

УДК 621.311.001.57

UDC 621.311.001.57

05.00.00 Технические науки

Technical sciences

**МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ
ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ АСИНХРОННЫХ
ДВИГАТЕЛЕЙ ПРЕДПРИЯТИЙ ПО
ПЕРЕРАБОТКЕ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННОЙ
ПРОДУКЦИИ**

**MATHEMATICAL MODELING OF
HIGH VOLTAGE INDUCTION MOTORS FOR
AGRICULTURAL ELECTRICAL POWER
SUPPLY SYSTEMS**

Коробейников Борис Андреевич
д.т.н., профессор
SPIN-код=8653-3962

Korobeinikov Boris Andreevich
Dr.Sci.Tech., professor
SPIN-code=8653-3962

Ищенко Алексей Ильич
к.т.н., доцент
SPIN-код=1879-6380

Ishchenko Aleksey Iljich
Cand.Tech.Sci., associate professor
SPIN-code=1879-6380

Смаглиев Александр Михайлович
к.т.н., доцент
SPIN-код=4549-4736

Smagliev Aleksandr Mikhailovich
Cand.Tech.Sci., associate professor
SPIN-code=4549-4736

Кубанский государственный технологический университет, Краснодар, Россия

Kuban State Technological University, Krasnodar, Russia

Ольшанская Ирина Владимировна
к.т.н., доцент
SPIN-код=9953-6900
Севастопольский государственный университет, Севастополь, Россия

Olyshanskaya Irina Vladimirovna
Cand.Tech.Sci., associate professor
SPIN-code=9953-6900
Sevastopol State University, Sevastopol, Russia

Переселков Андрей Олегович,
студент
SPIN-код=3256-7801
Кубанский государственный технологический университет, Краснодар, Россия

Peresiolkov Andrey Olegovich
student
SPIN-code=3256-7801
Kuban State Technological University, Krasnodar, Russia

Статья посвящена решению актуальной задачи, заключающейся в повышении надежности работы систем электроснабжения предприятий по переработке сельскохозяйственной продукции. Материал статьи имеет исследовательский характер, выражающийся в том, что предлагаемые математические модели для анализа режимов групп высоковольтных асинхронных двигателей позволяют более эффективно исследовать различные симметричные режимы групп асинхронных двигателей. При этом выполнен анализ существующих математических моделей асинхронных двигателей, установлены особенности конструкции таких двигателей, непосредственно влияющие на зависимость активного сопротивления и индуктивности от частоты тока в роторе. Сформулированы допущения, принимаемые для получения математической модели асинхронного двигателя. Выполнено сравнение различных систем координат, используемых при математическом моделировании асинхронных двигателей. Доказано, что применение координат обобщенного вектора для математического моделирования асинхронных двигателей является наиболее оптимальным. Получена схема замеще-

This article is devoted to solving the critical task of improving the reliability of the power systems for agricultural processing plants. The article's material is exploratory in nature, reflected in the fact that the proposed mathematical models for the analysis of groups of high-voltage induction motors will allow to investigate various modes of symmetric groups of asynchronous motors more effectively. We present the analysis of the existing mathematical models of induction motors considering the design features of such machines that directly affect the dependence of resistance and inductance on the rotor current frequency. The assumptions taken into consideration to obtain a more accurate mathematical model of the induction motor are also formulated. The article provides a comparison of different reference frames used in the mathematical modeling of asynchronous motors. It is proved that the use of the generalized coordinate vector for mathematical modeling of asynchronous motors is the most optimal approach. The equivalent circuit of asynchronous deep-bar motor in generalized vector coordinates derived in the work is used for analysis of transient behavior as well as the steady state operation. The results of the study are suitable for transient analysis of elec-

ния глубокопазного асинхронного двигателя в координатах обобщенного вектора, используемая для анализа переходных процессов. Получена также схема замещения глубокопазного асинхронного двигателя в координатах обобщенного вектора, используемая для анализа установившегося режима. Результаты исследования предлагается использовать для анализа переходных процессов в системах электроснабжения предприятий сельского хозяйства, в которых имеется большое количество мощных электродвигателей, например, ТЭЦ сахарных заводов и элеваторов

