

Дубовик М.Е., Соловьев В.А.

Комсомольский-на-Амуре государственный университет

## ДИНАМИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ МАШИНЫ ДВОЙНОГО ПИТАНИЯ ПРИ УПРАВЛЕНИИ СО СТОРОНЫ РОТОРА

В приводах высокой мощности, а именно свыше 100 кВт как правило, в случае использования в электроприводе асинхронных двигателей приходится ориентироваться на питание двигателя напряжением свыше 1000 В. Это обусловлено снижением массогабаритных показателей двигателя. Но при построении частотно-регулируемого электропривода необходимо использовать преобразователь частоты (ПЧ) высокого напряжения, что, в свою очередь, ведет к существенному удорожанию электропривода. Найти компромиссное решение можно путем использования машины двойного питания (МДП), канал частотного регулирования которого необходимо перенести в цепь ротора. Использование МДП позволит существенно уменьшить капитальные затраты и расширить управляющие функции над электроприводом.

В статье представлено математическое описание МДП. Особенностью данного описания является выбор системы координат. На его основе, с учетом характеристик МДП, построена динамическая модель машины. Исследованы динамические характеристики МДП при подаче управляющего сигнала со стороны ротора с переменной частотой. Управляющие сигналы представлены в виде идеальных гармонических функций. Построенная модель может быть использована для исследования динамических и статических режимов электропривода на основе МДП, например позволит исследовать пуск машины в различных режимах. Получена зависимость амплитуды напряжения ротора от его частоты. Данная эмпирическая зависимость показывает возможный диапазон изменения амплитуды напряжения на роторе при сохранении синхронного режима МДП на заданной скорости. Исследовано поведение машины в статическом режиме при изменении нагрузочного момента. Приведена имитационная модель, построенная в среде Matlab.

**Ключевые слова:** модель машины двойного питания, зависимость амплитуды напряжения ротора от частоты, динамический режим, устойчивость машины двойного питания.

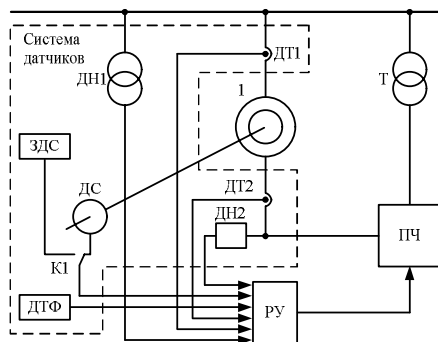
### ВВЕДЕНИЕ

Наличие двух силовых каналов управления МДП расширяет ее функциональные возможности. В последние годы при проектировании систем управления МДП ориентируются на частотное управление. Использование МДП в электроприводах посвящено большое количество публикаций [1-5]. Также работы по исследованию асинхронизированных машин представлены в работах иностранных авторов [6-9].

Одновременное использование обоих каналов регулирования целесообразно для реализации ряда специальных законов управления или для высокоточных приводов с большим диапазоном регулирования скорости. Но такое решение ведет к существенному усложнению системы управления электроприводом и росту его массогабаритных показателей.

В тех случаях, когда к системе регулируемого электропривода не предъявляются особые требования, то реализация его на базе МДП может быть построена при использовании одного канала регулирования. Определенный интерес представляет рассмотрение системы электропривода на основе МДП, в которой функция регулирования возлагается на канал управления со стороны ротора, а на канал регулирования статорной цепи возлагается возбуждение машины.

МДП представляет собой систему, состоящую из электрической машины, возбуждателя и регулятора возбуждения. Структура МДП показана на **рис. 1**. Здесь возбуждатель ПЧ питается от той же сети, что и статор двигателя, – через трансформатор Т.



**Рис. 1. Функциональная схема электропривода на базе МДП**

Автоматический регулятор РУ служит для формирования требуемой функции управления машины, которая усиливается возбуждителем ПЧ. Очевидно, что число выходных сигналов РУ будет равно числу фаз обмотки ротора. Для формирования функции регулирования в РУ, используется комплекс датчиков, который включает в себя следующие датчики: ДС – датчик тригонометрических функций угла поворота ротора, являющийся также датчиком скорости; ЗДС – задающий частоты (скорости); ДТФ – датчик тригонометрических функций угла изображающего вектора напряжения системы; ДТ1 и ДТ2 – датчики токов статора и ротора соответственно; ДН1 и ДН2 – датчики напряжений статора и ротора.

