИ-регулятора; $K_i, i = \overline{1,8}$ – коэффициенты настройки регулятора; $x_j, j = \overline{1,4}$ – динамические переменные регулятора.

Для моделирования замкнутой системы (8) с полученными синергетическими законами и традиционными законами (12) зададим выражения функций, отражающих изменение скорости ветра и внешнего возмущения:

$$V_w = \begin{cases} 7, & t < 2; \\ 10, & t \geq 2; \end{cases} \tag{13}$$

$$F(t) = \begin{cases} 0, & t < 3; \\ 1, & t \geq 3. \end{cases} \tag{14}$$

А также параметры АСГ и ветротурбины [21]: $x_s = 3{,}07$; $x_f = 3{,}056$; $r_f = 0{,}005$; $r_s = 0{,}007$; $x_a = 2{,}9$; $H_g = 2{,}15$; $H_T = 4{,}3$; $K_s = 0{,}6$; $D = 1{,}2$; $\rho = 1{,}225\ кг/м^3$; $R_b = 8\ м$; $S_b = 1{,}76\ MBA$; $\varphi_b = 0{,}035\ рад$; $U = 1$; $c_1 = 0{,}22$; $c_2 = 116$; $c_3 = 0{,}4$; $c_4 = 5$; $c_5 = 12{,}6$; $c_6 = 0{,}08$; $c_7 = 0{,}035$; параметры ПИ-регулятора (12) в соответствии с [21]: $K_1 = K_3 = 0{,}14$; $K_2 = K_4 = 2{,}16$; $K_5 = 0{,}74$; $K_6 = 2{,}71$; $K_7 = -9{,}44$; $K_8 = 2{,}45$; $Q_{ref} = 0$; параметры синергетических законов управления: $\xi_1 = 0{,}18$; $\xi_2 = 0{,}0081$; $T_1 = 0{,}099$; $\gamma = 0{,}3$; $Q_{ref} = 0$.

Результаты моделирования при $F(t) = 0$ и изменении скорости ветра согласно (13) представлены на рис. 1, 2, а при изменении $F(t)$ согласно (14) и неизменной скорости ветра $V_w = 7$ м/с – на рис. 3, 4. На этих рисунках результаты моделирования с синергетическими законами показаны сплошной линией, а с законами (12) – пунктирной.

Из рис. 1 видно, что при скачкообразном изменении скорости ветра (13), соответствующим образом согласно (7), изменяется и оптимальное значение частоты вращения ω_{opt}. При возмущении (14), как следует из рис. 3, установившееся значение частоты вращения ротора АСГ не изменяется. Реактивная мощность при законах управления (12), как показано на рис. 2, 4, изменяет величину установившегося значения, которое отлично от желаемого значения $Q_{ref} = 0$, т.е. в этом случае инвариант (5) не выполняется. В то же время реактивная мощность при синергетических законах управления инварианта к возмущениям (13), (14).

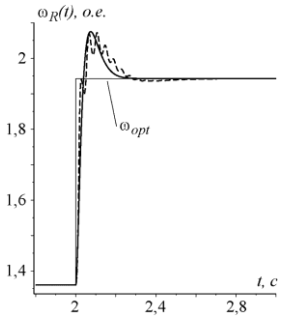


Рис. 1. Графики изменения частоты вращения ротора АСГ

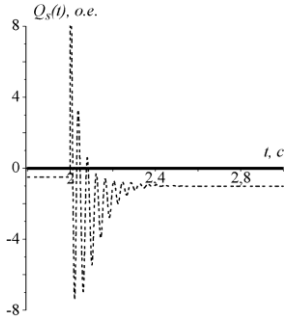


Рис. 2. Графики изменения реактивной мощности

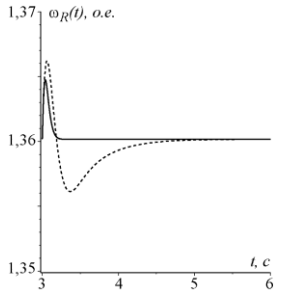


Рис. 3. Графики изменения частоты вращения ротора АСГ

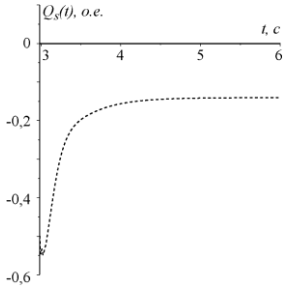


Рис. 4. Графики изменения реактивной мощности

В результате компьютерного моделирования также было установлено, что при увеличении скорости ветра с 7 до 15 м/с законы управления (12) приводят к неустойчивым переходным процессам, что видно из рис. 5.

