

Базовые алгоритмы адаптивного управления синхронным генератором с эталонной моделью

М.Ю. Медведев, В.Х. Пшихопов, В.А. Шевченко

Южный федеральный университет, Таганрог

Аннотация: В статье рассматривается задача управления синхронным генератором, а именно, сохранение устойчивости объекта управления в условиях возникновения шумов и возмущений в процессе регулирования. Модель синхронного генератора представлена системой дифференциальных уравнений Парка-Горева, определяющих переменные состояния относительно синхронно вращающихся d , q -осей. Управление синхронным генератором предлагается организовать на базе позиционно-траекторного регулирования с использованием алгоритмов адаптации с эталонной моделью. Базовый закон управления направлен на стабилизацию показателей частоты генерируемого тока и необходимого уровня мощности, что достигается за счет управления механическим моментом на валу турбины и значением напряжения возбуждения синхронного генератора. Модификация классического алгоритма адаптации с применением эталонной модели, позволяющая минимизировать ошибки регулирования эталонной и исследуемой модели в заданных пределах, производится по средствам введения в модель дополнительных переменных адаптации регулятора. Проведено математическое моделирование процесса управления при условии влияния на исследуемую модель постоянного нелинейного и не измеряемого возмущения. Результаты моделирования подтверждают высокий уровень точности слежения и адаптации исследуемой модели по отношению к эталонной, а значение присутствующей ошибки регулирования зависит от параметров быстрогодействия регулятора.

Ключевые слова: позиционно-траекторное управление, алгоритмы адаптации, эталонная модель, синхронный генератор.

Введение

Разработка системы управления синхронным генератором (СГ), обеспечивающей требуемый уровень качества генерируемой энергии и параметров работы генератора, является актуальной задачей, в связи с развитием концепций всеобщей электрификации, применения энергосберегающих, энергоэффективных технологий и повышение безопасного и устойчивого функционирования энергосетей. Особой задачей в синтезе системы управления СГ является построение управления, способного адаптироваться к возникающим возмущениям и шумам, которые могут появиться в процессе регулирования по ряду причин [1]. Построение регулятора, способного адаптироваться к внешним возмущениям таким

образом, что при изменяющихся параметрах объекта точность и качество системы оставалось неизменным, возможно с использованием систем адаптивного управления. При известной модели объекта и неизвестных параметрах используются алгоритмы адаптации с эталонной моделью, но в классическом исполнении такая система не способна адекватно реагировать на возникающие возмущения в процессе работы [2]. Данная задача может быть решена введением в модель объекта дополнительных параметров [3], позволяющих адаптировать ошибки регулирования эталонной и исследуемой модели в заданных пределах.

Базовый закон управления для СГ строится по принципам позиционно-траекторного управления, с успехом применяемого как в мобильных системах, таких как системы управления автономных устройств морского базирования [4-6], воздухоплавательных комплексов [7,8] и мобильных роботизированных систем [9,10], так и для построения управления стационарными системами, такими как системы управления тяговыми электродвигателями [11,12], двигателями постоянного тока, синхронными генераторами [13,14] и т.п.

Синтез адаптивного управления

Математическая модель СГ представлена системой дифференциальных уравнений Прка-Горева. В качестве переменных состояния в этой модели используются токи i_d , i_F , i_q (мгновенные значения), отклонение угла δ и угловая скорость ротора ω . В результате синхронная машина, работающая на систему неограниченной мощности через линию электропередачи, может быть представлена следующими уравнениями [15]:

$$\frac{d\delta}{d\tau} = \omega - 1,$$
$$\frac{d\omega}{d\tau} = -\frac{L_d}{3\tau_J} i_q i_d - \frac{kM_F}{3\tau_J} i_q i_F + \frac{L_q}{3\tau_J} i_d i_q - \frac{D}{\tau_J} (\omega - 1) + \frac{M_{MX}}{\tau_J},$$

$$\begin{aligned} \frac{di_d}{d\tau} &= \frac{-L_F(r_s + r_e)}{L} i_d - \omega \frac{L_F(L_q + L_e)}{L} i_q + \frac{kM_F r_F}{L} i_F - \frac{kM_F}{L} u_F + \frac{L_F U_\infty \sqrt{3}}{L} \sin(\delta), \\ \frac{di_F}{d\tau} &= \frac{kM_F(r_s + r_e)}{L} i_d + \frac{-(L_d + L_e)}{L} r_F i_F + \omega \frac{kM_F(L_q + L_e)}{L} i_q + \frac{(L_d + L_e)}{L} u_F - \frac{kM_F U_\infty \sqrt{3} \sin(\delta)}{L}, \\ \frac{di_q}{d\tau} &= \frac{(L_d + L_e)}{(L_q + L_e)} \omega i_d + \frac{kM_F}{(L_q + L_e)} \omega i_F - \frac{(r_s + r_e)}{(L_q + L_e)} i_q - \frac{U_\infty \sqrt{3}}{(L_q + L_e)} \cos(\delta). \end{aligned} \quad (1)$$

