

УДК 621.3.01(076)

DOI: 10.34046/aumsuomt95/13

ВЫЯВЛЕНИЕ ЗАВИСИМОСТЕЙ НЕОБХОДИМЫХ ДЛЯ ПОСТРОЕНИЯ ПОЛИНОМИАЛЬНЫХ МОДЕЛЕЙ ОДНОФАЗНОГО АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ БЕЗ ВНЕШНИХ ФАЗОСДВИГАЮЩИХ УСТРОЙСТВ ДЛЯ СИСТЕМ СУДОВОЙ АВТОМАТИКИ МЕТОДАМИ ПЛАНИРОВАНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТА

А. Б. Каракаев, доктор технических наук, профессор,

А. В. Костенко, аспирант,

В статье выполнен обзор и анализ зависимостей, которые необходимо учитывать при построении полиномиальных моделей однофазного асинхронного двигателя без внешних фазосдвигающих устройств для систем судовой автоматики. Отмечается, что из выявленных в работе зависимостей важнейшей является зависимость пускового момента от электрического угла между осями обмоток 1 и 44 - α . Где выбор не оптимального электрического угла - крайне негативно сказывается на величине пускового момента однофазного асинхронного электродвигателя без внешних фазосдвигающих устройств для систем судовой автоматики в особенности это заметно в системах, к которым предъявляются жесткие требования к качеству выходных характеристик таких систем включающих в свой состав микроэлектродвигатели, например система автоматического управления и контроля судном, система управления главной пропульсивной установкой судна и прочие. Для пояснения зависимостей в однофазном асинхронном двигателе приводятся построенные характеристики и кривые электромагнитного момента однофазного асинхронного электродвигателя при различных значениях активного сопротивления ротора. В результате проведенных исследований устанавливается зависимость характеристик двигателя от количества витков в дополнительных обмотках двигателя, по полученным данным построены графики зависимостей. Также в работе показано как влияет воздушный зазор на пусковые характеристики микроэлектродвигателя, дается пояснение такого влияния. Результатом работы является определение оптимального пространственного угла, при котором пусковой и максимальный момент имеют максимумы, а также получение зависимостей, которые дают нам обобщенную информацию о свойствах и характеристиках однофазного асинхронного двигателя без внешних фазосдвигающих устройств, которую необходимо учитывать при построении полиномиальных моделей данного двигателя методами планирования эксперимента.

Ключевые слова: однофазный асинхронный двигатель, внешние фазосдвигающие устройства, полиномиальные модели, судовые системы автоматики, метод планирования эксперимента.

The article reviews and analyzes the dependencies that must be taken into account when building polynomial models of a single-phase asynchronous motor without external phase-shifting devices for ship automation systems. It is noted that of the dependences identified in the work, the most important is the dependence of the starting torque on the electric angle between the axes of the windings 1 and 44 - α . Where the choice of the optimal electric angle is not very negatively affects the starting torque of a single-phase asynchronous electric motor without external phase-shifting devices for marine automation systems, this is especially noticeable in systems that have strict requirements on the quality of the output characteristics of such systems including micro electric motors, for example system of automatic control and monitoring of the vessel, control system of the main propulsive installation of the vessel and others. To clarify the dependencies in a single-phase induction motor, the constructed characteristics and electromagnetic curves of the electromagnetic moment of a single-phase asynchronous motor are given for different values of the rotor resistance. As a result of the studies, the dependence of the characteristics of the engine on the number of turns in the additional windings of the engine is established, according to the data obtained, dependency graphs are constructed. Also, the work shows how the air gap affects the starting characteristics of the micro electric motor, an explanation of this effect is given. The result of this work is the determination of the optimal spatial angle at which the starting and maximum moments have maximums, as well as obtaining dependencies that give us generalized information about the properties and characteristics of a single-phase asynchronous motor without external phase-shifting devices, which must be taken into account when constructing polynomial models of this engine using experimental design methods.

Keywords: single-phase asynchronous motor, external phase-shifting devices, polynomial models, ship automation systems, experiment planning method.

Введение

Задача построения полиномиальных моделей однофазных асинхронных двигателей без внешних фазосдвигающих устройств для систем судовой автоматики являются достаточно актуальными на сегодняшний день, в связи с нарастающим уровнем автоматизации современного флота.