Ключевые слова: ГЛУБОКОПАЗНЫЙ АСИНХРОННЫЙ ДВИГАТЕЛЬ, КООРДИНАТЫ ОБОБЩЕННОГО ВЕКТОРА, МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ, МНОГОКОНТУРНАЯ МОДЕЛЬ, СИНХРОННАЯ УГЛОВАЯ СКОРОСТЬ, СКОЛЬЖЕНИЕ

trical power supply systems of agricultural enterprises with large number of high-power electric motors, for example, CHP of sugar processing plants and grain elevators

Keywords: DEEP BAR INDUCTION MOTOR, GENERALIZED VECTOR SPACE, MATHEMATICAL MODELING, MULTI-LOOP MODEL, SYNCHRONOUS ANGULAR VELOCITY, SLIPPING

Задачи повышения эффективности производства основываются на создании таких систем электроснабжения, которые наряду с высокими технико-экономическими показателями в нормальных режимах должны иметь высокую надежность работы при различных аварийных ситуациях. Системы электроснабжения крупных предприятий по переработке сельскохозяйственной продукции, как правило, являются многомашинными и содержат асинхронные двигатели.

В системах электроснабжения предприятий возникают различные аварийные ситуации, которые сопровождаются сбросом нагрузки, отключением и расстройством технологического процесса при коротких замыканиях, кратковременными снижениями напряжения. Указанные аварийные ситуации приводят к нарушению технологического процесса на предприятии и значительному материальному ущербу.

Исключение или уменьшение ущерба от перерыва электроснабжения особенно важно для предприятий с непрерывным технологическим процессом, так как наряду с большим материальным ущербом возникает угроза пожаров, взрывов, большая опасность для жизни людей.

Разработка математических моделей и методов анализа переходных процессов для электромеханических комплексов, содержащих асинхрон-

ные двигатели, при аварийных ситуациях имеют свои особенности, которые обусловлены разнородностью входящих элементов, а также сложностью отдельных элементов. В частности, при расчетах по мгновенным значениям с целью повышения точности расчетов необходимо глубокопазные асинхронные двигатели рассматривать многоконтурными моделями роторной цепи.

Анализ существующих математических моделей асинхронных двигателей [1]-[6] показывает следующее:

1. Существующие модели глубокопазных асинхронных двигателей не достаточно ориентированы на исследование переходных процессов групп асинхронных двигателей.

2. Методы решения систем дифференциальных уравнений, описывающие переходные процессы группы асинхронных двигателей в системе электроснабжения, недостаточно учитывают закономерности переходных процессов, так как учет закономерностей позволяет повысить эффективность вычислительных алгоритмов.

3. Существующие методы моделирования систем электроснабжения для анализа переходных процессов не учитывают топологические закономерности схем, что ограничивает возможности автоматизации формирования уравнений пространства состояния.

4. Возникает необходимость в разработке такого метода анализа переходных процессов для групп глубокопазных асинхронных двигателей в системе электроснабжения, который позволил бы эффективно производить расчет переходных процессов при аварийных ситуациях для мгновенных значений величин, необходимых для построения и анализа современной противоаварийной автоматики.

В системах электроснабжения крупных промышленных предприятий широко используются мощные высоковольтные асинхронные двигатели, которые являются в основном глубокопазными. Асинхронные глубокопаз-

ные двигатели с короткозамкнутым ротором выполняются со стержнями трапецеидальной или колбообразной формы, что вызывает сложную зависимость активного сопротивления и индуктивности от частоты тока в роторе, которую часто выражают как зависимость от скольжения [1].

Для получения математической модели асинхронного двигателя принимаются следующие допущения:

- пренебрегаем пространственными высшими гармониками;
- пренебрегаем потерями в стали, не учитываем явление гистерезиса;
- считаем, что потоки рассеяния не зависят от положения ротора;
- активные сопротивления обмоток не зависят от температуры;
- не учитываются влияния емкостей внутри обмоток и между ними.

