

УДК 621.313

С.Е. Степанов

ВЫЧИСЛИТЕЛЬ УГЛА НАГРУЗКИ ДЛЯ СИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

ОАО «Гипрогазцентр»

В статье рассмотрен вариант построения системы регулирования возбуждения синхронного двигателя в функции угла нагрузки. Приведена структурная схема, математическое описание и результаты моделирования.

Ключевые слова: синхронный двигатель, автоматическое регулирование, угол нагрузки.

Наиболее приемлемым вариантом решения этой задачи является использование методов косвенного определения угла δ с помощью идентификатора, с малой динамической погрешностью вычисляющего угол нагрузки.

При построении системы автоматического регулирования возбуждения синхронных двигателей в ряде случаев возникает задача измерения угла нагрузки (δ).

Информация о мгновенном значении угла нагрузки позволяет прогнозировать момент выпадения СД из синхронизма и своевременно форсировать возбуждение, тем самым предотвращая асинхронный ход двигателя. Демпфирование колебаний ротора осуществляется посредством форсировок возбуждения в соответствии со значением скорости изменения угла δ .

Таким образом, идентификатор угла δ должен вычислять значение угла нагрузки по легко измеряемым координатам СД (току I_f и напряжению U_f цепи возбуждения, активному и реактивному токам и напряжению статора).

Поскольку начальное значение потокосцепления обмотки возбуждения $\Psi_f(0)$ известно из уравнений, соответствующих установившемуся режиму работы СД, то потокосцепление Ψ_f в переходном режиме определяется по напряжению возбуждения U_f и току возбуждения I_f согласно уравнению (1):

$$\psi_f = \int_0^t (u_f - r_f i_f) d\tau + \psi_f(0). \quad (1)$$

Потокосцепление обмотки возбуждения и потокосцепление статора Ψ_{sd} по продольной оси связаны с токами в контурах машины следующими уравнениями:

$$\psi_{sd} = L_d i_{sd} + L_{ad} i_f + L_{ad} i_{od}; \quad (2)$$

$$\psi_f = L_{ad} i_{sd} + L_f i_f + L_{ad} i_{od}. \quad (3)$$

Из уравнений (2) и (3) для потокосцепления обмотки возбуждения имеем:

$$\psi_f = \frac{L_{ad} L_f}{L_f - L_{ad}} i_{sd} + L_{ad} i_{od}, \quad (4)$$

где Ψ_{md} – потокосцепление в воздушном зазоре по продольной оси; $L_{\sigma s}$ и $L_{\sigma f}$ – индуктивности рассеяния статора и обмотки возбуждения.

Продольный ток статора i_{sd} , входящий в уравнение (4), может быть определен лишь

при известных значениях угла нагрузки δ , активного и реактивного тока статора. Если ток i_{sx} соответствует реактивному току статора и ориентирован вдоль вектора потокосцепления статора $\Psi_s = (\Psi_{sd} + j\Psi_{sq})$, а ток i_{sy} соответствует активному току статора и совпадает с вектором напряжения статора $U_s = (U_{sd} + jU_{sq})$, то угол нагрузки δ является углом сдвига между координатными осями dq и xy :

$$\mathbf{i}_s^{xy} = i_{sx} + j i_{sy} = (i_{sd} + j i_{sq}) \cdot e^{-j\delta}; \quad (5)$$

$$i_{sx} = \operatorname{Re} \mathbf{i}_s^{xy} = \operatorname{Re} \mathbf{i}_s^{dq} \cdot e^{-j\delta} = i_{sd} \cos \delta + i_{sq} \sin \delta; \quad (6)$$

$$i_{sy} = \operatorname{Im} \mathbf{i}_s^{xy} = \operatorname{Im} \mathbf{i}_s^{dq} \cdot e^{-j\delta} = i_{sq} \cos \delta - i_{sd} \sin \delta. \quad (7)$$

