

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ СИНХРОННОЙ МАШИНЫ ПРИ УПРАВЛЕНИИ ЕЕ ВОЗБУЖДЕНИЕМ

В.И. Котенев, А.В. Котенев, В.С. Осипов, В.В. Кочетков

Самарский государственный технический университет
443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244
E-mail:

Рассмотрена более полная математическая модель синхронной машины с позиции управления ее возбуждением, на базе которой построена система регулирования напряжением генератора.

Ключевые слова: синхронная машина, математическая модель, управление возбуждением, напряжение, синхронный генератор, система управления.

На крупных синхронных машинах, работающих в энергосистемах, в настоящее время применяются регуляторы сильного действия, которые реагируют не только на отклонение параметров режима, но также на скорость и ускорение их изменений. Причем таких параметров несколько. Поэтому в практике проектирования систем автоматического управления возбуждением нашел применение метод электродинамического моделирования на ЭВМ. В связи с аппаратной ограниченностью моделирующих машин использовались в основном упрощенные математические модели [1-15, 17, 18].

В настоящее время при проектировании используются современные информационные технологии, в частности такие системы моделирования, как Simulink и другие. С помощью этих систем возможно моделирование сложных динамических систем без упрощения их моделей, что позволяет существенно повысить качество регулирования.

В данной работе предложены более полные математические модели синхронной машины как объекта управления параметрами режима энергосистемы с учетом активных сопротивлений статора и электродвижущих сил трансформации с входными переменными – током возбуждения, напряжением электрической системы, механической мощностью на валу ротора и выходной переменной – внутренним углом машины.

Электромагнитные переходные процессы в синхронных генераторах при соответствующих допущениях, сделанных в [3, 13, 18], описываются следующей системой дифференциальных уравнений:

$$U_{\varepsilon} = -\frac{d\psi_{\varepsilon}}{dt} - RI_{\varepsilon}; \quad \varepsilon = A, B, C; \quad (1)$$

$$U_f = \frac{d\psi_f}{dt} - R_f I_f; \quad (2)$$

Виктор Иванович Котенев (д.т.н., проф.), профессор каф. электроснабжения промышленных предприятий.

Александр Викторович Котенев (к.т.н.), доцент каф. электроснабжения промышленных предприятий.

Вячеслав Семенович Осипов (к.т.н., доц.), доцент каф. электроснабжения промышленных предприятий.

Владимир Валерьевич Кочетков, студент.

$$\begin{bmatrix} \Psi_A \\ \Psi_B \\ \Psi_C \\ \Psi_f \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_A & M_{AB} & M_{AC} & M_{Af} \\ M_{BA} & L_B & M_{BC} & M_{Bf} \\ M_{CA} & M_{CB} & L_C & M_{Cf} \\ M_{fA} & M_{fB} & M_{fC} & L_f \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} I_A \\ I_B \\ I_C \\ I_f \end{bmatrix}, \quad (3)$$

где U , I , R , Ψ – соответственно напряжение, ток, активное сопротивление, потокоцепление;

L , M – коэффициенты самоиндукции и взаимной индукции;

A, B, C – обозначение статорных обмоток соответствующих фаз;

f – индекс величин обмотки возбуждения;

t – время.

Некоторые индуктивности и взаимные индуктивности, входящие в (3), являются периодическими функциями времени, поэтому уравнения (1) и (2) являются уравнениями с переменными коэффициентами, что значительно усложняет их анализ.

Переход к новым переменным, записанный относительно вращающейся системы d, q -координат, позволяет преобразовать систему уравнений (1) – (3) в другую систему, у которой все коэффициенты постоянные:

$$\begin{aligned} X_d \frac{dI_d}{\omega dt} + X_{ad} \frac{dI_d}{\omega dt} + RI_d + X_q I_q &= -U_d; \\ X_q \frac{dI_q}{\omega dt} - X_d I_d - E_q + RI_q &= -U_q; \\ X_{ad} \frac{dI_d}{\omega dt} + X_f \frac{dI_f}{\omega dt} + R_f I_f &= U_f, \end{aligned} \quad (4)$$

где ω – круговая частота.