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ МДП

Рассмотрим математическое описание машины двойного питания при частотном управлении со стороны ротора. При анализе динамических характеристик МДП систему координат, как правило, ориентируют по основному потокоцеплению. Это обусловлено тем, что управление МДП осуществляется как со стороны статора, так и со стороны ротора [9, 10].

Поскольку регулирование МДП осуществляется по каналу ротора, целесообразнее привязать систему координат  $x, y$  к валу двигателя. Таким образом, управляющие проекции вектора напряжения ротора  $u_{2x}$  и  $u_{2y}$  не будут содержать в себе переменную – скорость вращения ротора  $\omega$ . Такой подход позволяет реализовать математическую модель, учитывающую непосредственно только сигнал управления по цепи ротора.

Будем полагать, что скорость вращения вала двигателя определяется разностью частот напряжения статора и ротора [4]:

$$\omega = \omega_1 - \omega_2, \quad (1)$$

где  $\omega$  – угловая скорость вращения ротора;  $\omega_1$  – угловая скорость вращения вектора напряжения статора;  $\omega_2$  – угловая скорость вращения вектора напряжения ротора.

Данная зависимость предполагает, что МДП находится в двигательном режиме, векторы напряжений, магнитных потоков статора и ротора сонаправлены и вращаются в ту же сторону, что и сам ротор МДП [4].

Если проекции векторов напряжений ротора не зависят от скорости, то скорость вращения должна быть учтена при синтезе блоков подачи управляющих сигналов. В нашем случае управляющими сигналами являются векторы напряжений статора  $\vec{u}_1$  с питающей частотой  $f_1$  и ротора  $\vec{u}_2$  с питающей частотой  $f_2$ .

При таком выборе системы координат  $x, y$  проекции вектора напряжения статора и ротора будут описываться следующими выражениями:

$$\begin{aligned} u_{1x} &= U_1 \cos[(\omega_1 - \omega)t + \varphi_{10}]; \\ u_{1y} &= U_1 \sin[(\omega_1 - \omega)t + \varphi_{10}]; \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} u_{2x} &= U_2 \cos[\omega_2 t + \varphi_{20}]; \\ u_{2y} &= U_2 \sin[\omega_2 t + \varphi_{20}], \end{aligned} \quad (3)$$

где  $U_1, U_2$  – амплитуды напряжений статора и ротора соответственно;  $\varphi_{10}, \varphi_{20}$  – начальные углы сдвига фазового напряжения статора и ротора соответственно;  $\omega_1, \omega_2$  – частоты напряжений статора и ротора соответственно.

Математическое описание МДП в векторно-операторном виде:

$$\begin{cases} \vec{u}_1 = R_1 \vec{i}_1 + p \vec{\Psi}_1 + j p_n \omega \vec{\Psi}_1; \\ \vec{u}_2 = R'_2 \vec{i}_2 + p \vec{\Psi}_2; \\ \vec{\Psi}_1 = L_1 \vec{i}_1 + L_m \vec{i}_2; \\ \vec{\Psi}_2 = L_m \vec{i}_1 + L'_2 \vec{i}_2; \\ J_\Sigma p \omega = M_s - M_c; \\ M_s = \frac{mp_n}{2} \text{Im}(\vec{i}_1 \vec{\Psi}_1^*), \end{cases} \quad (4)$$

где  $\vec{i}_1, \vec{i}_2$  – векторы токов статора и ротора соответственно;  $\vec{\Psi}_1, \vec{\Psi}_2$  – векторы потокоцеплений статора и ротора соответственно;  $R_1, R'_2$  – активное сопротивление фазы ста-

тора и приведенное активное сопротивление фазы ротора соответственно;  $L_1, L'_2$  – индуктивность фазы статора и приведенная индуктивность фазы ротора соответственно;  $L_m$  – взаимная индуктивность статора и ротора;  $J_\Sigma$  – суммарный момент инерции привода;  $M_s, M_c$  – электромагнитный момент МДП и момент нагрузки;  $m$  – число фаз статора;  $p_n$  – число пар полюсов статора.

