

УДК 621.313.322

## ОБОБЩЕННАЯ ФУНКЦИОНАЛЬНАЯ СХЕМА СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ ПАРАМЕТРАМИ РЕЖИМА СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ИЗМЕНЕНИЕМ РЕАКТИВНОЙ МОЩНОСТИ СИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ И СТАТИЧЕСКИХ КОМПЕНСИРУЮЩИХ УСТРОЙСТВ

*В.И. Котенев, В.В. Кочетков*

Самарский государственный технический университет  
Россия, 443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244

E-mail: volodya163@mail.ru

*Разработана математическая модель системы электроснабжения, в которой учтены параметры трансформаторов, линии электропередачи, статических компенсирующих устройств, асинхронных и синхронных двигателей. На ее основе построена функциональная схема двухконтурной системы автоматического управления различными параметрами режима системы электроснабжения за счет непрерывного изменения напряжения возбуждения синхронного электродвигателя и дискретного переключения в фиксированные моменты емкости конденсаторной батареи. Система управления состоит из внутреннего контура регулирования возбуждения и внешнего контура регулирования параметра, по которому имеется внешняя обратная связь.*

**Ключевые слова:** *система электроснабжения, система автоматического управления, синхронный и асинхронный электродвигатель, конденсаторная батарея, реактивная мощность, линия электропередачи.*

Управление напряжением на шинах подстанции ступенчатым переключением банок конденсаторной батареи сопровождается значительной погрешностью [1]. С целью ее уменьшения обычно батарею делят на большое число частей, что сопровождается удорожанием статического компенсирующего устройства вследствие увеличения капитальных затрат на установку дополнительной коммутационной аппаратуры.

Известно [2, 3], что потребление реактивной мощности асинхронной нагрузкой растет линейно, а возобновляемая реактивная мощность конденсаторной батареи уменьшается по квадратичной зависимости. Поэтому в случае соизмеримости по мощности нагрузки с источником питания это может привести к ухудшению качества электроэнергии или в худшем случае к лавинообразному снижению напряжения и аварийному отключению электроприемников.

При комплексном подходе к управлению напряжением, когда «грубое» управление осуществляется переключением числа конденсаторных банок, а более точное – изменением напряжения возбуждения синхронных электродвигателей, уменьшаются затраты на установку дополнительной коммутационной аппаратуры, исключается перегрузка синхронных двигателей и улучшается качество электрической энергии.

---

*Виктор Иванович Котенев (д.т.н., проф.), профессор кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий».*

*Владимир Валерьевич Кочетков, аспирант.*

В данной работе рассматривается построение математической модели системы электроснабжения низкого и среднего напряжения (рис. 1) как объекта управления параметрами ее режима.

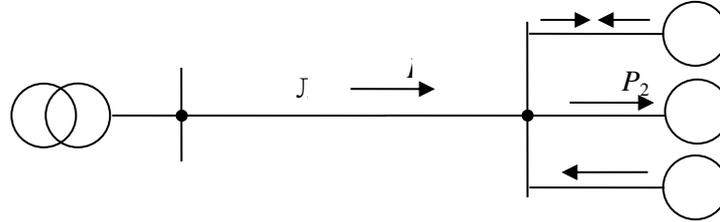


Рис. 1. Расчетная схема системы электроснабжения

На схеме обозначены: ЛЭП – линия электропередачи; СД – синхронный двигатель; АД – асинхронный двигатель; БК – батарея конденсаторов;  $U_1$ ,  $U_2$  – напряжения в начале и конце линии электропередачи;  $P_1$ ,  $P_2$  – активные мощности СД и АД;  $Q_1$ ,  $Q_2$ ,  $Q_3$  – реактивные мощности СД, АД и БК;  $P$ ,  $Q$  – суммарные значения активной и реактивной мощностей, протекающих по ЛЭП.

В системах электроснабжения такого вида можно пренебречь потерями и зарядной мощностью в ЛЭП. Если в схему входят несколько трансформаторов, то при неучете в них потерь холостого хода и последующего объединения ЛЭП и трансформаторов ее можно привести к схеме, представленной на рис. 1.

