

3. Markov V.A., Bashirov R.M., Gabitov I.I. Toksichnost' otrabotavshikh gazov dizeley. Moscow, Izd-vo MGTU im. Baumana, 2002, 376 p.
4. Markov V.A. (1993). Metod snizheniya toksichnosti otrabotavshikh gazov dizeley transportnogo naznacheniya // Izvestiya VUZov. Mashinostroenie. 10 – 12, 74-83.
5. Mel'nik G.V. (2013). Razvitie dvigatelestroeniya za rubezhom (po materialam kongressa CIMAC 2013). Dvigatelestroenie, 3, 39-53.
6. MAN Diesel. Marine Engine IMO Tier II, Programme 2nd edition. 2009. 114 p.
7. Hountalas T. Two-Stroke Marine Diesel Engine Variable Injection Timing System Performance Evaluation And Optimum Setting For Minimum Fuel Consumption At Acceptable NOx Levels / D.T. Hountalas, S. Raptotiasios, A. Antonopoulos, S. Daniolos, I. Dolaptzis, M. Tsobanoglou // Proceedings of the ASME 2014 12th Biennial Conference on Engineering Systems Design and Analysis, June 25-27, 2014, Copenhagen, Denmark.
8. Akhnazarova S.L., Kafarov V.V. Metody optimizatsii eksperimenta v khimicheskoy tekhnologii. Ucheb. posobie. 2-e izd., pererab. i dop. Moscow, Vyssh. shk, 1985, 327 p.
9. Nikolaev N.I., Zinenko N.N., Panamarev V.E. Teploekhnicheskie i ekologicheskie parametry sovremennykh dizel'nykh i kotel'nykh ustanovok morskikh sudov v ekspluatatsii, monografiya. Novorossiysk, RIO GMU im. adm. F.F. Ushakova, 2017. 154 p.
10. Turkin A.V., Turkin V.A., Samoilenko A.Yu. (2018). Modelirovanie rabochikh protsessov malooborotnogo sudovogo dvigatelya dlya snizheniya emissii oksidov azota. Morskie intellektual'nye sistemy, 1 (39), T.1, 106-110.
11. Karakaev A.B., Lukanin A.V., Hekert E.V. Razrabotka metodologii, metodov i modelej analiza vliyaniya razlichnykh variantov postroeniya struktury i rezhimov podderzhaniya i vosstanovleniya rabotosposobnosti sudovykh elektroenergeticheskikh sistem (chast' 1)/Ekspluatatsiya morskogo transporta. 2016. № 3(80). S.54-60.
12. Astrein V.V. Algoritm samoorganizatsii grupp sudov dlya preduprezhdeniya stolknovenij [Tekst]/V.V. Astrein, S.I. Kondrat'ev, E.V. Hekert //Ekspluatatsiya morskogo transporta. 2016. № 2 (79). S. 45-50.
13. Hekert E.V., Nikolaev N.I., Gerasidi V.V. Kontrol' sostoyaniya dvigatelya firmy "cat-erpillar" sat 3512 gruntonasosnoj ustanovki zemsnyarada po vibratsionnym parametram. // Morskie intellektual'nye tekhnologii. 2018. № 1-1 (39). S. 100-105.

УДК 621.3.01(076)

DOI: 10.34046/aumsuomt92/18

ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЙ МОМЕНТ И МЕХАНИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА СПЕЦИАЛЬНОГО ОДНОФАЗНОГО АСИНХРОННОГО ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ БЕЗ ВНЕШНИХ ФАЗОСДВИГАЮЩИХ УСТРОЙСТВ ДЛЯ СУДОВЫХ СИСТЕМ АВТОМАТИКИ

*А. Б. Каракаев, доктор технических наук, профессор,
А. В. Костенко, аспирант,
А. И. Епихин, кандидат технических наук*

Отмечается, что современные системы автоматизации судов морского и речного флота включают в свой состав большое количество однофазных асинхронных электродвигателей. На сегодняшний день существует только теоретическое описание таких электрических машин, которое учитывает влияние не всех переходных процессов, происходящих в специальной асинхронной машине. Для того, чтобы математически описать происходящие в двигателе процессы в статье предложена разработанная математическая модель, которая учитывает влияние переходных процессов во всех режимах работы асинхронной электрической машины. Для пояснения явлений, происходящих в электромоторе, приводятся механические характеристики, а также зависимость пускового и максимального момента двигателя от угла. Результатом работы является получение математической модели, описывающей электромагнитные процессы, протекающие в однофазных асинхронных двигателях в установившемся режиме, вывод уравнения для электромагнитного момента и построение механических характеристик двигателя, а также полученная математическая модель дает возможность расчета электромеханических переходных процессов, протекающих в однофазных асинхронных двигателях без внешних фазосдвигающих устройств.

