

DOI 10.37539/2949-1991.2024.3.14.021
УДК 621.3.072.86

Котенев Александр Викторович,
ФГБОУ ВО «Самарский государственный
технический университет», Самара
Kotenev A.V., Samara State Technical University (SSTU), Samara,

Стулов Александр Дмитриевич,
ФГБОУ ВО «Самарский государственный
технический университет», Самара
Stulov A.D., Samara State Technical University (SSTU), Samara,

Кузьмин Дмитрий Николаевич,
ФГБОУ ВО «Самарский государственный
технический университет», Самара
Kuzmin D.N., Samara State Technical University (SSTU), Samara,

Кириллов Пётр Николаевич,
ФГБОУ ВО «Самарский государственный
технический университет», Самара
Kirillov P.N., Samara State Technical University (SSTU), Samara,

Соболев Александр Александрович
ФГБОУ ВО «Самарский государственный
технический университет», Самара
Sobolev A.A., Samara State Technical University (SSTU), Samara,

**ПЕРЕДАТОЧНАЯ ФУНКЦИЯ АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ
КАК ВОЗМУЩАЮЩЕГО ВОЗДЕЙСТВИЯ НА СИСТЕМУ АВТОМАТИЧЕСКОГО
УПРАВЛЕНИЯ КОЭФФИЦИЕНТОМ РЕАКТИВНОЙ МОЩНОСТИ
TRANSFER FUNCTION OF ASYNCHRONOUS MOTOR AS DISTURBANCE
ON REACTIVE POWER FACTOR AUTOMATIC CONTROL SYSTEM**

Аннотация: Соблюдение требований введенных законодательными актами Российской Федерации в сфере регулирования коэффициента реактивной мощности и повышение эксплуатационных характеристик линий электропередачи на промышленных предприятиях предполагает наличие систем автоматического управления коэффициентом (САУ) реактивной мощности (КРМ) в составе их системы электроснабжения (СЭС). Важной проблемой влияющей на качество работы и настройки САУ КРМ является математическое описание и моделирование возмущающего воздействия на САУ, которым являются асинхронные двигатели большой мощности.

С целью математического описания асинхронного двигателя как возмущающего воздействия на САУ КРМ СЭС разработана математическая модель, позволяющая в пределах малых отклонений скольжения двигателя определить изменение потребляемой активной и реактивной мощностей. С целью упрощения математической и вычислительной моделей проведена аппроксимация разработанной математической модели и получены передаточные функции как отношение малых отклонений активной, либо реактивной мощности к скольжению асинхронного двигателя.



Проведена оценка точности аппроксимированной модели и разработан алгоритм параметрической идентификации ее характеристик. Применение результатов данной работы позволяет существенно упростить математическую модель САУ КРМ СЭС без значительного снижения точности расчетов и улучшить качество ее настройки.

Abstract: Compliance with the requirements introduced by the legislative acts of the Russian Federation in the field of regulation of the reactive power factor and increasing the operational characteristics of power transmission lines at industrial enterprises implies the presence of automatic control systems of the reactive power factor (ACS) as part of their power supply system (SES). An important problem affecting the quality of operation and adjustment of ECS ACS is the mathematical description and modeling of the disturbing effect on ACS, which are high-power asynchronous motors.

For the purpose of mathematical description of asynchronous motor as disturbing effect on ACS KMP SES mathematical model is developed, which allows to determine change of consumed active and reactive power within small deviations of engine sliding. In order to simplify mathematical and computational models, an approximation of the developed mathematical model was carried out and transfer functions were obtained as a ratio of small deviations of active or reactive power to the sliding of an asynchronous motor.

The accuracy of the approximated model was evaluated and an algorithm for parametric identification of its characteristics was developed. Application of the results of this work makes it possible to significantly simplify the mathematical model of ACS KRM SES without significantly reducing the accuracy of calculations and improve the quality of its adjustment.