Продольный ток статора выражается из формул (1.5) – (1.7)

$$i_{sd} = i_{sx} \cos \delta - i_{sy} \sin \delta. \quad (8)$$

Величина потокосцепления Ψ_{sd} из уравнения (4) зависит от напряжения статора U_s и угла нагрузки δ , поскольку проекция вектора потокосцепления статора на ось d определяется следующим выражением

$$\psi_{sd} = \psi_s \cos \delta = \omega_s^{-1} u_s \cos \delta. \quad (9)$$

В результате подстановки (8) и (9) в уравнение (4) потокосцепление обмотки возбуждения выражается уравнением:

$$\psi_f = \omega_s^{-1} u_s \cos \delta - L_\sigma (i_{sx} \cos \delta - i_{sy} \sin \delta) + L_{\sigma f} i_f. \quad (10)$$

Введем обозначения:

$$k_1 = \omega_s^{-1} u_s - L_\sigma i_{sx}; \quad k_2 = L_\sigma i_{sy}; \quad k_3 = \psi_f - L_{\sigma f} i_f. \quad (11)$$

Тогда уравнение (10) преобразуется к виду

$$k_1 \cos \delta + k_2 \sin \delta - k_3 = 0. \quad (12)$$

Уравнение (12) имеет несколько решений для угла δ :

$$\delta = \pm \arccos \frac{k_3}{\sqrt{k_1^2 + k_2^2}} + 2m\pi + \theta; \quad (13)$$

$$\theta = \operatorname{arctg} (k_2 k_1^{-1}) + n\pi,$$

где, исходя из физических соображений, верным является следующее:

$$\delta = - \arccos \frac{k_3}{\sqrt{k_1^2 + k_2^2}} + \xi \quad \text{или} \quad (14)$$

$$\delta = - \arccos \frac{\psi_f - L_{\sigma f} i_f}{\sqrt{(\omega_s^{-1} u_s - L_\sigma i_{sx})^2 + (L_\sigma i_{sy})^2}} + \xi;$$

$$\text{здесь } \zeta = \operatorname{arctg} \frac{k_2}{k_1} = \operatorname{arctg} \frac{L_\sigma i_{sy}}{\omega_s^{-1} u_s - L_\sigma i_{sx}}.$$

Для вычисления угла нагрузки по формулам (14) напряжение статора U_s и ток возбуждения i_f измеряются непосредственно, а потокосцепление Ψ_f вычисляется по формуле (1). Активный i_{sy} и реактивный i_{sx} токи статора вычисляются через фазные токи и напряжения статора в физических координатах.

Составляющие напряжения $u_{s\alpha}$, $u_{s\beta}$ и тока $i_{s\alpha}$, $i_{s\beta}$ статора СД в неподвижной двухфазной системе координат вычисляются по формулам:

$$u_{s\alpha} = \frac{2}{3} u_a - \frac{1}{3} (u_b + u_c); \quad (15)$$

$$u_{s\beta} = \frac{1}{\sqrt{3}} (u_b - u_c);$$

$$i_{s\alpha} = \frac{2}{3} i_a - \frac{1}{3} (i_b + i_c);$$

$$i_{s\beta} = \frac{1}{\sqrt{3}} (i_b - i_c).$$

Составляющие тока статора во вращающейся двухфазной системе координат i_{sx} , i_{sy} определяются выражениями:

$$i_{sx} = i_{s\alpha} \cos \gamma + i_{s\beta} \sin \gamma;$$

$$i_{sy} = i_{s\beta} \cos \gamma - i_{s\alpha} \sin \gamma, \quad (16)$$

где

$$\gamma = \arccos \frac{u_{s\alpha}}{\sqrt{u_{s\alpha}^2 + u_{s\beta}^2}} - \frac{\pi}{2} \quad - \text{ фаза потокосцепления статора.} \quad (17)$$

Соотношения, связывающие между собой обобщенные вектора тока статора i_s , потокосцепления Ψ_s статора и угол нагрузки δ_0 в статическом режиме имеют вид:

$$|\psi_s| \cdot \sin \delta_0 = L_q |\mathbf{i}_s| \cdot \sin (\delta_0 + \chi); \quad (18)$$

$$|\psi_s| \cdot \sin \delta_0 = L_q |\mathbf{i}_s| \cdot (\sin \delta_0 \cdot \cos \chi + \cos \delta_0 \cdot \sin \chi); \quad (19)$$

$$(|\psi_s| - L_q |\mathbf{i}_s| \cdot \cos \chi) \cdot \sin \delta_0 = L_q |\mathbf{i}_s| \cdot \sin \chi \cdot \cos \delta_0. \quad (20)$$