Реактивная мощность синхронного двигателя [4] с неявно выраженными полюсами

$$Q_1 = \frac{1}{x_d} (U_2 E_q \cos \theta - U_2^2).$$

В приращениях

$$\Delta Q_1 = k_3 \Delta U_2 + k_4 \Delta \theta + k_5 \Delta E_q, \quad (1)$$

где  $k_3 = \frac{E_{q0} \cos \theta_0 - 2U_{20}}{x_d};$

$$k_4 = \frac{U_{20} E_{q0}}{x_d} \sin \theta_0;$$

$$k_5 = \frac{U_{20} \cos \theta_0}{x_d}.$$

Здесь и далее индекс «0» обозначает величину, относительно которой произведена линеаризация.

Приращение активной мощности синхронного двигателя

$$\Delta P_1 = k_6 \Delta E_q + k_7 \Delta U_2 + k_8 \Delta \theta, \quad (2)$$

где  $k_6 = \frac{P_{см}}{E_{q0}};$

$$k_7 = \frac{P_{см}}{U_{20}};$$

$$k_8 = \frac{P_{\text{см}}}{\text{tg}\theta_0};$$

$$P_{\text{см}} = \frac{3U_{20}E_{q0}}{x_d}.$$

Приращение активной

$$P_2 = \sqrt{3}U_2 I_2 \cos\varphi_1$$

и реактивной мощностей индуктивной нагрузки

$$Q_2 = \sqrt{3}U_2 I_2 \sin\varphi_1;$$

$$\Delta Q_2 = U_{20} \sqrt{3} I_{20} \sin\varphi_1 \frac{\Delta U_2}{U_{20}} = \frac{U_{20}}{U_{20}} \Delta U_2$$

при изменении напряжения составит:

$$\Delta P'_2 = k_{10} \Delta U_2; \quad (3)$$

$$\Delta Q'_2 = k_{13} \Delta U_2, \quad (4)$$

где  $k_{10} = \frac{P_{20}}{U_{20}};$

$$k_{13} = \frac{Q_{20}}{U_{20}}.$$

Реактивная мощность конденсаторной батареи

$$Q_3 = \omega C U_2^2$$

при изменении напряжения и емкости составит

$$\Delta Q_3 = k_{15} \Delta C + k_{16} \Delta U_2, \quad (5)$$

где  $k_{15} = \omega U_{20}^2;$

$$k_{16} = 2\omega C_0 U_{20}.$$

Полные значения активной и реактивной мощностей составляют:

$$P = P_1 + P_2;$$

$$Q = Q_1 - Q_2 + Q_3.$$

В приращениях:

$$\Delta P = \Delta P_1 + \Delta P_2; \quad (6)$$

$$\Delta Q = \Delta Q_1 - \Delta Q_2 + \Delta Q_3; \quad (7)$$

$$\Delta P_2 = \Delta P'_2 + \Delta P''_2;$$

$$\Delta Q_2 = \Delta Q'_2 + \Delta Q''_2.$$

Приращения активной мощности  $\Delta P''_2$  и реактивной  $\Delta Q''_2$  при переключении асинхронной нагрузки можно найти расчетно либо экспериментально.

Ток в линии электропередачи

$$I = I_r - jI_x$$

состоит из активной составляющей

$$I_r = \frac{P}{\sqrt{3}U_2}$$

и реактивной

$$I_x = \frac{Q}{\sqrt{3}U_2}$$

Падение напряжения в линии электропередачи

$$\Delta U = \sqrt{3}IZ = \sqrt{3}(I_r - I_x)(r + jx) = \Delta U_r + j\Delta U_x$$

определяется током и полным сопротивлением

$$Z = r + jx = r + j\omega L,$$

где  $\omega$  – круговая частота сети;  $r$ ,  $x$  – активное и индуктивное сопротивления ЛЭП и трансформатора.

