УДК 62-523.2

Поляхов Николай Дмитриевич
ФГБОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет»
Россия, Санкт- Петербург[1]
Профессор
Доктор технических наук
ndpol@mail.ru

Ха Ань Туан
ФГБОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет»
Россия, Санкт- Петербург
Аспирант
Инженер технических наук
Haantu80@gmail.com

Адаптивное управление синхронным генератором в режиме возникновения бифуркации

Аннотация. В синхронных генераторах возможна хаотичность в виде бифуркационных состояний, из-за которой происходит явление изменение качественной динамики синхронных генераторов при малом изменении параметров. Стандартные регуляторы (линейные, оптимальные и им подобные) не дают положительного эффекта в борьбе с хаотическими процессами. В статье решается задача управления синхронным генератором в режиме возникновения бифуркации на основе алгоритма адаптивного управления. Для решения подобных задач в общем виде методом функций Ляпунова синтезирован алгоритм безынерционной адаптации по схеме с настраиваемой моделью. Системы регулирования возбуждения синхронного генератора с безынерционной адаптацией показывают способность ограничения размера странного аттрактора в режиме возникновения бифуркации и даже его полного подавления. Исследование в среде Simulink Toolbox переходных процессов синхронного генератора показало существенное улучшение динамических характеристик синхронного генератора. Результаты исследования расширяют знания о применении адаптивного управления, такими техническими объектами с неопределенностью как синхронные генераторы, работающими на энергосистему. Предложенный алгоритм безынерционной адаптации отличается простотой построения и легко интегрируется в систему возбуждения. Эффективен в управлении мощными и автономными электрогенераторами, электромеханическими системами, а также другими техническими объектами с нелинейной динамикой.

Ключевые слова: неопределенность описания технического объекта; динамические процессы; бифуркационные состояния; безынерционное адаптивное управление; метод функций Ляпунова; схема адаптивной системы с настраиваемой моделью; система возбуждения синхронного генератора, работающего на энергосистему; точка бифуркации; управление синхронным генератором; адаптивное управление; ограничение хаотичности.

---

[1] 197183, Санкт-Петербург, Дибуновская ул, д.59, кв.20

1. Введение

Последние несколько десятилетий отмечены возрастающим интересом к системам, испытывающим хаотическое поведение. Такие системы встречаются, как оказалось очень широко, т.к. подобное поведение проявляется при изменении параметров систем обыкновенных дифференциальных уравнений с нелинейной частью весьма простого вида. Такими уравнениями описываются процессы, например, в нелинейной оптике, задачах биологии и экологии, радиотехнике и электронике и т.д.

Хаотические процессы встречаются и в объектах электроэнергетики, которые также описываются при помощи систем обыкновенных дифференциальных уравнений. Одной из немногих работ по этой проблематике является статья К.С. Демирчяна и др. [1], посвященная рассмотрению стохастических режимов в элементах и системах электроэнергетики, предложены методы расчета параметров возникновения таких режимов. Одним из сильных признаков стохастичности для диссипативных систем считается наличие «странных аттракторов». Под странным аттрактором понимается область стохастических колебаний, достаточно грубая в том смысле, что малые изменения параметров системы не уничтожают ее, но влияют на ее вид.

Для исследования и оценки качества нелинейных динамических систем, сначала обычно определяют их равновесные точки, потому что качество динамики системы зависит от количества равновесных точек [2, 3]. На самом деле, количество и положение равновесных точек изменяются и зависит от изменений одного и более параметров системы. Иначе говоря, изменение параметра, который называется управляющим, вызывает потерю устойчивости одного состояния системы и переход к другому, качественно отличному от прежнего состоянию. Это явление называется бифуркацией, а значение параметра, при котором это происходит называется точкой бифуркации (бифуркационное значение). Теория бифуркаций находит приложения в разных науках, начиная от физики и химии, заканчивая биологией и социологией. С помощью теории бифуркаций можно предсказать характер движения, возникающего при переходе системы в качественно иное состояние, а также область существования системы и оценить ее устойчивость.

