

керт//Эксплуатация морского транспорта.– 2017.– № 3 (84).– С. 89-99.

16. Кондратьев С.И., Печников А.Н., Хекерт Е.В. Эргономический подход к оцениванию деятельности судовых специалистов: суть проблемы и подход к ее решению// Морские интеллектуальные технологии.– 2018.– № 4-4 (42).– С. 166-174.

REFERENCES

1. MAN B&W Two-stroke Marine Engines Emission Project guide. MAN Energy Solutions. 2018 – 111p.
2. Taufiq Chougle. 7 Ways For Ships To Meet MARPOL NOx Tier III Regulation [Elektronnyj resurs] <https://www.marineinsight.com/tech/different-ways-meet-nox-tier-iii-standards/>
3. Hudyakov S.A. Osobennosti dizelej firmy MAN B&W serii ME-GI i ih toplivnoj sistemy / S.A. Hudyakov, V.A. Bashkatov. Ekspluatatsiya morskogo transporta, № 2 (83), 2018. – Novorossiysk, RIO GMU im. adm. F.F. Ushakova. – S.107- 114.
4. Hudyakov S.A. Sistemy podvoda gaza dlya dizelej firmy MAN B&W serii SME-GI / S.A. Hudyakov, V.A. Bashkatov. Ekspluatatsiya morskogo transporta, № 3 (88), 2018. – Novorossiysk, RIO GMU im. adm. F.F. Ushakova. – S.81- 86.
5. Epifanov V.S. Ekspluatatsiya sudovyh energeticheskikh ustanovok na prirodnom gaze / V.S. Epifanov // . – M.: TransLit, 2010. –212 s.
6. IMO FAQ for IMO regulations to reduce air pollution from ships and the review of fuel oil availability, September 2016.
7. MAN B&W. Two-Stroke Marine Engines. Emission Project Guide for Marpol Annex VI Regulations. 9 Edition. 2018. – 108 p.
8. The 4T50ME-GI Test Engine at MAN Diesel & Turbo's Copenhagen Test Centre, Printed in Denmark MAN Diesel & Turbo Teglholmegade Copenhagen SV, Denmark, Feb. 2011.
9. MAN B&W 70-60 ME-GI/-C-GI-III Type Engines Engine Selection Guide, 1st Edition, June 2010, MAN Diesel & Turbo, branch of MAN Diesel & Turbo SE, Germany.
10. Leont'ev L.B. Povyshenie nadezhnosti sudovogo oborudovaniya. V 3-h t. T.3. Vossta-novlenie i uprochnenie detalej. – Vladivostok, Mor. gos. un-t, Dal'nauka, 2005. – 356 s.
11. Lashko V.A. (2014). Perspektivy razvitiya intellektual'nyh porshnevnyh DVS. Elek-tronnoe nauchnoe izdanie «Uchenye zametki TOGU» 2014, Tom 5, № 1, S. 260 – 287.
12. O. Grone. ME-GI dual fuel engine: The LNG carrier two-stroke solution. Pressrelease. Copenhagen, 13 January, 2004. (MAN B&W Diesel A/S launches the ME-GI engine).
13. Malcolm Latache [Elektronnyj resurs] <https://shipinsight.com/articles/man-b-w-dual-fuel-engines-pass-major-milestone>
14. Trevor Brown [Elektronnyj resurs] <https://www.ammoniaenergy.org/articles/man-energy-solutions-an-ammonia-engine-for-the-maritime-sector/>
15. Karakaev A.B. Osnovnye principy modelirovaniya i informacionnoj podderzhki processov upravleniya ekspluatatsiej sudovyh elektroenergeticheskikh sistem. (CHast' 1) [Tekst] /A.B. Karakaev, A.V. Lukanin, E.V. Hekert//Ekspluatatsiya morskogo transporta. 2017. № 3 (84). S. 89-99.
16. Kondrat'ev S.I., Pechnikov A.N., Hekert E.V. Ergonomicheskij podhod k ocenivaniyu deyatel'nosti sudovyh specialistov: sut' problemy i podhod k ee resheniyu// Morskie intellektual'nye tekhnologii. 2018. № 4-4 (42). S. 166-174

УДК 621.3.01(076)

DOI: 10.34046/aumsuomt94/24

РАЗРАБОТКА МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ОДНОФАЗНОГО АСИНХРОННОГО ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ ДЛЯ СУДОВЫХ СИСТЕМ АВТОМАТИКИ МЕТОДАМИ ПЛАНИРОВАНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТА

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

Для выявления и изучения основных закономерностей магнитных процессов однофазных асинхронных двигателей (ОАД) с целью создания работоспособной методики его проверки необходимо иметь математическую модель, в которой выходные показатели непосредственно связаны с параметрами. Однако, использование общеизвестных уравнений для токов и моментов, представляется затруднительным ввиду сложности и громоздкости. Целесообразнее заменить сложную математическую модель более простым, легко поддающимся анализу описанием. При этом точность аппроксимации должна быть достаточно высокой.

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

To identify and study the basic laws of the magnetic processes of single-phase asynchronous motors (SPAM) in order to create a workable method for testing it, it is necessary to have a mathematical model in which the output indicators are directly related to the parameters. However, the use of well-known equations for currents and moments seems difficult due to complexity and cumbersomeness. It is more advisable to replace a

complex mathematical model with a simpler, easier to analyze description. Moreover, the accuracy of the approximation should be sufficiently high.

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

Введение

В настоящее время для решения задачи построения математической модели однофазного асинхронного двигателя (ОАД) для судовых систем автоматикбольшие возможности представляют исследователю методы планирования эксперимента, которые позволяют сложное математическое описание аппроксимировать достаточно простой полиномиальной моделью, позволяющей решать аналитические и оптимизационные задачи [1,2,3]. Термин «эксперимент» [1] следует понимать в более широком смысле: эксперимент – совокупность действий, к которым приходится обращаться, чтобы выяснить представляющие интерес закономерности исследуемого объекта или процесса независимо от того, будут ли эти испытания на реальном объекте, физической моделью или расчеты на ЭВМ.

Основная часть

Основы теории планирования эксперимента (ПЭ) базируются на том [4,5], что результат любых опытов в n -мерном факторном пространстве могут быть представлены линеаризованным уравнением вида:

$$\left\{ \begin{aligned} y_i &= x_{0i}b_0 + x_{1i}b_1 + x_{2i}b_2 + x_{ki}b_k + \dots + \\ y_{i+1} &= x_{0(i+1)}b_0 + x_{1(i+1)}b_1 + x_{2(i+1)}b_2 + x_{k(i+1)}b_k + \dots + \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

где y – функция цели;

x – влияющие факторы;

b – коэффициенты уравнения.

