
ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ КОМПЛЕКСЫ И СИСТЕМЫ

УДК 621.335

В.И. Котенев, А.В. Котенев, В.В. Кочетков, Д.А. Елькин

СИСТЕМА АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ ПАРАМЕТРАМИ РЕЖИМА УЗЛА НАГРУЗКИ С ОБРАТНЫМИ СВЯЗЯМИ ПО ПЕРЕМЕННЫМ СИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ

Самарский государственный технический университет

Одно из направлений снижения потерь электрической энергии при ее передаче связано с обеспечением нормативного коэффициента реактивной мощности при работе оборудования. Актуальной задачей при этом является разработка систем автоматического управления (САУ) параметрами режима узла нагрузки. В статье рассмотрены САУ основными параметрами режима узла нагрузки (реактивной мощностью, напряжением, коэффициентом реактивной мощности) с различными обратными связями по переменным синхронного двигателя. Приведены математические модели узла нагрузки, в которых учтены уравнения силовых трансформаторов, линий электропередачи, асинхронных двигателей и статических компенсирующих устройств. Рассмотрен синтез регуляторов одноконтурной и двухконтурной системы управления. Выполнена оценка влияния неустойчивости напряжения в сети на величину реактивной мощности синхронного двигателя и на величину погрешности системы управления коэффициентом реактивной мощности. На основе полученных результатов сформулированы рекомендации по конструкции САУ параметрами режима узла нагрузки с синхронными электродвигателями, работающими в условиях ударных нагрузок.

Ключевые слова: внутренний угол, синхронный двигатель, узел нагрузки, управление.

1. Введение

Разработка систем автоматического управления (САУ) параметрами режима узла нагрузки относится к актуальным проблемам, так как их применение обеспечивает работу оборудования с нормативным коэффициентом реактивной мощности и тем самым снижает потери электрической энергии в элементах сети при ее транспортировке.

Основными элементами этих систем являются статические компенсирующие устройства (конденсаторные батареи) и синхронные двигатели. Синхронные электродвигатели, несмотря на более сложную конструкцию по сравнению с асинхронными двигателями, получили достаточно широкое распространение в промышленности благодаря комплексу преимуществ, а именно: возможности работы с генерацией реактивной мощности; меньшей чувствительности к колебаниям напряжения в сети, так как электромагнитные моменты пропорциональны напряжению, а не квадрату напряжения, как у асинхронного двигателя; частота вращения при высокой перегрузочной способности двигателя остается неизменной в пределах всего диапазона изменения момента нагрузки.

Синхронные электродвигатели используются в электроприводах различных производственных механизмов с постоянной и переменной нагрузкой. К первой группе механизмов относятся вентиляторы, турбокомпрессоры, насосы, воздухоподувки. Ко второй – поршневые компрессоры, шаровые мельницы, трубопрокатные агрегаты и т.п.

II. Обзор существующих решений

Существующие системы автоматического регулирования возбуждения синхронных двигателей конструируются по разным алгоритмам, с помощью которых обеспечивается управление одной координатой или комбинацией нескольких координат: током возбуждения; внутренним углом двигателя; коэффициентом мощности; активным, реактивным или полным током статора и т. д. В синхронных электроприводах с переменной (ударной) нагрузкой предпочтение отдается системам управления в функции внутреннего угла, вследствие их более высокого быстродействия [1, 2]. Такие системы возбуждения могут быть применены и в электроприводах с постоянной нагрузкой.

Существующие математические модели системы регулирования возбуждения синхронной машины [3-8] конструируются без учета колебания напряжения в сети и без учета обратной связи регулируемых координат машины через другие элементы узла нагрузки, что может негативно отразиться на качестве регулирования.

Математическая модель узла нагрузки при изменении возбуждения синхронного двигателя с учетом вышеперечисленных влияний опубликована в работах 2012-2014 гг. [9, 10]. Функциональные схемы систем управления параметрами режима системы электроснабжения за счет изменения реактивной мощности синхронного двигателя рассмотрены авторами позднее [11-13]. В данной работе рассматриваются САУ параметрами режима узла нагрузки, которые работают в условиях питания нестабильным напряжением и учитывают обратное влияние параметров элементов

узла нагрузки: линии электропередачи; силового трансформатора; асинхронного электродвигателя; конденсаторной батареи.