где $L = L_F(L_d + L_e) - kM_F^2$; L_d, L_q, L_F - собственные индуктивности обмоток статора по продольной d и поперечной q оси, обмотки возбуждения ротора, M_F - взаимная индуктивность обмоток статора и ротора, r_s, r_F, r_e - активные сопротивления обмоток статора, обмотки возбуждения ротора и линии электропередачи, U_∞, u_F - напряжения шины бесконечной мощности (действующее значение) и обмотки возбуждения ротора, k - постоянная Парка, τ_J - механическая постоянная времени. Все параметры модели, включая токи, напряжения и время, представлены в относительных единицах.

Рассматриваемая математическая модель эталонной и исследуемой моделей представлены системой уравнений (1), в эталонной модели для переменных состояния используется индекс m .

Произведем синтез управления для эталонной модели, стабилизирующее частоту тока и мощность генератора. Для управления этими параметрами регулируется механический момент на валу турбины и напряжение возбуждения. В соответствии с методом синтеза позиционно-траекторного управления [16] введем ошибки регулирования в виде:

$$\psi_{sm} = A_1 \cdot y_m - A_2; \quad (2)$$

$$\text{где } y_m = \begin{bmatrix} \omega_m \\ P_{gm} \end{bmatrix}; \quad T = \begin{bmatrix} T_w \\ T_p \end{bmatrix}; \quad A_1 = \begin{bmatrix} A_{1w} \\ A_{1p} \end{bmatrix}; \quad A_2 = \begin{bmatrix} A_{2w} \\ A_{2p} \end{bmatrix};$$

Для обеспечения асимптотической сходимости оценки потребуем, чтобы ошибка (2) подчинялась решению уравнения:

$$\dot{\psi}_{\varepsilon m} + T \cdot \psi_{\varepsilon m} = 0 \quad (3)$$

Первая производная по ошибке (2) примет следующий вид:

$$\dot{\psi}_{\varepsilon m} = A_1 \cdot \dot{y}_m; \quad (4)$$

Таким образом, уравнение (3) с учетом (2) и (4) запишем, как:

$$A_1 \cdot \dot{y}_m + T \cdot A_1 \cdot y_m - T \cdot A_2 = 0; \quad (5)$$

В скалярном виде уравнение (5):

$$\begin{cases} A_{1w} \cdot \dot{\omega}_m + T_w \cdot A_{1w} \cdot \omega_m - T_w \cdot A_{2w} = 0 \\ A_{1p} \cdot \dot{P}_{gm} + T_w \cdot A_{1p} \cdot P_{gm} - T_w \cdot A_{2p} = 0 \end{cases} \quad (6)$$

Для удобства представления и решения уравнений введем некоторые сокращения, являющимися следствием системы (1):

$$\dot{\omega}_m = f_{w_m} + \frac{M_{mx_m}}{\tau_j}; \quad (7)$$

$$\dot{P}_{gm} = 6 \cdot \sqrt{3} \cdot R_n \cdot (f_{12_m} + \frac{kM_F}{L} U_{F_m} \cdot \sin(\delta_m)) \quad (8)$$

$$f_{12_m} = f_{1m} - f_{2m} \quad (9)$$

$$f_{1m} = f_{iqm} \cdot \cos(\delta_m) - f_{idm} \cdot \sin(\delta_m), \quad (10)$$

$$f_{2m} = (i_{qm} \cdot \sin(\delta_m) + i_{dm} \cdot \cos(\delta_m)) \cdot (\omega_m - 1), \quad (11)$$

$$f_{iqm} = \frac{(L_d + L_e)}{(L_q + L_e)} \omega_m i_{dm} + \frac{kM_F}{(L_q + L_e)} \omega i_{Fm} - \frac{(r_s + r_e)}{(L_q + L_e)} i_{qm} - \frac{U_\infty \sqrt{3}}{(L_q + L_e)} \cos(\delta_m) \quad (12)$$

$$f_{idm} = \frac{-L_F(r_s + r_e)}{L} i_{dm} - \omega_m \frac{L_F(L_q + L_e)}{L} i_{qm} + \frac{kM_F r_F}{L} i_{Fm} + \frac{L_F U_\infty \sqrt{3}}{L} \sin(\delta_m) \quad (13)$$