Из выражения (20) определяется угол нагрузки δ_0 в статическом режиме:

$$\operatorname{tg} \delta_0 = \frac{L_q |\mathbf{i}_s| \cdot \sin \chi}{|\psi_s| - L_q |\mathbf{i}_s| \cdot \cos \chi}. \quad (21)$$

Выражения для скалярного и векторного произведений обобщенных векторов i_s и Ψ_s имеют вид

$$\psi_s \cdot \mathbf{i}_s = |\psi_s| \cdot |\mathbf{i}_s| \cdot \cos \chi = \psi_{s\alpha} i_{s\alpha} + \psi_{s\beta} i_{s\beta}; \quad (22)$$

$$\psi_s \times i_s = |\psi_s| \cdot |i_s| \cdot \sin \chi = \psi_{s\alpha} i_{s\beta} - \psi_{s\beta} i_{s\alpha}, \quad (23)$$

где $\Psi_{s\alpha}$, $\Psi_{s\beta}$, $i_{s\alpha}$, $i_{s\beta}$ – проекции векторов тока и потокосцепления статора на оси неподвижной двухфазной системы координат.

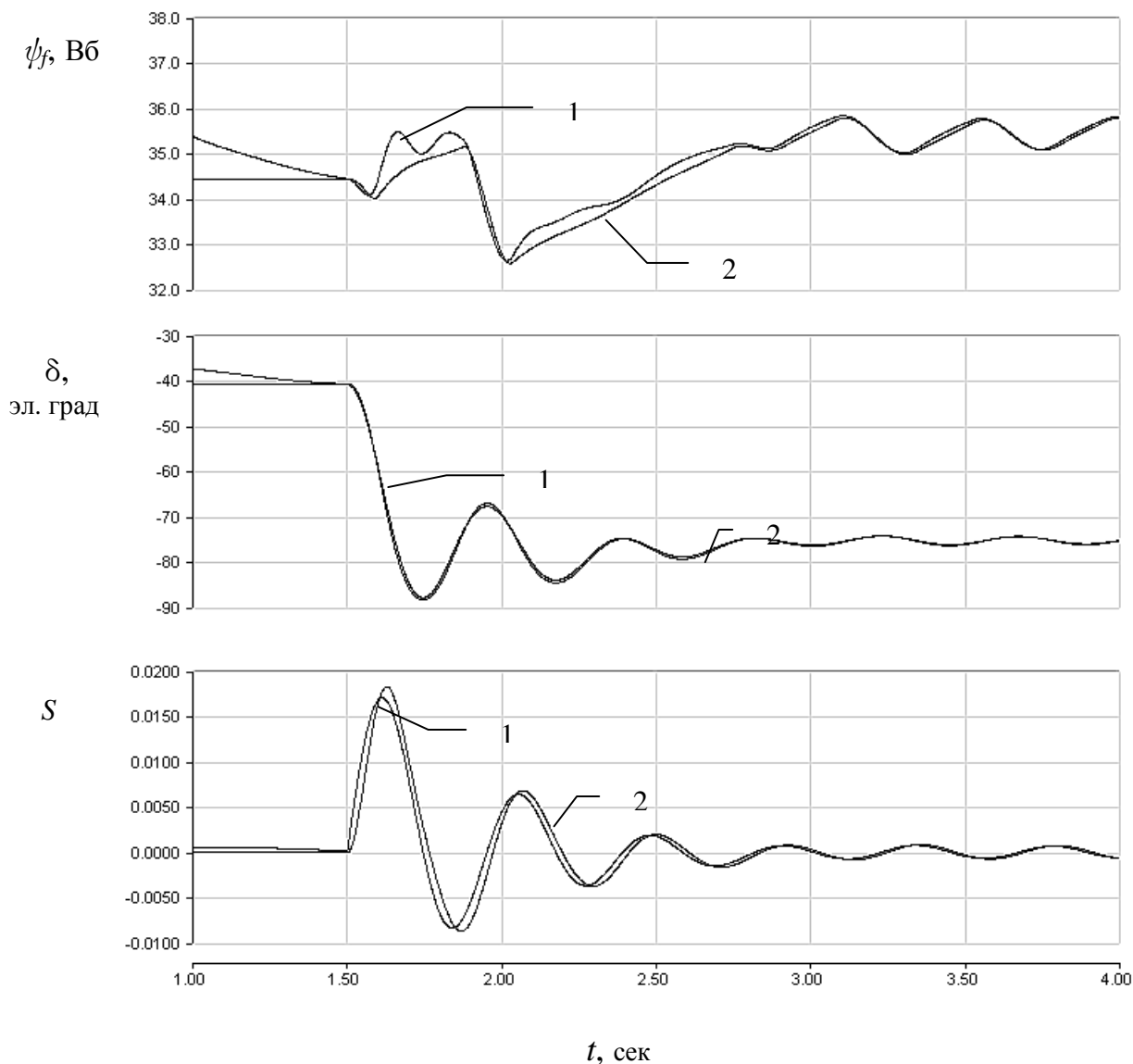


Рис. 1. Идентификация угла нагрузки и скольжения ротора при набросе нагрузки от 0.5 $M_{ном}$ до 2.0 $M_{ном}$:
 1 – теоретические изменения значений величин;
 2 – значения величин, вычисляемые косвенно

В результате подстановки (22) и (23) в (21) получается

$$\delta_0 = \arctg \frac{L_q \cdot (\psi_s \times i_s)}{|\psi_s|^2 - L_q \cdot (\psi_s \cdot i_s)}. \quad (24)$$

Согласно (16) – (18) формула (24) преобразуется к следующему виду:

$$\delta_0 = \arctg \frac{L_q \cdot \operatorname{Re}\{u_s i_s^*\}}{\omega_s^{-1} |u_s|^2 - L_q \cdot \operatorname{Im}\{u_s i_s^*\}}. \quad (25)$$

Подставляя δ_0 , определяемое по (25), в уравнение (10), получаем выражение для потокосцепления в начальный момент времени $\Psi_f(0)$:

$$\psi_f(0) = \omega_s^{-1} u_s \cos \delta_0 - L_\sigma (i_{sx} \cos \delta_0 - i_{sy} \sin \delta_0) + L_\sigma i_f. \quad (26)$$

Таким образом, для косвенного измерения угла нагрузки по формулам (14) используются сигналы датчика тока возбуждения (ДТВ), датчика напряжения возбуждения (ДНВ), датчика тока (ДТС) и напряжения (ДНС) статора.