III. Описание предлагаемой САУ и ее передаточные функции

Структурные схемы САУ параметрами режима узла нагрузки с отрицательной обратной связью (ООС) по току возбуждения ΔI_f представлены на рис. 1а, а с ООС по ΔI_f и внутреннему углу $\Delta \theta$ синхронного двигателя на рис. 1 б. Структурная схема узла нагрузки как объекта управления приведена на рис. 2.

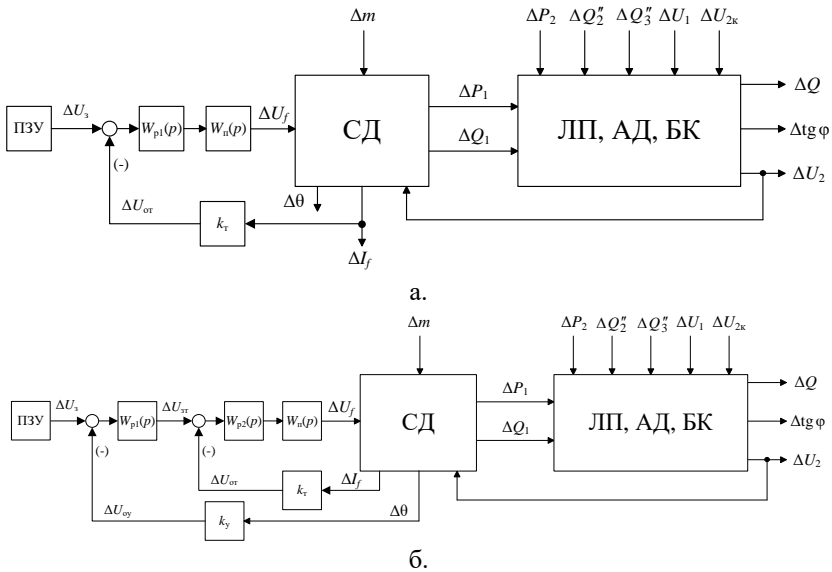


Рис. 1. Структурная схема системы САУ параметрами режима узла нагрузки: с ООС по ΔI_f (а); с ООС по ΔI_f и $\Delta \theta$ (б)

