

ПРИМЕНЕНИЕ СПЕЦИАЛЬНОГО АСИНХРОННОГО ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ ДЛЯ СУДОВЫХ ВЕНТИЛЯЦИОННЫХ СИСТЕМ

APPLICATION OF SPECIAL DESIGN ASYNCHRONOUS ELECTRIC MOTOR FOR THE SHIP VENTILATION SYSTEM

В статье рассмотрен вариант применения специального асинхронного двигателя в системах судовой вентиляции. Описана возможная конструкция двигателя. Приведены основные преимущества применения специального асинхронного двигателя по сравнению с традиционным электродвигателем, а именно: многофункциональность, улучшенные энергетические характеристики и оптимальные массогабаритные свойства. Также поставлена задача по разработке математической модели методами математической теории планирования эксперимента. Представленный метод позволяет упростить сложное описание простой полиномиальной моделью. Разработан план вывода уравнений тока и электромагнитного момента специального асинхронного двигателя. Для решения задач по оценке зависимостей основных характеристик от параметров предлагается использовать современные методы моделирования на персональном компьютере. Также в статье акцентировано внимание на необходимости разработки инженерной методики расчета специального асинхронного двигателя, на основе которой появится возможность построения работоспособной модели двигателя.

The article examines application of special design asynchronous motor for the ship ventilation system. It is described possible motor construction. And it is the main advantages of application of special design asynchronous motor compared to the conventional electric motor. These include multifunctionality, improved power characteristics and optimum weight and size properties. It is also tasked to develop mathematical model by means of the mathematical theory methods of experiment planning. The presented method allows to substituted complex description for a simple polynomial model. The derivation of an equation plane of special design asynchronous motor current and electromagnetic torque developed. It is planned to use modern PC modeling methods to solve problem of general features dependencies comparison with parameters. It is also noticed that it is important to developed engineering method of special design asynchronous motor calculating. It is formed a possibility to construct functional motor model for reasons given.

Ключевые слова: асинхронный электродвигатель, вентиляционная система, судовая вентиляция, математическая модель, планирование эксперимента, моделирование, инженерная методика.

Key words: asynchronous electric motor, ventilation system, ship ventilation, mathematical model, experiment planning, modeling, engineering method.

В НАСТОЯЩЕЕ время проводятся исследования в области применения специального асинхронного двигателя (АД) для судовых вентиляционных систем, в частности в коаксиальных системах вентиляции, а также в системах судовых водометных движителей. Использование сдвоенного АД для судовой вентиляции позволяет уменьшить массогабаритные показатели действующих систем, и также улучшить показатели надежности и живучести вентиляционного устройства и судна в целом. Внедрение в современные системы вентиляции специального АД может внести ощутимый вклад в их эффективность, что играет ключевую роль в жизнеобеспечении экипажа судов. По сравнению с традиционным электродвигателем сдвоенный АД дает возможность многофункционального использования вентиляционного устройства, так как подобная конструкция позволяет реализовать различные режимы работы. Двигатель выполнен сдвоенным, содержащим два статора и два ротора: внутренний и наружный, магнитные системы которых обращены друг к другу, что позволяет реализовать в системе два вентиляционных кана-

ла: наружный кольцевой и внутренний. Применение такого АД в коаксиальных системах вентиляции позволяет реализовать такие режимы работы, как работа наружного кольцевой контура на приток, а внутреннего — на вытяжку и наоборот: либо работа обоими каналами только на приток, либо только на вытяжку и т.д.

Конструкция сдвоенного электроventильатора для систем замкнутой вентиляции обеспечивает достаточно высокие энергетические характеристики, такие как коэффициент полезного действия (КПД) и коэффициент мощности [1]. Применение такого устройства позволяет реализовать несколько режимов работы: вентиляцию, регенерацию и обогащение воздуха, что не может обеспечить ни одна из известных систем. Конструкция специального АД для вентиляционных систем включает два статора, пластины активного железа которых собраны на внутренней и внешней сторонах гильзы. Чертеж продольного и поперечного разреза двигателя приведен на рисунке.

Пластины активного железа статоров – наружного 19 и внутреннего 16, собраны на внутренней и внешней стороне гильзы 20. В пазах статоров 19 и 16 уложены трехфазные распределенные обмотки. Внутренний ротор 6 выполнен в виде полого барабана, в который впрессованы пластины активного железа и короткозамкнутая обмотка типа «беличья клетка». Наружный ротор 12 обращенной конструкции выполнен аналогично внутреннему. Внутренняя поверхность внутреннего ротора используется как рабочая, т. е. снабжена крыльчаткой 7 и поэтому образует внутренний канал 5. Наружная поверхность наружного ротора также снабжена крыльчаткой 11 и поэтому вместе с корпусом 1 образует наружный кольцевой канал 13 вентиляции.