Ключевые слова: однофазные асинхронные двигатели, математическая модель, внешние фазосдвигающие устройства, судовые системы автоматизации, переходные процессы.

It is noted that modern automation systems for ships of the sea and river fleet are equipped with these special electric motors. The question of constructing a new mathematical model of a special asynchronous electric motor without external phase-shifting devices is considered, since today there is only a theoretical description of such models, which takes into account the influence of not all transients occurring in a special asynchronous machine. For these purposes, a new mathematical model is proposed in the article, which takes into account the influence of transients in all modes of operation of an asynchronous electric machine. The analysis of the main

proposed methods for compiling mathematical models is carried out and it is concluded that it is impossible to use not one of the standard models, but it is necessary to create a new mathematical model of a single-phase asynchronous electric motor without external phase-shifting devices for ship automation systems. It is taken into account that the solution to this problem is relevant not only for ships, but also for many sectors of the national economy, since there is also the opportunity to replace a morally obsolete drive with a special single-phase asynchronous electric motor without external phase-shifting devices. To explain the phenomena occurring in the electric motor, mechanical characteristics are given, as well as the dependence of the starting and maximum engine torque on the angle. The result of this work is to obtain a new mathematical model that describes electromagnetic processes that occur in single-phase induction motors in a steady state, as well as the obtained mathematical model makes it possible to calculate electromechanical transients that occur in single-phase asynchronous motors without external phase-shifting devices .

Key words: single-phase asynchronous motors, mathematical model, external phase-shifting devices, ship automation systems, transients.

Введение

На сегодняшний день все более и более актуальным является решение вопроса математического моделирования электропривода. В особенности специальных систем автоматизации судов. Как отмечалось ранее в [1] методы изучения однофазных асинхронных двигателей (ОАД) без внешних фазосдвигающих устройств (ВФСУ) с питанием от однофазной и трехфазной сетей разрабатываются и улучшаются на протяжении мно-

гих лет, однако проблемы математического моделирования электромагнитных и электромеханических процессов не решались так же быстро в связи с несовершенностью вычислительных методов, поэтому теоретическое описание процессов в ОАД превосходит математическое. Активные исследования в данной области [2] привели к получению уравнений для электромагнитного момента для специального ОАД без ВФСУ для систем автоматизации судна.

Зная токи (1) и все параметры двигателя, можно найти электромагнитный момент из следующей зависимости (2)

$$M = \frac{P_n x_0}{\omega} R_0 \left[I'_2 \left(\dot{I}_4 \frac{\sin \alpha}{k_{44}} + \dot{I}_4 \frac{\cos \alpha}{k_{45}} \right) - I'_3 \left(\dot{I}_1 + \frac{\cos \alpha}{k_{44}} - \dot{I}_4 \frac{\sin \alpha}{k_{45}} \right) \right] \quad (1)$$

Или, учитывая обозначения из таблицы источника [3]:

$$M = \frac{P_n x_0}{\omega} R_0 [I'_2 \dot{I}_4 A_2 - I'_3 (\dot{I}_4 + \dot{I}_4 A_1)] \quad (2)$$

Основная часть

В выражениях (1) и (2):

P_n - число пар полюсов статора двигателя;

$\omega = 2\pi$ - круговая частота.