Ключевые слова: асинхронный двигатель, автоматическое управление, коэффициент реактивной мощности, математическая модель, параметрическая идентификация, управление, передаточная функция

Keywords: asynchronous motor, automatic control, reactive power factor, mathematical model, parametric identification, control, transfer function

Введение

Регулирование реактивной мощности в системах электроснабжения промышленных предприятий является актуальной проблемой в энергетике, как с точки зрения технической составляющей вопроса, так и с точки зрения действующего законодательства. С технической точки зрения, регулирование реактивной мощности позволяющее поддерживать оптимальное значение коэффициента реактивной мощности позволяет снизить загруженность линий передачи электроэнергии, снизить потери связанные с передачей электрической энергии и повысить устойчивость системы электроснабжения промышленного предприятия. Действующие законодательные акты [1, 2] требуют наличия в системе электроснабжения регулирования коэффициента реактивной мощности и предусматривают штрафные санкции в случае несоблюдения предельных значений коэффициента реактивной мощности, что в свою очередь оказывает серьезное влияние на себестоимость выпускаемой продукции.

Для качественной настройки системы автоматического управления коэффициентом реактивной мощности важным является описание возмущающего воздействия на систему. Для промышленных предприятий основным возмущающим воздействием, вызывающим отклонение величины коэффициента реактивной мощности в системе электроснабжения являются асинхронные двигатели высокой мощности.

Целью данной работы является математическое описание, структурная и параметрическая идентификация математической модели асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором как возмущающего воздействия на систему автоматического управления коэффициентом реактивной мощности.



В научной литературе известны методы определения параметров схемы замещения трехфазного асинхронного двигателя [3, 4, 5]. Достоинством данных методов является возможность относительно просто определить параметры схемы замещения. Однако сопротивления, полученные при использовании этих методов, не позволяют напрямую определить изменение активной и реактивной мощности при изменении нагрузки на валу асинхронного двигателя, либо при изменении скольжения. Однако в работах [6, 7] есть зависимости позволяющие определить активное и реактивное сопротивление в функции скольжения. В [8] приведены зависимости, по которым можно определить активную и реактивную мощности, потребляемые асинхронным двигателем. При этом в [8] не указано как получить данные зависимости в функции момента или скольжения двигателя. Общим недостатком указанных выше работ является отсутствие возможности определения потребляемой активной и реактивной мощности в зависимости от момента или скольжения при известных паспортных данных асинхронного двигателя.

Математическая модель асинхронного двигателя

Используя известные зависимости [7, 6] активного и реактивного сопротивления, полученные в функции скольжения двигателя для T-образной схемы замещения трехфазного асинхронного двигателя

$$R(s) = R_1 + \frac{R_2(s) \frac{x_\mu^2}{s}}{(x_\mu + x_2(s))^2 + \frac{R_2^2(s)}{s^2}}, \quad (1)$$

$$x(s) = x_1(s) + \frac{x_2(s)x_\mu^2 + x_\mu \left(x_2^2(s) + \frac{R_2^2(s)}{s^2} \right)}{(x_\mu + x_2(s))^2 + \frac{R_2^2(s)}{s^2}}, \quad (2)$$

где R_1 – активное сопротивление статорной обмотки; s – скольжение двигателя; x_μ – индуктивное сопротивление ветви намагничивания; $R_2(s)$ – приведенное активное сопротивление ротора, которое определяется [7, 6].

$$R_2(s) = R_2(0) + (R_2(1) - R_2(0))\sqrt{s}, \quad s_n < s \leq 1, \quad (3)$$

где

$$R_2(0) = \frac{R_2(s_n) - R_2(1)\sqrt{s_n}}{1 - \sqrt{s_n}}, \quad (4)$$

$x_2(s)$ – индуктивное сопротивление ротора из [6] определяется

$$x_2(s) = 0,58x_k(s_n), \quad (5)$$

где $x_k(s_n)$ – индуктивное сопротивление короткого замыкания при номинальном скольжении, $x_1(s)$ – индуктивное сопротивление статора по [6] определяется как



$$x_1(s) = 0,42x_k(s_H). \quad (6)$$

Тогда используя известные выражения [8] и подставив полученные выражения активного (1) и реактивного (2) сопротивлений получим выражения активной и реактивной мощности

$$P(s) = \frac{U_H^2 R(s)}{R^2(s) + x^2(s)} \quad (7)$$

$$Q(s) = \frac{U_H^2 x(s)}{R^2(s) + x^2(s)} \quad (8)$$

где U_H – номинальное напряжение обмотки статора трехфазного асинхронного двигателя.