Проекция векторов напряжений, потокоцеплений и токов в системе координат  $x, y$  (4):

$$\begin{cases} \vec{u}_1 = u_{1x} + j u_{1y}; \vec{i}_1 = i_{1x} + j i_{1y}; \\ \vec{u}_2 = u_{2x} + j u_{2y}; \vec{i}_2 = i_{2x} + j i_{2y}; \\ \vec{\Psi}_1 = \Psi_{1x} + j \Psi_{1y}; \\ \vec{\Psi}_2 = \Psi_{2x} + j \Psi_{2y}; \\ \vec{\Psi}_1^* = \Psi_{1x} - j \Psi_{1y}. \end{cases} \quad (5)$$

Введем следующие обозначения переходных индуктивностей статора и ротора:

$$L'_1 = \sigma L_1; \quad L''_2 = \sigma L'_2, \quad (6)$$

где  $\sigma$  – коэффициент рассеяния.

Коэффициенты электромагнитной связи статора и ротора, а также коэффициент рассеяния:

$$\begin{aligned} k_1 &= \frac{L_m}{L_1}; \quad k_2 = \frac{L_m}{L'_2}; \\ \sigma &= \left(1 - \frac{L_m^2}{L_1 L'_2}\right) = (1 - k_1 k_2). \end{aligned} \quad (7)$$

Подставляя выражения проекций (5) в систему (4) и выразив проекции потокоцеплений, токов, а также учитывая выражения (6) и (7), получим систему уравнений для построения динамической модели МДП (8).

$$\begin{cases} \Psi_{1x} = \frac{1}{p} (u_{1x} - R_1 i_{1x} + p_n \omega \Psi_{1y}); \\ \Psi_{1y} = \frac{1}{p} (u_{1y} - R_1 i_{1y} - p_n \omega \Psi_{1x}); \\ \Psi_{2x} = \frac{1}{p} (u_{2x} - R'_2 i_{2x}); \\ \Psi_{2y} = \frac{1}{p} (u_{2y} - R'_2 i_{2y}); \\ i_{1x} = \frac{1}{L'_1} \Psi_{1x} - \frac{k_2}{L'_1} \Psi_{2x}; \\ i_{2x} = -\frac{k_1}{L'_2} \Psi_{1x} + \frac{1}{L'_2} \Psi_{2x}; \\ i_{1y} = \frac{1}{L'_1} \Psi_{1y} - \frac{k_2}{L'_1} \Psi_{2y}; \\ i_{2y} = -\frac{k_1}{L'_2} \Psi_{1y} + \frac{1}{L'_2} \Psi_{2y}; \\ M_s = \frac{mp_n}{2} (\Psi_{1x} i_{1y} - \Psi_{1y} i_{1x}); \\ \omega = \frac{1}{J_\Sigma p} (M_s - M_c). \end{cases} \quad (8)$$

Данная форма системы уравнений (форма Коши) позволит построить структурную схему (рис. 2) на одних интеграторах и пропорциональных звеньях и избавит от реально-дифференцирующих звеньев.

Система уравнений математической модели МДП (8) отличается от системы уравнений асинхронной машины наличием напряжения  $u_2$  в уравнении электрического баланса роторной цепи.

На основании структурной схемы разработана имитационная модель в среде Matlab. При её составлении, учитывается то, что все скорости и частоты измеряются в одних единицах.

Исследование динамических характеристик двигателя показало, что для обеспечения синхронного режима на валу двигателя, при изменении частоты питающего напряжения ротора должна изменяться амплитуда напряжения статора по закону  $U_1 = k(f_1 - p_n \omega)$ . Это связано с влиянием полного сопротивления статора, и для устранения этого явления необходимо использовать компенсирующие обратные связи.

При моделировании была получена зависимость амплитуды напряжения ротора от частоты напряжения ротора (рис. 3). Моделирование показало, что МДП в зависимости от соотношений амплитуд напряжения статора и ротора при изменении частоты напряжения ротора может работать в трех различных областях. В промежуточной области наблюдается устойчивый режим работы машины двойного питания, с выходом на требуемую скорость вращения, с учетом соотношения скорости и частот (1). В верхней и нижней области наблюдается неустойчивый режим работы МДП. Это обусловлено тем, что при амплитудах напряжения ротора, выходящих за диапазон ( $U_2 > U_{1\max}$  или  $U_2 < U_{2\min}$ ), напряжение ротора подавляет напряжение статора и наоборот, в результате чего двигатель выходит из синхронизма. Из полученной зависимости следует, что размах изменения амплитуды  $U_2$  при сохранении синхронного режима работы при разных частотах неодинаковый.