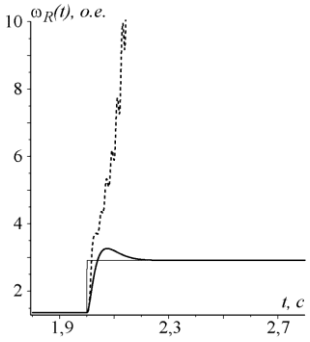


Рис. 5. Графики изменения частоты вращения ротора АСГ

Заключение. Поставленная в статье цель выполнена – показана процедура построения законов робастного управления энергосистемой «АСГ – ветротурбина» в соответствии с принципом интегральной адаптации СТУ. Для демонстрации эффективности полученных синергетических законов робастного управления выполнено сравнение с традиционными законами (12). Результаты моделирования, приведенные на рис. 1–5, наглядно иллюстрируют, что синергетические законы управления обеспечивают выполнение желаемых целей управления – инвариантов (5), (6) – при различных возмущениях. Сравнение показывает, что при схожих динамических характеристиках переходных процессов, законы (12) не обеспечивают выполнение инварианта (5) и оказываются работоспособны в меньшем диапазоне изменения скорости ветра. В структурном плане законы (12) безусловно проще синергетических законов, но в соответствии с принципом необходимо разнообразия У. Эшби сложность системы управления не должна быть меньше сложности объекта управления.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Global Wind Report 2014 – Annual market update. – Режим доступа: URL: http://www.gwec.net/publications/global-wind-report-2/ (дата доступа: 22.07.2015 г.).
2. *Nguyen H.M., Naidu D.S.* Advanced Control Strategies for Wind Energy Systems: An Overview // IEEE PES Power Systems Conference & Exposition, Phoenix, AZ, USA, 20-23 March 2011. – P. 230-238.
3. *Wu B., Lang Y., Zargari N., Kouro S.* Power Conversion and Control of Wind Energy Systems. – New York: Wiley-IEEE Press, 2011. – 480 p.
4. Advances in Wind Power / edited by Rupp Carriveau. – InTech, 2012. – Режим доступа: URL: http://www.intechopen.com/books/advances-in-wind-power/ (дата доступа: 22.07.2015 г.)
5. *Ботвинник М.М., Шакарян Ю.Г.* Управляемая машина переменного тока. – М.: Наука, 1969. – 140 с.
6. *Мамиконянц Л.Г.* Асинхронизированные синхронные генераторы: состояние, проблемы, перспективы // Электричество. – 1994. – Т. 10, № 3. – С. 13-18.
7. *Довганюк И.Я., Шакарян Ю.Г., Лабунец И.А., Плотникова Т.В. и др.* Концепция построения системы управления возбуждением асинхронизированных турбогенераторов // Электротехника. – 2010. – № 2. – С. 30-35.
8. *Li H., Chen Z.* Overview of different wind generator systems and their comparisons // IET Journal on Renewable Power Generation. – 2008. – No. 2. – P. 123-138.
9. *Ioannou P.A., Sun J.* Robust Adaptive Control. – New York: Dover, 2012. – 848 с.
10. *Luna A., Lima, F.K.A., Rodriguez P., Watanabe E.H.* Comparison of power control strategies for DFIG wind turbines // Proceedings of 34th Annual Conference of IEEE Industrial Electronics, 10-13 Nov. 2008, Orlando, FL, USA. – P. 2131-2136.
11. *Tapia A., Tapia G., Ostolaza J.X., Saenz J.R.* Modeling and control of a wind turbine driven doubly fed induction generator // IEEE Transactions on Energy Conversion. – 2003. – Vol. 18. – P. 194-204.
12. *Soares O.* Nonlinear control of the doubly-fed induction generator in wind power systems // Renewable Energy. – 2010. – Vol. 35. – P. 1662-1670.
13. *Jiabing H., Heng N., Bin H., Yikang H., Zhu Z.Q.* Direct active and reactive power regulation of DFIG using sliding-mode control approach // IEEE Transactions on Energy Conversion. – 2010. – Vol. 25, No. 4. – P. 1028-1039.
14. *Utkin V.I., Guldner J., Shi J.* Sliding mode control in electro-mechanical systems. – London: Taylor and Frencis, 1999. – 325 p.
15. *Ferna X., Battaiotto P.E., Mantz R.J.* Wind farm control based on passivity // Proceedings of IEEE International Conference on Industrial Technology, 2010. – P. 1000-1005.
16. *Monroy A., Alvarez-Icaza L.* Passivity based control of a DFIG wind turbine // Proceedings of American control conference, 2006. – P. 6-16.
17. *Колесников А.А.* Синергетические методы управления сложными системами: теория системного синтеза. –2 изд. – М.: Либроком, 2012. – 240 с.