Подставив в (2) выражения для токов из (1) и выполнив необходимые преобразования и упрощения, получим формулу для электромагнитного момента в виде:

$$M = \frac{P_n x_0 U_1^2}{2\pi f(k^2 + m^2)} \{ A_2 B_1 (k k_2 + m_2 m) + A_2 B_2 (k m_2 - k_2 m) - (k k_3 - m_3 m) * [(k k_1 + m_1 m) + B_1 A_1] + (k m_3 - k_3 m) * [(k m_1 + k_1 m) + B_2 A_1] \}. \quad (3)$$

Подставляя в последнюю формулу значения B_1 и B_2 из Таблицы 1 источника [1], производя упрощения, окончательно получим:

$$M = \frac{P_n x_0 U_1^2}{2\pi f(k^2 + m^2)} [(m_2 m + k_4 k_2) A_2 - (m_3 m_4 + k_3 k_4) A_1 - (m_3 m_1 + k_3 k_1)]. \quad (4)$$

Момент в формуле (4) выражен в Н·м

Рассматривая формулу (2) нетрудно заметить, что электромагнитный момент двигателя может быть представлен как состоящий из двух частей:

$$M = \frac{P_n x_0}{\omega} R_e I'_2 \dot{I}_4 A_2; \quad M = \frac{P_n x_0}{\omega} R_e [-I'_3 (\dot{I}_1 + \dot{I}_4 A_1)] \quad (5)$$

Эти составляющие имеют различные знаки. Первая из них представляет собой результат взаимодействия горизонтального (поперечного) поля статора с вертикальной (продольной) составляющей тока ротора.

Для первой составляющей (M_1) в области скольжения $0 < S < 1$ машина работает в двигательном режиме. В то же время для второй составляющей (M_2) в области скольжения $1 < S < 2$ машины могут иметь место различные соотношения величин M_1 и M_2 .

На рис. 1 представлены три зависимости моментов двигателя в функциях скольжения [3]. На этих рисунках:

1 – кривые электромагнитных моментов M_1 ,

2 – кривые электромагнитных моментов M_2

3 – кривые результирующих моментов двигателя M

Из рисунков видно, что по мере возрастания составляющей 2 (от рис. 1а) до рис. 1б)) результирующая кривая электромагнитного момента двигателя 3 отпускается ниже [4].

Во всех трех случаях имеется пусковой момент $M_{п}$, отличный от нуля, и ротор двигателя будет вращаться в направлении, указанном стрелками на кривых 3.

