

УДК 62-533.7

Поляхов Николай Дмитриевич

ФГАОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет»
Россия, Санкт-Петербург¹

Заместитель заведующего кафедрой по научной работе систем автоматического управления
Доктор технических наук, профессор
E-Mail: ndpol@mail.ru

Ха Ань Туан

ФГАОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет»
Россия, Санкт-Петербург

Аспирант кафедры систем автоматического управления
Инженер технических наук
E-Mail: haantu80@gmail.com

Нгуен Тиен Тханг

ФГАОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет»
Россия, Санкт-Петербург

Аспирант кафедры систем автоматического управления
Инженер технических наук
E-Mail: thanghvtqs416@yahoo.com

Улучшение динамических характеристик синхронного генератора на основе адаптивного управления

Аннотация: Динамические характеристики синхронного генератора определяются параметрами, влияющими на переходный процесс при изменении режима работы. В статье решается задача улучшения динамических характеристик синхронного генератора на основе адаптивного управления. Для решения подобных задач в общем виде, методом функций Ляпунова синтезирован алгоритм адаптивного управления техническими объектами с ограниченной неопределенностью по схеме с настраиваемой моделью. Целесообразными с точки зрения реализации приняты алгоритмы сигнального типа, то есть не изменяющие параметры и структуры регуляторов системы возбуждения. Кроме того, такие алгоритмы остаются грубыми (нечувствительными) к влияниям внешних возмущений, которые трудно измерить или учесть в модели синхронного генератора. Способность улучшения динамических характеристик адаптивного алгоритма подтверждается результатами моделирования в среде Simulink Toolbox переходных процессов синхронного генератора в трех основных режимах работы (перевозбуждение, недовозбуждение и номинальный режим) на основе сравнения динамических характеристик до и после подключения адаптивного регулятора. Исследование 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.

Ключевые слова: Неопределенность описания технического объекта; динамические процессы; адаптивное управление; метод функций Ляпунова; схема адаптивной системы с настраиваемой моделью; система возбуждения синхронного генератора, работающего на энергосистему; режимы недовозбуждения, перевозбуждения и номинальный.

Идентификационный номер статьи в журнале 59TVN114

¹ 197376, Россия, Санкт-Петербург, улица Профессора Попова, дом 5

Nikolay Polyakhov

St. Petersburg State Electrotechnical University
Russia, St. Petersburg
E-Mail: ndpol@mail.ru

Anh Tuan Ha

St. Petersburg State Electrotechnical University
Russia, St. Petersburg
E-Mail: haantu80@gmail.com

Tien Thang Nguyen

St. Petersburg State Electrotechnical University
Russia, St. Petersburg
E-Mail: thanghvktqs416@yahoo.com

Improvement of dynamic characteristics of the synchronous generator on the basis of adaptive control

Abstract: The dynamic characteristics of synchronous generator are determined by the parameters, which influence transient process with a change in the operating mode. In the article is solved the problem of an improvement in the dynamic characteristics of synchronous generator on the basis of adaptive control. For the solution of similar problems in general form the algorithm of the adaptive control of technical objects with the limited uncertainty is synthesized by the method of the Lyapunov functions according to scheme with the tuned model. Signal type algorithms, i.e., the not changing parameters and structures of the excitation system controllers are accepted expedient from the point of view of realization. Furthermore, such algorithms remain robust to the influences of the external disturbances, which to difficultly measure or to consider in the model of synchronous generator. The ability of an improvement in the dynamic characteristics of adaptive algorithm is confirmed by the results of the simulation by Simulink /Toolbox of the transient processes of synchronous generator in three basic modes of operation (over-excitation, under-excitation and nominal mode) on the basis of the comparison of the dynamic characteristics before and after of the connection of adaptive controller. A study showed an essential improvement in the dynamic characteristics of synchronous generator. The results of a study broaden knowledge about the application of the adaptive control of such technical objects with the uncertainty as synchronous generators, that work on the power system.

Keywords: Uncertainty of the description of technical object; dynamic processes; adaptive control; the method of the Lyapunov functions; the adaptive system scheme with the tuned model; the system of the excitation of the synchronous generator, which works on the power system; the modes of underexcitation, overexcitation and nominal one.