Таким образом что позволяет с высокой точностью и малым количеством расчетов разом, объединив зависимости (1), (2), (6) и (7) в одну систему уравнений (8) получим математическую модель асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором как возмущающего воздействия на систему автоматического управления коэффициентом реактивной мощности [9].

$$\left. \begin{aligned} R(s) &= R_1 + \frac{R_2(s) \frac{x_\mu^2}{s}}{(x_\mu + x_2(s))^2 + \frac{R_2^2(s)}{s^2}} \\ x(s) &= x_1(s) + \frac{x_2(s)x_\mu^2 + x_\mu \left(x_2^2(s) + \frac{R_2^2(s)}{s^2} \right)}{(x_\mu + x_2(s))^2 + \frac{R_2^2(s)}{s^2}} \\ P(s) &= \frac{U_H^2 R(s)}{R^2(s) + x^2(s)} \\ Q(s) &= \frac{U_H^2 x(s)}{R^2(s) + x^2(s)} \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

Полученная математическая модель может быть представлена в виде структурной схемы (рис. 1), где входным воздействием будет являться изменение скольжения двигателя s , а выходными координатами будут являться изменения активной $P(s)$ и реактивной $Q(s)$ мощностей потребляемых асинхронным двигателем из сети.



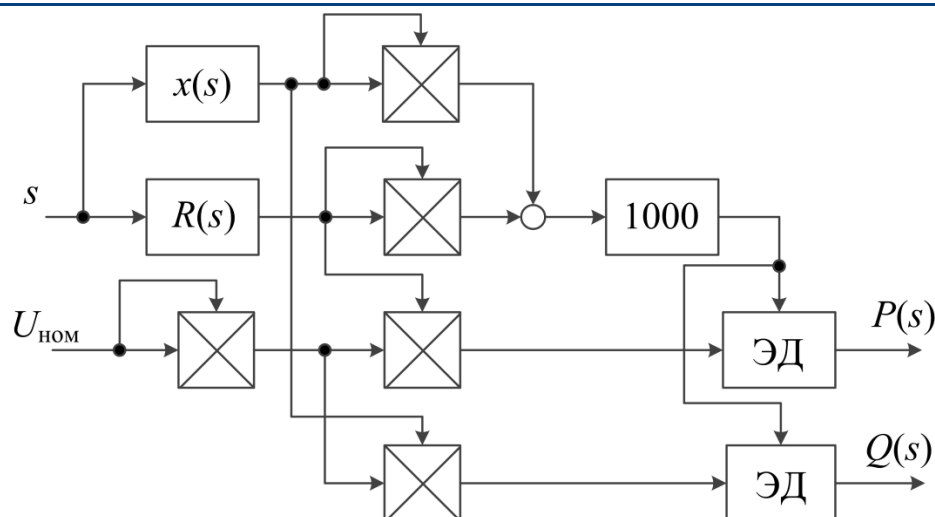


Рисунок 1. Структурная схема математической модели асинхронного двигателя как возмущающего воздействия на систему автоматического управления коэффициентом реактивной мощности.

На схеме ЭД – элемент деления, $x(s)$, $R(s)$ – зависимости индуктивного и активного сопротивлений асинхронного двигателя от его скольжения.

Для дальнейших исследований используем в качестве примера асинхронный двигатель АИР355М4 с паспортными данными $U_n = 380$ В, $P_n = 315$ кВт, $M_k = 2,2$, $\eta_n = 95,2\%$, $s_n = 2\%$, $\cos\phi_n = 0,9$ и с помощью метода [6] получим значения $R_1 = 0,012$ Ом, $x_1(s) = 0,037$ Ом, $x_2(s) = 0,05$ Ом, $x_\mu = 1,55$ Ом, $R_2(0) = 0,01$ Ом, $R_2(1) = 0,003$ Ом, необходимые для моделирования переходных процессов по активной $P(s)$ и реактивной $Q(s)$ мощности.

При кажущейся простоте данная схема довольно сложна для вычислений, т.к. блоки $x(s)$ и $R(s)$ представляют собой отдельные сложные структуры, описанные уравнениями (2) и (1) соответственно, а использование данной модели в качестве возмущающего воздействия на систему автоматического управления коэффициентом реактивной мощности [9], которая является довольно объемной приводит к значительному увеличению времени расчетов при моделировании работы системы.

Для уменьшения количества расчетов при моделировании структурная схема (рис. 1) была реализована в программной среде имитационного моделирования MATLAB Simulink и с помощью прикладного пакета «Model linearizer» получены логарифмические амплитудная и фазочастотная характеристики для асинхронного двигателя АИР355М4.