18. *Колесников А.А., Кузьменко А.А., Веселов Г.Е.* Новые технологии проектирования современных систем управления процессами генерирования электроэнергии. – М.: Издательский дом МЭИ, 2011. – 280 с.
19. *Кузьменко А.А., Синицын А.С., Колесниченко Д.А.* Принцип интегральной адаптации в задаче адаптивного управления системой «гидротурбина – синхронный генератор» // Системы управления и информационные технологии. – 2014. – № 2.1 (56). – С. 146-150.
20. Wind Power in Power Systems / edited by Thomas Ackermann. – Chichester: John Wiley & Sons, 2005. – 745 p.
21. *Zamanifara M., Fanib B., Golshana M.E.H., Karshenas H.R.* Dynamic modeling and optimal control of DFIG wind energy systems using DFT and NSGA-II // IEEE Electric Power Systems Research. – 2014. – Vol. 108. – P. 50-58.

REFERENCES

1. Global Wind Report 2014 – Annual market update. Available at: URL: http://www.gwec.net/publications/global-wind-report-2/ (accessed 22 July 2015).
2. *Nguyen H.M., Naidu D.S.* Advanced Control Strategies for Wind Energy Systems: An Overview, *IEEE PES Power Systems Conference & Exposition, Phoenix, AZ, USA, 20-23 March 2011*, pp. 230-238.
3. *Wu B., Lang Y., Zargari N., Kouro S.* Power Conversion and Control of Wind Energy Systems. New York: Wiley-IEEE Press, 2011, 480 p.
4. Advances in Wind Power / edited by Rupp Carriveau. – InTech, 2012. Available at: URL: http://www.intechopen.com/books/advances-in-wind-power/ (accessed 22 July 2015).
5. *Botvinnik M.M., Shakaryan Yu.G.* Upravlyaemaya mashina peremennogo toka [Controlled AC Machine]. Moscow: Nauka, 1969, 140 p.
6. *Mamikonyants L.G.* Asinkhronizirovannye sinkhronnye generatory: sostoyanie, problemy, perspektivy [DFIG: the state, problems and prospects], *Elektrichestvo* [Electricity], 1994, Vol. 10, No. 3, pp. 13-18.
7. *Dovganyuk I.Ya., Shakaryan Yu.G., Labunets I.A., Plotnikova T.V. i dr.* Kontseptsiya postroeniya sistemy upravleniya vozbuzhdeniem asinkhronizirovannykh turbogeneratorov [Control system excitation of asynchronized turbogenerators concept], *Elektrotekhnika* [Electrical engineering], 2010, No. 2, pp. 30-35.
8. *Li H., Chen Z.* Overview of different wind generator systems and their comparisons, *IET Journal on Renewable Power Generation*, 2008, No. 2, pp. 123-138.
9. *Ioannou P.A., Sun J.* Robust Adaptive Control. New York: Dover, 2012, 848 p.
10. *Luna A., Lima, F.K.A., Rodriguez P., Watanabe E.H.* Comparison of power control strategies for DFIG wind turbines, *Proceedings of 34th Annual Conference of IEEE Industrial Electronics, 10-13 Nov. 2008, Orlando, FL, USA*, pp. 2131-2136.
11. *Tapia A., Tapia G., Ostolaza J.X., Saenz J.R.* Modeling and control of a wind turbine driven doubly fed induction generator, *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 2003, Vol. 18, pp. 194-204.
12. *Soares O.* Nonlinear control of the doubly-fed induction generator in wind power systems, *Renewable Energy*, 2010, Vol. 35, pp. 1662-1670.
13. *Jiabing H., Heng N., Bin H., Yikang H., Zhu Z.Q.* Direct active and reactive power regulation of DFIG using sliding-mode control approach, *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 2010, Vol. 25, No. 4, pp. 1028-1039.
14. *Utkin V.I., Guldner J., Shi J.* Sliding mode control in electro-mechanical systems. London: Taylor and Frencis, 1999, 325 p.
15. *Ferna X., Battaiotto P.E., Mantz R.J.* Wind farm control based on passivity, *Proceedings of IEEE International Conference on Industrial Technology*, 2010, pp. 1000-1005.
16. *Monroy A., Alvarez-Icaza L.* Passivity based control of a DFIG wind turbine, *Proceedings of American control conference, 2006*, pp. 6-16.
17. Kolesnikov A.A. Sinergeticheskie metody upravleniya slozhnymi sistemami: teoriya sistemnogo sinteza [Complex systems synergetic control methods: system synthesis theory]. 2nd ed. Moscow: Librokom, 2012, 240 p.
18. *Kolesnikov A.A., Kuz'menko A.A., Veselov G.E.* Novye tekhnologii proektirovaniya sovremennykh sistem upravleniya protsessami generirovaniya elektroenergii [New design technology of modern process control systems for the electricity generating]. Moscow: Izdatel'skiy dom MEI, 2011, 280 p.