В связи с этим главной задачей ставится повышение надежности, эффективности и других параметров систем автоматики на судах.

Целью данной работы является выявление этих и других зависимостей параметров микроэлектродвигателей для систем автоматизации рассматривается в данной статье. В настоящее время для анализа математических моделей однофазных

асинхронных двигателей без внешних фазосдвигающих устройств ученые прибегают к различным методам. В том числе, пользуются методами планирования эксперимента [1].

Для того, чтобы применять данный метод необходимо обладать информацией о свойствах и характеристиках однофазного асинхронного двигателя (ОАД) без внешних фазосдвигающих устройств (ВФСУ), которые выявляются из ряда зависимостей.

Для решения поставленных задач были составлены и проанализированы следующие зависимости:

1. Зависимость пускового и максимального момента от величины угла α 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.

Основная часть

Важным обстоятельством является то, что характер рассматриваемой зависимости пускового момента от угла α и соотношения количества витков в дополнительных обмотках $\frac{W_{44\text{эф}}}{W_{45\text{эф}}}$ и положение максимумов не изменяется при варьировании других параметров двигателя. Очевидна жесткая зависимость $M = f(\alpha)$ в зоне максимумов.

Это особенно хорошо иллюстрирует рис. 1, где она показана в зоне углов α от 260 до 300 электрических градусов.

Здесь показано влияние соотношения $\frac{W_{44\text{эф}}}{W_{45\text{эф}}}$ на величину пускового момента в районе максимумов. Очевидно, что с увеличением соотношения $\frac{W_{44\text{эф}}}{W_{45\text{эф}}}$ пусковой момент растет [3].

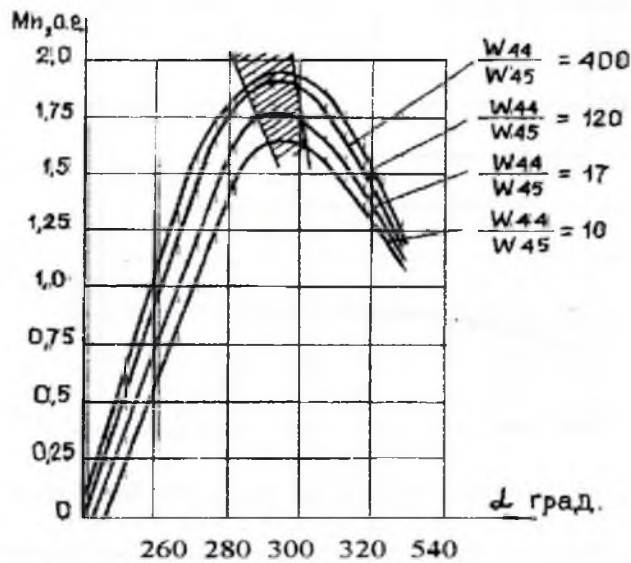


Рисунок 1 – Зависимости пускового момента двигателя от угла α и соотношения количества витков в дополнительных обмотках $\frac{W_{44\text{эф}}}{W_{45\text{эф}}}$

Данное обстоятельство объясняется зависимостями приведенными на рис. 2 и 3.

Как видно из рисунков, при увеличении количества в обмотке 44, все энергетические показатели растут и, наоборот, они падают при увеличении количества витков в обмотке 45. Исключение составляет значение $\cos \varphi$, которое увеличивается при росте W_{45} . Физически данный результат объясняется тем, что при увеличении количества витков в обмотке 44 растет амплитуда электро-

движущей силы (ЭДС), наводимой потоком возбуждения [4]. Это, в свою очередь, приводит к увеличению амплитуды тока I_4 и потока дополнительных обмоток Φ_4 . Последнее обстоятельство приводит к росту электромагнитного момента двигателя и его энергетических характеристик [5]. При увеличении количества витков в обмотке 45 без увеличения количества витков в обмотке 44 изменяется пространственное положение вектора магнитного потока Φ_4 в сторону уменьшения, в

результате чего увеличивается эллиптичность вращающегося поля и, соответственно, ухудшаются характеристики. Характерно, что практически все указанные зависимости являются, в пер-

вом приближении, линейными. Это важное обстоятельство необходимо учитывать при выборе метода планирования в ходе использования математической теории планирования эксперимента [6].