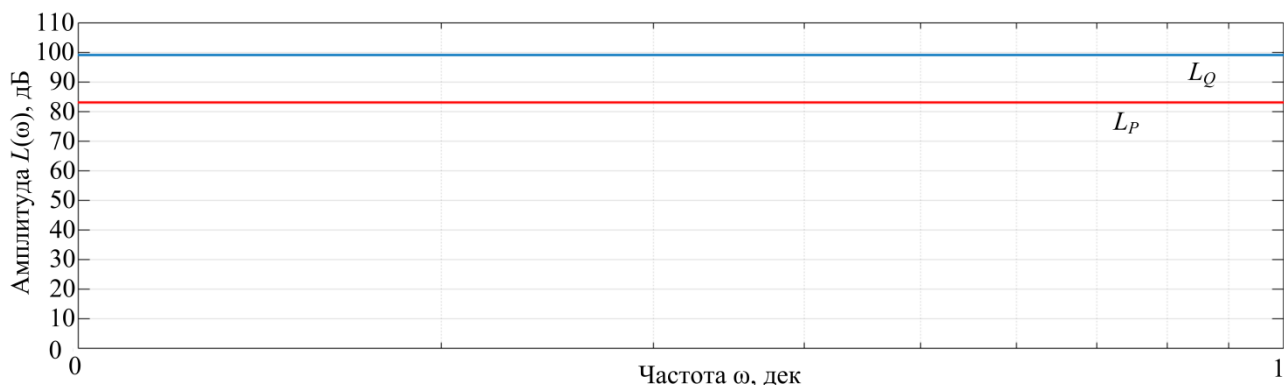


Рисунок 2 – Логарифмическая амплитудно-частотная характеристики математической модели.



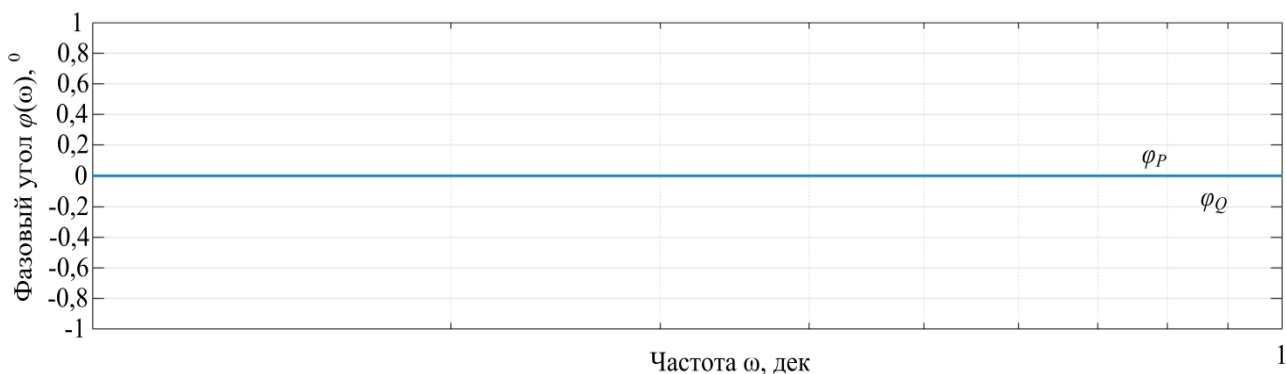


Рисунок 3 – Логарифмическая фазо-частотная характеристика математической модели.

Передаточная функция асинхронного двигателя

Анализируя приведенные зависимости на рисунках 2 и 3 можно сделать вывод, что в малых отклонениях данная математическая модель может быть аппроксимирована двумя безинерционными звеньями [10], при этом зная амплитудные значения графиков $LP(\omega)$ и $LQ(\omega)$ можно получить коэффициенты передачи согласно [10].

$$k_P = 10^{\frac{L_P(\omega)}{20}}; \quad (10)$$

$$k_Q = 10^{\frac{L_Q(\omega)}{20}}, \quad (11)$$

где k_P – коэффициент передачи передаточной функции по активной мощности, k_Q – коэффициент передачи передаточной функции по реактивной мощности.

Тогда передаточные функции как отношение приращения активной мощности $\Delta P(s)$ к приращению скольжения Δs и отношение приращения реактивной мощности $\Delta Q(s)$ к приращению скольжения Δs запишутся

$$W_P(p) = \frac{\Delta P(s)}{\Delta s} = k_P; \quad (12)$$

$$W_Q(p) = \frac{\Delta Q(s)}{\Delta s} = k_Q. \quad (13)$$

Выражения (11) и (12) записанные в виде передаточных функций позволяют аппроксимировать сложную математическую модель асинхронного двигателя как возмущающего воздействия на систему автоматического управления коэффициентом реактивной мощности.