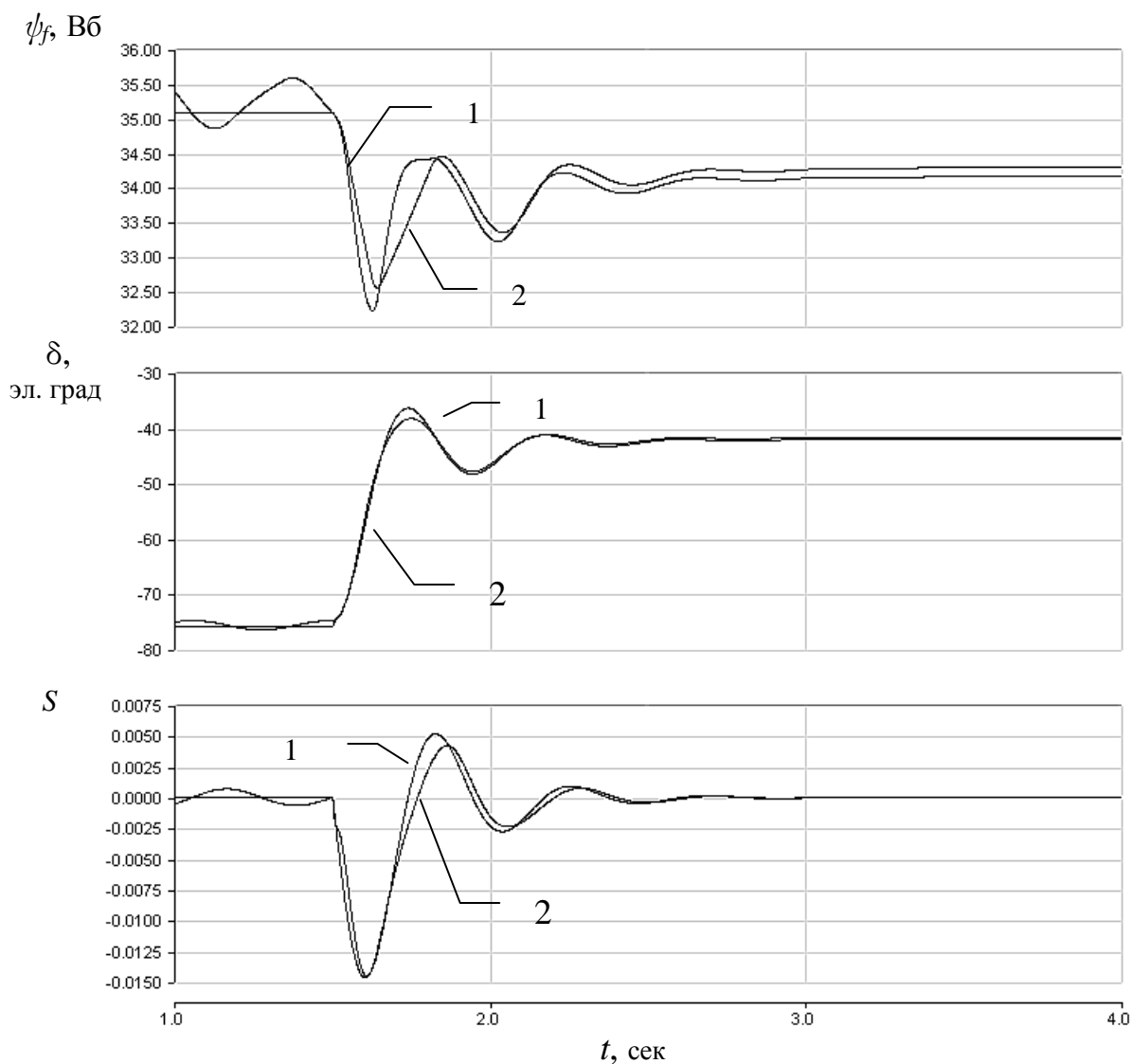


Рис. 2. Идентификация угла нагрузки и скольжения ротора при сбросе нагрузки от $2.0 M_{\text{ном}}$ до $0.5 M_{\text{ном}}$:
1 – теоретические изменения значений величин;
2 – значения величин, вычисляемые косвенно

Для проверки работоспособности идентификатора угла нагрузки, построенного по формулам (1), (14)–(26), в среде Simulink 4.0 была разработана соответствующая струк-

турная схема СД с идентификатором угла нагрузки и его производной, которая представлена на рис. 3.

В результате моделирования работы идентификатора при сбросе и набросе нагрузки СД получены графики вычисляемых по формулам (1), (14)–(26) потокосцепления обмотки возбуждения Ψ_f и угла нагрузки δ СД (рис. 3, 4). Также представлены графики изменения скольжения ротора S (производной угла нагрузки). При моделировании было введено допущение, что параметры схемы замещения СД известны точно и являются неизменными, а помеха на входе интегратора отсутствует.

Представленные графики свидетельствуют о высокой точности косвенного измерения угла нагрузки по токам и напряжениям в статорных контурах СД и в его обмотке возбуждения.

Система регулирования с идентификатором угла нагрузки представлена на структурной схеме (рис. 3). Регулятор тока возбуждения компенсирует постоянную времени обмотки возбуждения и обеспечивает требуемое быстродействие в контуре регулирования тока возбуждения. Регулятор реактивного тока (реактивной мощности) необходим для обеспечения экономичного режима работы двигателя. В тех случаях, когда узел нагрузки не испытывает дефицита реактивной мощности, оптимальным является режим работы СД, с $\cos \varphi$ близким к 0,9, обеспечивающий минимум электрических потерь и благоприятный тепловой режим двигателя. Регулятор напряжения обеспечивает стабилизацию напряжения в узле нагрузки путем изменения величины реактивной мощности, потребляемой или генерируемой двигателем в сеть.

Структурная схема системы регулирования с идентификатором угла нагрузки представлена на рис. 3.