Identification number of article 59TVN114

Реальные процессы в динамических системах обладают разнообразными по физической природе источниками неопределенности. Характер (параметры) этих неопределенностей почти всегда точно неизвестны. Последнее обстоятельство приводит к необходимости адаптивного подхода в построении законов управления указанными объектами. Именно адаптивное управление позволяет эффективно управлять и повышать качество функционирования объектами с неопределенностью. К настоящему времени имеется определенный задел в разработке адаптивных систем различного назначения [1–3]. Однако адаптивные разработки не приспособлены к реальным объектам, где практически отсутствует возможность в изменении структуры регулятора и остается только вариант введения дополнительных сигналов управления. Разработке адаптивных стратегий, как правило, сопутствует проблема получения полного вектора состояния управляемого объекта. В адаптивной постановке указанная проблема и построение законов управления целесообразно решать совместно, что и принято в работе.

Построение адаптивного управления техническими системами, как правило, основано на двух главных подходах: адаптивное управление по схеме с эталонной моделью (АСЭМ) и по схеме с *настраиваемой моделью* (АСНМ). Для технического объекта, который обладает ограниченной неопределенностью, чаще используют адаптивную систему типа АСНМ [1], представленной на рис 1.

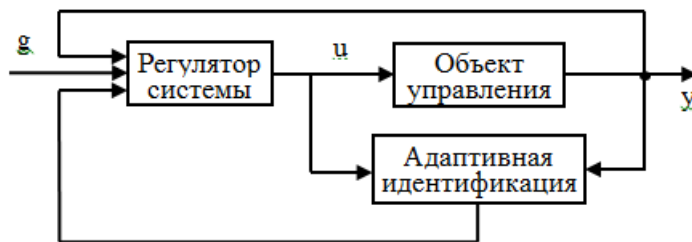


Рис. 1. Адаптивную система типа АСНМ

Пусть управляемый объект задается в виде

$$\dot{x} = Ax + Bu = A_0x + B_0u + (A - A_0)x + (B - B_0)u, y = Cx, \quad (1)$$

где $x = x(t)$ – n -мерный вектор состояния; $u = u(t)$ – m -мерный вектор управления, $m \leq n$; y – p -мерный вектор измерений $p \leq n$; A, B – матрицы с ограниченными элементами и в общем случае, зависящие от x, u, t ; C – постоянная матрица измерений; A_0, B_0 является результатом линеаризации матрицы A, B в режимной точке. Все размерности согласованы.

Обозначим $\sigma = (A - A_0)x + (B - B_0)u$, тогда выражение (1) будет иметь вид

$$\dot{x} = A_0x + B_0u + \sigma. \quad (2)$$

При управлении объектом (1) принят идентификационный подход в синтезе закона адаптивного управления [1, 4].

Уравнение модели идентификатора состояния имеет вид

$$\dot{\tilde{x}} = A_0\tilde{x} + B_0u + GC(x - \tilde{x}) + z, \quad (3)$$

где матрица G – выбирается из условия гурвицевости матрицы $A_H = (A_0 - GC)$, поскольку A_0 может содержать собственные значения с положительной вещественной частью.

Введем ошибку $e(t), e = \tilde{x} - x$, тогда из выражений (2) и (3) получим дифференциальное уравнение вида:

$$\dot{e} = A_H e + (z - \sigma) \quad (4)$$

Выберем квадратичную функцию Ляпунова в виде $V_p = e^T P e$, где P – постоянная матрица $P = P^T > 0$, являющаяся решением матричного уравнения Ляпунова [4]:

$$A_H^T P + P A_H = -Q, Q = Q^T > 0.$$

Тогда

$$\dot{V}(e) = -V_Q + 2e^T P (z - \sigma), V_Q = e^T Q e \quad (5)$$

Выберем закон управления $z = z(t)$ из условия максимальной скорости убывания функции Ляпунова в виде $z = -h \operatorname{sgn} B_0^T P e$.

В правой части уравнения (5) для асимптотической устойчивости должно быть выполнено $2e^T P (z - \sigma) \leq 0$, что обеспечивает при $t \rightarrow \infty$ выполнение $z(t) = \sigma(t)$. Однако функция $z(t)$ имеет разрывную форму и для использования в построении адаптивного закона следует применить малоинерционный фильтр с описанием

$$\tau \dot{\hat{\sigma}} + \hat{\sigma} = z, \quad (6)$$

где $\hat{\sigma}$ – непрерывная функция, являющаяся оценкой для $\sigma(t)$, τ – достаточная малая величина.