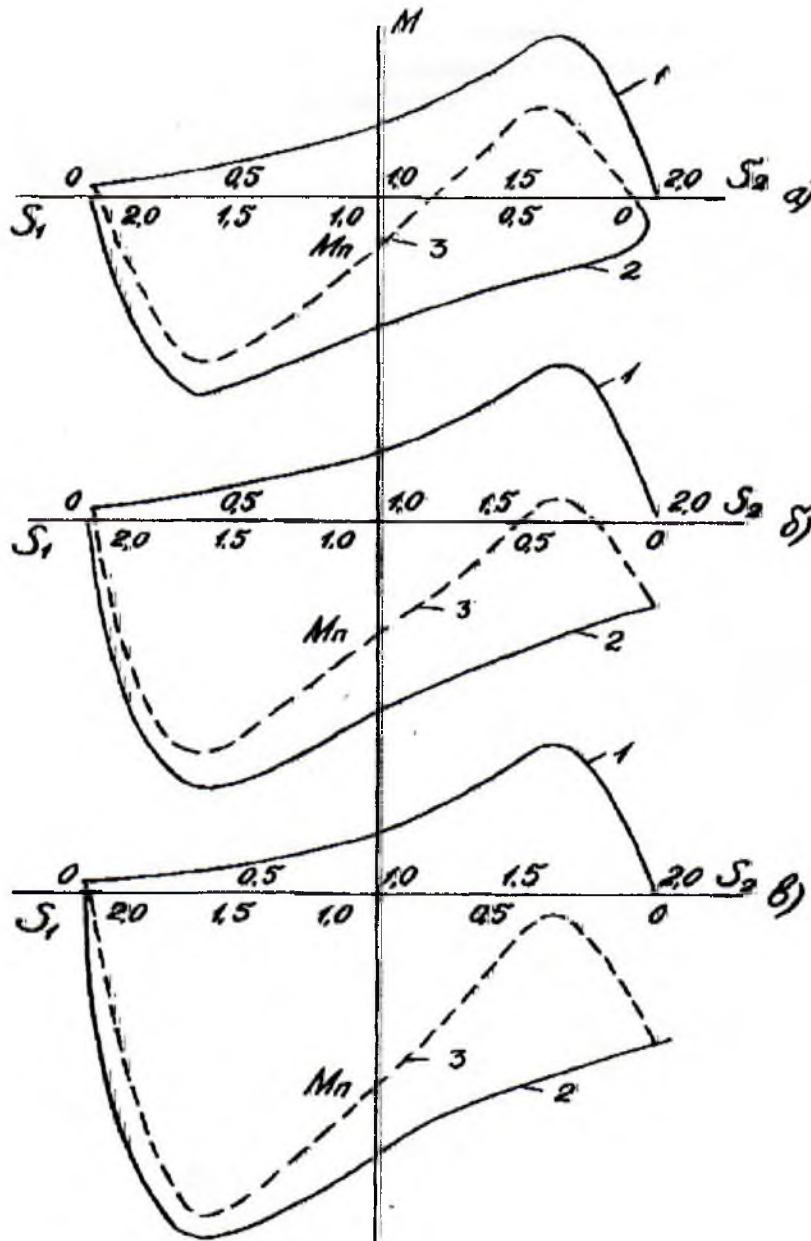


Рисунок 1 – Механические характеристики двигателя

Представленная выше интерпретация механических характеристик двигателя соответствует описанию, принятому в теории вращающихся полей [5]. В этом случае, говорят, что M_1 создается за счет прямо вращающегося поля, а M_2 – вследствие наличия обратно вращающегося поля.

Естественно, что оба представления (описания) идентичны по результатам. Электромагнитная мощность двигателя, передаваемая полем в зазор, будет равна:

$$P_3 = (M_1 + M_2)\omega \tag{6}$$

$$\text{т.е. } P_3 = P_n \times 0 R_e [I_2' \dot{I}_1 A_2 - I_3' (\dot{I}_1 + \dot{I}_4 A_1)]. \tag{7}$$

На рис. 2 показаны, для иллюстрации, расчетная механическая характеристика и токи двигателя (в относительных единицах).

При построении механических характеристик двигателя следует учесть, что полезный момент на валу M_2 равен (4):

$$M_2 = M - M_0 \tag{8}$$

где: M_0 – момент, соответствующий механическим и дополнительным потерям.

Из [4] известно, что

$$M_0 = \frac{P_{\text{мех}} + P_{\text{доб}}}{\Omega} \quad (9)$$

и составляет пренебрежимо малую часть M_2 . Поэтому в дальнейшем будем считать:

$$M_2 = M \quad (10)$$

Здесь $\Omega = 2\pi$ – механическая угловая частота вращения ротора.