Точки зависимости были получены в результате моделирования имитационной модели МДП. Изменяя амплитуду напряжения ротора, при заданной амплитуде напряжения статора были определены критические значения амплитуд, при которых МДП входила в неустойчивый режим работы. Пунктирная линия соответствует точкам, значения которых рассчитаны как среднее арифметическое максимального и минимального значения амплитуд при заданной частоте.

При соблюдении необходимых соотношений амплитуд напряжений статора и ротора, наблюдается устойчивый синхронный режим работы МДП, что отражено на графиках переходных процессов при одновременной подаче напряжений в цепи статора и ротора (рис. 4).

Кроме того, моделирование режима одновременной подачи сигналов управления на статорную и роторную цепи (см. рис. 4) подтвердило соблюдение закономерности частоты вращения ротора согласно выражения (1).

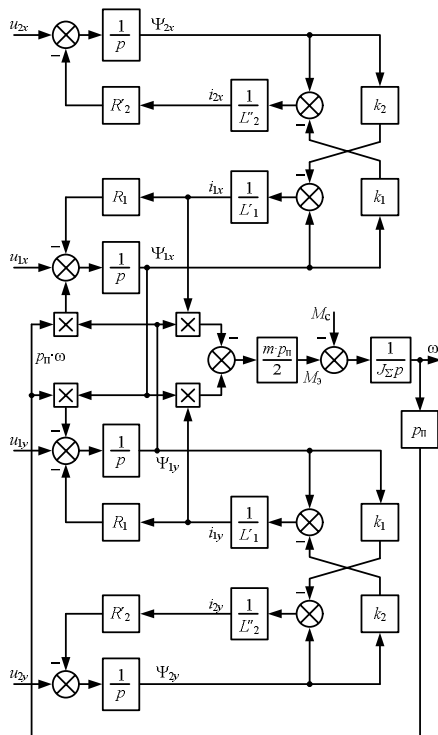


Рис. 2. Динамическая модель машины двойного питания

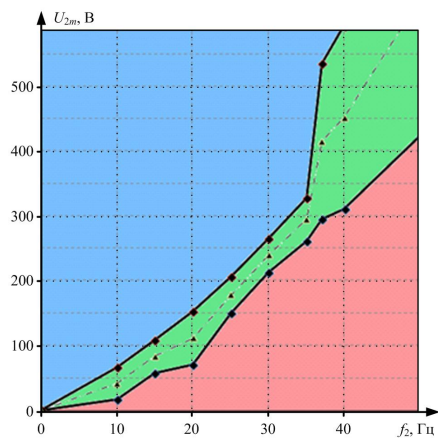


Рис. 3. Зависимость амплитуды напряжения ротора от его частоты

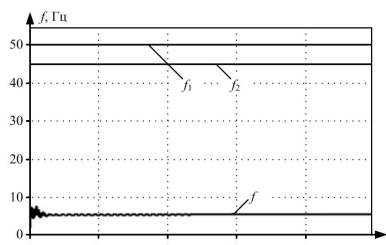


Рис. 4. Графики скоростей и частот машины двойного питания при прямом пуске:  $f_1$  – частота напряжения статора;  $f_2$  – частота напряжения ротора;  $f$  – частота вращения ротора (спуска на  $f$ )

При ударном приложении нагрузки к валу двигателя МДП ведет себя по-разному во всем диапазоне изменения частоты. Практически во всем диапазоне частот при незначительной величине (10–15%)  $M_n$  возмущающего момента (рис. 5) выпадение МДП из синхронизма не происходит. Увеличение величины момента нагрузки может привести к выпадению из синхронизма, причем согласно результатам моделирования (рис. 6) величина возмущающего момента, при которой происходит выпадение МДП из синхронизма, растет при возрастании частоты напряжения на роторе.

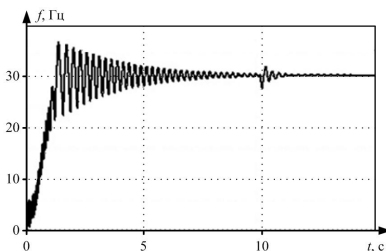


Рис. 5. Переходный процесс частоты вращения ротора МДП при подаче статического момента  $M_c = 800$  Н·м в момент времени  $t = 10$  с