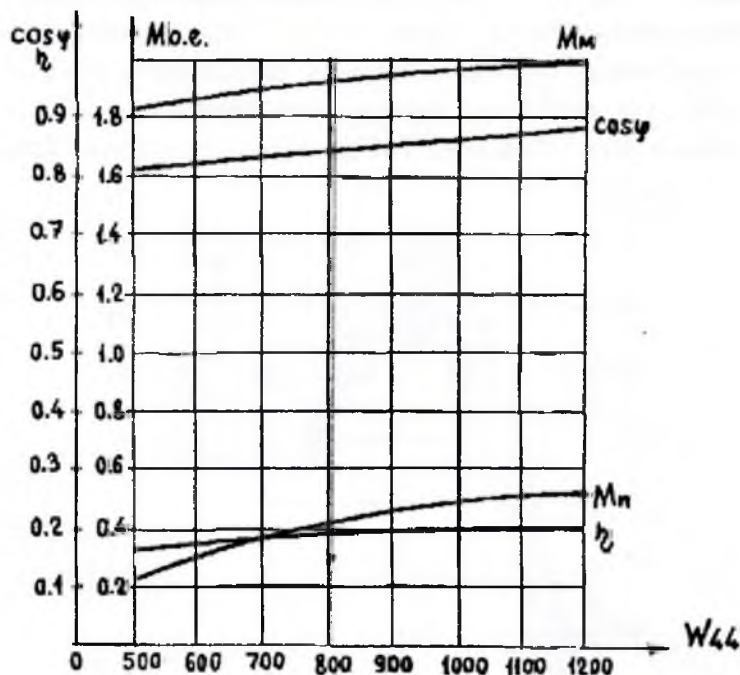


Рисунок 2 – Зависимость характеристик ОАД без ВФСУ от W44

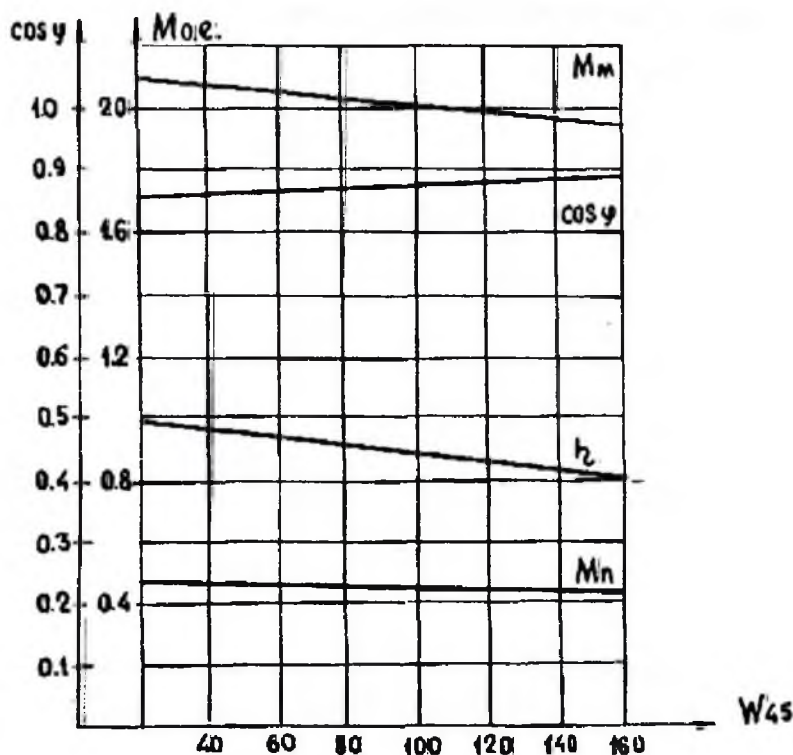


Рисунок 3 – Зависимость характеристик ОАД без ВФСУ от W45

Обсуждение результатов

Представляет интерес рассмотрение зависимости характеристик ОАД без ВФСУ от величины воздушного зазора. Известно, что в боль-

шинстве случаев, для получения высоких энергетических показателей асинхронных двигателей, стремятся к уменьшению величины воздушного зазора [7].