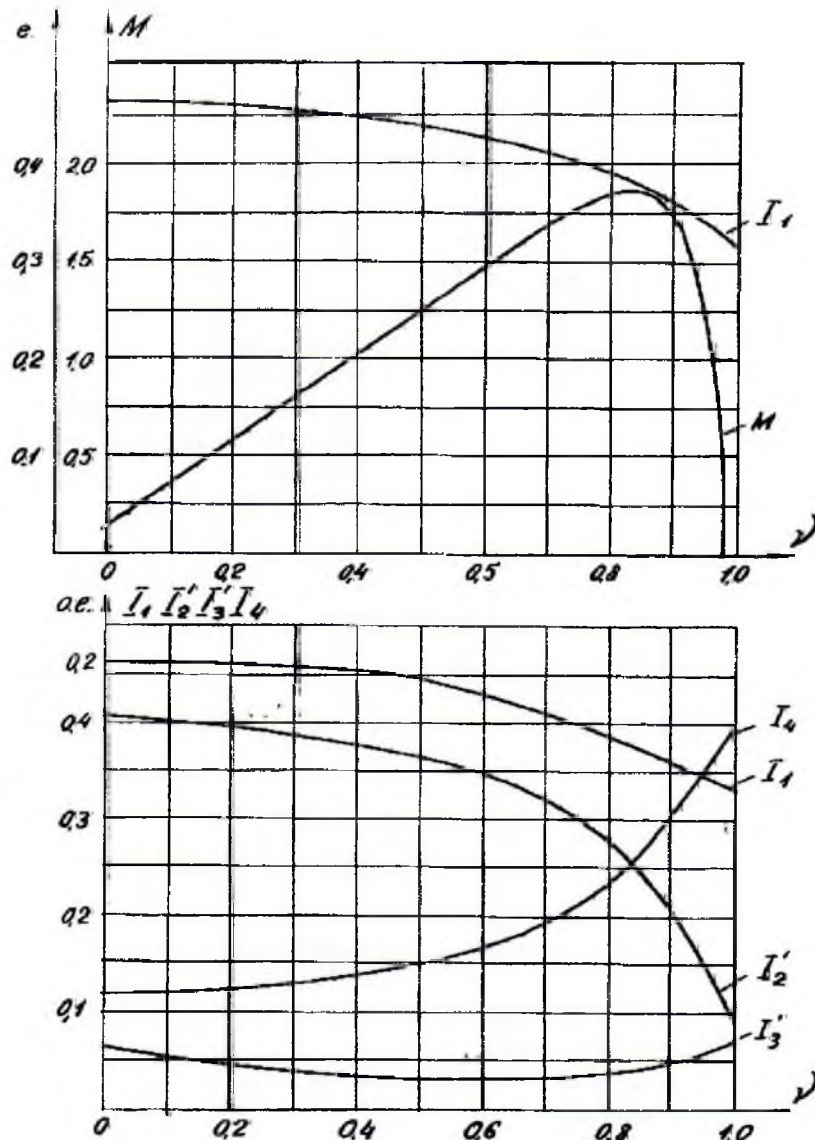


Рисунок 2 – Механическая характеристика и токи двигателя

Выражения для токов (1) и (4) позволяют определить токи и момент двигателя в функции относительной частоты вращения. Эта зависимость определяется параметрами машины [5].

Полученные выражения чрезвычайно громоздки и решение их при ручном счете является сложным и весьма трудоемким процессом [6]. Гораздо целесообразней использовать для расчетов электронно-вычислительную технику. С этой целью, учтя введенные в (1) обозначения, разработан алгоритм расчета характеристик ОАД на ЭВМ [7].

Исходными данными для расчета являются следующие параметры машины:

$W_{1\Phi}$ – эффективное число витков первой обмотки

$W_{44\Phi}$ – эффективное число витков обмотки 44;

$W_{45\Phi}$ – эффективное число витков обмотки 45;

r_1 – активное сопротивление первой обмотки;

r'_{44} – приведенная величина активного сопротивления обмотки 44;

r'_{45} – приведенная величина активного сопротивления обмотки 45;

r_0 – активное сопротивление, соответствующее потерям в стали;

x_1 – индуктивное сопротивление рассеяния первой обмотки;

r'_2 – приведенная величина активного сопротивления обмотки ротора;

x'_{44} – приведенная величина индуктивного сопротивления рассеяния обмотки 44;

x'_{45} – приведенная величина индуктивного сопротивления рассеяния обмотки 45;

x_0 – главное индуктивное сопротивление;

α – эл. угол между осями обмоток 1 и 44;

f – частота;

ρ – число пар полюсов;

ν – относительная частота вращения ротора

Относительная частота вращения задается начальными значениями в интервале от -1 до +1 шагом 0,05. Анализ основных характеристик ОАД без ВФСУ будет приведен в следующих публикациях.

Обсуждение результатов

Выражение для электромагнитного момента (1-10) и составленные для него вычисления [8], алгоритм и программа позволяют получить функциональные связи момента с углом α и другими параметрами двигателя. Для получения информации о свойствах и характеристиках ОАД

можно выявить ряд зависимостей, а именно:

1. Зависимость пускового и максимального момента от величины угла $M = f(\alpha)$ с целью определения оптимальных зон.

2. Зависимость величины пускового момента от соотношения количества витков в дополнительных обмотках

3. Зависимость характеристик двигателя от количества витков в дополнительных обмотках.

4. Влияние величины воздушного зазора на пусковые характеристики двигателя.

5. Зависимость характеристик ОАД от величины активного сопротивления ротора, и его влияние на форму механической характеристики.

Как видно из рисунка 3 пространственный угол α между осями обмоток 1 и 44 оказывает значительное влияние на величину момента и, в частности, на величину пускового и максимального момента. [9] Кривые зависимости пускового и максимального момента от угла α имеют синусоидальный характер и два максимума при $\alpha = 120$ и 300 эл. градусов.