Систему уравнений синхронного генератора в приращениях получим из системы уравнений (4) при $U_d = U_c \sin \theta$ и $U_q = U_c \cos \theta$:

$$\Delta I_q(p) = - \frac{R(T_d p + 1) \Delta I_d(p) + RT_{ad} p \Delta I_f(p) + U_{c0} \cos \theta_0 \Delta \theta(p) + \sin \theta_0 \Delta U_c(p)}{X_q}; \quad (5)$$

$$\Delta I_d(p) = \frac{R(T_q p + 1) \Delta I_q(p) - E_q(p) - U_{c0} \sin \theta_0 \Delta \theta(p) + \cos \theta_0 \Delta U_c(p)}{X_d}; \quad (6)$$

$$\Delta I_f(p) = \frac{\Delta U_f(p) - RT_{ad} p \Delta I_d(p)}{R_f(T_f p + 1)}. \quad (7)$$

Уравнения (5) и (6) можно представить одним уравнением

$$\begin{aligned} \Delta I_d(p) = - \left\{ \left[\frac{R(T_q p + 1) (RT_{ad} p \Delta I_f(p) + U_{c0} \cos \theta_0 \Delta \theta(p) + \sin \theta_0 \Delta U_c(p))}{X_d X_q} \right] + \right. \\ \left. + \frac{\Delta E_q(p) + U_{c0} \sin \theta_0 \Delta \theta(p) - \cos \theta_0 \Delta U_c(p)}{X_d} \right\} W_2(p); \end{aligned} \quad (8)$$

$$\text{где } W_2(p) = \frac{1}{(1+c_0) \left[\frac{c_0}{1+c_0} T_d T_q p^2 + \frac{c_0}{1+c_0} (T_d + T_q) p + 1 \right]}; \quad c_0 = \frac{R^2}{X_d X_q}.$$

Электромеханические переходные процессы описываются уравнением

$$\omega_H J \frac{d\omega}{dt} = \pm (P_M - P_c - P_a), \quad (9)$$

где ω_H – синхронная угловая скорость; J – момент инерции привода; P_M – механическая мощность на валу машины: знак «плюс» – для генератора, «минус» – для двигателя.

Ускорение ротора

$$\frac{d\omega}{dt} = \pm \frac{1}{p_M} \frac{d^2\theta}{dt^2}, \quad (10)$$

где p_M – число пар полюсов.

Синхронная мощность машины

$$P_c = P_{c \max} \sin \theta; \quad P_{c \max} = \frac{m U_c E_q}{X_{d\Sigma}}, \quad (11)$$

где m – число фаз; U_c – напряжение сети; $X_{d\Sigma}$ – индуктивное сопротивление машины по продольной оси и сопротивление внешних элементов, включенных между машиной и электрической системой.

Действие демпферных контуров в уравнениях (1) – (4) не учитывается, а оно учитывается введением демпферной мощности P_a в уравнение движения ротора (9). Определение этой мощности у синхронного двигателя не вызывает затруднений, так как он имеет пусковую обмотку, для которой заданы максимальные значения момента $M_{a \max}$ и скольжения $s_{\max}$. Поэтому

$$P_a = \frac{M_{a \max}}{s_{\max} \omega_H p_M} \frac{d\theta}{dt}. \quad (12)$$

У синхронного генератора такой обмотки нет, так как он имеет демпферные контуры, которые расположены на роторе. Их действие может быть приближенно учтено демпферной мощностью, методика определения которой изложена в [1].

После линеаризации уравнения (9) относительно переменных $\Delta\theta$, ΔU_c , ΔE_q , ΔP_M с учетом выражений (10) – (12) получим операторные уравнения движения ротора:

$$\Delta\theta(p) = W_1(p) \left[k_1 \left(\frac{\Delta E_q(p)}{E_{q0}} + \frac{\Delta U_c(p)}{U_{c0}} \right) \right] + k_2 \Delta P_M(p), \quad (13)$$

где

$$W_1(p) = \frac{1}{T_1^2 p^2 + 2\varepsilon T_1 + 1}; \quad k_1 = -tg\theta_0; \quad k_2 = \frac{1}{P_{c \max} \cos \theta_0};$$

$$T_1 = \sqrt{\frac{J}{p_M M_{c \max} \cos \theta_0}}; \quad \varepsilon = \frac{M_{a \max}}{2 s_{\max} \omega_H \sqrt{p_M J M_{c \max} \cos \theta_0}}.$$

На рис. 1 представлена структурная схема генератора, составленная по уравнениям (7), (8) и (13), которая содержит два элемента с отрицательными передаточными функциями. Структурная схема двигателя – такая же, только эти элементы имеют положительные передаточные функции. При объединении этих элементов знаки у передаточных функций становятся одинаковыми – положительными. Поэтому структурные схемы машины при работе в режимах двигателя и генератора будут одинаковыми.