Подставив выражения (7) – (13) в систему (7) получим уравнения регуляторов для эталонной модели:

$$\begin{cases} M_{mx_m} = \left(\frac{-T_w \cdot A_{1w} \cdot \omega_m + T_w \cdot A_{2w}}{A_{1w}} - f_{w_m} \right) \cdot \tau_j \\ U_{F_m} = \left(\frac{(-T_w \cdot A_{1p} \cdot P_{gm} + T_w \cdot A_{2p})}{A_{1p} \cdot 6 \cdot \sqrt{3} \cdot R_n} - f_{12_m} \right) \cdot L / (kM_F \cdot \sin(\delta_m)) \end{cases} \quad (14)$$

Рассмотрим синтез адаптивного управления для исследуемой модели, цель управления в которой задается следующим образом:

$$\psi = A_1 \cdot y - A_2 \quad (15)$$

где $y = \begin{bmatrix} \omega \\ P_g \end{bmatrix}$.

Введем дополнительные переменные адаптивного регулятора z :

$$\dot{z} = \begin{bmatrix} \dot{z}_1 \\ \dot{z}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \psi_1 - \psi_{1эм} \\ \psi_2 - \psi_{2эм} \end{bmatrix} \quad (16)$$

Ошибка управления задается в виде:

$$e = \psi - \psi_{эм} + B \cdot z \quad (17)$$

где $B = \begin{bmatrix} B_1 \\ B_2 \end{bmatrix}$;

Далее, аналогично процедуре синтеза для эталонной модели потребуем выполнения следующего равенства:

$$\dot{e} + T \cdot e = 0 \quad (18)$$

Решая уравнение (18) относительно механического момента на валу и напряжения возбуждения, получим следующие выражения для адаптивного регулятора с эталонной моделью:

$$M_{mx} = \left(\frac{k_w}{A_{1w}} - f_w \right) / \tau_j \quad (19)$$

$$U_F = \left(\frac{k_p}{6\sqrt{3} \cdot A_{1p}} - f_{12} \right) \cdot \frac{L}{k \cdot M_F \sin(\delta)} \quad (20)$$

В уравнениях (19), (20) использованы следующие сокращения:

$$k_w = A_{1w} \cdot \dot{\omega}_m - B_1 \cdot A_{1w} \cdot \omega + B_1 \cdot A_{1w} \cdot \omega_m - T_1 \cdot A_{1w} \cdot \omega + T_1 \cdot A_{1w} \cdot \omega_m - T_1 \cdot B_1 \cdot z_1,$$

$$k_p = A_{1p} \cdot \dot{P}_{gm} - B_2 \cdot A_{1p} \cdot P_g + B_2 \cdot A_{1p} \cdot P_{gm} - T_1 \cdot A_{1p} \cdot P_g + T_1 \cdot A_{1p} \cdot P_{gm} - T_1 \cdot B_2 \cdot z_2,$$

а так же сокращения аналогично (7)-(13).

В общем случае, адаптация системы управления к возникающим возмущениям происходит за счет автоматической подстройки параметров B_1 и B_2 .

Моделирование системы

Результат моделирования системы представлено на рисунках 1 – 4, где сплошной линией обозначены параметры исследуемой модели, а пунктирной – параметры эталонной модели. Моделирование проводилось с использованием следующих параметров системы: $L_d=0.973$; $t_j=10$; $k=1$; $M_f=0.923$; $L_q=0.55$; $D=0$; $L_f=1.088$; $L=1$; $L_e=0.997$; $r_s=0.005$; $r_e=0.005$; $r_f=0.14$; $U_\infty=1$; $R_n=300$; $A_{1w}=1$; $A_{1p}=1$; $T_{1w}=10$; $T_{1p}=1$; $A_{2w}=1$; $A_{2p}=1$. Возмущение, действующее на эталонную модель равно нулю, возмущение действующее на значения частоты вращения и мощности $5 \cdot \sin(3t)$.