Оценить точность и справедливость полученных передаточных функций можно путем сравнения графиков величин $\Delta P(s)$ и $\Delta Q(s)$ полученных на основании моделирования структурной схемы (рис. 1) математической модели (8) и графиков полученных при использовании передаточных функций (11) и (12). Для двигателя АИР355М4, использованного в качестве примера, значение $LP(\omega) = 83,1$ дБ и $LQ(\omega) = 99$ дБ.



Следовательно, используя выражения (9) и (10) получим, что $k_p = 1,43 \cdot 10^4$ Вт/% и $k_q = 8,91 \cdot 10^4$ ВАр/%. Тогда задавшись приращением величины Δs в момент времени $t = 1$ секунде получим графики величин $\Delta P(s)$ и $\Delta Q(s)$ путем моделирования (8) и (11), (12) соответственно.

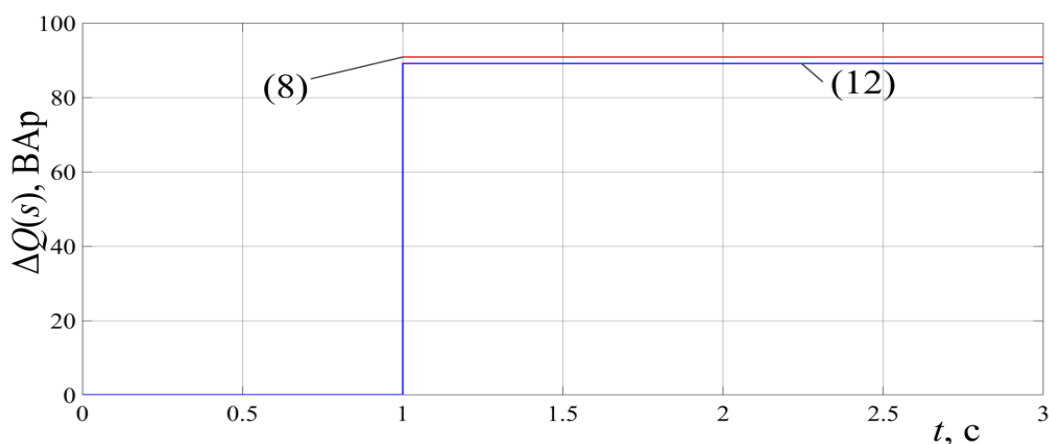


Рисунок 4 – Переходные характеристики величины $\Delta Q(s)$ при моделировании модели (8) и передаточной функции (12).

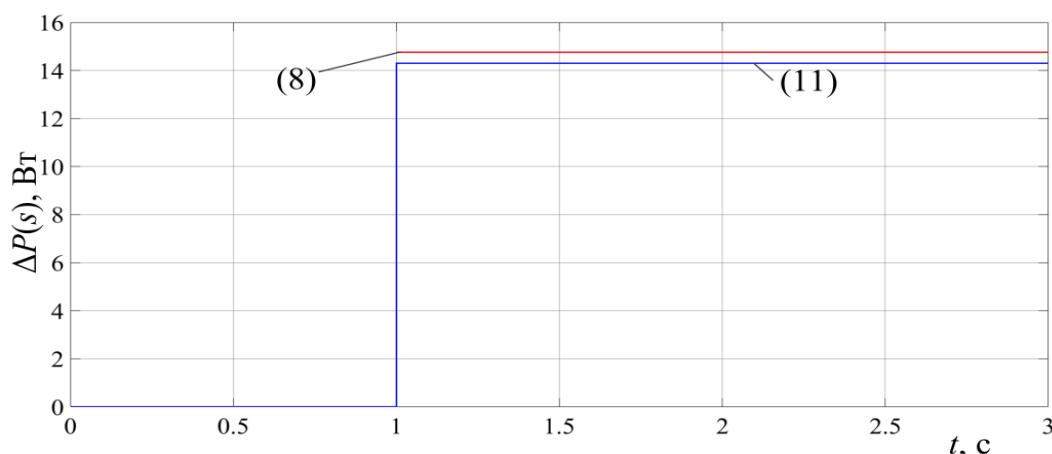


Рисунок 5 – Переходные характеристики величины $\Delta P(s)$ при моделировании модели (8) и передаточной функции (11).