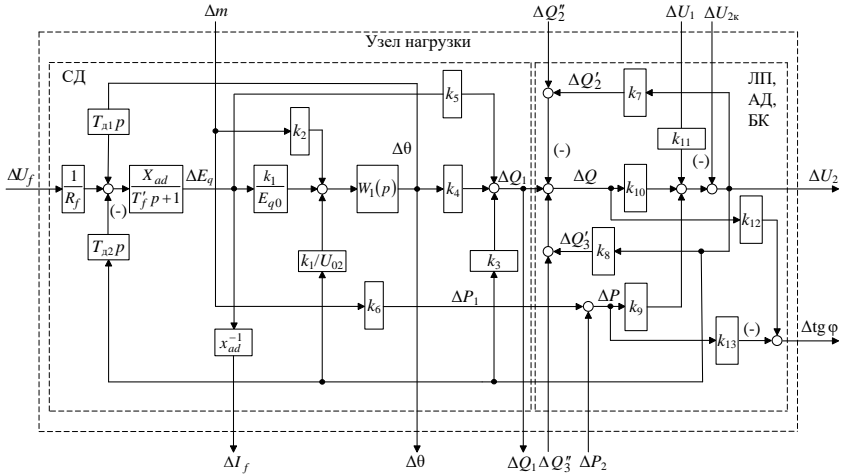


Рис. 2. Структурная схема узла нагрузки

На рис. 2 использованы следующие обозначения: Q_1 , P_1 – реактивная и активная мощность синхронного двигателя; θ_0 , U_{02} , Q_{02} , Q_{03} – установившиеся значения угла, напряжения узла нагрузки, реактивные мощности асинхронных двигателей и конденсаторной батареи соответственно; Δm – приращение относительного значения мощности нагрузки синхронного двигателя; R_b , R_T – активные сопротивления линии электропередачи и трансформатора; x_b , x_T – индуктивные сопротивления линии и трансформатора; R_f – активное сопротивление обмотки возбуждения; x_{ad} – индуктивное сопротивление взаимной индукции между обмотками возбуждения и обмотками статора; x_d – индуктивное сопротивление по продольной оси синхронного двигателя; E_q – ЭДС по оси q; T_f' – постоянная времени обмотки возбуждения при замкнутых накоротко обмотках статора; $W_{p1}(p)$, $W_{p2}(p)$, $W_{\Pi}(p)$, k_t , k_y – передаточные функции и коэффициенты передачи соответственно регуляторов угла и тока возбуждения, тиристорного преобразователя, цепей обратных связей по току возбуждения и внутреннему углу; ПЗУ – программно-задающее устройство соответствующего параметра режима узла нагрузки ΔQ , $\Delta \text{tg } \varphi$ или ΔU_2 .

Постоянные времени, коэффициенты передачи и передаточная функция равны следующим значениям:

$$T_3 = \frac{3 \cdot k_0^2}{2 \cdot \omega x_d \cdot R_f}; \quad T_4 = \frac{3}{2} \cdot \frac{\cos \theta_0}{x_d}; \quad \omega = 2\pi f; \quad k_0 = \sqrt{3} \cdot x_{ad}; \quad k_1 = -tg \theta_0;$$

$$k_2 = -\frac{1}{\cos \theta_0}; \quad k_3 = \frac{E_{0q} \cdot \cos \theta_0}{x_d}; \quad k_4 = -\frac{U_{02} \cdot E_{0q} \cdot \sin \theta_0}{x_d}; \quad k_5 = \frac{U_{02} \cdot \cos \theta_0}{x_d};$$

$$k_6 = P_{эм}; \quad k_7 = \frac{2,3 \cdot Q_{02}}{U_{02}}; \quad k_8 = \frac{2 \cdot Q_{03}}{U_{02}}; \quad k_9 = -\frac{R_l + R_r}{U_{02}}; \quad k_{10} = \frac{x_l + x_r}{U_{02}};$$

$$k_{11} = \frac{U_{02}}{2U_{02} - U_{01}}; \quad k_{12} = P_0^{-1}; \quad k_{13} = Q_0 \cdot P_0^{-1}; \quad W_1 = \frac{1}{T_1^2 \cdot p^2 + 2 \cdot \varepsilon_1 \cdot T_1 \cdot p + 1}.$$

Недостающие значения можно найти в опубликованных работах [11-13].

Объект управления удобно представить двумя звеньями с передаточными функциями:

$$W_f(p) = \frac{\Delta I_f(p)}{\Delta U_f(p)} = \frac{k_f \cdot (T_1^2 \cdot p^2 + 2 \cdot \varepsilon_1 \cdot T_1 \cdot p + 1)}{R_f \cdot (T_\mu \cdot p + 1)(T_3 \cdot p + 1)(T_1^2 \cdot p^2 + 2 \cdot \varepsilon_1 \cdot T_1 \cdot p + 1)}; \quad (1)$$

$$W_H(p) = \frac{\Delta \theta(p)}{\Delta I_f(p)} = \frac{k_0 \cdot k_1}{E_{0q}} \cdot W_1(p), \quad (2)$$

где k_f и T_μ – коэффициенты передачи и постоянная времени тиристорного преобразователя.

Вычисленные значения параметров передаточных функций $W_f(p)$ в зависимости от величины момента инерции J синхронного привода приведены в табл. 1.