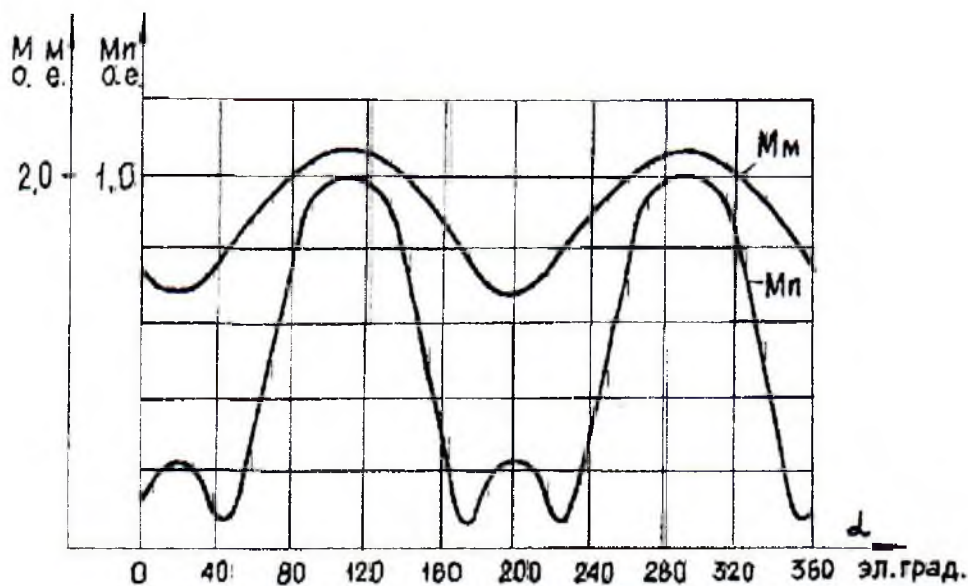


Рисунок 3 – Зависимость пускового $Mп$ и максимального $Mм$ моментов ОАД от угла

Синусоидальность зависимостей определяется тем, что проекция потока Φ_4 , создаваемого дополнительными обмотками, на продольную ось является функцией синуса угла α [10]. Максимумы моментов имеют период равный π , а их положение объясняется тем, что при $\alpha = 120$ и 300 эл. градусов амплитуды ЭДС и тока \dot{I}_4 , создаваемых в дополнительных обмотках потоком возбуждения Φ_1 , имеют наибольшее значение. Данное

утверждение подтверждается анализом выражений (1-10) и иллюстрируется рис. 1. Здесь, величина пускового момента $Mп$ растет при увеличении коэффициента A_1 при токе \dot{I}_4 и уменьшается при росте коэффициента A_2 . Полученная новая математическая модель ОАД без ВФСУ наиболее применима при расчете и построении специальных систем автоматики судов, таким как система рулевого управления, которая для реализации своих функций включает в свой состав более 30

специальных ОАД, а также система управления пропульсивной установкой судна включающей в свой состав более 40 таких двигателей, а также прочих систем автоматики судна.

Выводы и заключения

1. Расчетным способом получены уравнения (1-10) позволяющие на их основе построить уравнение электромагнитного момента ОАД без ВФСУ для систем автоматики судов.
2. Проанализирована возможность применения специального асинхронного электропривода для различных отраслей народного хозяйства.
3. Показана возможность реализации математической модели на ЭВМ.
4. На основе анализа сделан вывод об оптимальности достижения фазового сдвига в рассматриваемом двигателе за счет трансформаторной связи между рассредоточенными обмоткой возбуждения и дополнительными обмотками, уложенными в симметричный магнитопровод статора и, соответственно о необходимости ухода от использования конденсаторов.

Литература

1. Каракаев А. Б. Математическая модель однофазного асинхронного электродвигателя безвнешних фазосдвигающих устройств для судовых систем автоматики / А. Б. Каракаев, А. В. Костенко // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2019. — Т. 11. — № 4.
2. Каракаев А. Б. Разработка и применение однофазного асинхронного двигателя без внешних фазосдвигающих устройств для судовых систем автоматики / А. Б. Каракаев, А. В. Костенко // Сборник тезисов национальной научно-технической конференции профессорско-преподавательского состава ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала С.О. Макарова». — СПб.: Издательство ГУМРФ им. С.О. Макарова, 2018. — С. 91–92.
3. Баранов М.В. Разработка математической модели высокомоментного синхронного двигателя при проектировании прецизионных приводов / М.В. Баранов, О.А. Корчагин // Инженерный журнал: наука и инновации. — 2013. — № 8 (20). — С. 23
4. Каракаев А. Б. Математическое моделирование специального асинхронного электродвигателя для судовых вентиляционных систем / А.Б. Каракаев, Е.С. Хохлов, В.И. Зимин. — СПб.: Издательство ГУМРФ им. С.О. Макарова, 2016. — С.137-142
5. Malyar V. Mathematical model of single-phase induction motors with auxiliary winding resistance / V. Malyar, A. Malyar // PrzeglądElektrotechniczny. — 2018. — Vol. 94. — Pp. 33–37. DOI: 10.15199/48.2018.12.08