Результаты опытов в математической форме имеют вид:

$$\bar{Y} = \bar{X}\bar{B}, \quad (2)$$

где \bar{Y} – вектор столбец наблюдений;

\bar{X} – информационная матрица;

\bar{B} – вектор столбец коэффициентов.

$$\bar{B} = \begin{pmatrix} b_1 \\ b_2 \\ \vdots \\ b_n \end{pmatrix}; \quad (3)$$

$$\bar{Y} = \begin{pmatrix} y_1 \\ y_2 \\ \vdots \\ y_m \end{pmatrix}; \quad (4)$$

$$\bar{X} = \begin{pmatrix} x_{01} & x_{11} & \dots & x_{k1} \\ x_{02} & x_{12} & \dots & x_{k2} \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ x_{0n} & x_{1n} & \dots & x_{kn} \end{pmatrix} \quad (5)$$

Полученные матрицы \bar{B} , т.е. определение коэффициентов полинома, связано с транспонированием и обращением информационной матрицы \bar{X} . Конечное выражение для \bar{B} имеет вид:

$$\bar{B} = \bar{C}^{-1}\bar{X}_t\bar{Y}, \quad (6)$$

где \bar{C}^{-1} – обратная матрица по отношению к

$$\bar{C} = \bar{X}_t\bar{X};$$

\bar{X}_t – транспонированная матрица.

Специально построение информационной матрицы \bar{X} и есть планирование эксперимента.

От того, как построена матрица \bar{X} зависит вид планирования и расчетные формулы для определения коэффициентов полиномов и дисперсии их определения.

В зависимости от специфики задачи, решаемой с помощью ПЭ, выбирают тот или иной вид планирования.

Для построения линейных и неполных квадратичных моделей рекомендуются планы факторных экспериментов, обладающие ортогональностью [3]. Для таких планов матрица \bar{B} диагональная, а матрица \bar{X} при двухуровневом варьировании факторов обладает тремя свойствами:

$$\sum_{i=1}^N X_{ij} = 0; \quad \sum_{i=1}^N X_{il}X_{im} = 0; \quad \sum_{i=1}^N X_{ij}^2 = N; \quad (7)$$

где N – число опытов;

i – номер опыта;

j, l, m – номер факторов.

Представителями таких планов является полный факторный эксперимент (ПФЭ) и метод дробных реплик (МДР).

Для построения квадратичных моделей основное применение нашли планы на кубе и сфере, главным образом симметричные. Матрица \bar{B} - планов для построения квадратичных моделей в общем случае недиагональная. Однако для

симметричных планов ее можно представить как блочно-диагональную:

$$\bar{B} = \begin{bmatrix} B_1 & 0 \\ 0 & B_2 \end{bmatrix} \quad (8)$$

Подматрица \bar{B}_1 , содержит диагональные элементы T_1 и T_{11} , необходимые для оценки свободного члена b_{0i} квадратичных эффектов b_{ii} , а также внедиагональные элементы T_2 и T_5 , определяющие ковариацию между этими эффектами:

$$\bar{B}_1 = \begin{bmatrix} T_1 & T_3 & \dots & T_2 \\ T_2 & T_{11} & \dots & T_5 \\ T_2 & T_5 & \dots & T_{11} \end{bmatrix} \quad (9)$$

Подматрица \bar{B}_2 , содержит только диагональные элементы T_3 и T_6 , необходимые для независимой оценки линейных эффектов b_{ii} и эффектов взаимодействия b_{ij} :

$$\bar{B}_2 = \begin{bmatrix} T_3 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ 0 & T_3 & \dots & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \dots & T_3 & 0 \\ 0 & 0 & \dots & 0 & T_6 \end{bmatrix} \quad (10)$$

Блочно-диагональная структура матрицы \bar{B} позволяет получить достаточно простые формулы для расчета коэффициентов регрессии, их ошибок и ковариаций [3].

Если матрица \bar{B} не является блочно-диагональной, что свойственно несимметричным планам, то расчет оценок целесообразно осуществлять лишь с помощью ЭВМ. Наиболее распространенными симметричными планами являются [3].

1. Планы для $K = 3$ на кубе – Бокса;
2. План Бокса-Бенкина;
3. Ротатабельный план Бокса, РЦКП-3;
4. Ортогональный план ОЦКП-3;
5. Почти композиционный насыщенный план Рехтшафнера и др.

Зависимость коэффициентов регрессии определяют с использованием критерия Стюдента [3,6].

Принято считать, что коэффициент регрессии значим, если выполнено условие:

$$|b| \geq S_b t, \quad (11)$$

где S_b – дисперсия, с которой определяется коэффициент.

Адекватность получаемых полиномиальных зависимостей объекту исследования, характеризуют величиной соответствия целевой функ-

ции, полученной из эксперимента – y^o и рассчитанной по полиному – y^p .

Величина, характеризующая несовпадение этих величин, называется дисперсией неадекватности (или дисперсией адекватности) и вычисляется по формуле:

$$S_{ag}^2 = \frac{1}{N - B} \sum_{i=1}^N (y_i^o - y_i^p)^2, \quad (12)$$

где B – число значимых коэффициентов регрессии полинома.

Проверка гипотезы адекватности проводится с использованием критерия Фишера:

$$F = \frac{S_{ag}^2}{S_{\varnothing}^2}, \quad (13)$$

} – для оценки

где S_{\varnothing}^2 – оценка дисперсии воспроизводимости, характеризующая точность измерений и воспроизводимость опытов.

Если, вычисленное по (13), значение критерия меньше $F_{табл}$, найденное по таблице [2,3] при заданном уровне значимости P (обычно $P = 0,95$), то описание считается адекватным объекту, т.е. полином описывает поверхность отклика. Применение матриц планирования для исследования электрических машин имеет определенную специфику в использовании аппарата планирования [6,7].

Можно выделить три класса задач в электротехнике, в которых используется ПЭ [2].

Первый класс задач наиболее близок к классической схеме ПЭ – это задачи испытания электрических машин.

Второй класс – задачи исследования методом ПЭ физических и математических моделей и аналогов или частей электрических машин, которые из-за специфики и сложности не могут использоваться непосредственно для решения задач синтеза электрических машин.

Третий класс – задачи аппроксимационного типа, когда метод позволяет заменить сложное математическое описание процесса преобразования энергии в электрических машинах простым полиномом с явной связью между переменными параметрами и показателями машин. Задача такого рода и рассматривается в данной статье.

Основной особенностью ПЭ для использования в решении поставленной задачи является то, что объект исследования имеет строгое математическое описание, которое из-за громоздкости в явном виде неудобно для исследования. Для данного класса задач термин планирование эксперимента правомерно заменить термином планирование расчета. Характерным для данной задачи является использование матриц планиро-

вания для проведения планируемого расчета, в результате которого должна произойти замена сложного математического описания простой полиномиальной моделью. При этом основным является точность аппроксимации: число расчетных точек в данном случае минимизируется не жестко.

Так как повторные расчеты показателей машины при тех же значениях параметров дают одинаковые результаты, то дисперсия эксперимента $S_{\mathcal{O}}^2 = 0$, т.е. все коэффициенты получаемых полиномов будут значимы [8]. Проверку адекватности модели по F-критерию Фишера в вершинах факторного пространства провести нельзя.