Пусть $\tilde{e} = (\sigma - \hat{\sigma})$. Из выражения (6) получаем:

$$\dot{\tilde{e}} = \left(\dot{\sigma} - \frac{1}{\tau} \tilde{e} \right). \quad (7)$$

Примем $u = g + \mu$, где $\mu(t)$ – адаптивный закон управления, $g = g(t)$ – внешнее воздействие. Тогда уравнение системы (1) примет вид

$$\dot{x} = A_0 x + B_0 g + B_0 \mu + \sigma$$

При выполнении условия согласованности $B_0^+ B_0 \mu = \mu$ [1], имеем $\mu = -B_0^+ \hat{\sigma}$. Оценим влияние введенного фильтра на устойчивость адаптивной системы. Введем функцию Ляпунова $V_p(\tilde{e}) = \tilde{e}^T \tilde{e}$. Полная производная по времени функции $V_p(\tilde{e})$ в силу (7) равна

$$\dot{V}_p(\tilde{e}) = -\frac{2}{\tau} \tilde{e}^T \tilde{e} + 2\tilde{e}^T \dot{\tilde{e}}.$$

Используем подстановку $V_p(\tilde{e}) = \rho^2$, где $\|\rho\| = \|\tilde{e}\|$ и $\rho^2 = \tilde{e}^T \tilde{e} > 0$.

Тогда можно записать $\dot{V} = 2\rho\dot{\rho} = -\frac{2}{\tau}\rho^2 + 2\rho\dot{\sigma}$ и

$$\dot{\rho} = -\frac{1}{\tau}\rho + \dot{\sigma}. \quad (8)$$

Решение уравнения (8) имеет вид $\rho(t) = e^{-(t-t_0)/\tau} \rho(t_0) + e^{-t/\tau} \int_{t_0}^t e^{\delta/\tau} \dot{\sigma} d\delta$.

Переходя к оценке $\operatorname{Sup} \|\dot{\sigma}\| \leq M$, $M = \operatorname{const}$, получаем, при $t \rightarrow \infty$, $\rho(t) = \|\tilde{e}\| \leq \tau M$

Полученная оценка ρ , по влиянию малоинерционного фильтра, указывает на диссипативную устойчивость [4], причем размер предельного множества регламентируется выбором значения малого параметра τ .

Оценка эффективности адаптивного алгоритма проводилась с помощью пакета Matlab/Simulink [7] на основе сравнительного моделирования динамических процессов синхронного генератора (СГ).

Синхронный генератор может работать автономно или в энергосистеме, и параметры его изменяются в зависимости от изменения нагрузки, режимов работы и других воздействий. Изменение параметров СГ, особенно по напряжению и частоте, может вызвать работу

энергосистемы вблизи границы колебательной устойчивости. Поэтому в структуре системы возбуждения СГ всегда присутствует автоматический регулятор возбуждения (АРВ) для обеспечения стабильной динамики по переменным напряжения и частоты СГ [5, 6]. Однако «наилучшая/номинальная» настройка регуляторов АРВ производителями выставляется только в единственном варианте – для номинального режима работы СГ, – то есть, режима выдачи активной мощности. В случае режимов выдачи (перевозбуждение) и потребления (недовозбуждение) реактивной мощности при этих настройках качественная динамика, как правило, не сохраняется.

С целью улучшения переходных процессов СГ синтезирован адаптивный регулятор, подключаемый параллельно АРВ, как показано на рис. 2. Здесь y – вектор переменных напряжения U и отклонения частоты Δf .