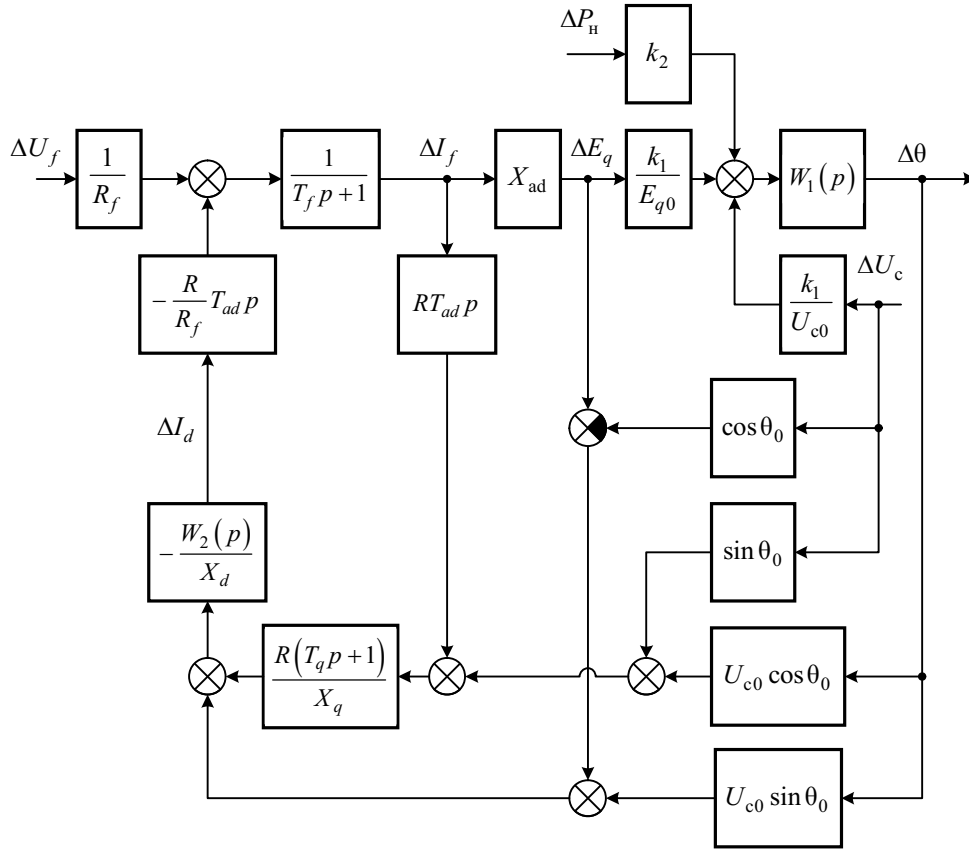


Рис. 1. Структурная схема синхронного генератора

Иногда пренебрегают ЭДС трансформации и активными сопротивлениями фазных обмоток. Полагая в (4)

$$X_d \frac{dI_d}{\omega dt} = 0; \quad X_{ad} \frac{dI_f}{\omega dt} = 0; \quad X_q \frac{dI_q}{\omega dt} = 0; \quad R = 0,$$

получим:

$$\Delta I_f(p) = \frac{1}{T_f p + 1} \left[\frac{\Delta U_f(p)}{R_f} + W_3(p) \Delta I_f(p) + W_4(p) \Delta \theta(p) + W_5(p) \Delta U_c(p) \right]; \quad (14)$$

$$\Delta\theta(p) = \frac{k_1 X_{ad}}{E_{q0}} \Delta I_f(p) + k_2 \Delta P_m(p) + \frac{k_1}{U_{c0}} \Delta U_{c0}(p), \quad (15)$$