В момент времени, когда система находится вблизи точки бифуркации, огромную роль начинают играть малые возмущения значений ее параметров. Эти возмущения могут носить как чисто случайный характер, так и быть целенаправленными. Именно от них зависит, по какой эволюционной ветви пойдет система, пройдя через точку бифуркации. То есть, если до прохождения точки бифуркации, поведение системы подчиняется детерминистским закономерностям, то в самой точке бифуркации решающую роль играет случай [4, 5]. Точка бифуркации имеет следующие свойства:

- Непрогнозируемость. Обычно точка бифуркации предваряет несколько ветвей аттрактора (устойчивых состояний системы), в одно из которых перейдет система. Однако заранее невозможно предсказать, какой новый аттрактор займёт система. Это связано с природой времени – невозможно так синхронизировать внутренние состояния элементов системы, чтобы достоверно определить, в каких состояниях они будут в момент, когда система достигнет точки бифуркации.

- Точка бифуркации носит как правило кратковременный локальный характер относительно разделяемых ею более длительных устойчивых состояний системы.

Можно сказать, что возникновение бифуркации или точки бифуркации происходит из-за хаотичности нелинейных объектов. Поэтому, если в таких системах отсутствуют регуляторы, которые бы эффективно ограничивали хаотичность, то устойчивость их в работе не гарантирована. Таким образом, задача управления техническими объектами в режиме возникновения бифуркации является важной и актуальной, при этом эффективность системы определяется способностью управления размером хаотичности (странных аттракторов) [6].

В статье представлено исследование режима возникновения бифуркациии (хаотичность) в системе регулирования возбуждения синхронного генератора и подавления странного аттрактора алгоритмом безынерционной адаптации на базе системы с настраиваемой моделью [7].

2. Адаптивная система с настраиваемой моделью

Синхронный генератор задается в виде

$$\dot{x}(t) = Ax(t) + B\hat{u}(t), \tag{1}$$

где $x(t) - n$-мерный вектор состояния; $\hat{u}(t) - m$-мерный вектор управления, $m \le n$; у матрицы $B = \{b_{ij}\}_{n\times m}$ все элементы которой точно известны, а элементы матрицы $A = \{a_{ij}\}_{n\times n}$ имеет параметрическую (интервальную) неопределенность в области Θ: $\Theta = \left\{\theta \in R^l : \left|a_{ij} - a^*_{ij}\right| \le \theta_{ij}, i = \overline{1,n}\right\}$, a^*_{ij} – номинальные значения, $t \in [\mathrm{t}_0, \infty]$.

Уравнение настраиваемой модели имеет вид

$$\dot{\hat{x}}(t) = A_0\hat{x}(t) + B_0(\hat{u} - u), \tag{2}$$

где $\hat{x}(t) - n$-мерный вектор состояния настраиваемой модели; $u(t) - m$-мерный вектор сигналов адаптации модели, со стационарной частью настраиваемой модели $\dot{\hat{x}}(t) = A_0\hat{x}(t) + B_0\hat{u}(t)$, соответствующей желаемой динамике.

Введем ошибку управления $e_i(t) = x_i(t) - \hat{x}_i(t)$, $t \in [t_0, \infty]$, $i = \overline{1,n}$, t_0 – начальный момент процесса управления.

Из уравнений (1), (2) после несложных преобразований получаем уравнение переменных состояний в виде:

$$\dot{e}(t) = Ae(t) + Bu(t) + \delta,\ e(t_0) = e_0 \tag{3}$$

где $\delta(t) = \left[(A - A_0)\hat{x}(t) + (B - B_0)g(t)\right]$, $g(t)$ – входной сигнал.

Из уравнения (3) получаем уравнение адаптивного регулятора

$$Bu(t) = \dot{e}(t) - Ae(t) - \delta(t). \tag{4}$$

Уравнение (1) представим в виде

$$\dot{x}(t) = A_0x(t) + B_0g(t) + \tilde{\delta}(t) + Bu(t), \tag{5}$$

где $\tilde{\delta}(t) = \left[(A - A_0)x(t) + (B - B_0)g(t)\right]$.