Обычно, ограничениями в этом вопросе выступают причины технологического характера. Как видно из рис. 4, пусковой момент падает при уменьшении воздушного зазора.

Это объясняется тем, что фазовый сдвиг во времени между токами статора I_1 и I_4 возникает за счёт наличия трансформаторных связей между контурами этих токов, а с уменьшением воздушного зазора уменьшается величина намагничивающего тока, и, соответственно, уменьшается фазовый сдвиг между этими токами, что и приводит к ухудшению пусковых свойств двигателя [8]. Очевидно,

что полученный результат необходимо учитывать при выработке рекомендаций по оптимальному проектированию двигателей подобного типа.

Зависимость характеристики ОАД без ВФСУ от величины активного сопротивления ротора показана на рис. 5.

Как видно из рисунка, при увеличении r_2' , все характеристики (M_n , M_m , КПД, $\cos \varphi$) падают. Исключением является пусковой момент M_n , который при увеличении r_2' растёт. Причем последняя зависимость является практически линейной.

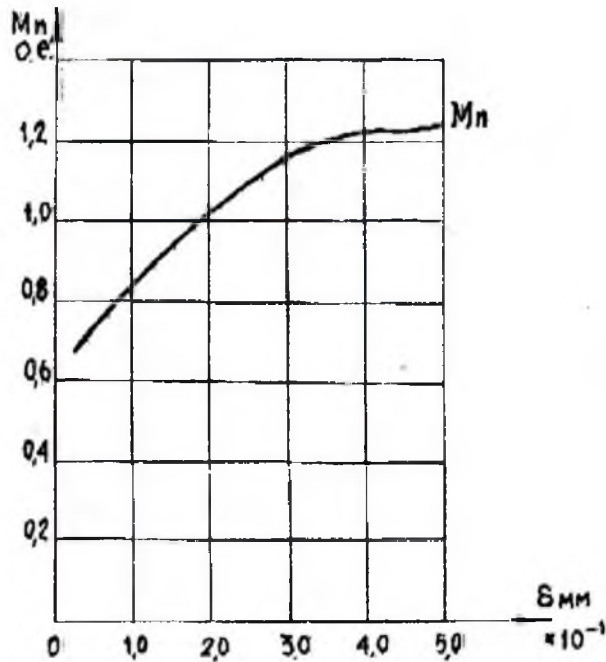


Рисунок 4 – Зависимость пускового момента M_n от величины воздушного зазора

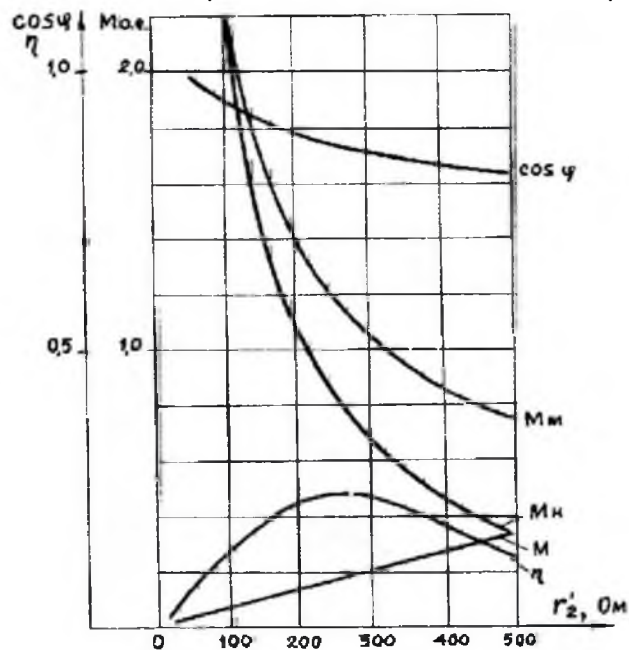


Рисунок 5 – Зависимость характеристик ОАД без ВФСУ от активного сопротивления ротора

Форма кривых электромагнитного момента ОАД без ВФСУ при различных значениях активного сопротивления ротора показана на рис. 6.