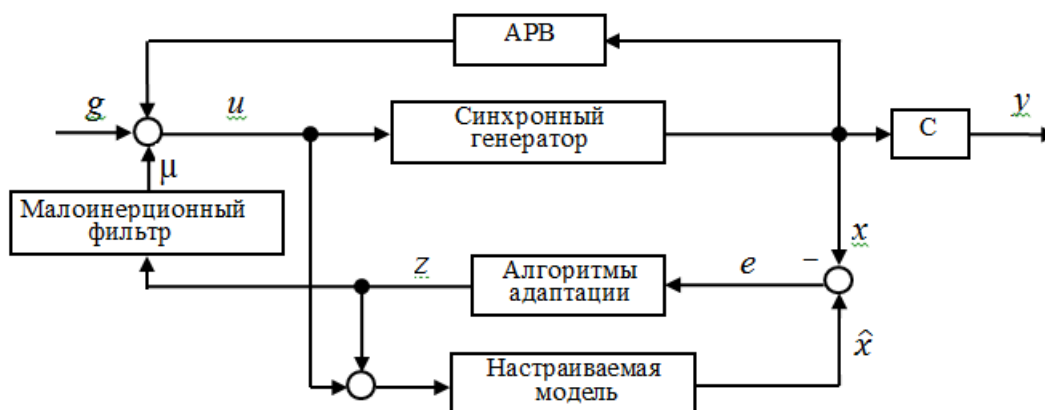


Рис.2. Адаптивный регулятор, подключаемый параллельно АРВ

Уравнения адаптивной системы СГ для моделирования имеют следующий вид:

1) уравнения синхронного генератора:

$$\begin{aligned} \dot{x}_1 &= x_2, \\ \dot{x}_2 &= -\alpha_1 x_2 - \alpha_3 x_1 - \alpha_4 x_3, \\ \dot{x}_3 &= -\alpha_2 x_3 + \alpha_5 x_2 + \beta_5 (i_f + \mu_z), \\ U &= -\beta_1 x_1 + \beta_2 x_3, \\ \Delta f &= \beta_3 x_2 - \beta_4 \alpha_2 x_3 + \beta_4 \alpha_5 x_2 + \beta_4 \beta_5 i_f, \end{aligned}$$

где x_1, x_2, x_3 – переменные отклонения угла нагрузки, производной отклонения угла нагрузки, ЭДС, напряжения U , частоты Δf и i_f – ток возбуждения синхронного генератора, μ_z – сигнал адаптивного управления. Значения коэффициентов $\alpha_i, \beta_j, i, j = 1, 2, 3$, для номинального режима, недовозбуждения и перевозбуждения приведены в табл.1.

Таблица 1

Значения коэффициентов $\alpha_i, \beta_j, i, j = 1, 2, 3$, для номинального режима, недовозбуждения и перевозбуждения

Параметры	α_1	α_2	α_3	α_4	α_5	β_1	β_2	β_3	β_4	β_5
Номинальный	0,249	0,513	13,98	21,23	1.9	0,308	0,142	0,275	0,159	0,513
Недовозбуждение	0,45	0,513	-10,36	11,5	2,546	0,302	0,01	0,014	0,213	0,513
Перевозбуждение	0,064	0,513	12	10,74	0,961	0,308	0,197	0,756	0,08	0,513

2) уравнения настраиваемой модели (модель адаптивной идентификации невязки σ , уравнение 2) точно совпадают с уравнениями СГ со значениями коэффициентов для номинального режима; вместо $\mu_z(t)$ подставляется $z(t)$,

3) алгоритмы адаптивной идентификации и адаптивного управления (переменные $\tilde{U}, \tilde{f}, \dot{\hat{x}}_2$ соответствуют переменным настраиваемой модели):

$$z = -h \operatorname{sgn} B_0^T P e = -\operatorname{sgn}(-2e_1 + 0,15e_2 + 0,0237e_3),$$

$$\text{где } e_1 = (\tilde{U} - U), e_2 = (\tilde{f} - f), e_3 = (\dot{\hat{x}}_2 - \dot{x}_2); B_0^T = [0 \ 0 \ 0,513];$$

$$\mu_z = -B_0^+ \hat{\sigma} = 0,04 \hat{\sigma}, \hat{\sigma} = W_\phi z = \left(\frac{1}{0,002s+1} \right) z.$$

В штатной системе возбуждения (АРВ), входящей в комплект управления синхронного генератора, реализуется закон управления со стандартными настройками, соответствующий номинальному режиму. В других режимах, как это видно на рис.3, работа системы возбуждения по динамике не эффективна. Детального описания АРВ здесь приводить не целесообразно, поскольку, как видно из структуры на рис 2, в идентификации и адаптивных процессах АРВ не участвует. Переходные характеристики СГ без сигнала и с сигналом адаптивного управления в трех режимах работы представлены на рисунках 3, 4, соответствующие динамические характеристики сведены в табл. 2.