Подставляя выражение (4) на (5) с учетом $x \to \hat{x}$, получаем

$$\dot{x}(t) = A_0x(t) + B_0g(t) + \tilde{\delta}(t) + \dot{e}(t) - Ae(t) - \delta(t)\ .$$

Учитывая, что $e(t)\to 0$ как решение уравнения и, следовательно, $\delta(t) \to \tilde{\delta}(t)$, уравнение (1) сведется к виду

$$\dot{x}(t) = A_0 x(t) + B_0 g(t),$$

что соответствует результату адаптивного управления.

3. Синтез алгоритма адаптации

Рассмотрим уравнение

$$\dot{e}(t) = Ae(t) + Bu(t) \tag{6}$$

Сигнал адаптации $u(t)$ определяется таким образом, чтобы обеспечить асимптотическую устойчивость решения уравнения (6).

Пусть структура регулятора задается в форме линейной обратной связи

$$u(t) = Ke(t), \tag{7}$$

где $K = \left\{k_{ji}\right\}_{m\times n}$ – матрица настраиваемых параметров.

Уравнение ошибки (6) тогда примет вид

$$\dot{e}(t) = \Gamma(t)e(t), \tag{8}$$

где $\Gamma(t) = (A+BK)$.

Необходимо определить закон настройки элементов матрицы настраиваемых параметров $K(t)$, чтобы обеспечить асимптотическую устойчивость системы (1) с учетом интервальной неопределенности, указанной в (1).

Пусть функция Ляпунова [8] выбрана как

$$J(t) = \frac{1}{2}e^T(t)e(t)$$

Ее полная производная по времени имеет вид $\dot{J}(t) = dJ/dt = e^T(t)\dot{e}(t)$.

Для обеспечения асимптотической устойчивости системы (6) достаточно, чтобы $\dot{J}(t) = \Psi(t) < 0$.

На основании выражения (8) имеем

$$\Psi(t) = e^T(t)\dot{e}(t) = e^T(t)\Gamma(t)e(t) = \sum_{i=1}^{n} e_{ii}^2\gamma_{ii} + \sum_{\substack{i,j=1\\ i\neq j}}^{n} \gamma_{ij}e_i e_j.$$

Обозначим: $\Psi_1(t) = \sum_{i=1}^{n}\gamma_{ii}e_{ii}^2$ и $\Psi_2(t) = \sum_{\substack{i,j=1\\ i\neq j}}^{n}\gamma_{ij}e_i e_j$.

При выполнении условий $\Psi_1(t)<0$ и $\Psi_2(t)<0$, $i=\overline{1,n}$, а значит и $\Psi(t)<0$, асимптотическая устойчивость системы (6) обеспечивается.

Действительно, примем [9] диагональные элементы матрицы $\Gamma(t)=\left\{\gamma_{ij}\right\}_{n\times n}$ постоянными и отрицательными, т. е. $\gamma_{ii}<0$, тогда $\Psi_1(t)<0, i=\overline{1,n}$.

Теперь, найдем условия для выполнения неравенства $\Psi_2(t)<0.$

Допустим [9], что $\gamma_{ij}(t)=\alpha_{ij}^{-1}e_i(t)e_j(t), i, j=\overline{1,n}, i\neq j$.

Тогда

$$\Psi_2(t)=\sum_{\substack{i,j=1\\ i\neq j}}^{n}\gamma_{ij}e_ie_j(t)=\sum_{\substack{i,j=1\\ i\neq j}}^{n}\alpha_{ij}\gamma_{ij}^2(t) \tag{9}$$

Из выражения (9) следует, что если $\alpha_{ij}<0, i, j=\overline{1,n}, i\neq j$, то $\Psi_2(t)<0$.

Таким образом, если $\gamma_{ii}<0$ и $\alpha_{ij}<0, i, j=\overline{1,n}, i\neq j$, то асимптотическая устойчивость системы (6) обеспечена.