19. *Kuz'menko A.A., Sinitsyn A.S., Kolesnichenko D.A.* Printsip integral'noy adaptatsii v zadache adaptivnogo upravleniya sistemoy «gidroturbina – sinkhronnyy generator» [The principle of integral adaptation for the problem of "hydroturbine–synchronous generator" system adaptive control], *Sistemy upravleniya i informatsionnye tekhnologii* [Control Systems and Information Technologies], 2014, No. 2.1 (56), pp. 146-150.
20. Wind Power in Power Systems, Edited by Thomas Ackermann. Chichester: John Wiley & Sons, 2005, 745 p.
21. *Zamanifara M., Fanib B., Golshana M.E.H., Karshenas H.R.* Dynamic modeling and optimal control of DFIG wind energy systems using DFT and NSGA-II, *IEEE Electric Power Systems Research*, 2014, Vol. 108, pp. 50-58.

Статью рекомендовал к опубликованию к.т.н. А.Д. Лукьянов.

Кузьменко Андрей Александрович – Южный федеральный университет; e-mail: aakuzmenko@sfedu.ru; 347922, г. Таганрог, ул. Чехова, 2; тел.: 88634318090; кафедра синергетики и процессов управления; к.т.н.; доцент.

Синицын Александр Сергеевич – e-mail: axeom18@gmail.com; кафедра синергетики и процессов управления; аспирант.

Синицына Алиса Алексеевна – кафедра синергетики и процессов управления; магистрант.

Kuz'menko Andrey Alexandrovich – Southern Federal University; e-mail: aakuzmenko@sfedu.ru; 2, Chehov street, Taganrog, 347922, Russia; phone: +78634318090; the department of synergetic and control processes; cand. of eng. sc.; associate professor.

Sinitsyn Alexander Sergeevitch – e-mail: axeom18@gmail.com; the department of synergetic and control processes; postgraduate student.

Sinitsyna Alisa Alekseevna – the department of synergetic and control processes; undergraduate.

УДК 681.54

Е.К. Грудяева, С.Е. Душин

ЛОГИКО-ДИНАМИЧЕСКОЕ УПРАВЛЕНИЕ БИОХИМИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ ОЧИСТКИ СТОЧНЫХ ВОД

Анализ современных исследований управления процессом очистки сточных вод показывает, что существующие очистные системы используются для узкого диапазона концентраций загрязнений в исходной сточной воде. Целью исследования является синтез системы управления процессами удаления соединений азота и снижений ХПК в сточной воде в широком диапазоне концентраций подаваемого субстрата. Для достижения данной цели решается задача разработки регулятора, способного снижать концентрации загрязнений до допустимых значений в условиях динамической гетерогенности химических процессов и разнообразием поведения системы в зависимости от входных воздействий. В результате представлена нелинейная управляемая математическая модель двухзонного биореактора с рециклом и возвратным потоком из ультрафильтрационного мембранного блока, составленная на основе модели ASM1. Построена схема взаимодействия компонентов биохимических реакций, отражающая тенденции их изменений. Введены показатели качества процессов для системы управления процессом удаления соединений азота и снижения ХПК. На их основе разработана методика параметрической настройки субрегуляторов в составе логико-динамического регулятора с гибкой структурой. Проведена его настройка для широкого диапазона загрязняющих веществ, значения границ которого определены путем анализа более 20 объектов очистки России и других стран. Определены зависимости коэффициентов настройки субрегуляторов от входных субстратов для полного диапазона концентраций нитратов и легко биологически разложимого вещества при низком содержании аммония в исходной воде, а также при высоких и промежуточных значениях концентраций аммония. В соответствии с разработанной математической моделью в среде Matlab/Simulink построена компьютерная модель. Результаты моделирования демонстрируют