где

$$W_3(p) = \frac{X_{ad}^2}{\omega X_d R_f} p;$$

$$W_4(p) = \frac{U_{c0} X_{ad} \sin \theta_0}{\omega X_d R_f} p;$$

$$W_5(p) = -\frac{X_{ad} \cos \theta_0}{\omega X_d R_f} p.$$

По уравнениям (14), (15) построена структурная схема, представленная на рис. 2, на которой

$$W_9(p) = \frac{1}{T_f' p + 1}; \quad T_f' = \left(1 - \frac{X_{ad}^2}{X_f X_d}\right) T_f = \frac{X_d'}{X_d} T_f.$$

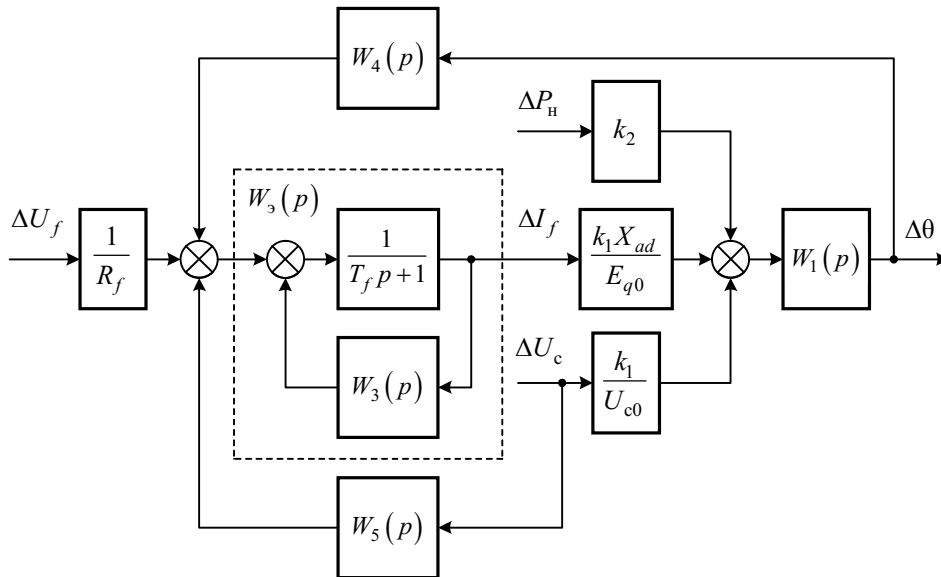


Рис. 2. Преобразованная структурная схема синхронной машины

Если пренебречь и изменением напряжения в электрической системе ($\Delta U_c = 0$), то структурная схема (рис. 2) с передаточными функциями (14) будет аналогична схемам, приведенным в [12, 13, 16, 18].

Действием обратной связи (реакцией якоря) можно пренебречь, если характеристические полиномы разомкнутой $R_p(p)$ и замкнутой $R_3(p)$ системы (рис. 2) будут незначительно отличаться друг от друга.

Пример. Синхронный двигатель СДН2-16-36-6У3: $S_H = 1165$ кВА, $P_H = 1000$ кВт, $\omega_0 = 104,7$ 1/с, $M_{\max}/M_H = 1,8$, $M_{\Pi}/M_H = 0,85$, $I_{\Pi}/I_H = 5,7$,

$$U_{fн} = 33 \text{ В}, I_{fн} = 312 \text{ А}, U_{н} = 6000 \text{ В}, M_{кр}/M_{н} = 1,5, J = 107,5 \text{ кг} \cdot \text{м}^2, \cos \theta_{н} = 0,9.$$

Вычисленные параметры: $T_1 = 0,053 \text{ с}$, $\varepsilon = 0,55$, $R_f = 0,106 \text{ Ом}$, $x_f = 1,33$, $x'_d = 0,24$, $T_f = 1,41 \text{ с}$, $x_d = 1,35$, $x_{ad} = 1,2$, $T'_f = 0,25 \text{ с}$, $T_3 = 40,2 \text{ А} \cdot \text{с}$, $E_{d0} = 7205 \text{ В}$, $X_{ad} = 37 \text{ Ом}$, $X_1 = 0,58$.