Активную и реактивную составляющие падения напряжения можно выразить через активную и реактивную мощности:

$$\Delta U_r = \frac{rP + xQ}{U_2}; \tag{8}$$

$$\Delta U_x = \frac{xP - rQ}{U_2}. \tag{9}$$

Модульная величина падения напряжения

$$\Delta U = \frac{\sqrt{(r^2 + x^2)(P^2 + Q^2)}}{U_2}. \tag{10}$$

Для определения отклонения напряжения в узле нагрузки составим векторную диаграмму токов и напряжений в ЛЭП, которая без учета зарядной мощности представлена на рис. 2.

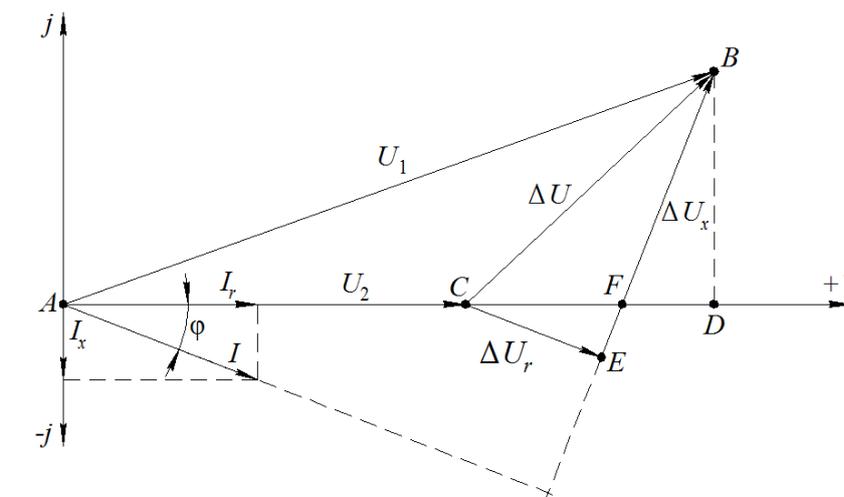


Рис 2. Векторная диаграмма линии электропередачи

Падение напряжения в линии электропередачи можно найти из  $\Delta ABC$ :

$$BC^2 = AB^2 - AC^2 - 2 \cdot AC \cdot CD. \quad (11)$$

В этом соотношении неизвестный отрезок

$$CD = CF + ED$$

можно выразить через отрезки  $CE$ , пропорциональный  $\Delta U_r$ , и  $BF$ , пропорциональный  $\Delta U_x$ .

Из треугольника  $CFE$  получаем:

$$\begin{aligned} CF &= \frac{CE}{\cos \phi}; \\ FE &= CE \cdot \operatorname{tg} \phi, \end{aligned} \quad (12)$$

где  $\phi = \operatorname{arctg} \frac{Q}{P}$ . (12)

Из треугольника  $FBD$  находим

$$FD = (BE - FE) \sin \phi. \quad (13)$$

Подставив (12) в (13), получим

$$FD = (BE - CE \operatorname{tg} \phi) \sin \phi.$$

Длина отрезка

$$CD = CF + FD = \frac{CE}{\cos \phi} + (BE - CE \operatorname{tg} \phi) \sin \phi,$$

или

$$CD = BE \sin \phi + CE \left( \frac{1}{\cos \phi} - \operatorname{tg} \phi \sin \phi \right). \quad (14)$$

В результате подстановки (14) в (11) получим

$$BC^2 = AB^2 - AC^2 - 2 \cdot AC \cdot \left[ BE \sin \phi + CE \left( \frac{1}{\cos \phi} - \operatorname{tg} \phi \sin \phi \right) \right].$$

Это выражение с учетом соотношений (8) – (10) и обозначений на рис. 2 принимает вид

$$\begin{aligned} \frac{(r^2 + x^2)(P^2 + Q^2)}{U_2^2} &= U_1^2 - U_2^2 - 2[(xP - rQ) \sin(\operatorname{arctg} q) + \\ &+ (rP + xQ) \frac{1}{\cos(\operatorname{arctg} q)} - q \sin(\operatorname{arctg} q)], \end{aligned} \quad (15)$$

где  $q = \frac{Q}{P}$ .