Из выражения $\Gamma(t)=A+BK(t)$ получаем матрицу настраиваемых параметров $K(t)$, которая имеет вид

$$K(t)=B^{-1}(\Gamma-A),$$

при $n=m$ матрица (неособенная) B имеет обратную матрицу B^{-1}, а при $n\neq m$ имеет вид

$$K(t)=B^{+}(\Gamma-A),$$

где $B^{+}=(B^TB)^{-1}B^T$ – псевдоинверся к B; матриц $\Gamma(t)=\left\{\gamma_{ij}\right\}_{n\times n}$ имеет элемент $\gamma_{ij}(t)=\alpha_{ij}^{-1}e_i(t)e_j(t),\ \alpha_{ij}<0 i, j=\overline{1,n}, i\neq j\ и\ \gamma_{ii}-$ постоянные, $\gamma_{ii}<0, i=\overline{1,n}$.

Так как матрица A имеет параметрическую неопределенность (1), для вычисления матрицы $K(t)$ используются “номинальные” значения θ_i^* .

<u>Вывод.</u> *Система* $\dot{x}(t)=Ax(t)+B\hat{u}(t)$ *обладает асимптотической устойчивостью с законом безынерционной параметрической адаптации* $u(t)=Ke(t)$, $K(t)=B^{-1}(\Gamma-A)$ *или* $K(t)=B^{+}(\Gamma-A)$.

4. Исследование режима бифуркации в синхронном генераторе

Для исследования бифуркационных режимов в качестве модели синхронного генератора (СГ) выбрана система дифференциальных уравнений 4-го порядка [10]

$$\dot{\delta} = \omega, \tag{10}$$

$$\dot{\omega} = -\frac{D\omega}{\tau} + \frac{2M_M}{\tau} + \frac{\beta}{\tau\left(X_l + X_d^{'}\right)} sin\delta - \frac{2}{\tau\left(X_l + X_d^{'}\right)} E_q^{'} \, sin\frac{\delta}{2}, \tag{11}$$

$$\dot{E}_q^{'} = -\frac{1}{\tau_d{}'}\left(1 + \frac{X_d - X_d^{'}}{X_l + X_d^{'}}\right)E_q^{'} + \frac{1}{\tau_d^{'}} E_{fd}^{'} + \frac{1}{\tau_d^{'}}\left(\frac{X_d - X_d^{'}}{X_l + X_d^{'}}\right)\cos\frac{\delta}{2}, \tag{12}$$

$$\dot{E}_{fd} = -\frac{1}{\tau_{fd}}\left(-1 + \frac{k_a k_f}{\tau_e + k_a k_f}\right)E_{fd} + \frac{k_a}{\tau_e + k_a k_f}U_0 - \frac{k_a}{\tau_e + k_a k_f}U, \tag{13}$$

$$U = \left[\left(\alpha cos\delta + \left(1-\alpha\right)E_q^{'}\right)^2 + \left(\alpha + \left(1-\alpha\right)\beta\right)^2 sin^2\delta\right]^{1/2}.$$

где $\alpha = \frac{X_d^{'}}{X_l + X_d^{'}}$, $\beta = \frac{X_d - X_d^{'}}{X_l + X_d^{'}}$, U - сигнал обратной связи по напряжению СГ; U_0 - программа (уставка по напряжению).

Такая система обыкновенных дифференциальных уравнений описывает модель СГ с системой регулирования возбуждения. Она сохраняет бифуркационные свойства присущие полной модели, имеющей 7-й порядок [10]. Два уравнения (10) и (11) выражают движение ротора синхронного генератора, работающего на шину бесконечной мощности, уравнения (12) и (13) описывают работу обмотки возбуждения и регулятора.

Для рассмотрения эффективности алгоритма безынерционной адаптации при управлении током системы возбуждения СГ в режиме бифуркации (бифуркационная точка) выбраны реальные значения параметров СГ, приведенные в таблице.

Таблица

Реальные значения параметров синхронного генератора

Параметры	τ	$\tau_d^{'}$	τ_{fd}	τ_e	D	M_M
Значение	6,5	4,0	10	0,5	0,5	0,85
Параметры	k_a	$X_d^{'}$	X_L	X_d	$X_в^{'}$	X_q
Значение	50	0,26	0,46	1,7	0,26	1,7

Структурная схема синхронного генератора с адаптивным алгоритмом представлена на рис. 1.