Характеристические полиномы:

$$R_p(p) = \sum_{i=0}^3 a_i p^i, R_3(p) = \sum_{i=0}^3 b_i p^i,$$

где

$$a_0 = b_0; a_2 = b_2; a_3 = b_3; a_1 = T'_f + 2\varepsilon T_1 = 0,25 + 2 \cdot 0,55 \cdot 0,053 = 0,308 \text{ с};$$

$$b_1 = a_1 + \frac{k_1 X_{ad} T_3}{E_{d0}} = 0,308 + \frac{0,58 \cdot 37 \cdot 40,2}{7205} = 0,428 \text{ с}$$

отличаются друг от друга только коэффициентами a_1 и b_1 не более чем на 28 %.

Математическая модель в виде структурной схемы с выходной переменной – внутренним углом машины (рис. 2) является базовой моделью, на основе которой формируются модели по другим выходным переменным.

Так, в результате электродинамического моделирования показано [4-6], что наиболее эффективна система управления с обратной связью по основной регулируемой величине – напряжению машины U_G и связью по углу θ и его производным.

Однако при этом требуется телепередача фазы напряжения приемной электростанции U_c . С целью упрощения системы управления целесообразно [5, 18] использование обратной связи по частоте напряжения генератора и ее первой производной вместо связи соответственно по первой и второй производным угла θ . Регулирование возбуждения в этом случае ведется по напряжению и частоте на выводах генератора, и, следовательно, не требуется телемеханических устройств и дополнительных измерительных трансформаторов на высоком напряжении электростанции. В результате этого существенно упрощается система управления возбуждением машины.

Для получения структурной схемы по вышеперечисленным переменным схема, представленная на рис. 2, дополняется элементами, составленными по соотношениям:

$$\Delta U_r(p) = k_3 \Delta I_f(p) + k_4 \Delta \theta(p); \Delta f(p) = k_5 \Delta I_f(p) + k_6 \Delta \theta(p),$$

$$\text{где } k_3 = c_3 X_{ad} \cos \theta_{r0}; k_4 = -c_3 E_{q0} \sin \theta_{r0}; k_5 = \frac{2\pi c_3 X_{ad}}{U_{r0}} \sin \theta_{r0}; k_6 = \frac{2\pi c_3 E_{q0}}{U_{r0}} \cos \theta_{r0};$$

$$c_3 = \frac{X_{вн}}{X_d + X_{вн}}; \Delta U_r(p); \Delta f(p) - \text{изображения приращений напряжения и частоты}$$

генератора; $X_{вн}$ – сопротивление внешних элементов, расположенных между генератором и электрической системой.

Структурная схема САУ напряжением генератора представлена на рис. 3. Она состоит из моделей генератора, тиристорного преобразователя и регулятора. Регулятор представлен передаточными функциями $W_U(p)$, $W_I(p)$, $W_f(p)$, а тиристорный преобразователь – $W_{тп}(p)$. Датчики тока возбуждения, частоты и напряжения

генератора входят в состав передаточных функций регулятора своими коэффициентами передачи.

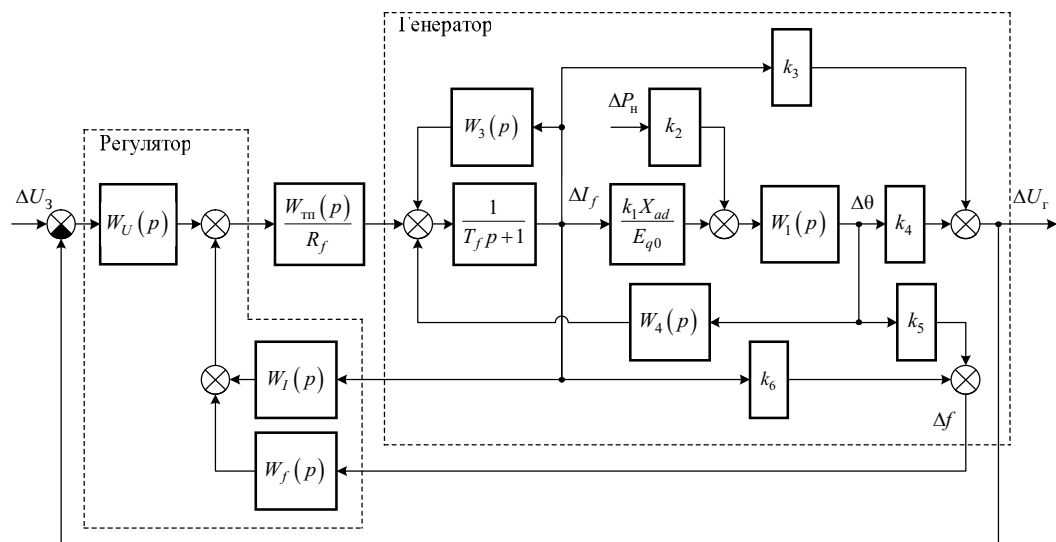


Рис. 3. Структурная схема системы автоматического управления напряжением генератора