Проверку адекватности полинома при решении аппроксимационных задач необходимо проводить для других точек факторного пространства. Как показывает опыт [9], при постановке экспериментов наибольшее расхождение между $y^{\mathcal{O}}$ и $y^{\mathcal{P}}$ имеется в середине сторон и в центральной точке плана. Поэтому проверку адекватности модели следует проводить в этих точках, используя критерий Кохнера об однородности оценок дисперсий неадекватности [10].

$$S_{\max} = \frac{\max[S_{iaq}]}{\sum_{i=1}^n S_{iaq}^2}, \quad (14)$$

где $S_{iaq}^2 = (y_i^{\mathcal{O}} - y_i^{\mathcal{P}})^2$ – дисперсия неадекватности для контрольной точки;

n – число контрольных точек.

Если вычисленное значение S_{\max} меньше $S_{кр}$ определенного по таблице для соответствующих степеней свободы $f_1 = 1$ и $f_2 = n$ и для выбранного уровня значимости ($P = 0,95$), то применяется гипотеза об однородности дисперсии [1].

Затем вычисляется оценка генеральной дисперсии неадекватности модели:

$$S_{aq}^2 = \frac{\sum_{i=1}^N S_{iaq}^2}{n}, \quad (15)$$

Если величина S_{aq}^2 удовлетворяет предъявленной к аппроксимации точности, то полином адекватен: если не удовлетворяет – необходимо переходить к планам высших порядков или уменьшить интервал варьирования факторов. Так как число контрольных опытов при проведении планируемых расчетов ограничено не жестко, рекомендуется с помощью таблицы случай-

ных чисел взять еще дополнительные точки внутри факторного пространства [2,3].

Имеется и более простой и очевидный путь проверки адекватности аппроксимирующей формулы, когда $S_{\mathcal{O}}^2 = 0$ задаться допустимой погрешностью аппроксимации $\Delta y_{\mathcal{Oon}}$ и считать аппроксимацию адекватной, если ее погрешность $(y^{\mathcal{O}} - y^{\mathcal{P}})$ в точках плана и в ряде контрольных точек не превосходит $\Delta y_{\mathcal{Oon}}$. При этом может быть проведена и своеобразная проверка значимости коэффициентов, если считать незначимыми те коэффициенты, отбрасывание которых не нарушает условие адекватности аппроксимации. Подобный способ проверки адекватности аппроксимации в наибольшей степени отвечает задачам по выявлению с помощью ПЭ общих закономерностей электромагнитных процессов в ОАД для судовых систем автоматике.

Решение задачи по получению полиномиальных зависимостей, связывающие выходные характеристики ОАД с его параметрами методами ПЭ можно разделить на несколько этапов:

1. Выявление количества и состава независимых переменных.
2. Предварительные исследования характера зависимостей функции цели от независимых переменных.
3. Установление диапазона изменения независимых переменных.
4. Выбор экспериментального плана.
5. Проведение эксперимента по выбранному плану, определение коэффициентов регрессии.
6. Проверка адекватности полученного уравнения.
7. Анализ характеристик ОАД с помощью полиномиальных моделей и выявление основных закономерностей.
8. Переход от метода планирования эксперимента к оптимизации ОАД для судовых систем автоматике.

Одним из решающих в ПЭ является выявление количества и состава независимых переменных факторов.

Для анализа особенностей технико-экономических экспериментов целесообразно выделить три категории факторов [3]:

- Управляемые X_u , которые можно изменять в исследуемом диапазоне без большого риска полностью нарушить работу объекта исследования;
- Неуправляемые, но контролируемые X_k , которые хотя и не управляются, но достаточно точно фиксируются в период исследования;

- Трудноизменяемые X_T ;

Отнесение того или иного фактора к одной из категорий зависит от конкретной задачи. Наиболее часто, исходя из опыта исследования [3], встречаются ситуации, в которых по-разному сочетаются факторы X_U, X_K, X_T .

В первичном рассмотрении принимаем в качестве факторов, влияющих на характеристики двигателя, ряд исходных величин, используемых для расчета токов и моментов двигателя, полученных в [9]. В этот ряд входят все активные и индуктивные сопротивления обмоток статора и ротора, количество витков обмоток статора, параметры питающей сети – напряжение и частота, число пар полюсов и угол α между осями обмоток 1 и 44. Всего таким образом имеем n факторов.

Учитывая предварительные исследования, к управляемым факторам X_U отнесем следующие параметры:

W_{44} – число витков дополнительной обмотки 44;

W_{45} – число витков дополнительной обмотки 45;

r_1 – активное сопротивление обмотки возбуждения 1;

r_2 – активное сопротивление обмотки ротора;

r_{44} – активное сопротивление обмотки 44;

r_{45} – активное сопротивление обмотки 45;

r_0 – активное сопротивление намагничивающей ветви.

Эти семь факторов легко управляются, т.е. их можно легко изменять, варьируя количеством витков в секциях и диаметром обмоточного провода. Однако, на их значения могут быть наложены ограничения, применительно к конкретному габариту двигателя.

К контролируемым факторам отнесены величины индуктивных сопротивлений рассеяния обмоток x_1, x_2, x_{44}, x_{45} , а также сопротивление взаимной индукции ротора x_m . Величины этих факторов зависят от геометрии магнитопровода двигателя, а поскольку в расчетах используются их приведенные значения, то с изменением количества витков соответствующих обмоток изменяется в обратной пропорции коэффициент приведения, что обеспечивает достаточно точную их фиксацию на одном уровне при исследованиях.

К трудноизменяемым факторам отнесены такие величины, как количество витков обмотки возбуждения W_1 , напряжение сети U_1 , частота питающей сети f_1 , число пар полюсов P_{II} , а также угол α , оптимальное значение которого достаточно точно определено [10].

Величины U, f и P_0 целиком определяются техническим заданием на проектирование, и поэтому варьировать ими при исследовании с применением ПЭ не представляется возможным. W_1 определяется величиной ЭДС, необходимой для создания потока двигателя. Таким образом, из общего перечня влияющих на характеристики ОАД факторов, выбраны семь независимых переменных.

Для ОАД в первую очередь представляют интерес такие выходные характеристики, как величина пускового момента M_{II} или кратность пускового момента k_{II} , величина максимального момента M_M или кратность максимального момента k_M , скольжение S_m , соответствующее максимальному моменту. Представляет интерес также получение полиномиальной зависимости КПД и $\cos \varphi$ от параметров машины при оптимальном значении номинального скольжения.