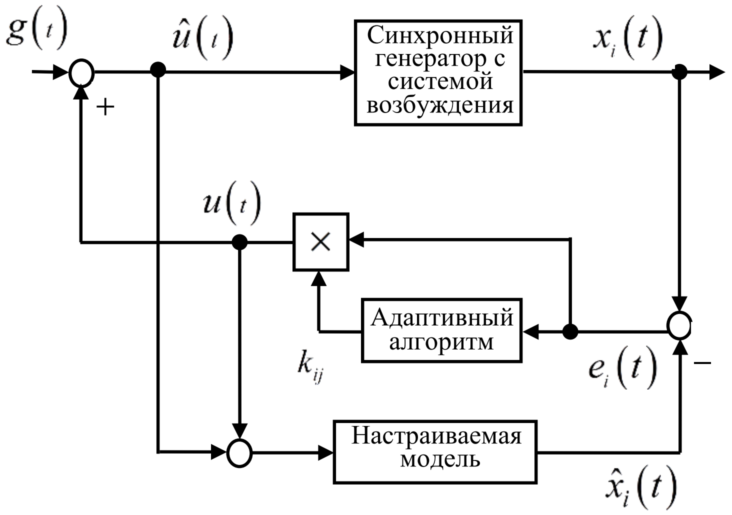

Рис. 1. *Структурная схема синхронного генератора с адаптивным алгоритмом*

Коэффициент k_f является варьируемым параметром. Изменяя с его помощью контурный коэффициент усиления системы, можно найти точки бифуркации. При значении $k_f \cong 0{,}053$ наблюдаются бифуркация рождения цикла.

После того как, появился предельный цикл, через несколько секунд подключается адаптивный регулятор к системе возбуждения СГ. На рис. 2.а показаны три этапа переходных процессов СГ: исходные переходные характеристики, процесс бифуркации рождения цикла ($k_f \cong 0{,}053$) и воздействие адаптивного регулятора после некоторого времени бифуркации рождения цикла; на рисунке 2.б показаны фазовые траектории в координатах "угол нагрузки (δ) – частота (ω)".

Результаты моделирования на рисунках 2.а, б показывают, что когда адаптивный регулятор не подключен, то СГ работает не устойчиво, при $k_f \cong 0{,}053$ появляется точка бифуркации (точка Б) и качественная динамика СГ изменяется. После возникновения бифуркации через некоторое время подключается адаптивный регулятор и СГ переходит в устойчивый режим с апериодической динамикой (точка равновесия У).