Таблица 1.
Параметры передаточной функции

Параметры		Варианты и моменты инерции				
		T_1, c	ε_1	T_2, c	ε_2	T_3, c
Вариант 1	$J=31,9 \text{ кг}\cdot\text{м}^2$	0,075	0,38	0,046	0,27	0,97
Вариант 2	$J=535 \text{ кг}\cdot\text{м}^2$	0,31	0,1	0,2	0,22	0,91

Передаточная функция (1) аппроксимирована более простыми выражениями:

$$W_{la}(p) = \frac{k_r}{R_f \cdot (T_\mu \cdot p + 1)(T_3 \cdot p + 1)}. \quad (3)$$

Погрешность аппроксимации не превышает $\Delta L = 3$ дБ, если частоты сопряжения $\lg T^{-1}_1$, $\lg T^{-1}_2$ расположены левее относительно частоты среза разомкнутой системы $\lg \omega_{ср}$ не менее чем на 1,5 декады.

Синтез регулятора угла производится в два этапа. На первом этапе регулятор выбирается методом логарифмических частотных характеристик с использованием аппроксимированных частотных характеристик объекта управления (3) так, чтобы среднечастотный участок результирующей амплитудно-частотной характеристики с наклоном -20 дБ/дек располагался по возможности симметрично относительно частоты среза и имел протяженность влево и вправо от нее на величину не менее:

$$h = \frac{1}{2} \cdot \lg \frac{1 + \sin \Delta\varphi_d}{1 - \sin \Delta\varphi_d}, \quad (4)$$

где $\Delta\varphi_d$ – величина запаса устойчивости по фазе [14].

На втором этапе параметры регулятора уточняются по результатам решения минимаксной задачи:

$$\Delta\theta(T_{p1}^*, T_{p2}^*, T_{pm}^*, t_m) = \min_{t_m > 0} \left[\max \Delta\theta(T_{p1}, T_{p2}, T_{pm}^*, t_m) \right], \quad (5)$$

где T_{p1} , T_{p2} , T_{pm}^* – постоянные времени регулятора; * – индекс оптимальных величин; t_m – время первого достижения максимального значения регулируемой величины.

На этом этапе используются частотные характеристики неаппроксимированного объекта управления (1).

Передаточные функции регуляторов, их параметры, время регулирования t_{p1} , перерегулирование σ по управляющему воздействию $\Delta U_3(t) = 0,1(t)$ В, а также время регулирования t_{p2} , величина динамического провала угла $\Delta\theta_{\max}$ при изменении нагрузки $\Delta m = 0,1(t)$ для двух вариантов объекта управления в одноконтурной и двухконтурной системе управления приведены в таблице 2.

Значения параметров элементов структурной схемы составляют: $R_f = 0,18$ Ом; $X_{ad} = 30$ Ом; $T'_f = 0,367$ с; $U_{02} = 6300$ В; $T_{d1} = 162$ А·с; $T_{d2} = 0,034$

с/Ом; $\theta_0 = 0,64$ рад; $E_{q0} = 11800$ В; $k_1 = 0,75$; $k_2 = 1,25$; $k_3 = -0,078$ кА; $k_4 = -1300$ кВА; $k_5 = 0,147$ кА; $k_6 = 274$ кВА; $k_7 = 0,26$ кА; $k_8 = 0,1$ кА, $k_9 = -0,014$ кА⁻¹; $k_{10} = -0,22$ кА⁻¹; $k_{11} = 1,04$; $k_{12} = 4,05 \cdot 10^{-4}$ кВА⁻¹; $k_{13} = 2,2 \cdot 10^{-4}$ кВА⁻¹. Мощность узла нагрузки в установившемся режиме: $P_0 = 2277$ кВт, $Q_0 = 911$ кВАр, $\text{tg } \varphi_3 = 0,4$.