Выводы. Получена компактная модель синхронной машины, которая справедлива для различных режимов работ машины с входными переменными – напряжением возбуждения, механической мощностью на валу ротора, напряжением сети и выходной переменной – внутренним углом машины. На базе этой модели построена структурная схема автоматической системы управления напряжением синхронного генератора.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Важнов В.И. Основы теории переходных процессов синхронной машины. – М.-Л.: Госэнергоиздат, 1969. – 312 с.
2. Веников В.А. Переходные электромеханические процессы в электрических системах. – М.: Высш. шк., 1985. – 535 с.
3. Веников В.А. и др. Сильное регулирование возбуждения. – Л.: Госэнергоиздат, 1963. – 152 с.
4. Глебов И.А. Системы возбуждения мощных синхронных машин. – Л.: Наука, 1979. – 312 с.
5. Глебов И.А., Каשתелян В.Е., Сырый Н.С. Влияние параметров гидрогенераторов на устойчивость электропередач // Известия АН СССР. ОТН. Энергетика и автоматика. 1960. № 5. – С. 3-14.
6. Глебов И.А., Логинов С.И. Системы возбуждения и регулирования синхронных машин. – Л.: Энергия, 1972. – 113 с.
7. Горев А.Н. Переходные процессы синхронной машины. – Л.: Наука, 1985. – 355 с.
8. Жданов П.С. Вопросы устойчивости электрических систем. – М.: Энергия, 1979. – 455 с.
9. Копылов И.П. Электрические машины. – Энергоатомиздат, 1986. – 360 с.
10. Крючков И.П. Переходные процессы в электроэнергетических системах. – М: ИД МЭИ, 2009. – 413 с.
11. Матюхин В.М. О статической устойчивости электропередачи в связи с наличием нескольких генераторов на передающей станции // Известия АН СССР. ОТН. 1957. № 7. – С. 3-7.
12. Матюхин В.М. Уравнения и структурная схема синхронного генератора при автоматическом регулировании возбуждения // Известия АН СССР. ОТН. 1952. № 9. – С. 1322-1330.
13. Михневич Г.В. Синтез структуры системы автоматического регулирования возбуждения синхронных машин. – М.: Высш. шк., 1978. – 222 с.
14. Петелин Д.П. Автоматическое регулирование возбуждения синхронных двигателей. – М.-Л.: Госэнергоиздат, 1961. – 104 с.

15. Ульянов С.А. Электромагнитные переходные процессы в электрических системах. – М: АРИС, 2010. – 518 с.
16. Шварц Г.Р.и др. Применение регулируемого электропривода в технологии транспорта нефти и газа. – М.: Машиностроение-1, 2008. – 240 с.
17. Шумилов В.Ф., Шумилов Н.И. Повышение качества компенсации реактивной мощности синхронными двигателями // Промышленная энергетика. – 1989. – № 7. – С. 33.
18. Юрганов А.А., Кожеевников В.А. Регулирование возбуждения синхронной машины. – М.: Наука, 1996. – 138 с.

Статья поступила в редакцию 29 марта 2012 г.

MATHEMATICAL MODEL OF SYNCHRONOUS MACHINE WITH CONTROLLED EXCITATION

V.I. Kotenev, A.V. Kotenev, V.S. Osipov, V.V. Kochetkov

Samara State Technical University
244, Molodogvardeyskaya st., Samara, 443100

A more precise mathematical model of a synchronous machine with the controlled excitation is considered in the paper. The control system of the generator voltage is used on its base.

Keywords: *synchronous machine, mathematical model, excitation control, voltage, frequency, synchronous generator, block diagram, control system.*

*Viktor I. Kotenev (Dr. Sci. (Techn.)), Professor.
Alexander V. Kotenev (Ph.D. (Techn.)), Associate Professor.
Vyacheslav S. Osipov (Ph.D. (Techn.)), Associate Professor.
Vladimir V. Kochetkov, Student.*