С целью обобщения результатов исследования ОАД различных мощностей и частот вращения целесообразно использовать относительные параметры двигателя [1]. В качестве базовой величины обычно выбирают приведенное активное сопротивление ротора или главное индуктивное сопротивление x_m . Иногда используют и смешанную систему относительных параметров. Активное сопротивление ротора определяет основные свойства машины, его удобно использовать при моделировании на расчетных столах переменного тока: оно не зависит от насыщения ОАД. Однако, величина r_2' зависит от температуры обмотки и чувствительна к технологическому разбросу. В свою очередь сопротивление x_m характеризует главные электромагнитные связи в ОАД и не зависит от температуры, но его величина изменяется для различных режимов работы машины в зависимости от насыщения. Кроме того, на него отказывает влияние колебание воздушного зазора, связанного с технологическим разбросом. Учитывая трудность изменения в широких пределах величины главного индуктивного сопротивления, а также то обстоятельство, что мы выше включили r_2' в группу управляемых факторов, выбираем в качестве базовой величины главное индуктивное сопротивление x_m .

Таким образом, в качестве независимых переменных (факторов) приняты следующие относительные параметры ОАД:

$$P = \frac{r_1}{x_m}; \quad P_2' = \frac{r_2'}{x_m}; \quad P_4' = \frac{r_{44}'}{x_m}; \quad P_5' = \frac{r_{45}'}{x_m};$$

$$P_0' = \frac{r_0}{x_m}. \quad (16)$$

Оставшиеся два управляемых фактора, а именно, количество витков в обмотке 44 – W_{44} и количество витков в обмотке 45 – W_{45} целесообразно также представить в виде относительных параметров, например, в виде коэффициентов трансформации, взяв за базовую величину количество витков в обмотке возбуждения W_1 .

Тогда:

$$k_4 = \frac{W_{44}k_{044}}{W_1k_{01}}; \quad k_5 = \frac{W_{45}k_{045}}{W_1k_{01}}. \quad (17)$$

Области значений выбранных независимых переменных установлена на основе статистического анализа результатов 50-ти вариантов расчета механической характеристики на ЭВМ для двигателей различных габаритов, соответствующей полезной мощности $P_2 = 3 \div 16$ Вт при $2p = 2$ и $2p = 4, f = 50$ Гц.

Опыт исследования ОАД для использования в системах судовой вентиляции воздуха [10] показал, что наиболее эффективным является применение теории ПЭ с использованием планов для построения моделей второго порядка типа Бокса-Бенкина ВВ_к, представляющие выборку

Коэффициенты T в (18÷21) зависят от размерности плана и определяются по таблицам [3].

Реализация плана Бокса-Бенкина для размерности $k = 7$ получает получить квадратичные модели вида:

$$Y = b_0 + b_1X_1 + b_2X_2 + b_3X_3 + b_4X_4 + b_5X_5 + b_6X_6 + b_7X_7 +$$

$$+ b_{11}X_1^2 + b_{22}X_2^2 + b_{33}X_3^2 + b_{44}X_4^2 + b_{55}X_5^2 + b_{66}X_6^2 + b_{77}X_7^2 +$$

$$+ b_{12}X_1X_2 + b_{13}X_1X_3 + b_{14}X_1X_4 + b_{15}X_1X_5 + b_{16}X_1X_6 + b_{17}X_1X_7 +$$

$$+ b_{23}X_2X_3 + b_{24}X_2X_4 + b_{25}X_2X_5 + b_{26}X_2X_6 + b_{27}X_2X_7 +$$

$$+ b_{34}X_3X_4 + b_{35}X_3X_5 + b_{36}X_3X_6 + b_{37}X_3X_7 +$$

$$+ b_{45}X_4X_5 + b_{46}X_4X_6 + b_{47}X_4X_7 +$$

$$+ b_{56}X_5X_6 + b_{57}X_5X_7 + b_{67}X_6X_7 \quad (22)$$

При постановке эксперимента принимаем следующие допущения:

1. Все неуправляемые x_k и трудноизменяемые параметры x_T считаем неизменными для всей серии опытов.
2. Независимо от величины потерь в меди обмоток, условие условия теплоотдачи считаем удовлетворительными для всей серии опытов.
3. Определение значений характеристик осуществляем для максимально возможного КПД.
4. Схема обмоток для всех вариантов остается постоянной.

Введенные допущения облегчают проведение анализа свойств ОАД по полиномиальным моделям и, в то же время, они не могут оказать

точек из ПФЭ 3^k . Особенностью этих планов является [11] то, что во всех строках отличных от нуля только два (при $k = 3 \div 5$), три (при $k = 6, 7, 9$) или четыре (при $k = 10, 11, 12, 16$) фактора.

Эта особенность планов весьма важна для решения технико-экономических задач, так как позволяет стабилизировать ряд факторов в многофакторной ситуации в течение некоторой группы опытов. Поскольку планы Бокса-Бенкина являются симметричными, т.е. имеют блочно-диагональную структуру матрицы, то коэффициенты регрессии определяются по достаточно простым зависимостям, не требующим использования ЭВМ [3]. Свободный член определяется из выражения:

$$b_0 = T_1(oY) + T_2 \sum_{i=1}^N (iiY). \quad (18)$$

Линейные эффекты равны:

$$b_i = T_3(iY). \quad (19)$$

Квадратичные эффекты находятся как:

$$b_{ii} = T_1(iiY) + T_5 \sum_{i=1}^N (iiY) = T_2(oY), \quad (20)$$

Эффект взаимодействия:

$$b_{ij} = T_6(ijY). \quad (21)$$

существенного влияния на результаты экспериментов, поскольку основной задачей исследования на данном этапе является выявление закономерностей в двигателе. Указанные допущения при оптимизации двигателя могут быть использованы для выработки ограничений.

Обсуждение результатов

Для проведения эксперимента, прежде всего, определены основные характеристики плана, т.е. основной уровень (центральный план) и шаги варьирования, которые приведены в таблице 1.

Здесь кодированные переменные связаны с физическими величинами следующим соотношением:

$$X_i = \frac{x_i - x_{0i}}{\Delta x_i}, (i = 1, 2, \dots, n), \quad (23) \quad \text{где } \Delta x_i - \text{ шаг варьирования; } x_{0i} - \text{ координаты центра плана } x_i - \text{ независимые переменные.}$$

Таблица 1 – Основные характеристики плана эксперимента типа ВВ-размерности $k = 7$

Независимые переменные (x_i)	Кодированное значение(X_i)	Базовый уровень(о)	Шаг варьирования(Δ)	Нижний уровень(-1)	Верхний уровень(+1)
k_4	x_1	0,600	0,220	0,380	0,820
k_5	x_2	0,060	0,020	0,038	0,082
ρ_1	x_3	0,450	0,150	0,300	0,600
ρ_2'	x_4	0,350	0,100	0,250	0,450
ρ_4'	x_5	1,000	0,400	0,600	1,400
ρ_5'	x_6	10,000	4,000	6,000	14,000
ρ_0	x_7	0,060	0,030	0,030	0,090

Матрица планирования эксперимента представлена в таблице 2.

В результате расчета всех параметров на ЭВМ и последующей обработке данных, получены значения целевых функций, а именно:

$k_{П}$ – кратность пускового момента;

$k_{М}$ – кратность максимального момента;

η – коэффициент полезного действия;

$\cos \varphi$ – коэффициент мощности для скольжения, соответствующему максимальному КПД.