Таблица 2.
Передаточные функции регуляторов

Число контуров	Вариант ОУ	Передаточные функции и показатели качества						
		$W_{p1}(p)$	$W_{p2}(p)$	$t_{p1}, \text{с}$	$\sigma, \%$	$t_{p2}, \text{с}$	$\Delta\theta_{\text{max}}, ^\circ$	
Один	№1	1	$(T_6 p + 1)^2 (T_7 p + 1)$	$T_n = 10^{-3} \text{ с}$ $T_6 = 0,064 \text{ с}$ $T_7 = 0,1 \text{ с}$	0,17	40	0,07	0,37
	№2	1	$T_n p (T_\phi p + 1)^2$ $T_\phi = 10^{-3} \text{ с}$	$T_n = 3 \cdot 10^{-3} \text{ с}$ $T_6 = 0,1 \text{ с}$ $T_7 = 0,075 \text{ с}$	0,07	30	0,25	0,25
Два	№1	$\frac{0,97 p + 1}{0,01 p}$	$(T_6 p + 1)(T_7 p + 1)$	$T_n = 0,03 \text{ с}$ $T_6 = 0,1 \text{ с}$ $T_7 = 0,075 \text{ с}$	0,2	37	0,45	0,95
	№2	$\frac{0,91 p + 1}{0,01 p}$	$T_n p (T_\phi p + 1)$ $T_\phi = 10^{-3} \text{ с}$	$T_n = 0,009 \text{ с}$ $T_6 = 0,51 \text{ с}$ $T_7 = 0,126 \text{ с}$	0,23	36	0,45	0,18

IV. Заключение

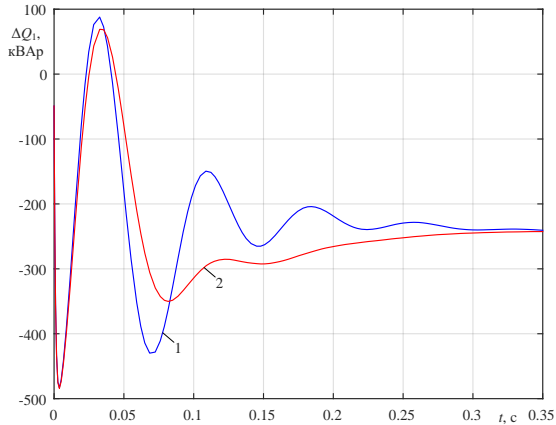
Из анализа данных в табл. 2 следует, что при обработке возмущений, например, по $\Delta m(t)$, с наибольшей быстротой (электроприводы с ударной нагрузкой) систему управления следует конструировать по одноконтурному варианту. В остальных случаях, где не требуется высокого быстродействия, необходимо ориентироваться на двухконтурные системы, у которых показатели качества достаточно хорошие, а регуляторы контуров имеют более простую структуру; внутренний контур регулирования имеет ПИ-регулятор, а внешний – ПИД-регулятор.

При выборе алгоритма управления следует учитывать, что в системе с ООС по внутреннему углу двигателя отклонение реактивной мощности (рис. 3, а) в установившемся режиме при изменении напряжения в сети на 10% от номинальной величины значительно больше по сравнению с системой без этой связи (рис. 3, б). Погрешность регулирования коэффициента реактивной мощности в первом случае составляет 24%, а во втором – всего 4,4 %.

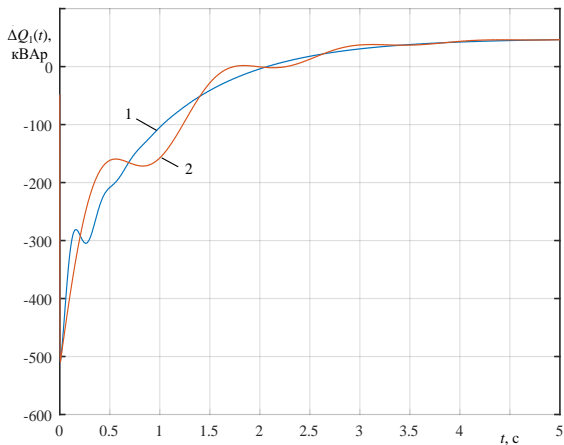
Значительное увеличение реактивной мощности в системе с ООС по углу объясняется тем, что в этом случае синхронный двигатель работает с

постоянными значениями внутреннего угла $\theta_0 = \text{const}$ и нагрузки $P_{0c} = \text{const}$. Поэтому при увеличении напряжения в сети U_2 происходит уменьшение E_q согласно уравнения угловой характеристики синхронного двигателя:

$$\frac{E_q \cdot U_c}{x_d} \cdot \sin \theta_0 = P_c. \quad (6)$$



а.