Очевидно, что при увеличении активного сопротивления ротора величина максимального

момента падает, причем характеристика становится мягче (S_m растет), а величина пускового момента увеличивается. Известно, что это свойство присуще большинству асинхронных микродвигателей, работающих в несимметричном режиме, однако для ОАД оно более ярко выражено [9, 10, 11].

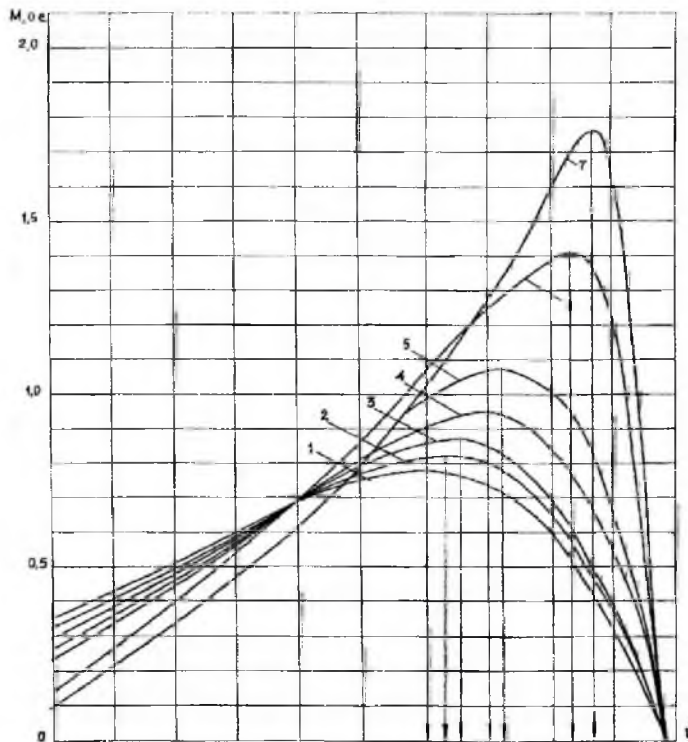


Рисунок 6 – Кривые электромагнитного момента ОАД без ВФСУ при различных значениях активного сопротивления ротора

Выводы и заключения

Выявленные зависимости, проиллюстрированные рисунками 1-6, позволяют получить обобщенную информацию о свойствах и характеристиках ОАД, которую необходимо учитывать при построении полиномиальных моделей ОАД без ВФСУ методами планирования эксперимента. Было установлено, что:

1. Пусковой и максимальный момент имеют максимумы при величине пространственного угла между осью обмотки 1 и 44, равной $\alpha = 300$ и $\alpha = 120$ электрических градусов [3];
2. Основные характеристики ОАД без ВФСУ (M_n , M_m , КПД, $\cos \phi$) увеличиваются при увеличении количества витков в обмотке 44 и уменьшаются при увеличении витков в обмотке 45. Причем зависимости имеют характер близкий к линейному;
3. Основные характеристики ОАД нелинейно зависят от главного индуктивного сопро-

тивления и приведенного значения активного сопротивления ротора. Причем, при увеличении главного индуктивного сопротивления резко снижается значение пускового момента, а при увеличении активного сопротивления ротора – увеличивается.

Литература

1. 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.
2. 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.