Таблица 2 – Матрица планирования второго порядка по плану Бокса-Бенкина размерности $K = 7$ (ВВ₇)

№ п/п	X_1	X_2	X_3	X_4	X_5	X_6	X_7	№ п/п	X_1	X_2	X_3	X_4	X_5	X_6	X_7
1	0	0	0	-1	-1	-1	0	32	+1	0	0	+1	0	0	0
2	0	0	0	+1	-1	-1	0	33	0	0	-1	-1	0	0	-1
3	0	0	0	-1	+1	-1	0	34	0	0	+1	-1	0	0	-1
4	0	0	0	+1	+1	-1	0	35	0	0	-1	+1	0	0	-1
5	0	0	0	-1	-1	+1	0	36	0	0	+1	+1	0	0	-1
6	0	0	0	+1	-1	+1	0	37	0	0	-1	-1	0	0	+1
7	0	0	0	-1	+1	+1	0	38	0	0	+1	-1	0	0	+1
8	0	0	0	+1	+1	+1	0	39	0	0	-1	+1	0	0	+1
9	-1	0	0	0	0	-1	-1	40	0	0	+1	+1	0	0	+1
10	+1	0	0	0	0	-1	-1	41	-1	0	-1	0	-1	0	0
11	-1	0	0	0	0	+1	-1	42	+1	0	+1	0	-1	0	0
12	+1	0	0	0	0	+1	-1	43	-1	0	-1	0	-1	0	0
13	-1	0	0	0	0	-1	+1	44	+1	0	+1	0	-1	0	0
14	+1	0	0	0	0	-1	+1	45	-1	0	-1	0	+1	0	0
15	-1	0	0	0	0	+1	+1	46	+1	0	+1	0	+1	0	0
16	+1	0	0	0	0	+1	+1	47	-1	0	-1	0	+1	0	0
17	0	-1	0	0	-1	0	-1	48	+1	0	+1	0	+1	0	0
18	0	+1	0	0	-1	0	-1	49	0	-1	-1	0	0	-1	0
19	0	-1	0	0	+1	0	-1	50	0	+1	+1	0	0	-1	0
20	0	+1	0	0	+1	0	-1	51	0	-1	-1	0	0	-1	0
21	0	-1	0	0	-1	0	+1	52	0	+1	+1	0	0	-1	0
22	0	+1	0	0	-1	0	+1	53	0	-1	-1	0	0	+1	0
23	0	-1	0	0	+1	0	+1	54	0	+1	+1	0	0	+1	0
24	0	+1	0	0	+1	0	+1	55	0	-1	-1	0	0	+1	0
25	-1	-1	0	-1	0	0	0	56	0	+1	+1	0	0	+1	0
26	+1	+1	0	-1	0	0	0	57	0	0	0	0	0	0	0
27	-1	-1	0	-1	0	0	0	58	0	0	0	0	0	0	0
28	+1	+1	0	-1	0	0	0	59	0	0	0	0	0	0	0
29	-1	-1	0	+1	0	0	0	60	0	0	0	0	0	0	0
30	+1	+1	0	+1	0	0	0	61	0	0	0	0	0	0	0
31	-1	-1	0	+1	0	0	0	62	0	0	0	0	0	0	0

В качестве примера на рис. 1 изображена механическая характеристика ОАД, на которой заштрихованная область оптимальных значений полезной мощности P_2 и η , лежащая между максимальными значениями этих показателей. Кроме того, определены значения скольжения, соответствующие максимальному моменту S_m . Зна-

чения функций цели сведены в таблицу 3. На основании результатов эксперимента по плану BB_7 , представленных в таблице 3, пользуясь выражениями (18÷21) и, разработанными в [3], бланками алгоритмами, рассчитаны коэффициенты регрессии для зависимостей:

$$k_{II}, k_M, \eta, \cos \varphi, S_m = f(X_1, X_2, X_3, X_4, X_5, X_6, X_7) \quad (24)$$

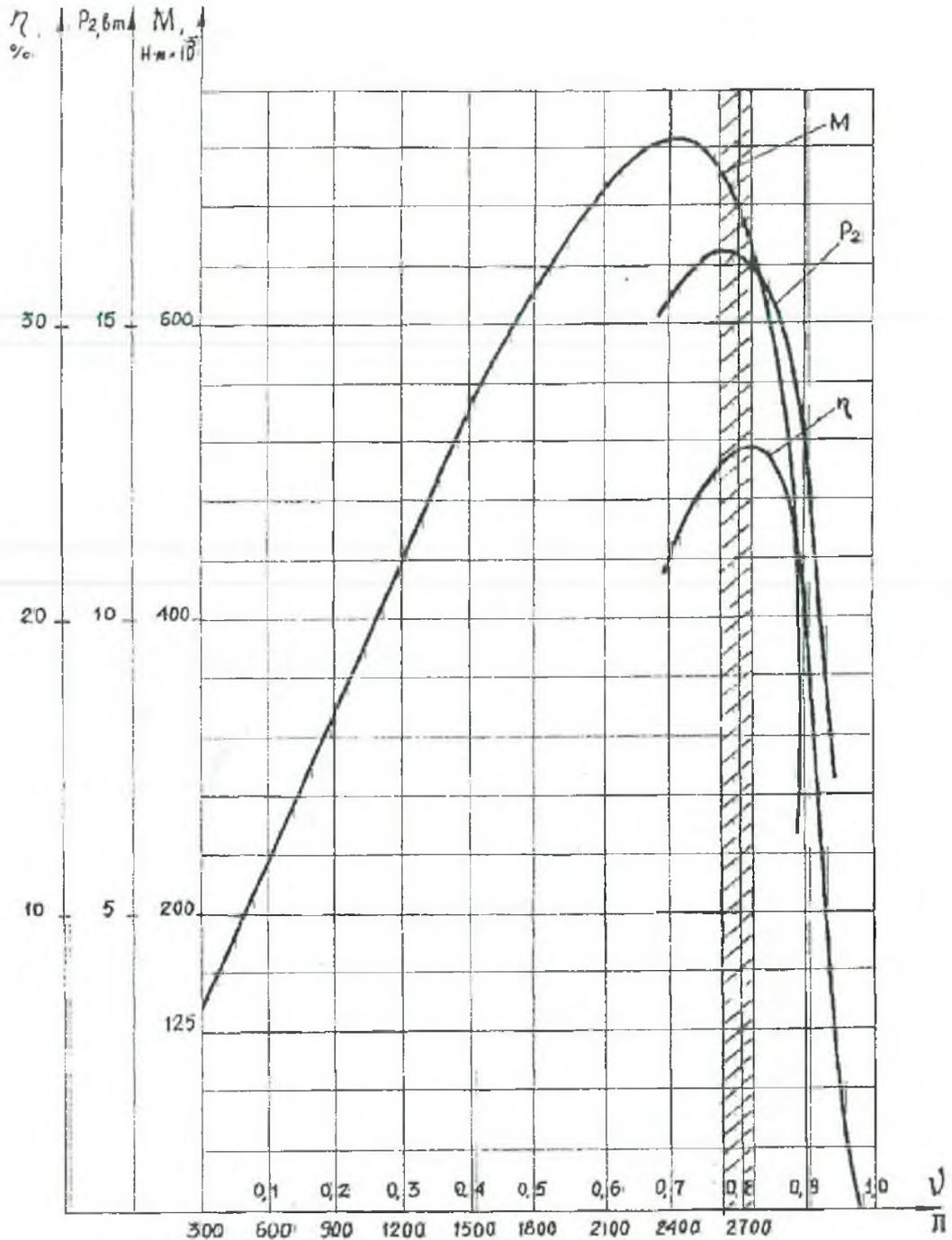


Рисунок 1 – Определение области максимальных значений P_2 и η на механической характеристике ОАД