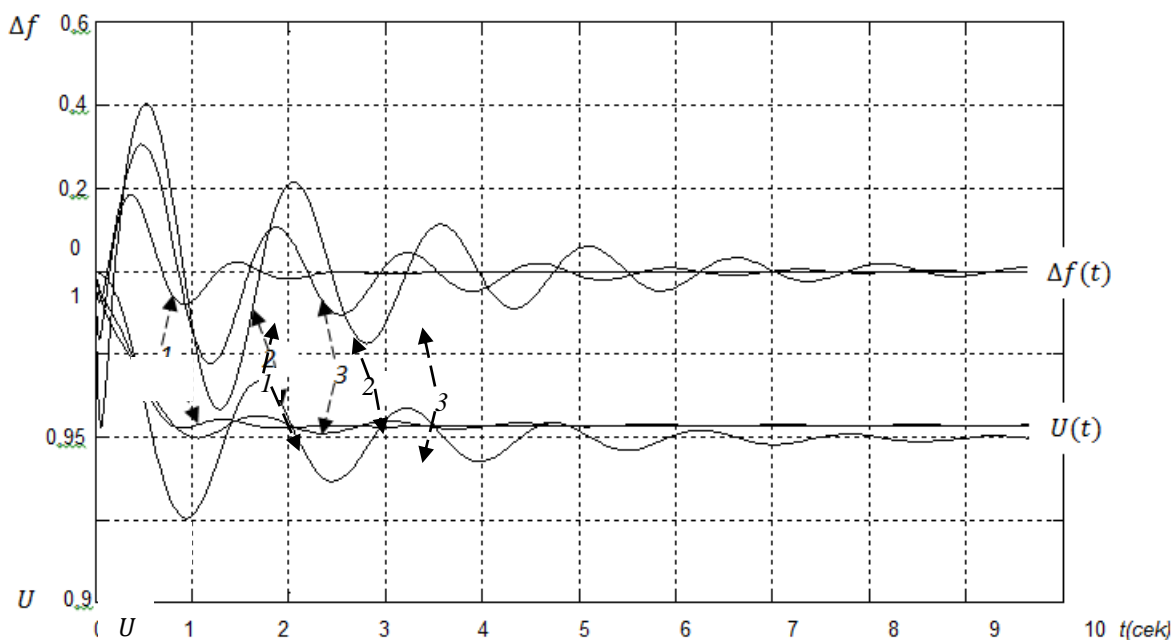


Рис. 3. Переходные характеристики СГ без сигнала адаптивного управления

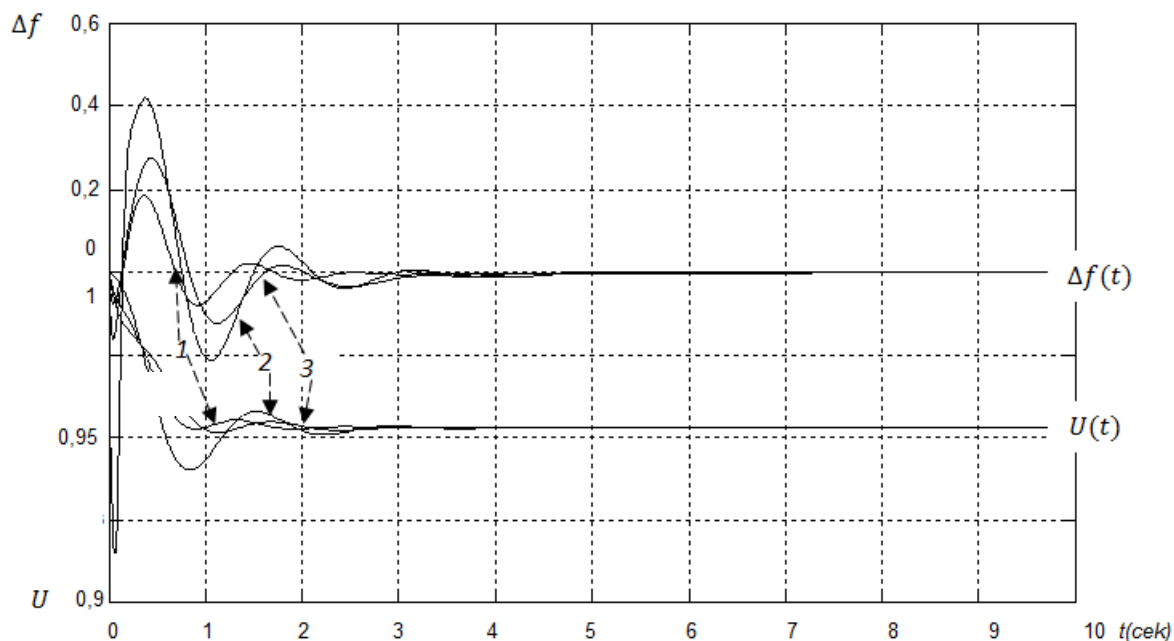


Рис. 4. Переходные характеристики СГ с сигналом адаптивного управления для трех режимов.