б.

Рис. 3. Переходные характеристики в системе с обратной связью по углу (а) и без такой связи (б) при увеличении напряжения на десять процентов $\Delta U_2(t)=600$ В:

1 – первый вариант объекта управления, 2 – второй вариант

Системы управления параметрами режима узла нагрузки с синхронными электродвигателями, работающими в условиях ударных нагрузок и которым при этом требуется высокое быстродействие, следует конструировать с внутренней ООС по углу. В остальных случаях – по двухконтурному варианту с целью получения более простых регуляторов общепромышленного применения, что упрощает их наладку и обслуживание.

При значительных колебаниях напряжения, когда отклонения реактивной мощности недопустимо большие, следует отказаться от систем с ООС по углу и перейти на системы управления с ООС по реактивной мощности.

© Котенев В.И., 2018

© Котенев А.В., 2018

© Кочетков В.В., 2018

© Елькин Д.А., 2018

Библиографический список

- [1] Веников В.А. Переходные электромеханические процессы в электрических системах. М.: Высшая школа, 1985. – 535 с.
- [2] Петелин Д.П. Автоматическое регулирование возбуждения синхронных двигателей. Л.: Госэнергоиздат, 1961. – 94 с.
- [3] Абрамович Б.Н., Круглый А.А. Возбуждение, регулирование и устойчивость синхронных двигателей. Л.: Энергоатомиздат. Ленинград. отд., 1983. – 128 с.
- [4] Глебов И.А. Системы возбуждения мощных синхронных машин. Л.: Наука, 1979. – 312 с.
- [5] Шварц Г.Р., Голубовский А.В., Мигачева Л.А., Рассказов Ф.Н. Оптимизация и повышение энергоэффективности электроприводных КС МГ // Газовая промышленность. 2005. № 12. С. 76-78.
- [6] Михнечвич Г.В. Синтез структуры системы автоматического регулирования возбуждения синхронных машин. М.: Высшая школа, 1978. – 222 с.
- [7] Шварц Г.Р., Абакумов А.М., Мигачева Л.А., Рассказов Ф.Н., Кузнецов П.К. Применение регулируемого электропривода в технологиях транспорта газа и нефти. М.: Машиностроение, 2008. – 240 с.
- [8] Юрганов А.А., Кожевников В.А. Регулирование возбуждения синхронной машины. М.: Наука, 1996. – 138 с.
- [9] Котенев В.И., Котенев А.В., Осипов В.С., Кочетков В.В. Математическая модель синхронной машины при управлении ее возбуждением. Самара: Вестник СамГТУ. Серия Технические науки. 2012. № 2 (34), С. 128-135.
- [10] Котенев В.И., Осипов В.С., Кочетков В.В. Обобщенная математическая модель узла нагрузки для управления параметрами режимов в системе электропитания // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. 2014. № 5. С.103-106.
- [11] Котенев В.И., Кочетков В.В. Обобщенная функциональная схема САУ параметрами режима СЭС и изменением реактивной мощности СД и компенсиру-

- ющих устройств. Самара: Вестник СамГТУ. Серия Технические науки. 2014. № 4 (44). С. 122-129.
- [12] Kotenev V.I., Kochetkov V.V., Elkin D.A. The reactive power control of the power system load node at the voltage instability of the power supply // International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON-2017), June 29-30, 2017, Astana, Kazakhstan. С. 1-17.
- [13] Kotenev V.I., Kotenev A.V., Kochetkov V.V., Elkin D.A. Electrical engineering unit for the reactive power control of the load bus at the voltage instability // Journal of Physics: Conference series. 2018. vol. 944. Pp. 1-17.
- [14] Абакумов А.М. Системы управления электромеханическими преобразователями и электротехнологическими установками: учебное пособие. Самара: СамГТУ, 2013. – 192 с.