После подстановки в (15) соотношений

$$\cos(\operatorname{arctg} q) = a_0 P; \quad \sin(\operatorname{arctg} q) = a_0 Q; \quad a_0 = (P^2 + Q^2)^{-0.5}$$

и соответствующих преобразований будем иметь

$$U_2^4 + (a_1 - U_1^2)U_2^2 + a_2 = 0,$$

где  $a_1 = 2(xPQ + r(P^2 - Q^2))$ ,  $a_2 = a_0^{-2}(r^2 + x^2)$ .

Напряжение в узле нагрузки можно найти из выражения

$$U_2 = \left( a_3 + (a_3^2 - a_2)^{0,5} \right)^{0,5},$$

где  $a_3 = \frac{1}{2}(U_1^2 - a_1)$ .

В результате линеаризации этого выражения получим:

$$\Delta U_2 = k_{18}\Delta P + k_{19}\Delta Q + k_{20}\Delta U_1; \quad (16)$$

$$k_{18} = -a_4 \left( a_0 a_5 x Q_0 + a_5 P_0 \left( 2a_0 r - \frac{a_0^2 a_1}{2} - \frac{a_6}{a_5} \right) \right);$$

$$k_{19} = -a_4 \left( a_0 a_5 x P_0 - a_5 Q_0 \left( 2a_0 r + \frac{a_0^2 a_1}{2} + \frac{a_6}{a_5} \right) \right);$$

$$k_{20} = a_4 a_5 U_{01};$$

$$a_4 = \frac{1}{2} \left( a_3 + (a_3^2 - a_2)^{0,5} \right)^{-0,5};$$

$$a_5 = 1 + (a_3^2 - a_2)^{-0,5};$$

$$a_6 = (r^2 + x^2) (a_3^2 - a_2)^{-0,5}.$$

Переменные  $P_0$ ,  $Q_0$ ,  $U_{01}$ , входящие в коэффициенты уравнения (16), имеют нулевые индексы, относительно которых произведена линеаризация.

Отклонение напряжения в начале линии от протекания реактивной мощности по сопротивлению электрической системы  $x_c$  составит:

$$\Delta U_1 = k_{21}\Delta Q, \quad (17)$$

где  $k_{21} = \frac{x_c}{U_{10}}$ .

Структурная схема системы электроснабжения (рис. 3) построена на основе структурной схемы синхронного двигателя [5]. Она дополнена элементами, которые соответствуют уравнениям (1) – (7), (16), (17).

Недостающие величины, входящие в состав структурной схемы синхронного двигателя, приведены в [5].

Обобщенная функциональная схема системы автоматического управления параметрами режима системы электроснабжения представлена на рис. 4. В ее состав входят: модель системы электроснабжения СЭС, тиристорный возбудитель ТВ, регулятор возбуждения РВ, датчик тока возбуждения ДТВ, регулятор параметров РП, датчик напряжения  $DU_2$ , датчик угла нагрузки  $D\theta$ , датчики реактивной мощности синхронного двигателя  $DQ_1$  и узла нагрузки  $DQ$ , датчики активной мощности синхронного двигателя  $DP_1$  и узла нагрузки  $DP$ , датчики углов  $D\varphi_1$  и  $D\varphi$ .