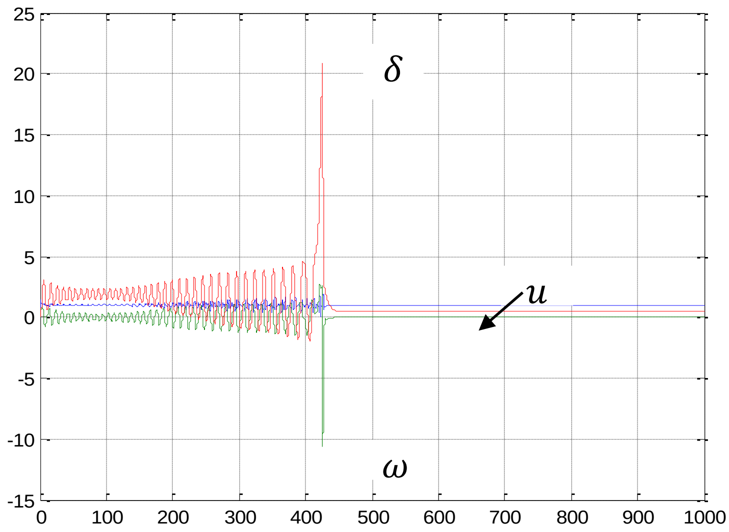

Рис. 2.а. *Этапы переходных процессов синхронного генератора*

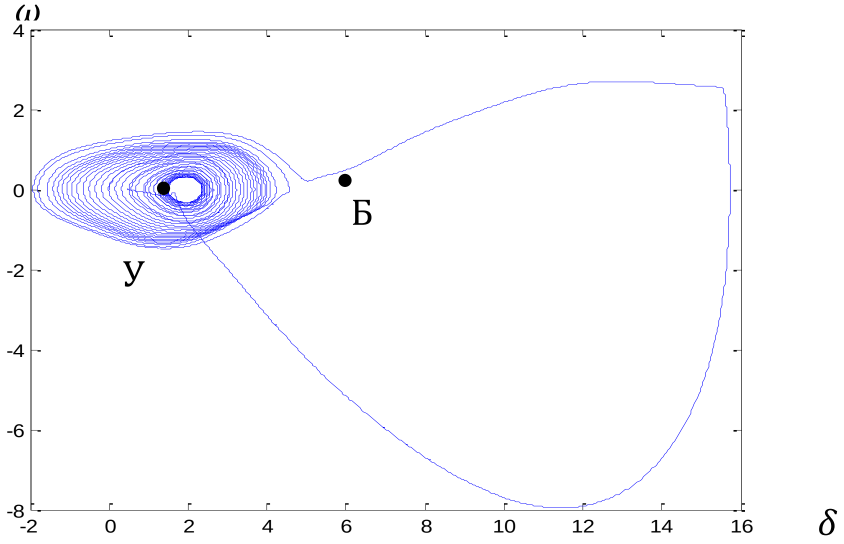

Рис. 2.б. *Фазовые траектории в координатах «угол нагрузки (δ) – частота (ω)»*

5. Заключение

Стандартные регуляторы (линейные, оптимальные и им подобные) не дают положительного эффекта в борьбе с хаотическими процессами. Однако известны исследования, демонстрирующие успех в применении нечетких и адаптивных законов управления. Градиентные алгоритмы почти не пригодны в виду их ограниченности по быстродействию, но безынерционные алгоритмы эффективны в виду отсутствия их собственной динамики.

Представленные исследования системы регулирования возбуждения синхронного генератора с безынерционной адаптацией показывают способность ограничения размера странного аттрактора в режиме возникновения бифуркации и даже его полного подавления.

Предложенный алгоритм безынерционной адаптации отличается простотой построения и легко интегрируется в систему возбуждения. Эффективен в управлении мощными и автономными электрогенераторами, электромеханическими системами, а также другими техническими объектами с нелинейной динамикой.

ЛИТЕРАТУРА

1. Демирчян К. С., Бутырин П. А., Савицки А. Стохастические режимы в элементах и системах электроэнергетики // Изв. АН СССР. Энергетика и транспорт. 1987. № 3. С. 3-16.
2. Бланк М. Л. Устойчивость и локализация в хаотической динамике.— М.: МЦНМО, 2001.
3. Магницкий Н. А. О стабилизации неподвижных точек хаотических динамических систем // Докл. РАН.— 1997,— Т. 352,—№ 5,— С.610-612.
4. Андронов А. А., Леонтович Е. А., Гордон И. И., Майер А. Г. Теория бифуркаций динамических систем на плоскости.— М: Наука, 1967.
5. Афраймович В. С. Внутренние бифуркации и кризисы аттракторов // В сб. Нелинейные волны / Под ред. А. В. Гапонова-Грехова и М. И. Рабиновича,—М.: Наука, 1987,— С. 189-213.
6. Фрадков А. Л. Синтез адаптивной системы стабилизации линейного динамического объекта // Автоматика и телемеханика. 1974. N 12. С. 96-104.
7. Борцов Ю. А., Поляхов Н. Д., Путов В. В. Электромеханические системы с адаптивным и модальным управлением. Л: Энергоатомиздат, 1984.- 216 с.
8. Кунцевич В. М., Лычак М. М. Синтез систем автоматического управления с помощью функций Ляпунова. Наука, М., 1977.- 400 с.
9. Кожекова Г. А. Расчет адаптивной системы управления для синхронного генератора. Известия КГТУ им. И.Раззакова .2010.-№ 21-С. 158-162.
10. Salam F. Chaos in the one generator system with excitation feedback // Proc. 22th IEEE Conf. on Decision and Control, San Antonio, Tex. 1983. V. 1. P. 360-364.