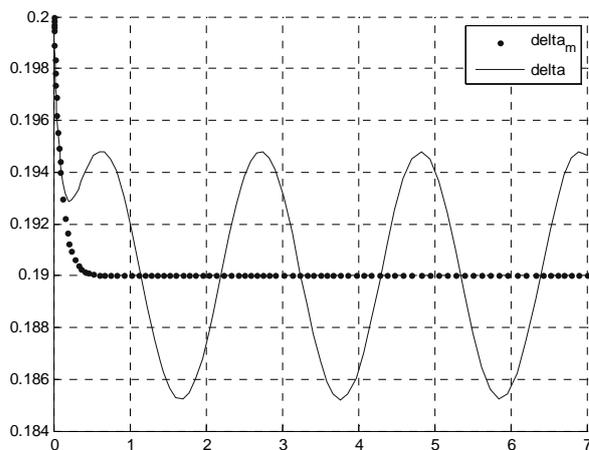


Рисунок 1 – Угол δ

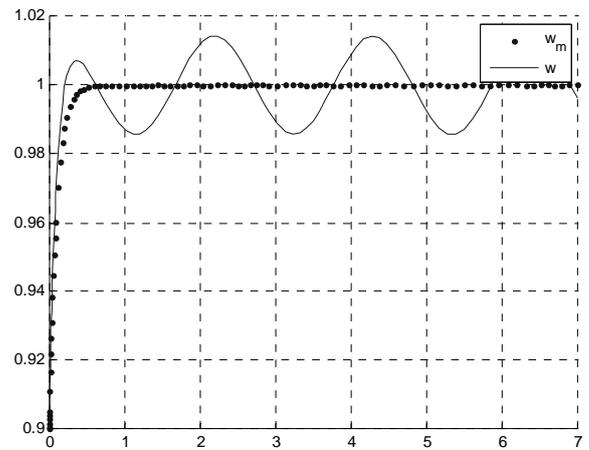


Рисунок 2 – Частота вращения вала

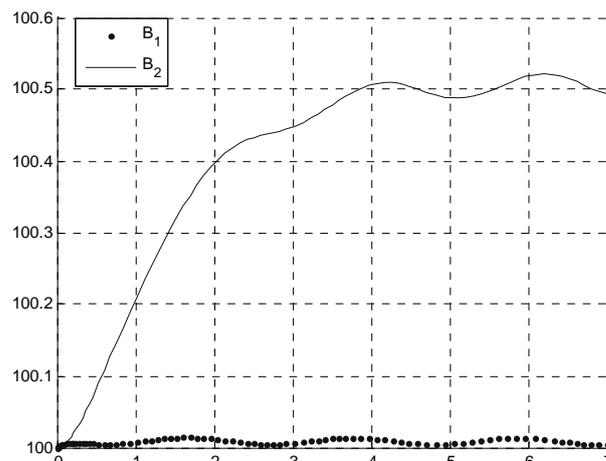
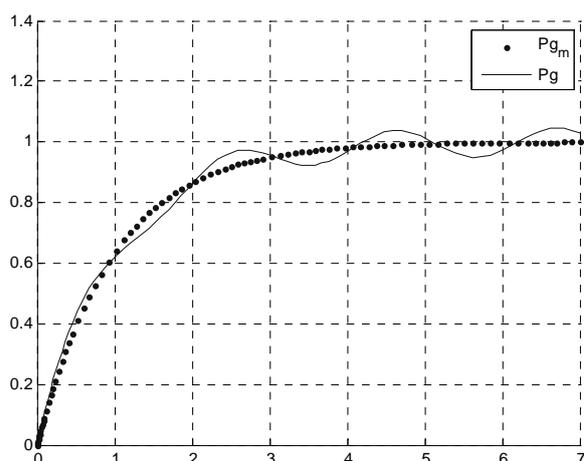


Рисунок 3 – Генерируемая мощность Рисунок 4 – Коэффициент адаптации

Из результатов моделирования можно сделать вывод, что адаптивная система с высокой точностью следит за эталонной моделью и позволяет подовить возникающие возмущения в исследуемой системе, а отклонения значений переменных эталонной модели и исследуемой зависит от параметров быстродействия регулятора.

Работа выполнена при поддержке ЮФУ (грант № 213.01-07/2014-01 «Теория и методы энергосберегающего управления распределенными системами генерации, транспортировки и потребления электроэнергии»).