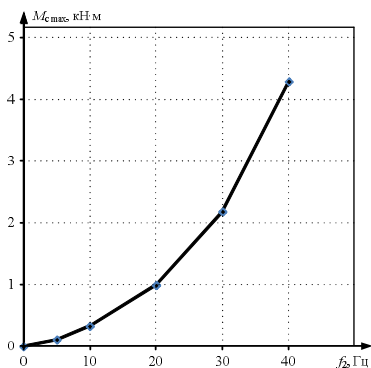


Рис. 6. Зависимость максимального момента  $M_{c \max}$  нагрузки от частоты напряжения ротора  $f_2$

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, результаты моделирования указывают на то, что необходимо более подробно рассмотреть связь между амплитудой задающего напряжения и его частотой при регулировании скорости. При этом важно отметить, что данный вопрос касается обоих каналов регулирования (по статору и по ротору). Эмпирические зависимости, полученные методом выбора средних значений, указывают на квадратичную зависимость, однако данная зависимость может носить гораздо более сложный характер.

Выпадение из синхронизма машины двойного питания указывает на то, что при разработке системы управления необходимо вводить компенсирующие обратные связи по управляющему сигналу как со стороны статора, так и со стороны ротора. Возможно построение с обратной связью только по одному каналу.

Исходя из вышесказанного, явления, протекаемые в МДП, математически описываются более сложными зависимостями, чем в асинхронных машинах. Однако применение МДП раскрывает больший спектр регулировочных свойств, что может привести к улучшению таких показателей, как универсальность, стоимость и энергоэффективность.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Тугаев Г.М. Широкорегулируемый энергоэффективный электропривод переменного тока на базе асинхронизированного вентиляционного двигателя: автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.09.03 / Тугаев Геннадий Михайлович. Нижний Новгород, 2017. 44 с.
2. Ляпин А.С. Модельное исследование машины двойного питания с токовым управлением // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2016. № 4. С. 731-737.
3. Ляпин А.С. Получение и анализ статических характеристик машины двойного питания при питании роторных обмоток от источника напряжения // Известия вузов. Электромеханика. 2014. №1. С. 30-34.
4. Пересад С.М., Благодир В.О. Векторное управление машиной двойного питания со свойствами робастности к параметрическим и координатным возмущениям // Электромеханические энергосберегающие системы. 2016. №1. С. 10-17.
5. Мустафаев Р.И., Гасанова Л.Г. Использование регулируемой асинхронной машины двойного питания в синхронном режиме // Электричество. 2017. №10. С. 60-68.
6. Ганджа С.А. Применение асинхронизированных синхронных генераторов для автономных и сетевых ветроэнергетических установок // Международный научный журнал Альтернативная электроэнергетика и экология. 2010. № 1. С. 25-28.
7. Glaoui H., Harrouz A. Sliding mode control of the dfig used in wind energy system // Электротехника и электромеханика. 2018. №3. С. 61-67.
8. Дорошенко, А.Л. Режимы работы и алгоритмы управления электромеханическими системами с машиной двойного питания и разными типами преобразователей частоты / А.Л. Дорошенко // Вісник Вінницького політехнічного інституту. 2014. №2. С. 57-59.
9. Шакарян Ю.Г. Асинхронизированные синхронные машины. М.: Энергоатомиздат, 1984. 192 с. : ил.
10. Ботвинник М.М., Шакарян Ю.Г. Управляемая машина переменного тока. М.: Наука, 1969. 140 с.

Поступила в редакцию 13 марта 2019 г.

## DYNAMIC MODEL OF A DUAL POWER MACHINE CONTROLLED FROM THE ROTOR SIDE

Mikhail E. Dubovik

Post-graduate student, the department of Electric Drive and Automation of Industrial Installations, Komsomolsk-on-Amur State Technical University, Komsomolsk-on-Amur, Russia. E-mail: mihail.dubovik@bk.ru. <https://orcid.org/0000-0002-7092-1409>.

Vyacheslav A. Solovyev

D.Sc. (Engineering), Professor, the department of Electric Drive and Automation of Industrial Installations, Komsomolsk-on-Amur State Technical University, Komsomolsk-on-Amur, Russia. E-mail: epapu@knastu.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7930-0601>

In the high power mode, the power of which exceeds 100 kW, as a rule, when energy is used in asynchronous motors it requires voltage up to 1000 V. This is due to a decrease in the weight and dimensions of the motor. But when developing a frequency-controlled electric drive, it is necessary to use a high-voltage frequency converter (FC), which leads to a significant increase in the cost of electrical wiring. A compromise solution can be found by using a dual power supply machine (MIS), a frequency control channel that needs to be transferred to the rotor circuit [1]. The use of TIR will significantly reduce capital costs and expand control functions over the drive.