Результаты исследования показывают, что аппроксимация (11-12) позволяет сохранить инженерную точность расчетов по сравнению с не аппроксимированной моделью (8). А именно, анализ графиков на рисунках 4 и 5 показывает, что аппроксимированные модели имеют погрешность по активной мощности, потребляемой асинхронным двигателем 3,05%, а по реактивной мощности погрешность составляет 1,93%.

Оценивая полученные в результате исследования результаты можно предложить алгоритм параметрической идентификации аппроксимированной модели асинхронного двигателя как возмущающего воздействия на систему [9] по паспортным данным:

1. используя паспортные данные определить параметры Т-образной схемы замещения асинхронного двигателя по методу [6] и подставить их в формулы (1-5);
2. с помощью моделирования математической модели (8), структура которой представлена на рисунке 1, получить логарифмические амплитудные характеристики;
3. используя выражения (9-10) получить коэффициенты передаточных функций (11-12).



Таким образом, получена аппроксимированная модель асинхронного двигателя и алгоритм параметрической идентификации ее параметров, которые позволяют в значительной степени сократить количество расчетов и, следовательно, упростить моделирование возмущающего воздействия на систему автоматического управления коэффициентом реактивной мощности.

Заключение

В результате работы была получена математическая модель асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором как возмущающего воздействия на систему автоматического управления коэффициентом реактивной мощности, произведена параметрическая идентификация и аппроксимация модели, позволяющая с погрешностью менее 3,1%, что позволяет с высокой точностью и малым количеством расчетов проводить моделирование возмущающего воздействия на систему управления коэффициентом реактивной мощности.

Список литературы:

1. Приказ Минэнерго РФ от 23.06.2015 N 380 "О порядке расчета значений соотношения потребления активной и реактивной мощности для отдельных энергопринимающих устройств (групп энергопринимающих устройств) потребителей электрической энергии"// [Электронный ресурс]. URL: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_183610/ (08.11.2023).
2. Приказ ФСТ РФ от 31.08.2010 N 219-э/6 "Об утверждении Методических указаний по расчету повышающих (понижающих) коэффициентов к тарифам на услуги по передаче электрической энергии в зависимости от соотношения потребления активной и реактивной мощности для отдельных энергопринимающих устройств (групп энергопринимающих устройств) потребителей электрической энергии, применяемых для определения обязательств сторон по договорам об оказании услуг по передаче электрической энергии по единой национальной (общероссийской) электрической сети (договорам энергоснабжения)" (Зарегистрировано в Минюсте РФ 06.10.2010 N 18637)// [Электронный ресурс]. URL: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_105613/ (08.11.2023).
3. Котенев В.И., Котенев А.В., Кочетков В.В. Определение параметров схемы замещения асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором по справочным данным //Изнестия высших учебных заведений. Электромеханика. 2016. №6. С. 13-17.
4. Осипов В.С., Котенев В.И., Кочетков В.В. Определение параметров схем замещения трехфазных асинхронных электродвигателей // Вестник самарского государственного технического университета. Серия: технические науки. 2013. №3 С. 175-184.
5. Котенев А.В., Коченев В.И., Кочетков В.В. Определение сопротивлений короткозамкнутого асинхронного двигателя по каталожным данным // Вестник самарского государственного технического университета. Серия: технические науки. 2016. №1 С. 103-109.
6. Котенев В.И., Стулов А.Д. Метод расчета сопротивлений асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором по паспортным данным и оценка его погрешности// Вестник самарского государственного технического университета. Серия: технические науки. 2021. №3 С. 98-110.
7. Сыромятников И.А. Режимы работы асинхронных и синхронных электродвигателей. М.: Энергоатомиздат, 1984. 242с.
8. Веников В.А. Переходные электромеханические процессы в электрических системах. М.: Высшая школа, 1985. 536с.
9. Kotenev A. V., Stulov A. D. A Power Supply System for an Industrial Facility with a Synchronous Electric Drive as a Reactive Power Factor Control Object. 2023 International Ural Conference on Electrical Power Engineering (UralCon), Magnitogorsk, Russian Federation, 2023, pp. 177-181.
10. Бессекерский В.А. Теория систем автоматического управления. Спб.: Издательство «Профессия», 2003. 750с.