Для удобства представления математической модели асинхронного двигателя и уравнений, характеризующих данную модель, служит система координат. Применяются различные системы координат: abc (фазные), dq (вращающиеся с ротором машины), DQ (синхронно вращающиеся), F (обобщенного вектора) [6, 7] и другие. При этом существует однозначная связь между различными системами координат исходя из соотношений:

$$\left. \begin{aligned} \vec{Z}' &= \check{C}_s^t \cdot \vec{Z} \cdot C_s; \\ \vec{U} &= \check{C}_s^t \cdot \vec{U}'; \\ \vec{I} &= \check{C}_s \cdot \vec{I}', \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

где $\vec{I}, \vec{U}, \vec{Z}$ – исходные матрицы токов, напряжений и сопротивлений;

$\vec{I}', \vec{U}', \vec{Z}'$ – преобразованные матрицы токов, напряжений и сопротивлений;

\check{C}_s – матрица преобразований.

В частности, переход от координат abc к F можно осуществить, исходя из упрощенных выражений:

$$i_F = \frac{2}{3} \cdot (i_a + a \cdot i_b + a^2 \cdot i_c) \cdot e^{-j\omega t} = i_D + j \cdot i_Q, \quad (2)$$

где $a = \exp\left(j \cdot \frac{2\pi}{3}\right)$; $a^2 = \exp\left(-j \cdot \frac{2\pi}{3}\right)$;

i_a, i_b, i_c – фазные токи;

i_D, i_Q – действительная и мнимая части тока i_F в матричной форме.

$$\check{C}_f^{abc} = \frac{2}{3} e^{-j\omega t} |1 \quad a \quad a^2|, \quad (3)$$

$$\vec{i}_F = \check{C}_f^{abc} \cdot \vec{i}_{abc}, \quad (4)$$

$$\vec{i}_{abc} = \begin{vmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{vmatrix}.$$

Для получения перехода от координат обобщенного вектора к фазной системе координат необходимо выполнить следующие операции:

$$i'_F = i_F \cdot e^{j\omega t} = i_\alpha + j \cdot i_\beta; \quad (5)$$

$$\vec{i}_{abc} = \check{C}_{abc}^F \cdot \vec{i}_{\alpha\beta}, \quad (6)$$

$$\vec{i}_{\alpha\beta} = \begin{vmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{vmatrix};$$

$$\check{C}_{abc}^F = \begin{vmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} \\ -\frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{vmatrix}. \quad (7)$$

Применение координат обобщенного вектора для исследования режимов работы асинхронных двигателей позволяют, по сравнению с другими си-

стемами координат, более эффективно исследовать различные симметричные режимы: пуск, выбег, трехфазное короткое замыкание, самозапуск, заклинивание ротора и т.д. В результате математическая модель асинхронного двигателя получается компактной и в некоторых случаях даже возможно аналитическое рассмотрение решения задач переходных процессов.

Система уравнений для глубокопазного асинхронного двигателя при представлении его многоконтурной моделью в координатах обобщенного вектора следующая:

$$\left. \begin{aligned}
 U_S &= R_S \cdot i_S + L_S \cdot \frac{di_S}{dt} + M \cdot \frac{di_{r1}}{dt} + M \cdot \frac{di_{r2}}{dt} + \dots + M \cdot \frac{di_{rn}}{dt} + \\
 &+ j \cdot \omega_S \cdot L_S \cdot i_S + j \cdot \omega_S \cdot M \cdot i_{r1} + j \cdot \omega_S \cdot M \cdot i_{r2} + \dots + j \cdot \omega_S \cdot M \cdot i_{rn}; \\
 0 &= R_{r1} \cdot i_{r1} + L_{r1} \frac{di_{r1}}{dt} + M \frac{di_S}{dt} + M \frac{di_{r2}}{dt} + \dots + M \frac{di_{rn}}{dt} + \\
 &+ j \cdot s \cdot \omega_S \cdot L_{r1} \cdot i_{r1} + j \cdot s \cdot \omega_S \cdot M \cdot i_{r2} + \dots + j \cdot s \cdot \omega_S \cdot M \cdot i_{rn}; \\
 &\dots \\
 0 &= R_{rn} \cdot i_{rn} + L_{rn} \frac{di_{rn}}{dt} + M \frac{di_S}{dt} + M \frac{di_{r1}}{dt} + \dots + M \frac{di_{rn-1}}{dt} + \\
 &+ j \cdot s \cdot \omega_S \cdot L_{rn} \cdot i_{rn} + j \cdot s \cdot \omega_S \cdot M \cdot i_S + \dots + j \cdot s \cdot \omega_S \cdot M \cdot i_{rn-1},
 \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

где $i_{r1}, i_{r2}, \dots, i_{rn}$ — токи обмоток ротора;

$R_{r1}, R_{r2}, \dots, R_{rn}$ — активные сопротивления обмоток ротора;

$L_{r1}, L_{r2}, \dots, L_{rn}$ — индуктивности обмоток ротора;

i_S — ток в обмотке статора;

U_S — напряжение статора;

R_S — активное сопротивление обмотки статора;

L_s – индуктивность обмотки статора;

M – взаимная индуктивность между обмотками;

s – скольжение;

ω_s – синхронная угловая скорость.

На рисунке 1 приведена схема замещения глубокопазного асинхронного двигателя в координатах обобщенного вектора, используемая для анализа переходных процессов.

Приведенную систему уравнений удобно представить в матричной форме:

$$\vec{U} = \vec{R} \cdot \vec{I} + L \cdot \frac{d}{dt} \vec{I} + j \cdot \omega_s \cdot \vec{Q} \cdot \vec{I}, \quad (9)$$

где

$$\vec{U} = \begin{pmatrix} U_s \\ 0 \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \end{pmatrix}; \quad \vec{I} = \begin{pmatrix} i_s \\ i_{r1} \\ i_{r2} \\ \vdots \\ i_{rn} \end{pmatrix};$$

$$\vec{R} = \begin{pmatrix} R_s & & & & \\ & R_{r1} & & & \\ & & R_{r2} & & \\ & & & \ddots & \\ & & & & R_{rn} \end{pmatrix};$$