6. Третьяков, А. С. Моделирование тепловентиляционных режимов работы асинхронных электродвигателей при питании от синусоидального источника напряжения / А. С. Третьяков, О. А. Капитонов // Вестник. ГГТУ им. П. О. Сухого. — 2018. — № 2. — С. 66–73.
7. Кириченко О. С. Моделирование асинхронного электродвигателя с использованием программного модуля AnsysMaxwellRMxpvt / О. С. Кириченко, П. Н. Полянский, Г. А. Иванов // MOTROL. Commission of Motorization and Energeticsin Agriculture – 2016. – Vol.18. – №2. 3-7. – С. 49-55.
8. Пат. 2680372 Российская Федерация, МПК H02J 1/00. Способ получения фазового сдвига напряжений генераторов и устройство использования фазового сдвига для преобразования механической энергии в эллипсоидное излучение / Г.Л. Багич; заяв. и патентообл. Г. Л. Багич (RU). — № 2017139643; заявл. 14.11.2017; опубл. 20.02.2019, Бюл. № 5.
9. Казаков Ю. Б. Расчетный анализ потерь в стали асинхронных двигателей при питании от преобразователей частоты с несинусоидальным выходным напряжением / Ю. Б. Казаков, Н. К. Швецов // Вестник Ивановского государственного энергетического университета. — 2015. — № 5. — С. 42–46. DOI: 10.17588/2072-2672.2015.5.042-046.
10. Каракаев А.Б. Применение специального асинхронного электродвигателя для судовых вентиляционных систем / А.Б. Каракаев, Е.С. Хохлов // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С.О. Макарова. — 2015. — № 1 (29). — С. 208–214. DOI: 10.21821/2309-5180-2015-7-1-208-214
11. Контроль и управление коммутационными состояниями электрических сетей. Каракаев А.Б., Луканин А.В., Николаев Н.И., Хекерт Е.В. Морские интеллектуальные технологии. 2019. № 2-1 (43). С. 46-54.
12. Studenikin D.E. Estimation of vessel's movement with the aid of fuzzy logic based hierarchy systems (in english) [текст] / D.E. Studenikin, E.V. Khekert, M.A. Modina // Морские интеллектуальные технологии. 2018. Т. 1. № 1 (39). С. 205-208.
13. Каракаев А.Б., Луканин А.В., Хекерт Е.В. Разработка методологии, методов и моделей анализа влияния различных вариантов построения структуры и режимов поддержания и восстановления работоспособности судовых электроэнергетических систем (часть 1). // Эксплуатация морского транспорта. — 2016. — № 3(80). — С.54-60.
14. Каракаев А.Б., Хекерт Е.В., Луканин А.В. Разработка методологии, методов и моделей анализа влияния различных вариантов построения структуры и режимов поддержания и восстановления работоспособности судовых электроэнергетических систем (часть 2). // Эксплуатация морского транспорта. — 2016. — № 4(81). — С.85-95.

15. Каракаев А.Б., Луканин А.В., Хекерт Е.В. Основные принципы моделирования и информационной поддержки процессов управления эксплуатацией судовых электроэнергетических систем. (Часть 2). // Эксплуатация морского транспорта.– 2017.– № 3 (84).– С. 89-99.
16. Каракаев А.Б., Луканин А.В., Хекерт Е.В. Основные принципы моделирования и информационной поддержки процессов управления эксплуатацией судовых электроэнергетических систем. (ЧАСТЬ 1). // Эксплуатация морского транспорта.– 2017.– № 2 (83).– С. 114-122.