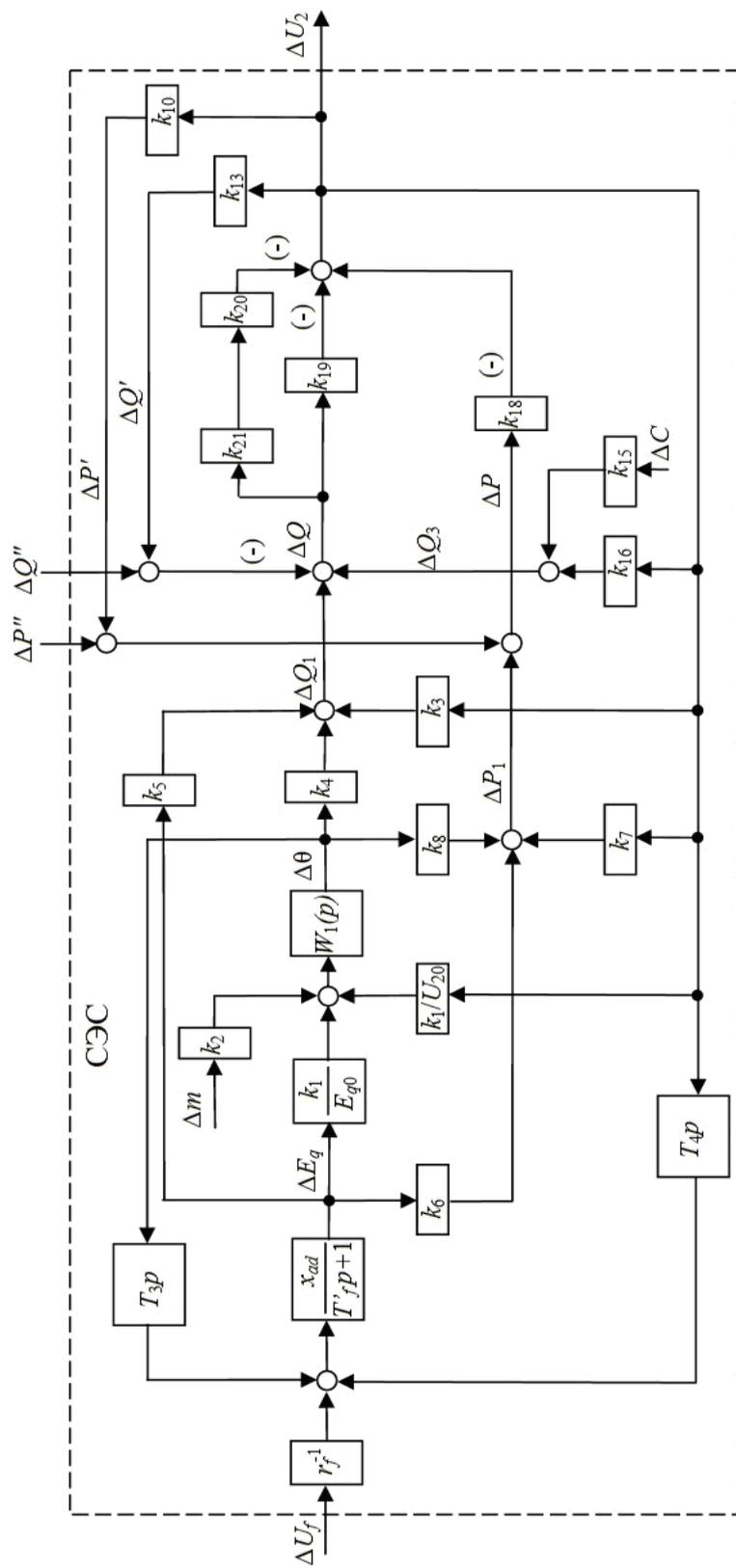


Рис. 3. Структурная схема системы электроснабжения

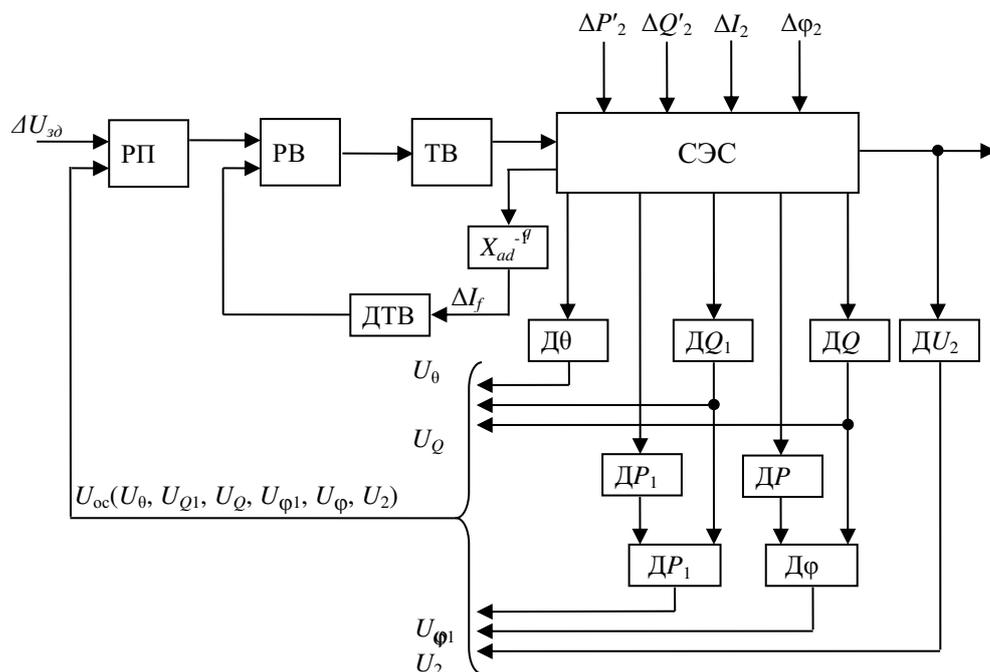


Рис. 4. Функциональная схема системы автоматического управления параметрами режима системы электроснабжения

**Выводы.** На основе математической модели системы электроснабжения построена функциональная схема системы автоматического управления различными параметрами: углом нагрузки, реактивной мощностью и коэффициентом мощности синхронного двигателя, а также реактивной мощностью, коэффициентом мощности и напряжением узла нагрузки.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Федоров А.А., Каменева В.В. Основы электроснабжения промышленных предприятий. – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 472 с.
2. Сыромятников И.А. Режимы работы асинхронных и синхронных двигателей. – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 240 с.
3. Слодарж М.И. Режимы работы, релейная защита и автоматика синхронных электродвигателей. – М.: Энергия, 1977. – 216 с.
4. Веников В.А. Переходные электромеханические процессы в электрических системах. – М.: Высш. шк., 1985. – 535 с.
5. Котенев В.И., Котенев А.В., Осипов В.С., Кочетков В.В. Математическая модель синхронной машины при управлении ее возбуждением // Вестник Самарского государственного технического университета. Сер. Технические науки. – 2012. – № 2 (34). – 128-135 с.
6. Петелин Д.П. Автоматическое регулирование возбуждения синхронных двигателей. – М.-Л.: Госэнергоиздат, 1961. – 194 с.