Полученные значения коэффициентов регрессии приведены в таблице 4. Проверка значимости коэффициентов регрессии приведена с принятым в основной части методом. После отбрасывания незначимых коэффициентов, квадратичные полиномиальные зависимости, связывающие основные характеристики ОАД для систем судовой автоматики с параметрами, имеют вид:

$$\begin{aligned} \bar{k}_n 10^3 = & 377 + 618X_1 - 741X_2 - 250X_3 - 161,6X_4 - 63,0X_5 - 60,0X_6 + 25,0X_7 - \\ & - 15,1X_1^2 + 11,6X_2^2 + 10,5X_3^2 + 16,0X_4^2 + 9,6X_5^2 + 11,1X_6^2 + 3,4X_7^2 + \\ & + 3,9X_1X_2 - 6,9X_1X_3 + 16,1X_1X_4 - 19,9X_1X_5 + 3,3X_1X_6 + 2,0X_1X_7 - \\ & - 16,1X_2X_4 + 21,1X_2X_5 + 2,3X_2X_6 - 2,4X_2X_7 - \\ & - 5,8X_3X_4 + 5,1X_3X_5 + 1,1X_3X_7 - \\ & - 11,5X_4X_5 - 11,3X_4X_6 + 13,4X_4X_7 + \\ & + 21,2X_5X_6 - 1,6X_5X_7 - 2,3X_6X_7; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \bar{k}_n 10^2 = & -116 + 0,958X_1 - 2,25X_2 - 2,834X_3 + 0,75X_4 - 0,75X_5 - 0,71X_6 - 0,292X_7 - \\ & - 0,113X_1^2 + 0,123X_2^2 + 1,499X_3^2 - 0,126X_4^2 - 0,376X_5^2 - 0,313X_6^2 + 0,124X_7^2 - \\ & - 0,125X_1X_2 - 0,25X_1X_3 + 0,125X_1X_4 + 0,25X_1X_6 - \\ & - 0,125X_2X_4 + 0,123X_2X_5 + 0,25X_2X_6 - 0,125X_2X_7 - \\ & - 0,75X_3X_4 + 0,75X_3X_7 + \\ & + 0,875X_4X_5 + 0,875X_4X_6 + 0,5X_4X_7 + \\ & + 0,025X_5X_6 + 0,125X_5X_7 + 0,25X_6X_7; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \bar{\eta} 10^4 = & 1201 + 19X_1 - 87X_2 - 149X_3 - 195X_4 - 26X_5 + 21X_6 - 181X_7 - \\ & - 13X_1^2 - 7X_2^2 + 40X_3^2 + 21X_4^2 + 18X_5^2 - 14X_6^2 + 4X_7^2 + \\ & + 17X_1X_2 + 7X_1X_3 + 24X_1X_4 + 13X_1X_5 + 11,5X_5X_6 + 20X_1X_7 - \\ & - 24X_2X_4 - 24X_2X_5 - 17X_3X_6 - 6X_2X_7 + \tag{25} \\ & + 40X_3X_4 - 12X_3X_5 + 32X_3X_7 - \\ & - 29X_4X_5 - 29X_4X_6 + 7X_4X_7 - \\ & - 34X_5X_6 - 10X_5X_7 - 8X_6X_7; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \overline{\cos \varphi} 10^3 = & 1919 + 5,83X_1 - 6,67X_2 + 23,7X_3 - 5,13X_4 - 8,63X_5 - 5,58X_6 + 9,75X_7 - \\ & - 2,13X_1^2 + 1,06X_2^2 - 6,57X_3^2 - 0,85X_4^2 + 0,93X_5^2 + 2,12X_6^2 - 2,38X_7^2 - \\ & - 0,63X_1X_2 - 2,36X_1X_5 - 0,38X_1X_4 - 3,63X_1X_5 - 0,5X_1X_6 - 0,75X_1X_2 + \\ & + 2,25X_2X_5 + 0,38X_2X_4 + 3,5X_2X_5 + 1,0X_2X_2 + \\ & + 1,25X_2X_4 + 2,63X_5X_5 - 2,75X_2X_2 - \\ & - 0,75X_4X_5 - 0,5X_4X_6 + 0,25X_4X_7 - \\ & - 2,5X_5X_6 + 1,25X_5X_7 - 1,0X_6X_7; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \bar{S}_m 10^3 = & 390 + 5,24X_1 - 12,22X_2 - 37,17X_3 + 67,46X_4 - 12,8X_5 - 13,21X_6 + 22,92X_7 - \\ & - 0,38X_1^2 + 5,25X_2^2 + 4X_3^2 + 3,44X_4^2 + 5,31X_5^2 + 10,94X_6^2 - 2,25X_7^2 - \\ & - 3,75X_1X_2 - 3,75X_1X_3 + 1,25X_1X_4 - 6,75X_1X_3 - 3,75X_1X_6 + 1,25X_1X_7 - \\ & - 7,5X_2X_5 - 1,25X_2X_4 + 6,25X_2X_3 + 50X_2X_5 + 1,25X_2X_7 + \\ & + 13,75X_3X_4 - 1,25X_3X_5 + 5X_3X_6 + 13,75X_5X_7 + \\ & + 0,88X_4X_5 + 0,88X_4X_5 - 13,75X_4X_5 + \\ & + 11,63X_5X_5 - 1,25X_5X_7 + 3,75X_6X_5. \end{aligned}$$

Таблица 3 – Значение функций цели по результатам эксперимента по плану Бокса-Бенкина ВВ-размерности $k = 7$