Литература

1. Медведев М. Ю., Шевченко В. А. Оценка возмущений в процессе автоматического регулирования синхронного генератора // Инженерный вестник Дона. 2013. №4. URL: ivdon.ru/magazine/archive/n4y2013/1930.
2. Александров А. Г. Оптимальные и адаптивные системы. 2-е изд // М.:Высшая школа. – 2003. – С. 279.
3. Пшихопов В.Х., Гуренко Б.В., Медведев М.Ю., Маевский А.М., Голосов С.П. Оценивание аддитивных возмущений анпа робастным наблюдателем с нелинейными обратными связями // Известия Южного федерального университета. Технические науки. 2014. № 3 (152). С. 128-137.

4. Пшихопов В.Х., Чернухин Ю.В., Федотов А.А., Гузик В.Ф., Медведев М.Ю., Гуренко Б.В., Пьявченко А.О., Сапрыкин Р.В., Переверзев В.А., Приемко А.А. Разработка интеллектуальной системы управления автономного подводного аппарата // Известия Южного федерального университета. Технические науки. 2014. № 3 (152). С. 87-101.

5. Pshikhopov V.K., Medvedev M.Y., Gurenko B.V. Homing and docking autopilot design for autonomous underwater vehicle // Applied Mechanics and Materials. 2014. Т. 490-491. pp. 700-707.

6. Pshikhopov V.Kh., Medvedev M.Yu., Gaiduk A.R., Gurenko B.V. Control system design for autonomous underwater vehicle // Proceedings - 2013 IEEE Latin American Robotics Symposium, LARS 2013 2013. pp. 77-82.

7. Пшихопов В.Х., Кульченко А.Е., Медведев М.Ю. Применение позиционно-траекторных алгоритмов управления одновинтовым мини-вертолетом с рулевым винтом // Материалы конференции «Информационные технологии в управлении» (ИТУ-2014) Санкт-Петербург, 2014. С. 117-122.

8. Пшихопов В.Х., Медведев М.Ю. Алгоритмы оценивания в системе управления автономного роботизированного дирижабля // Известия Южного федерального университета. Технические науки. 2013. № 2 (139). С. 200-207.

9. Pshikhopov V.Kh., Krukhmalev V.A., Medvedev M.Yu., Fedorenko R.V., Kopylov S.A., Budko A.Yu., Chufistov V.M. Adaptive control system design for robotic aircrafts // Proceedings - 2013 IEEE Latin American Robotics Symposium, LARS 2013 2013. pp. 67-70.

10. Пшихопов В.Х., Медведев М.Ю., Гайдук А.Р., Нейдорф Р.А., Беляев В.Е., Федоренко Р.В., Костюков В.А., Крухмалев В.А. Система позиционно-траекторного управления роботизированной воздухоплавательной платформой. Часть 2. Алгоритмы управления // Мехатроника, автоматизация, управление. 2013. № 7. С. 13-20.

11. Пшихопов В.Х., Медведев М.Ю., Шевченко В.А. Синтез энергоэффективных алгоритмов управления движением электропоезда в условиях преодоления неоднородностей профиля пути // Инженерный вестник Дона. 2013. №4. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2013/1931.

12. Пшихопов В.Х., Гайдук А.Р., Медведев М.Ю., Беляев В.Е., Полуянович Н.К., Волощенко Ю.П. Энергосберегающее управление тяговыми приводами электроподвижного состава // Известия Южного федерального университета. Технические науки. 2013. № 2 (139). С. 192-200.

13. Шевченко В.А. Адаптивное управление синхронным генератором при заданном классе возмущений // Материалы конференции "управление в технических, эргатических, организационных и сетевых системах " Под редакцией С.Н. Васильева, И.А. Каляева, Д.А. Новикова, Г.Г. Себрякова. 2012. С. 328-331.

14. Шевченко В.А. Исследование математической модели и синтез системы автоматического регулирования частоты и амплитуды напряжения синхронного генератора электростанции // Информационное противодействие угрозам терроризма. 2012. № 18. С. 175-179.

15. Али З.М. Способы улучшения качества регулирования и устойчивости электротехнических комплексов с генерирующими источниками// Автореферат на соискание ученой степени кандидата технических наук, Казань, 2010г. – С. 6 – 9.

16. Пшихопов В.Х., Медведев М.Ю. Управление подвижными объектами в определенных и неопределенных средах. М.: Наука, 2011. 350 с. ISBN 978-5-02-037509-3.