7. Юрганов А.А., Кожеевников В.А. Регулирование возбуждения синхронной машины. – М.: Наука, 1996. – 138 с.
8. Михневич Г.В. Синтез структуры системы автоматического регулирования возбуждения синхронных машин. – М.: Высш. шк., 1978. – 222 с.

Статья поступила в редакцию 4 октября 2014 г.

## GENERALIZED FUNCTIONAL DIAGRAM OF THE AUTOMATIC CONTROL SYSTEM PARAMETERS OF THE POWER SYSTEM MODE ON ACCOUNT OF CHANGES REACTIVE POWER OF SYNCHRONOUS MOTOR AND STATIC COMPENSATING DEVICE

*V.I. Kotenev, V.V. Kochetkov*

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

*The mathematical model of the electric power system is developed; this model considers the parameters of transformers, power line, static compensating devices, synchronous and asynchronous motors. The functional diagram of double-loop automatic control system is developed on the basis of this model; this automatic system controls various parameters of the power supply system mode by continuous change of drive voltage of the synchronous motor and discrete switching of capacitor bank capacity at fixed periods of time. The control system consist of two loops: the inner loop controls driving voltage and the outer loop controls the parameter with external feedback.*

**Keywords:** *power system, automatic control system, synchronous and in duction motor, capacitor bank, reactive power, power line.*

---

*Viktor I. Kotenev (Dr. Sci. (Techn.)), Professor.  
Vladimir V. Kochetkov, Postgraduate student.*