The article presents a mathematical description of a dual power machine. The main feature of this description is the choice of coordinate system. On the basis of it and taking into account its characteristics, a dynamic model of the machine has been built. The research group investigated the dynamic characteristics of the machine when applying a control signal from the rotor with a variable frequency. Control signals are presented in the form of ideal harmonic functions. In the further study, the constructed model will make it possible to investigate the launch of the machine in various modes. The dependence of the amplitude of the rotor voltage on its frequency is obtained. This dependence shows the possible range of variation of the voltage amplitude on the rotor while maintaining the synchronous MOS mode at a given speed. Simulation is made in electrical degrees. All angular velocities (rad / s) are expressed in frequencies (Hz). The behavior of the machine in a static mode was investigated when the load torque changes. A simulation model built in the Matlab environment is given.

**Keywords:** dual power machine, amplitude of the rotor voltage vector, dynamic mode, dual power machine stability.

## REFERENCES

1. Tutaev G.M. *Shiroko-reguliruemiy energoeffektivnyy elektropriwod peremennogo toka na baze asinkhronizirovannogo ventil'nogo dvigatelya* [Widely-regulated energy-efficient AC electric drive based on an asynchronized ac converter-fed engine]: abstract of a Ph.D. thesis. Sciences: 05.09.03 / Tutaev Gennadiy Mihaylovich. Nizhny Novgorod, 2017, 44 p. (In Russian)
  2. Lyapin A.S. A Model Study of a Dual-Power Machine with Current Control. *Nauchno-tehnicheskiy vestnik informatsionnykh tekhnologiy, mehaniki i optiki* [Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics]. 2016, no. 4, pp. 731-737. (In Russian)
  3. Lyapin A.S. Obtaining and analysis of static characteristic double power machines when powered by a voltage source. *Izvestiya vuzov. Elektromekhanika*. [News of universities. Electromechanics]. 2014, no. 1, pp. 30-34. (In Russian)
  4. Peresada S.M., Blagodir V.O. Vector control of a dual power machine with robustness properties for parametric and coordinate perturbations. *Elektromekhanicheskie energosberegayushchie sistemy* [Electromechanical energy-saving systems]. 2016, no. 1, pp. 10-17. (In Russian)
  5. Mustafaev R.I., Hasanova L.G. Use of an adjustable asynchronous dual-power machine in synchronous mode. *Elektrichestvo* [Electricity]. 2017, no. 10, pp. 60-68. (In Russian)
  6. Gandzha S.A. Application of asynchronized synchronous generators for autonomous and network wind power plants. *Mezhdunarodnyy nauchnyy zhurnal alternativnaya elektroenergetika i ekologiya* [International Scientific Journal of Alternative Electricity and Ecology]. 2010, no. 1, pp. 25-28. (In Russian)
  7. Glaoui H., Harrouz A. Used in wind energy systems. *Electrical engineering and electromechanics*. 2018, no. 3, pp. 61-67.
  8. Doroshenko A.L. Modes of operation and control algorithms for electromechanical systems with a dual-power machine and various types of frequency converters. *Vicinnik Vinnytsia Polytechnic Institute*. 2014, no. 2, pp. 57-59.
  9. Shakaryan Yu.G. *Asinkhronizirovannyye sinhnornyye mashiny* [Asynchronized synchronous machines]. M.: Energoatomizdat, 1984. 192 p. (In Russian)
  10. Botvinnik M.M., Shakaryan Yu.G. *Upravlyayemaya mashina peremennogo toka* [Controlled AC machine]. M.: Science, 1969. 140 p. (In Russian)
- Дубовик М.Е., Соловьев В.А. Динамическая модель машины двойного питания при управлении со стороны ротора // Электротехнические системы и комплексы. 2019. № 2(43). С. 60-64. [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2019-2\(43\)-60-64](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2019-2(43)-60-64)
- Dubovik M.E., Solovyev V.A. Dynamic Model of a Dual Power Machine Controlled from the Rotor Side. *Elektrotehnicheskie sistemy i komplekсы* [Electrotechnical Systems and Complexes], 2019, no. 2(43), pp. 60-64. (In Russian). [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2019-2\(43\)-60-64](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2019-2(43)-60-64)