V.I. Kotenev, A.V. Kotenev, V.V. Kochetkov, D.A. Elkin

**AUTOMATIC CONTROL SYSTEM OF LOAD NODE
MODE PARAMETERS WITH FEEDBACK
ON SYNCHRONOUS MOTOR VARIABLES**

Samara State Technical University,
Samara, Russia

Abstract. One of the ways to reduce the loss of electric energy during its transmission is associated with the provision of a standard reactive power factor during equipment operation. The urgent task is the development of automatic control systems (ACS) parameters of the load node mode. The article discusses the ACSs with the main parameters of the load node mode (reactive power, voltage, reactive power factor) with various feedbacks on alternating synchronous motors. Mathematical models of the load node are given, which take into account the equations of power transformers, power lines, induction motors and static compensating devices. The synthesis of regulators single and dual control systems is considered. The influence of the voltage instability in the network on the magnitude of the reactive power of a synchronous motor and on the magnitude of the error control system of the reactive power has been estimated. Based on the obtained results the recommendations on the design of the ACS for the parameters of the load node mode with synchronous motors operating under shock loads have been formulated.

Keywords: control, internal angle, load unit, synchronous motor.

References

- [1] V.A. Venikov, Transient electromechanical processes in electrical systems. Moscow: Higher school, 1985.
- [2] D.P. Petelin, Automatic excitation control of synchronous motors. Saint-Petersburg: Gosenergoizdat, 1961.

- [3] B.N. Abramovich and A.A. Krugliy, Excitation, regulation and stability of synchronous motors. Saint – Petersburg: Energoatomizdat. Leningrad. Otd., 1983.
- [4] I.A. Glebov, Excitation systems of powerful synchronous machines. Saint – Petersburg: Science, 1979.
- [5] G.R. Schwartz, A.V. Golubovsky, L.A. Migacheva and F.N. Rasskazov. Optimization and increase of energy efficiency of electrically driven KS MG // Gas industry, no. 12, pp. 76-78, 2005.
- [6] G.V. Mikhnechvich, Synthesis of the structure of the automatic control system for the excitation of synchronous machines. Moscow: Higher school, 1978.
- [7] G.R. Schwartz, A.M. Abakumov, L.A. Migacheva, F.N. Rasskazov and P.K. Kuznetsov, The use of an adjustable electric drive in gas and oil transport technologies. Moscow: Innovative engineering, 2008.
- [8] A.A. Yurganov and V.A. Kozhevnikov, Regulation of synchronous machine excitation. Moscow: Science, 1996.
- [9] V.I. Kotenev, A.V. Kotenev, V.S. Osipov and V.V. Kochetkov. Mathematical model of a synchronous machine when controlling its excitation // Samara: Bulletin of the Samara State Technical University. Technical science series, vol. 2, № 34, pp. 128-135, 2012.
- [10] V.I. Kotenev, V.S. Osipov and V.V. Kochetkov. The generalized mathematical model of the load node to control the parameters of the modes in the power supply system // Russian Electromechanics, no. 5, pp.103-106, 2014.
- [11] V.I. Kotenev and V.V. Kochetkov. A generalized functional diagram of the ACS with parameters of the PES mode and changes in the reactive power of the SM and compensating devices // Samara: Bulletin of the Samara State Technical University. Technical science series, vol. 4, no. 44, pp. 122-129, 2014.
- [12] V.I. Kotenev, V.V. Kochetkov and D.A. Elkin. In the case of the power supply // in proc. IEEE International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON-2017), June 29-30, 2017, Astana, Kazakhstan, pp. 1-17.
- [13] V.I. Kotenev, A.V. Kotenev, V.V. Kochetkov and D.A. Elkin. At the voltage insulator// The Journal of Physics: Conference, vol. 944, pp. 1-17, 2018.
- [14] A.M. Abakumov. Control systems for electromechanical transducers and electrical installations: a tutorial. Samara: Samara State Technical University, 2013.