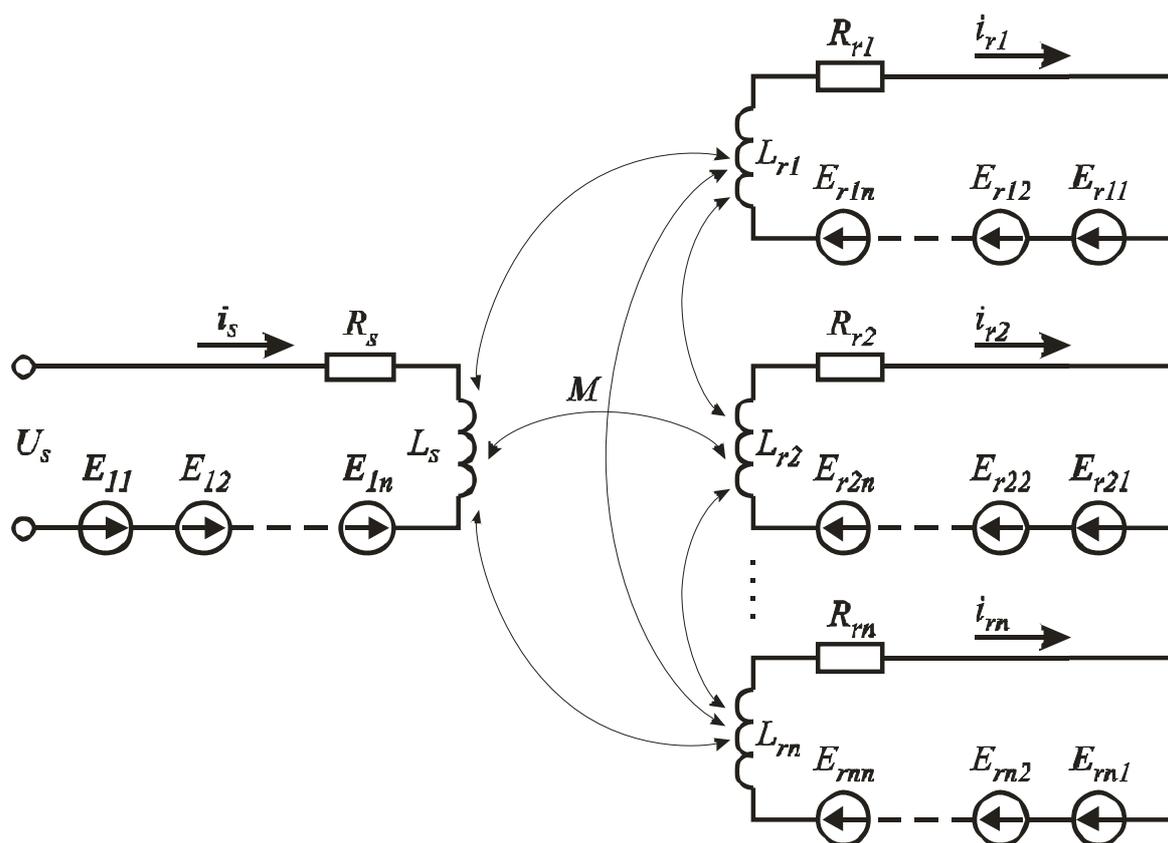


Рисунок 1 – Схема замещения глубокопазного асинхронного двигателя в координатах обобщенного вектора, используемая для анализа переходных процессов

$$L = \begin{vmatrix} L_s & M & M & \dots & M \\ M & L_{r1} & M & \dots & M \\ M & M & L_{r2} & \dots & M \\ \vdots & \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ M & M & M & \dots & L_{rn} \end{vmatrix};$$

$$\vec{Q} = \begin{vmatrix} L_s & M & M & \dots & M \\ s \cdot M & s \cdot L_{r1} & M & \dots & M \\ s \cdot M & s \cdot M & s \cdot L_{r2} & \dots & M \\ \vdots & \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ s \cdot M & s \cdot M & s \cdot M & \dots & s \cdot L_{rn} \end{vmatrix}.$$

Для установившегося режима работы асинхронного глубокопазного двигателя уравнения в матричной форме следующие:

$$\vec{U}_y = \vec{R} \cdot \vec{I}_y + j \cdot \omega_s \cdot \vec{Q} \cdot \vec{I}_y; \tag{10}$$

$$\vec{I}_y = \begin{bmatrix} i_{sy} \\ i_{r1y} \\ i_{r2y} \\ \vdots \\ i_{rny} \end{bmatrix}. \tag{11}$$

На рисунке 2 представлена схема замещения глубокопазного асинхронного двигателя, используемая для анализа установившегося режима.