№ опыта	Y_1 (k_n)	Y_2 (k_{M^2})	Y_3 (η)	Y_4 ($\cos\varphi$)	Y_4 (S_m)	№ опыта	Y_1 (k_n)	Y_2 (k_{M^2})	Y_3 (η)	Y_4 ($\cos\varphi$)	Y_4 (S_m)
1	0,377	1,20	12,21	0,947	0,377	32	0,555	1,17	10,28	0,914	0,450
2	0,745	1,15	9,72	0,942	0,500	33	0,276	1,25	19,67	0,874	0,350
3	0,229	1,12	14,18	0,928	0,317	34	0,201	1,13	13,64	0,934	0,200
4	0,558	1,18	10,38	0,915	0,450	35	0,579	1,23	14,65	0,865	0,460
5	0,228	1,12	14,18	0,927	0,317	36	0,488	1,14	10,28	0,926	0,410
6	0,558	1,18	10,38	0,915	0,450	37	0,285	1,21	15,14	0,905	0,370
7	0,173	1,14	14,62	0,913	0,310	38	0,224	1,12	10,42	0,950	0,320
8	0,450	1,16	0,84	0,903	0,440	39	0,651	1,21	10,46	0,893	0,500
9	0,354	1,16	13,32	0,912	0,370	40	0,569	1,15	7,31	0,942	0,460
10	0,464	1,18	14,49	0,925	0,310	41	0,387	1,21	14,17	0,885	0,420
11	0,237	1,14	13,50	0,896	0,310	42	0,579	1,23	13,98	0,913	0,450
12	0,356	1,16	14,18	0,907	0,350	43	0,321	1,13	9,81	0,938	0,370
13	0,406	1,16	9,82	0,930	0,410	44	0,481	1,15	9,81	0,952	0,390
14	0,520	1,17	10,12	0,940	0,420	45	0,301	1,19	14,20	0,873	0,410
15	0,276	1,14	9,72	0,918	0,400	46	0,409	1,22	14,93	0,882	0,420
16	0,407	1,17	10,43	0,926	0,410	47	0,251	1,12	9,77	0,932	0,360
17	0,528	1,18	12,94	0,934	0,400	48	0,336	1,13	10,39	0,936	0,350
18	0,358	1,17	13,53	0,910	0,370	49	0,570	1,24	14,24	0,909	0,440
19	0,356	1,16	14,28	0,906	0,370	50	0,369	1,13	9,85	0,943	0,370
20	0,271	1,15	13,69	0,898	0,360	51	0,570	1,24	14,24	0,904	0,440
21	0,585	1,18	9,82	0,947	0,400	52	0,369	1,13	9,85	0,943	0,370
22	0,405	1,16	9,97	0,929	0,410	53	0,449	1,22	14,96	0,889	0,420
23	0,406	1,6	10,50	0,926	0,400	54	0,757	1,12	9,89	0,932	0,360
24	0,312	1,15	9,92	0,920	0,400	55	0,449	1,22	14,96	0,889	0,420
25	0,234	1,15	14,16	0,924	0,320	56	0,257	1,12	9,89	0,932	0,360
26	0,315	1,17	13,78	0,937	0,340	57	0,377	1,16	12,01	0,919	0,390
27	0,146	1,14	14,00	0,914	0,320	58	0,377	1,16	12,01	0,919	0,390
28	0,234	1,15	14,18	0,924	0,320	59	0,377	1,16	12,01	0,919	0,390
29	0,555	1,17	10,28	0,914	0,450	60	0,377	1,16	12,01	0,919	0,390
30	0,690	1,19	10,74	0,925	0,470	61	0,377	1,16	12,01	0,919	0,390
31	0,474	1,15	9,01	0,905	0,440	62	0,377	1,16	12,01	0,919	0,390

Таблица 4 – Коэффициенты полиномов для выходных показателей ОАД

Коэффициенты	Значения коэффициентов для выходных показателей				
	$k_n^3 \cdot 10^3$	$k_{M^2} \cdot 10^2$	$\eta \cdot 10^4$	$\cos\varphi \cdot 10^3$	$S_m \cdot 10^3$
b_0	377	116	1201	919	390
b_1	+61,8	+0,958	+19	+5,8	+5,24
b_2	-74,1	-2,250	-87	-6,7	-12,22
b_3	+161,6	+0,750	-195	-5,1	+67,46
b_4	-63,0	-0,750	+26	-8,6	-12,79
b_5	-60,0	-0,708	+21	-5,6	-13,21
b_6	+25,0	-0,292	-181	+9,8	+22,92
b_{11}	-15,1	-0,313	-13	-2,1	-0,38
b_{22}	+11,6	+0,123	-7	+1,1	+5,25
b_{33}	+10,5	+1,499	+40	-6,6	+4,00
b_{44}	+16,0	-0,126	+21	-1,0	+3,44
b_{55}	+9,6	-0,376	-18	+1,0	+5,31
b_{66}	+11,1	-0,313	-14	+2,1	+10,94
b_{77}	+3,4	+0,124	+4	-2,4	-2,25
b_{12}	+3,9	-0,125	+17	-0,6	-3,75
b_{13}	-6,9	-0,250	+7	-2,4	-3,75
b_{14}	+16,1	+0,125	+24	-0,4	+1,25
b_{15}	-19,9	0	+13	-3,6	-6,25
b_{16}	+3,3	+0,250	+12	-0,5	-3,75
b_{17}	+2,0	0	+2	-0,8	+1,25
b_{23}	0	0	0	+2,25	+7,5
b_{24}	16,1	-0,125	-24	+0,4	-1,25
b_{25}	+21,4	+0,125	-24	+3,5	+6,25
b_{26}	+2,25	+0,250	-17	0	+5,00
b_{27}	-2,4	-0,125	-6	+1,0	+1,25
b_{34}	-5,8	+0,750	+40	+1,3	+13,75
b_{35}	+5,1	0	-12	+2,6	-1,25
b_{36}	0	0	0	0	5,0
b_{37}	+1,1	+0,750	+31	-0,8	+13,75
b_{45}	-11,5	+0,825	-29	-0,5	+0,875
b_{46}	-11,3	+0,825	-29	+0,3	+0,875
b_{47}	+13,4	+0,500	+7	+0,3	-13,75
b_{56}	+21,2	-0,625	-34	+2,5	+11,63
b_{57}	-1,6	+0,125	-10	+1,25	-1,25
b_{67}	-2,3	+0,250	-8	+1,0	+3,75

Выводы и заключения

В связи с тем, что дисперсия воспроизводимости опытов $S_{\sigma}^2 = 0$, формальное применение статистического аппарата для проверки адекватности полиномов невозможно. В этом случае вывод о допустимости применения полиномиальной модели можно сделать на основании анализа величины дисперсии адекватности и отклонения $(y_a^{\sigma} - y_a^p)$ [3]. Аппроксимация считается адекватной, если ее погрешность Δy в точках плана и в ряде контрольных точек не превосходит Δy_{don} . Учитывая априорную информацию [12], опыт экспериментального определения ха-

рактеристик электродвигателей, а также соотносясь с задачами, которые предполагается решать с помощью полиномов, принято допустимое отклонение функций цели $\Delta y_{don} = 5\%$. В результате сравнений расчетов на ЭВМ и вычислений по полиномиальным зависимостям для всех функций цели получены значения средних отклонений $(y_a^{\sigma} - y_a^p)$ и дисперсий адекватности S_a^2 , которые приведены в таблице 5 и позволяют сделать вывод об адекватности построенной математической модели однофазного асинхронного электродвигателя для судовых систем автоматизации методами планирования эксперимента.