1 - переходные характеристики в номинальном режиме, 2 - переходные характеристики в режиме недовозбуждения, 3 - переходные характеристики в режиме перевозбуждения

Таблица 2

Динамические характеристики

Режим работы СГ	Время переходного процесса, с			
	напряжение СГ, U		отклонение частоты СГ, Δf	
	без адаптации	с адаптацией	без адаптации	с адаптацией
Недо возбуждение	8,5	2,4	9,5	3
Номинальный режим	2	2	2,5	2,5
Перевозбуждение	3,5	2,2	7	3

Исходя из результатов моделирования видно, что переходные характеристики СГ с адаптацией имеет разброс в интервале (2 – 3)с., разброс переходных характеристик системы без адаптации достигает (2 – 9,5)с. Адаптивный регулятор хорошо оптимизирует процессы при изменении режима работы сети, уменьшая перерегулирование и время регулирования напряжения и отклонения частоты по сравнению со стандартными настройками.

Заключение

Среди множества существующих алгоритмов и систем адаптивного управления по нашему мнению выгодно отличаются, особенно при реализации, такие решения, в которых совмещены функции идентификации и адаптивного управления динамическим объектом с ограниченной неопределенностью. Адаптивно настраиваемая модель обладает как возможностью идентификации этой неопределенности, так и ее компенсации. При этом управляемый объект получает свойство, равноценное стабильному объекту с «номинальными» параметрами. При использовании адаптивной системы с настраиваемой моделью для синхронного генератора достигнута «почти одинаковость» моделей во всех режимах генератора, соответствующая модели в номинальном режиме. Регуляторы системы возбуждения, настроенные на номинальный режим, обеспечивают наилучшее качество регулирования во всех режимных условиях.

Выполненное исследование эффективности адаптивного управления синхронным генератором показывает стабильность переходных характеристик синхронного генератора с адаптивным управлением по сравнению со стандартной системой управления в трех характерных режимах: номинальный режим, недовозбуждение и перевозбуждение.

ЛИТЕРАТУРА

1. Борцов Ю.А., Поляхов Н.Д., Путов В.В. Электромеханические системы с адаптивным и модальным управлением. Л: Энергоатомиздат, 1984.-216 с.
2. А.Г.Александров. Оптимальные и адаптивные системы, 2003- 279с.
3. Букреев В.Г. Математическое обеспечение адаптивных систем управления электромеханическими объектами - Учебное пособие. Томск: Изд - во ТПУ, 2002 - 132 с.
4. Кунцевич В. М., Лычак М. М. Синтез систем автоматического управления с помощью функций Ляпунова. М.: Наука. 1977
5. Андерсон П., Фуад А. Управление энергосистемами и устойчивость. - М: Энергия, 1980.
6. Юрганов А.А., Кожевников В.А. Регулирование возбуждения синхронных генераторов, 1996-183с.

Рецензент: Микеров Александр Геннадьевич, профессор кафедры систем автоматического управления, Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета «ЛЭТИ», доктор технических наук.

REFERENCES

1. Bortsov Yu.A., Polyakhov N.D., Putov V.V. Electromechanical systems with adaptive and modal control. L: Energy-Atomizdat, 1984. - 216 s.
2. A.G.Aleksandrov. Optimal and adaptive systems, 2003 - 279s.
3. Bukreev V.G. The software of adaptive systems for control with electromechanical objects - teaching aid. Tomsk: Izd - in TPU, 2002 - 132 s.
4. Kuntsevich V. M., Lychak M. M. Synthesis of the systems of automatic control with the aid of the Lyapunov functions. M.: Science. 1977
5. Anderson P., Fuad A. Control of power systems and stability. - M: Energy, 1980.
6. Yurganov A.A., Kozhevnikov v.a. Excitation systems of synchronous generators, 1996-183s.
7. Simulink. Dynamic Of system Of simulation of for MATLAB. Version 9.7