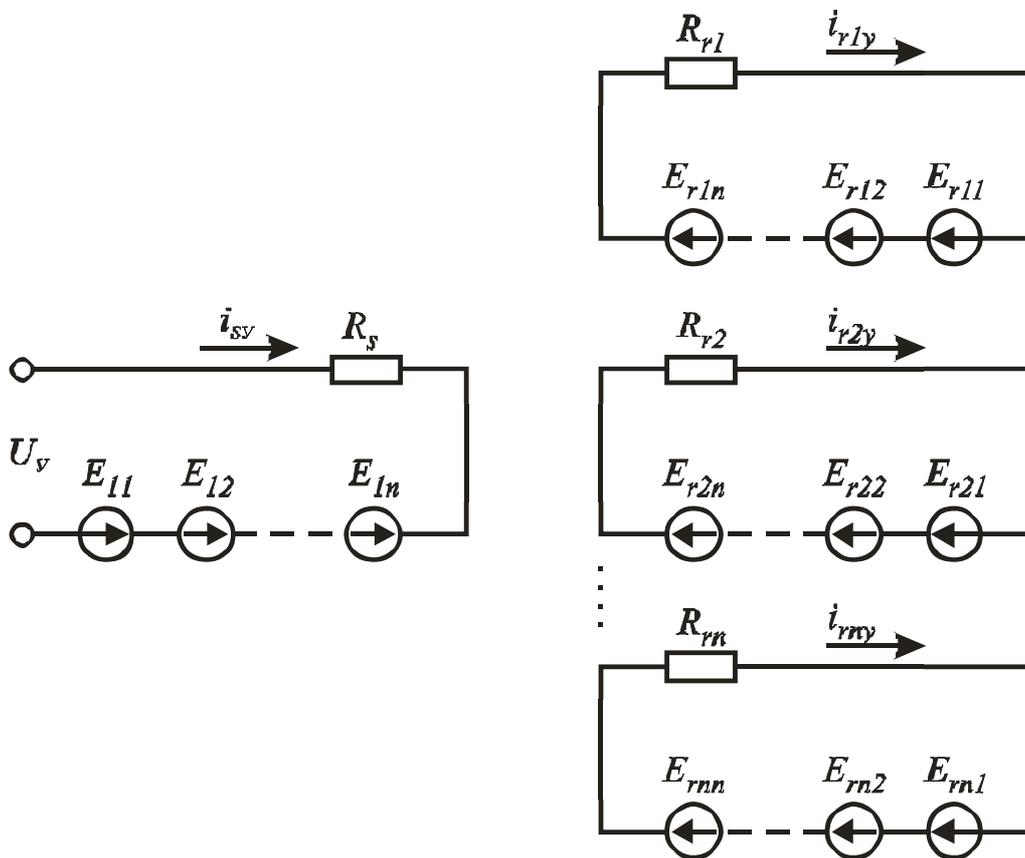


Рисунок 2 – Схема замещения глубокопазного асинхронного двигателя, используемая для анализа установившегося режима

Определение параметров модели глубокопазного асинхронного двигателя представляет собой сложную задачу, решение которой основано на методах оптимизации [8]–[12].

Результаты, полученные в данной работе, могут быть использованы при анализе переходных и установившихся режимов высоковольтных глубокопазных асинхронных двигателей.

Список литературы

1. Копылов И.П. Электромеханические преобразователи энергии. М.: Энергия, 1973. 400 с.
2. Постников И.М. Обобщенная теория и переходные процессы электрических машин. М: Энергия, 1975. 319 с.
3. Адкинс Б. Общая теория электрических машин. М: Госэнергоиздат, 1960. 272 с.
4. Уайт Д., Дудсон Г. Электромеханические преобразователи энергии. М: Энергия, 1964. 528 с.
5. Важнов А.И. Переходные процессы в машинах переменного тока. Л.: Энергия, 1980. 258 с.
6. Ковач К.П., Рац И. Переходные процессы в машинах переменного тока. М.-Л.: Госэнергоиздат, 1963. 744 с.
7. Коробейников Б.А., Ищенко А.И., Тадесе М. Исследование переходных процессов в симметричных асинхронных двигателях с помощью обобщенного вектора // Электромеханика (Известия вузов). 1985. № 5. С. 31-34.
8. Коробейников Б.А., Ищенко А.И. Идентификация параметров математической модели глубокопазных асинхронных двигателей // Электромеханика (Известия вузов). 1989. № 8. С. 33-38.
9. Химмельблау Д. Прикладное нелинейное программирование. М.: Мир, 1975. 595 с.
10. Гилл Ф., Мюррей Ч., Райт М. Практическая оптимизация. М.: Мир, 1975. 509 с.
11. Математическое моделирование синхронных двигателей систем электропитания предприятий по переработке сельскохозяйственной продукции / Б.А. Коробейников, Е.А. Беседин, А.И. Ищенко, А.М. Смаглиев // Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета (Научный журнал КубГАУ) [Электронный ресурс]. – Краснодар: КубГАУ, 2013. – №03(87). С. 318 – 329.
12. Математическое моделирование режимов работы синхронного двигателя системы электроснабжения сахарного завода / Б.А. Коробейников, А.И. Ищенко, А.М. Смаглиев и др. // Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета (Научный журнал КубГАУ) [Электронный ресурс]. – Краснодар: КубГАУ, 2014. – №04(098). С. 1308 – 1318. – IDA [article ID]: 0981404094. – Режим доступа: <http://ej.kubagro.ru/2014/04/pdf/94.pdf>, 0,688 у.п.л., импакт-фактор РИНЦ=0,346.