Рецензент: Путов Виктор Владимирович, декан факультета электротехники и автоматики, доктор.т.н, профессор кафедру систем автоматического управления Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета «ЛЭТИ».

Nikolay Polyakhov
St. Petersburg State Electrotechnical University
Russia, Saint Petersburg
ndpol@mail.ru

Ha Anh Tuan
St. Petersburg State Electrotechnical University, St. Petersburg
Russia, Saint Petersburg
Haantu80@gmail.com

The adaptive control of synchronous generator in the regime of the bifurcation appearance

Abstract. It is possible the chaos in the form of bifurcational states in the synchronous generators, because of which occurs the phenomenon a change in the qualitative dynamics of synchronous generators with a small change in the parameters. Standard regulators (linear, optimal and to them similar) do not give positive effect in the fight with the chaotic processes. In the article is solved the problem of control of synchronous generator in the regime of the appearance of bifurcation on the basis of the algorithm of adaptive control. For the solution of similar problems in general form by the method of the Lyapunov functions is synthesized the algorithm of inertia-free adaptation according to diagram with the tuned model. The control systems of the excitation of synchronous generator with the inertia-free adaptation show the ability of the limitation of the size of strange attractor in the regime of the appearance of bifurcation and even its complete suppression. The study based on Matlab/simulink of the transient processes of synchronous generator showed an essential improvement in the dynamic characteristics of synchronous generator. The results of a study enlarge knowledge about the application of adaptive control, by such technical objects with the uncertainty as synchronous generators, that work on the power system. The algorithm of inertia-free adaptation proposed is characterized by simplicity of construction and easily it is integrated into excitation system. It is effective in control of powerful and autonomous electric generators, electromechanical systems, and also by other technical objects with nonlinear dynamics.

Keywords: uncertainty of the description of technical object; dynamic processes; bifurcational states; inertia-free adaptive control; the method of the Lyapunov functions; the adaptive system scheme with the adjustable model; the system of the excitation of the synchronous generator, which works on the power system; the point of bifurcation; control of synchronous generator; adaptive control; the limitation of chaos.

REFERENCES

1. Demirchyan K. S., Butyrin P. A., Savitski A. Stochastic regimes in the elements and the systems electro-energeticists // Proc. AS USSR. Power engineering and transport. 1987. № 3. P. 3-16.
2. Blank M. L. Stability and localization in the chaotic dynamics. - M.: MTSNMO, 2001.
3. Magnitskiy N. A. On the stabilization of the fixed points of chaotic dynamic systems // reports. WOUNDS. - 1997, T. 352, № 5, P.610-612.
4. Andronov A. A., Leontovich E. A., Gordon I. I., Mayer A. G. Theory of the bifurcations of dynamic systems on the plane. - M: Science, 1967
5. Afraymovich V. S. Internal bifurcations and the crises of attractors // in the collection Nonlinear waves/edited by. A. V. Gaponov -Grekhova and M. I. Rabinovich, M.: Science, 1987, P. 189-213.
6. Fradkov a. L. Synthesis of the adaptive system of the stabilization of linear dynamic object // automation and telemechanics. 1974. N 12. P. 96-104.
7. Bortsov Yu. A., Polyakhov N. D., Putov V. V. Electromechanical systems with adaptive and modal control. L: Energy-Atomizdat, 1984. - 216 P.
8. Kuntsevich V. M., Lychak M. M. Synthesis of the systems of automatic control with the aid of the Lyapunov functions. Science, M., 1977. - 400 P.
9. Kozhekova G. A. Calculation of the adaptive control system for the synchronous generator. Proc. KGTU by I.Razzakova. 2010. - № 21- P. 158-162.
10. Salam F. Chaos in the one generator system with excitation feedback // Proc. 22th IEEE Conf. on Decision and Control, San Antonio, Tex. 1983. V. 1. P. 360-364