References

1. Medvedev M. Yu., Shevchenko V. A. Inženernyj vestnik Dona. 2013. №4. URL: ivdon.ru/magazine/archive/n4y2013/1930.

2. Aleksandrov A. G. Optimal'nye i adaptivnye sistemy [Optimal and adaptive systems]. 2-e izd. M.:Vysshaya shkola. 2003. pp. 279.
 3. Pshikhopov V.Kh., Gurenko B.V., Medvedev M.Yu., Maevskiy A.M., Golosov S.P. Izvestiya Yuzhnogo federal'nogo universiteta. Tekhnicheskie nauki. 2014. № 3 (152). pp. 128-137.
 4. Pshikhopov V.Kh., Chernukhin Yu.V., Fedotov A.A., Guzik V.F., Medvedev M.Yu., Gurenko B.V., P'yavchenko A.O., Saprykin R.V., Pereverzev V.A., Priemko A.A.. Izvestiya Yuzhnogo federal'nogo universiteta. Tekhnicheskie nauki. 2014. № 3 (152). pp. 87-101.
 5. Pshikhopov V.K., Medvedev M.Y., Gurenko B.V. Applied Mechanics and Materials. 2014. T. 490-491. pp. 700-707.
 6. Pshikhopov V.Kh., Medvedev M.Yu., Gaiduk A.R., Gurenko B.V. Sontrol system design for autonomous underwater vehicle. Proceedings - 2013 IEEE Latin American Robotics Symposium, LARS 2013 2013. pp. 77-82.
 7. Pshikhopov V.Kh., Kul'chenko A.E., Medvedev M.Yu. Primenenie pozitsionno-traektonnykh algoritmov upravleniya odnovintovym mini-vertoletom s rulevym vintom. Materialy konferentsii «Informatsionnye tekhnologii v upravlenii» (ITU-2014). Sankt-Peterburg, 2014. pp. 117-122.
 8. Pshikhopov V.Kh., Medvedev M.Yu.. Izvestiya Yuzhnogo federal'nogo universiteta. Tekhnicheskie nauki. 2013. № 2 (139). pp. 200-207.
 9. Pshikhopov V.Kh., Krukhmalev V.A., Medvedev M.Yu., Fedorenko R.V., Kopylov S.A., Budko A.Yu., Chufistov V.M. Adaptive control system design for robotic aircrafts. Proceedings - 2013 IEEE Latin American Robotics Symposium, LARS 2013, 2013. pp. 67-70.
 10. Pshikhopov V.Kh., Medvedev M.Yu., Gayduk A.R., Neydorf R.A., Belyaev V.E., Fedorenko R.V., Kostyukov V.A., Krukhmalev V.A.. Mekhatronika, avtomatizatsiya, upravlenie. 2013. № 7. pp. 13-20.
-



11. Pshikhopov V.Kh., Medvedev M.Yu., Shevchenko V.A. Inzhenernyj vestnik Dona (Rus), 2013. №4. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2013/1931.
12. Pshikhopov V.Kh., Gayduk A.R., Medvedev M.Yu., Belyaev V.E., Poluyanovich N.K., Voloshchenko Yu.P.. Izvestiya Yuzhnogo federal'nogo universiteta. Tekhnicheskie nauki. 2013. № 2 (139). pp. 192-200.
13. Shevchenko V.A. Adaptivnoe upravlenie sinkhronnym generatorom pri zadannom klasse vozmushcheniy. Materialy konferentsii "upravlenie v tekhnicheskikh, ergaticheskikh, organizatsionnykh i setevykh sistemakh " Pod redaktsiey S.N. Vasil'eva, I.A. Kalyaeva, D.A. Novikova, G.G. Sebryakova. 2012. pp. 328-331.
14. Shevchenko V.A. Informatsionnoe protivodeystvie ugrozam terrorizma. 2012. № 18. pp. 175-179.
15. Ali Z.M. Sposoby uluchsheniya kachestva regulirovaniya i ustoychivosti elektrotekhnicheskikh kompleksov s generiruyushchimi istochnikami [Ways to improve the quality of regulation and the stability of electrical systems with generating sources]. Avtoreferat na soiskanie uchenoy stepeni kandidata tekhnicheskikh nauk, Kazan', 2010. pp. 6 – 9.
16. Pshikhopov V.Kh., Medvedev M.Yu. Upravlenie podvizhnymi ob"ektami v opredelennykh i neopredelennykh sredakh [Control of moving objects in certain and uncertain environments]. M.: Nauka, 2011. pp. 350. ISBN 978-5-02-037509-3.