References

1. Kopylov I.P. Jelektromehanicheskie preobrazovateli jenergii. M.: Jenergija, 1973. 400 s.
2. Postnikov I.M. Obobshhennaja teorija i perehodnye processy jelektricheskikh mashin. M: Jenergija, 1975. 319 s.
3. Adkins B. Obshhaja teorija jelektricheskikh mashin. M: Gosjenergoizdat, 1960. 272 s.
4. Uajt D., Dudson G. Jelektromehanicheskie preobrazovateli jenergii. M: Jenergija, 1964. 528 s.
5. Vazhnov A.I. Perehodnye processy v mashinah peremennogo toka. L.: Jenergija, 1980. 258 s.
6. Kovach K.P., Rac I. Perehodnye processy v mashinah peremennogo toka. M.-L.: Gosjenergoizdat, 1963. 744 s.
7. Korobejnikov B.A., Ishhenko A.I., Tadese M. Issledovanie perehodnyh processov v simmetrichnyh asinhronnyh dvigateljah s pomoshh'ju obobshhennogo vektora //Jelektromehanika (Izvestija vuzov). 1985. № 5. S. 31-34.
8. Korobejnikov B.A., Ishhenko A.I. Identifikacija parametrov matematicheskoj modeli glubokopaznyh asinhronnyh dvigatelej // Jelektromehanika (Izvestija vuzov). 1989. № 8. S. 33-38.
9. Himmel'blau D. Prikladnoe nelinejnoe programmirovanie. M.: Mir, 1975. 595 s.
10. Gill F., Mjurrej Ch., Rajt M. Prakticheskaja optimizacija. M.: Mir, 1975. 509 s.
11. Matematicheskoe modelirovanie sinhronnyh dvigatelej sistem jelektrosnabzhenija predpriyatij po pererabotke sel'skohozjajstvennoj produkcii / B.A. Korobejnikov, E.A. Besedin, A.I. Ishhenko, A.M. Smagliev // Politematicheskij setevoj jelektronnyj nauchnyj zhurnal Kubanskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta (Nauchnyj zhurnal KubGAU) [Jelektronnyj resurs]. – Krasnodar: KubGAU, 2013. – №03(087). S. 318 – 329. – IDA [article ID]: 0871303024. – Rezhim dostupa: <http://ej.kubagro.ru/2013/03/pdf/24.pdf>, 0,75 u.p.l.
12. Matematicheskoe modelirovanie rezhimov raboty sinhronnogo dvigatelja sistemy jelektrosnabzhenija sahnarnogo zavoda / B.A. Korobejnikov, A.I. Ishhenko, A.M. Smagliev i dr. // Politematicheskij setevoj jelektronnyj nauchnyj zhurnal Kubanskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta (Nauchnyj zhurnal KubGAU) [Jelektronnyj resurs]. – Krasnodar: KubGAU, 2014. – №04(098). S. 1308 – 1318. – IDA [article ID]: 0981404094. – Rezhim dostupa: <http://ej.kubagro.ru/2014/04/pdf/94.pdf>, 0,688 u.p.l.