3. Каракаев А.Б., Костенко А. В., Епихин А.И. Электромагнитный момент и механическая характеристика специального однофазного асинхронного электродвигателя без внешних фазосдвигающих устройств для судовых систем автоматизации // Эксплуатация морского транспорта. - 2019.- № 3(92).- С.120-126.
4. Квашнин, В. О. Разработка методики программного расчета и исследования статических механических характеристик асинхронного двигателя (в среде BORLAND DELPHI) [Текст] / Квашнин В. О., Бабаш А. В. // Вестник ДГТУ, Сборник научных трудов.- Днепропетровск: ДГТУ, 2009.
5. Сивокобыленко, В. Ф., Василюк С. В. Расчетно-экспериментальное определение параметров схем замещения и характеристик асинхронных двигателей [Текст] / В. Ф. Сивокобыленко, С. В. Василюк // Науковий вісник НГУ.- 2014.- № 5.- С. 76-82.
6. 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.
7. 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
8. *Веников В. А.* Теория подобия и моделирования (применительно к задачам электроэнергетики): учеб. пособие для электроэнергетических спец. вузов / В. А. Веников, Г. В. Веников. — М.: Электротехника, 2013. — 440 с
9. Стеклов А. С. Прогнозирование технического состояния судовых электроэнергетических систем / А. С. Стеклов, А. В. Серебряков, В. Г. Титов // Вестник Ивановского государственного энергетического университета. — 2016. — № 5. — С. 21-26. DOI: 10.17588/2072-2672.2016.5.021-026.
10. Черный С. Г. Моделирование управления процессами в сложных системах при недетерминированных возмущающих воздействиях / С. Г. Черный, А. А. Жиленков // Автоматизация процессов управления. — 2016. — № 1 (43). — С. 37-46.
11. Стеклов А. С. Разработка модели экспертной системы диагностирования и прогнозирования технического состояния судовых электроэнергетических систем / А. С. Стеклов, А. В. Серебряков, В. Г. Титов // Электротехника: сетевой электронный научный журнал. — 2016. — Т. 3. — № 2. — С. 24-27.
12. Каракаев А.Б. Разработка методологии, методов и моделей анализа влияния различных вариантов построения структуры и режимов поддержания, и восстановления работоспособности судовых электроэнергетических систем (часть 1) [текст] / А.Б. Каракаев, А.В. Луканин, Е.В. Хекерт // Эксплуатация морского транспорта.- 2016.- № 3 (80).- С. 54-60.
13. Каракаев А.Б. Разработка методологии, методов и моделей анализа влияния различных вариантов построения структуры и режимов поддержания, и восстановления работоспособности судовых электроэнергетических систем (Часть 2) [Текст] / А.Б. Каракаев, А.В. Луканин, Е.В. Хекерт// Эксплуатация морского транспорта. – 2016.- № 4 (81).- С. 85-95.
14. Каракаев А.Б. Основные принципы моделирования и информационной поддержки процессов управления эксплуатацией судовых электроэнергетических систем. (Часть 1) [Текст] / А.Б. Каракаев, А.В. Луканин, Е.В. Хекерт// Эксплуатация морского транспорта.- 2017.- № 2 (83).- С. 114-122.
15. Каракаев А.Б. Основные принципы моделирования и информационной поддержки процессов управления эксплуатацией судовых электроэнергетических систем. (Часть 1) [Текст] / А.Б. Каракаев, А.В. Луканин, Е.В. Хекерт// Эксплуатация морского транспорта.- 2017.- № 3 (84).- С. 89-99.

References

1. Karakaev, A.B., and A.V. Kostenko. "Razrabotka i primeneniye odnofaznogo asinkhronnogo dvigatelya bez vneshnikhfazosdviyayushchikh ustroystv dlya sudovykh sistem avtomatiki." *Sbornik tezisov natsional'noy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii professorskoy i prepodavatel'skoy skozostava FGBOU VO «GUMRF imeni admirala S.O. Makarova»*. SPb.: Izdatel'stvo GUMRF im. S.O. Makarova, 2018. 91-92
2. 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 i rechnogo flotaimeni admirala S. O. Makarova* 11.4 (2019)
3. Karakaev A.B., Kostenko A.V., Epikhin A.I. Electromagnetic moment and mechanical characteristic of a special single-phase asynchronous electric motor without external phase-shifting devices for ship automation systems - Operation of maritime transport. - 2019.- No. 3 (92).- P.120-126.
4. Kvashnin, V.O., Babash A.V. (2009), "Development of methods and software for calculating the study of static mechanical characteristics of the induction motor (in the environment BORLAND