References

1. Karakaev, Aleksandr B., and Aleksandr V. Kostenko. "Mathematical model of single-phase asynchronous electric motor without external phase-shifting devices for ship automation systems." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo inzhenerstva imeni admirala S. O. Makarova* 11.4 (2019)
2. Karakaev, A.B., and A.V. Kostenko. "Razrabotka i primeneniye odnofaznogo asinkhronnogo dvigatelya bez vneshnikh fazov dvigayushchikh ustroystv dlya sudovykh sistem avtomatiki." *Sbornik tezisov nauchno-tekhnicheskoi konferentsii professorско-prepodavatel'skogostava FGBOU VO «GUMRF imeni admirala S.O. Makarova»*. SPb.: Izdatel'stvo GUMRF im. S.O. Makarova, 2018. 91–92.
3. Baranov, M.V., and O.A. Korchagin. "High torque synchronous motor mathematical model development under the design of precision drives." *Engineering Journal: Science and Innovation* 8(20) (2013): 23.
4. Karakaev, A.B., and A.S. Khokhlov., and V.I. Zimin. "Mathematical modeling of a special asynchronous electric motor for marine ventilation systems." SPb.: Izdatel'stvo GUMRF im. S.O. Makarova, 2016. 137–142.
5. Malyar V. Mathematical model of single-phase induction motors with auxiliary winding resistance / V. Malyar, A. Malyar // *Przegląd Elektrotechniczny*. — 2018. — Vol. 94. — Pp. 33–37. DOI: 10.15199/48.2018.12.08
6. Tretyakov A.S. and Kapitonov O.A.. "Modeling of heat ventilation modes of operation of asynchronous electric motors powered by a sinusoidal voltage source." *Vestnik Gomelskogo Gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta imeni P.O. Syhogo* – 2018 - Vol.2 – Pp. 66-73
7. Kirichenko O.S., and Polyanskiy P.N., and Ivanov G.A. Modeling an induction motor using a software module Ansys Maxwell MOTROL. Commission of Motorization and Energetics in Agriculture – 2016. – Vol.18. – Pp. 49-55.
8. Bagich, G.L. RU 2 680 372 C1, IPC H 02 J 1/00. Sposob polucheniya fazovogo dviganiya pri zheni generirovani
9. Kazakov, Yu.B., and N.K. Shvetsov. "Calculating analysis of steel losses in induction motors fed by frequency converters with non-sinusoidal output voltage." *Vestnik IGEU* 5 (2015): 42–46. DOI: 10.17588/2072-2672.2015.5.042-046
10. Karakaev, A.B., and E.S. Khokhlov. "Application of special design asynchronous electric motor for the ship ventilation system." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo inzhenerstva imeni admirala S.O. Makarova* 1(29) (2015): 208–214. DOI: 10.21821/2309-5180-2015-7-1-208-214
11. Контроль и управление коммутационными состояниями электрических сетей. Каракаев А.Б., Луканин А.В., Николаев Н.И., Хекерт Е.В. Морские интеллектуальные технологии. 2019. № 2-1 (43). С. 46-54.
12. Studenikin D.E. Estimation of vessel's movement with the aid of fuzzy logic based hierarchy systems (in english) [текст] / D.E. Studenikin, E.V. Khekert, M.A. Modina // *Морские интеллектуальные технологии*. 2018. Т. 1. № 1 (39). С. 205-208.
13. Каракаев А.Б., Луканин А.В., Хекерт Е.В. Разработка методологии, методов и моделей анализа влияния различных вариантов построения структуры и режимов поддержания и восстановления работоспособности судовых электроэнергетических систем (часть 1). *Эксплуатация морского транспорта*. 2016. № 3(80). С.54-60.
14. Каракаев А.Б., Хекерт Е.В., Луканин А.В. Разработка методологии, методов и моделей анализа влияния различных вариантов построения структуры и режимов поддержания и восстановления работоспособности судовых электроэнергетических систем (часть 2). *Эксплуатация морского транспорта*. 2016. № 4(81). С.85-95.
15. Каракаев А.Б., Луканин А.В., Хекерт Е.В. Основные принципы моделирования и информационной поддержки процессов управления эксплуатацией судовых электроэнергетических систем. (Часть 2). *Эксплуатация морского транспорта*. 2017. № 3 (84). С. 89-99.
16. Каракаев А.Б., Луканин А.В., Хекерт Е.В. Основные принципы моделирования и информационной поддержки процессов управления эксплуатацией судовых электроэнергетических систем. (ЧАСТЬ 1). *Эксплуатация морского транспорта*. 2017. № 2 (83). С. 114-122.