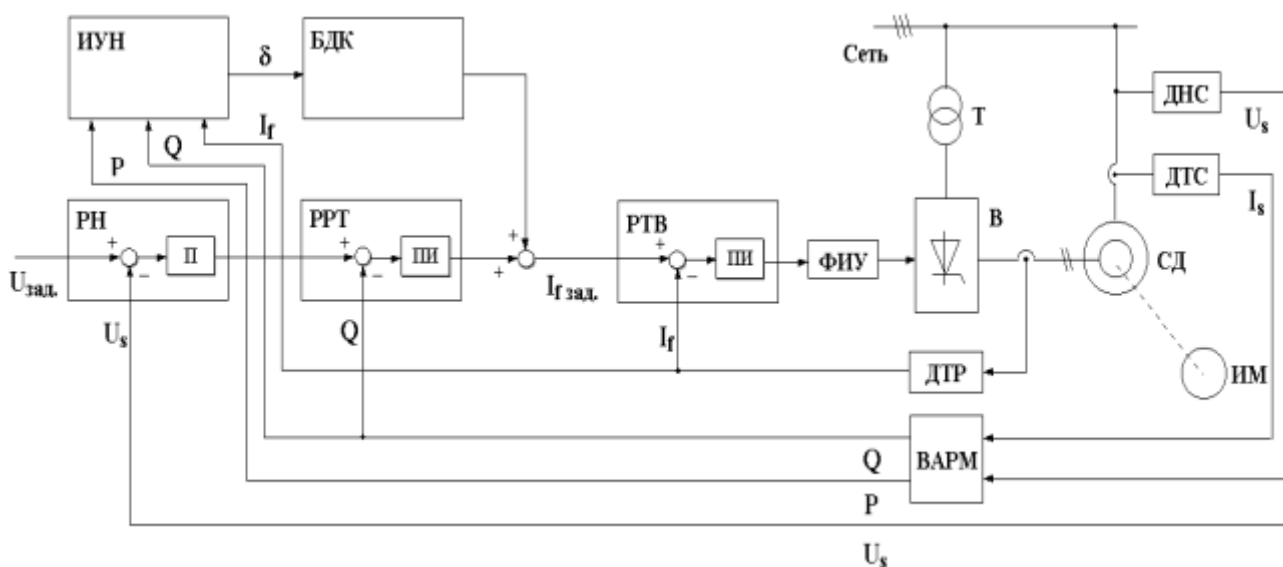


Рис. 3. Структурная схема системы регулирования возбуждения СД с идентификатором угла нагрузки

Блок демпфирования колебаний ротора СД предназначен для ограничения амплитуды колебаний ротора, снижения колебаний активной и реактивной мощности СД. Тем самым повышается устойчивость и надежность работы двигателя при ударном приложении нагрузки.

Регулирование тока возбуждения в целях демпфирования качаний ротора осуществляется по углу нагрузки δ и его производной, которые являются параметрами, непосредственно определяющими устойчивость работы двигателя. Угол нагрузки δ и его производная вычисляются идентификатором угла нагрузки.

Библиографический список

1. **Важнов, А.И.** Переходные процессы в машинах переменного тока / А.И. Важнов. – Л.: Энергия, 1980.
2. **Трещев, И.И.** Методы исследования машин переменного тока / И.И. Трещев. – Л.: Энергия, 1969.
3. **Петелин, Д.П.** Автоматическое управление синхронными электро-приводами / Д.П. Петелин. – М.: Энергия, 1968.
4. **Вейнгер, А.М.** Регулируемый синхронный электропривод / А.М. Вейнгер. – М. Энергоатомиздат, 1985.
5. **Слодарж, М.И.** Режимы работы, релейная защита и автоматика синхронных электродвигателей / М.И. Слодарж. – М.: Энергия, 1977.
6. **Лютер, Р.А.** Расчет синхронных машин / Р.А. Лютер. – Л.: Энергия, 1979.

*Дата поступления
в редакцию 02.07.2010*

S.E. Stepanov

THE CALCULATOR OF A CORNER OF LOADING OF SYNCHRONOUS ENGINES

In article the variant of construction of system of regulation of excitation of the synchronous engine as a loading corner is considered. The block diagramme, the mathematical description and results of modelling is resulted.

Key words: The synchronous engine, automatic control, loading corner.