Таблица 5 – Значения отклонения Δy и дисперсии адекватности

№ п/п	Функции цели	Расхождения %	Дисперсия адекватности
1	k_{II}	1,753	$1,620 \times 10^{-4}$
2	k_M	0,875	$3,201 \times 10^{-4}$
3	η	2,391	$4,136 \times 10^{-5}$
4	$\cos\varphi$	0,288	$2,614 \times 10^{-5}$
5	S_m	2,078	$2,395 \times 10^{-4}$

Литература

1. Лопухина Е. М., Семенчук Г.А., Проектирование асинхронных микродвигателей с применением ЭВМ. – М.: Высшая школа, 1980. -360 с.
2. Копылов Н.П. Применение вычислительных машин в инженерно-экономических расчетах – М.: Высшая школа, 1980.– 256 с.
3. Вознесенский В.А. Статистические методы планирования эксперимента в технико-экономических исследованиях. - М.: Финансы и статистика, 1981.– 263с.
4. Ивоботенко Б.Л., Ильинский Н.Ф., Копылов Н.П. Планирование эксперимента в электромеханике. - М.: Энергия, 1975. – 184 с.
5. Асатурян В.Н. Теория планирования эксперимента. - М.: Радио и связь, 1983. – 248 с.
6. Адлер Ю.П. и др. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий. – М.:Наука, 1976 – 285 с.
7. Каракаев А. Б. Разработка и применение однофазного асинхронного двигателя без внешних фазосдвигающих устройств для судовых систем автоматизации / 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.
8. 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.

9. Каракаев А. Б. Математическая модель однофазного асинхронного электродвигателя безвнешних фазосдвигающих устройств для судовых систем автоматизации / А. Б. Каракаев, А. В. Костенко // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2019. — Т. 11. — № 4.
10. 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.
11. Каракаев А.Б., Каган А.В. Полиномиальная модель однофазного асинхронного двигателя. – Ленинград, 1984 -7 с. - Рукопись представлена СЗПИ. Деп. в Информэлектро в 1985г., № 408 эт. – 84 Деп.
12. Маркитантов Б.С., Каракаев А.Б. Исследование пусковых свойств однофазного асинхронного двигателя без внешних фазосдвигающих устройств методами планирования эксперимента. В.Сб.: - Тезисы докладов научно-технической конференции профессорско-преподавательского состава училища – Л.: ВВМИУ им.В.И.Ленина,1983.–С. 82-86

References

1. Lopukhina E. M., Semenchuk G. A., Design of asynchronous micromotors with the use of computers - M.: Higher school, 1980 - 360 p.
2. Kopylov N.P. The use of computers in engineering and economic calculations - M.: Higher school, 1980 - 256 p.

3. Voznesensky V.A. Statistical methods of designing an experiment in technical and economic research - M.: Finance and Statistics, 1981 - 263 p.
4. Ivobotenko B. L., Ilyinsky N. F., Kopylov N. P. Planning an experiment in electromechanics -M.: Energy, 1975 – 184 p.
5. Asaturian V.N. Theory of experimental design-M.: Radio and communications, 1983 – 248 p.
6. Adler Yu.P. and others. Planning an experiment in the search for optimal conditions - M.: Nauka, 1976 – 285 p.
7. Karakaev, A.B., and A.V. Kostenko. Development and application of a single-phase asynchronous motor without external phase-shifting devices for ship automation systems. Collection of abstracts of the national scientific and technical conference of teaching staff Admiral Makarov state university of maritime and inland shipping. SPb.: Publishing house Admiral Makarov state university of maritime and inland shipping, 2018. P. 91–92
8. Karakaev A.B., Lukanin A.V., Hekert E.V. Development of methodology, methods and analysis modelsthe influence of various options for building the structure and maintenance and recovery modesoperability of ship electric power systems (part 1). Operation of maritime transport. 2016. No 3 (80). p. 54-60.
9. Karakaev, Aleksandr B., and Aleksandr V. Kostenko. Mathematical model of single-phase asynchronous electric motor without external phase-shifting devices for ship automation systems. Bulletin Admiral Makarov state university of maritime and inland shipping 11.4 (2019)
10. 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.
11. Karakaev A.B., Kagan A.V. Polynomial model of a single-phase asynchronous motor. - Leningrad, 1984 -7s. - The manuscript is presented by the North-West Journal. Dep. at Informelectro in 1985, No. 408 et. - 84 Dep.
12. Markitantov B.S., Karakaev A.B. Study of the starting properties of a single-phase asynchronous motor without external phase-shifting devices by experimental design methods. V.Sb.: - Abstracts of the start-up technical conference of the teaching staff of the school - L.: VVMU im.V.I. Lenin, 1983, p. 82-86

УДК 536.2

DOI: 10.34046/aumsuomt94/25

ИССЛЕДОВАНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ ТЕПЛОНОСИТЕЛЕЙ И РАБОЧИХ СРЕД В ШИРОКОМ ДИАПАЗОНЕ ПАРАМЕТРОВ СОСТОЯНИЯ

Ю.Г.Косолап, кандидат технических наук, доцент

В работе проведен анализ существующих методов определения теплопроводности водных растворов KF. Приводятся результаты экспериментального исследования коэффициента теплопроводности воды и водного раствора соли KF в интервале температур 293–473K и давлений до 100 МПа. Исследования теплопроводности воды λ_w проводились методом коаксиальных цилиндров в абсолютном варианте. Основное внимание уделено растворам с повышенным содержанием соли. Установлены закономерности в поведении температурных и барических коэффициентов теплопроводности исследованных бинарных растворов. Получены регрессионные зависимости, описывающие связи теплопроводности воды и раствора KF-вода, на основании которых могут быть определены оптимальные технические параметры энергетических установок. По сравнению с существующими методиками расчета теплопроводности расширен диапазон параметров. Результаты экспериментальных данных внесены в рекомендуемые справочные данные в Всероссийском научно-исследовательском центре стандартизации, информации и сертификации сырья, материалов и веществ.

Ключевые слова: теплопроводность, бинарный раствор, температура, давление

The paper analyzes existing methods for determining the thermal conductivity of aqueous solutions of KF. The article presents the results of an experimental study of the thermal conductivity of water and an aqueous solution of KF salt in the temperature range of 293–473K and pressures up to 100 MPa. Studies of the thermal conductivity of water were carried out by the method of coaxial cylinders in the absolute version. The main attention is paid to solutions with a high salt content. The regularities in the behavior of temperature and pressure coefficients of thermal conductivity of the studied binary solutions are established. Regression dependences are obtained that describe the connections between the thermal conductivity of water and the KF-water solution. With their help, the optimal technical parameters of power plants can be determined. Compared with existing methods for calculating thermal conductivity, the range of parameters has been expanded. The results of the experimental data are included in the recommended reference data at the All-Russian Research Center for Standardization, Information and Certification of Raw Materials, Materials and Substances.

Key words: thermal conductivity, binary solution, temperature, pressure