- DELPHI)”, Vestnik DGTU, Sbornik nauchnyx trudov Dneprodzerzhinsk DGTU.
5. Sivokobylenko, V. F., Vasilets, S. V. (2014) “Design and experimental definition parameters of substitution diagrams and characteristics asynchronous motors”, Naukoviy visnik NGU. № 5, pp. 76–82
 6. 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
 7. 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.
 8. Venikov V. A. The theory of similarity and modeling (in relation to the tasks of the electric power industry): textbook. allowance for electricity special. universities / V.A. Venikov, G.V. Venikov. - M.: Electrical Engineering, 2013. -- 440 s
 9. Steklov A. S. Prediction of the technical condition of ship electric power systems / A. S. Steklov, A. V. Serebryakov, V. G. Titov // Bulletin of Ivanovo State Power Engineering University. - 2016. - No. 5. - P. 21–26. DOI: 10.17588 / 2072-2672.2016.5.021-026.
 10. Cherny S. G. Modeling of process control in complex systems with non-deterministic disturbing influences / S. G. Cherny, A. A. Zhilenkov // Automation of control processes. - 2016. - No. 1 (43). - P. 37–46.
 11. Steklov A. S. Development of a model of an expert system for diagnosing and predicting the technical condition of ship electric power systems / A. S. Steklov, A. V. Serebryakov, V. G. Titov // Electrical: electronic scientific journal online. - 2016. - T. 3. - No. 2. - S. 24–27.
 12. Karakaev A.B. Razrabotka metodologii, metodov i modelej analiza vliyaniya razlichnykh variantov postroeniya struktury i rezhimov podderzhaniya i vosstanovleniya rabotosposobnosti sudovykh elektroenergeticheskikh sistem (chast' 1) [tekst] / A.B. Karakaev, A.V. Lukanin, E.V. Hekert // Ekspluatatsiya morskogo transporta. 2016. № 3 (80). S. 54–60.
 13. Karakaev A.B. Razrabotka metodologii, metodov i modelej analiza vliyaniya razlichnykh variantov postroeniya struktury i rezhimov podderzhaniya i vosstanovleniya rabotosposobnosti sudovykh elektroenergeticheskikh sistem (CHast' 2) [Tekst] /A.B. Karakaev, A.V. Lukanin, E.V. Hekert//Ekspluatatsiya morskogo transporta. 2016. № 4 (81). S. 85-95.
 14. Karakaev A.B. Osnovnye principy modelirovaniya i informacionnoj podderzhki processov upravleniya ekspluatatsiej sudovykh elektroenergeticheskikh sistem. (CHast' 1) [Tekst] /A.B. Karakaev, A.V. Lukanin, E.V. Hekert//Ekspluatatsiya morskogo transporta. 2017. № 2 (83). S. 114-122.
 15. Karakaev A.B. Osnovnye principy modelirovaniya i informacionnoj podderzhki processov upravleniya ekspluatatsiej sudovykh elektroenergeticheskikh sistem. (CHast' 1) [Tekst] /A.B. Karakaev, A.V. Lukanin, E.V. Hekert//Ekspluatatsiya morskogo transporta. 2017. № 3 (84). S. 89-99.

УДК 629.5.015

DOI: 10.34046/aumsuomt95/14

ИЗНОСЫ ПАР ТРЕНИЯ В СУДОВЫХ ДИЗЕЛЯХ С ЭЛЕКТРОННЫМ УПРАВЛЕНИЕМ

С.А. Худяков, доктор технических наук, профессор

А.И. Епихин, кандидат технических наук

А.В. Игнатенко

Опыт эксплуатации судовых малооборотных дизелей с электронным управлением свидетельствует о том, что со временем появляются повреждения и отказы, связанные с естественными износами пар трения, особенно прецизионных, в силовой гидравлической системе. Это приводит к снижению давления в системе и некоторым нарушениям газораспределения, что отражается на эксплуатационных характеристиках и снижении эффективности работы МОД. Этот же эффект будет более значителен на МОД серии Win GD фирмы Wartsila-Sulzer, у которых давление в силовой гидравлической системе не 200, а 300 бар. Утечки в таких системах при аналогичных износах в парах трения будут больше. Влияние повреждений и отказов элементов электронных систем на техническое состояние дизелей количественно оценить затруднительно и прогнозировать эти события тоже. Если для основных деталей МОД фирмы дают значения ресурсов, то для плат, микросхем и т. п. этих сведений нет. К тому же, в большинстве случаев эта продукция не фирм дизелестроителей. Таким образом, анализируя состояние дизелей с электронным управлением возможно только рекомендовать способы восстановления изношенных пар трения или их замену, что облегчит задачу судовладельцев по поддержанию судов с эксплуатационными характеристиками близкими к номинальным.

Ключевые слова: малооборотные дизели, электронное управление, эксплуатация, проблемы, повреждения, отказы.