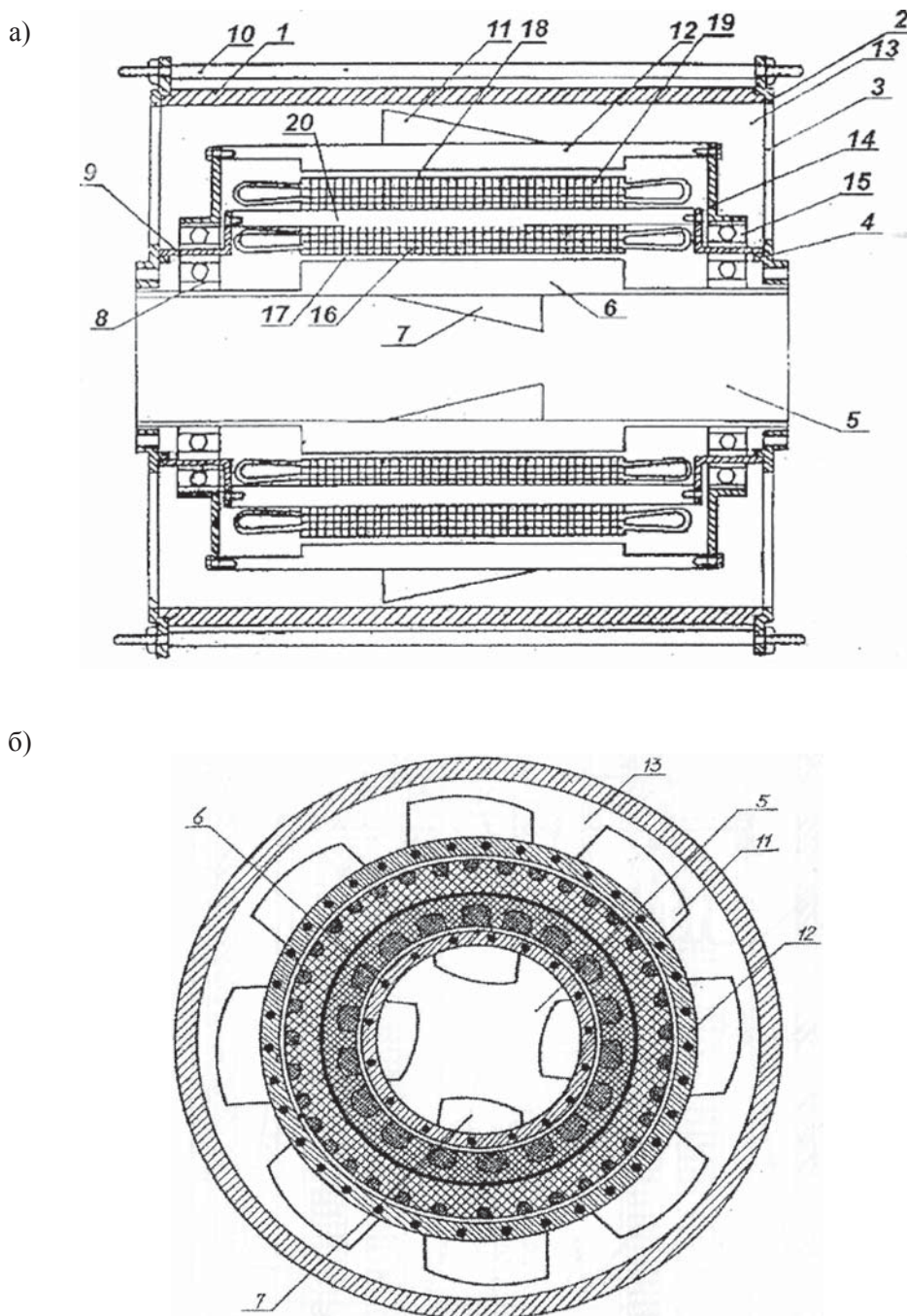
Для распределения ходовой части ventильатора применено жесткое крепление наружных 15 и внутренних 8 подшипников в гильзе 20, которая, в свою очередь, с помощью фасок 4 жестко скрепляется с передней и задней крышками электродвигателя, которые между собой стягиваются шпильками 10. Подшипники запрессовываются в гильзе и на нее «один на один», образуя жесткий подшипниковый узел.

Между передним и задним подшипниковыми узлами размещаются обмотки наружного и внутреннего статоров. С целью предотвращения загрязнения торцевых частей статоров подшипники выполнены закрытыми. Гильза, на которой крепятся подшипники и оба статора, одновременно служит для уменьшения электромагнитного влияния друг на друга внутреннего и внешнего статоров, т.е. оказывает экранирующее действие и поэтому выполнена из немагнитного материала. Таким образом, гильза помимо своего основного конструктивного назначения выполняет роль экрана, или зазора между статорами. Для обеспечения работоспособности наружного кольцевого канала на передней и задней крышках электродвигателя предусмотрены окна 3. Их количество и размеры определяют наряду с количеством, размерами и формой лопастей, а также расстоянием от поверхности наружного ротора до корпуса электродвигателя, производительность наружного кольцевого канала вентиляции [2].

Для успешного применения специального АД в системах судовой вентиляции необходимо построение работоспособного макета. В процессе изготовления опытного образца могут возникнуть трудности, связанные, например, с индукцией, оказывающей влияние на расположенные на внутренней и внешней стороне гильзы статорные обмотки [3], [4]. Для учета влияния подобных факторов необходимо построение математической модели, определение зависимостей основных характеристик АД от его параметров, что позволяет выявить области оптимальных значений характеристик и обосновать методику инженерного расчета и проектирования, учитывающую особенности данного АД.

Для выявления и изучения основных закономерностей электромагнитных процессов специального АД с целью создания работоспособной методики его проектирования необходимо иметь математическую модель, в которой выходные показатели непосредственно связаны с его параметрами. Использование первоначально созданных уравнений равновесия напряжения электрических контуров, уравнений токов обмоток статора и ротора, а также электрического момента представляется затруднительным ввиду сложности и громоздкости. В данном случае целесообразным будет за-

менить сложную математическую модель более простым, легко поддающимся анализу описанием, имеющим достаточно высокую точность аппроксимации. Для решения этой задачи большие возможности представляют исследователю методы математической теории планирования эксперимента, которые позволяют сложное математическое описание аппроксимировать достаточно простой полиномиальной моделью, позволяющей решать аналитические и оптимизационные задачи [5], [6]. Исходя из этого возникает необходимость решения следующих основных задач.



Продольный (а) и поперечный (б) разрез специального асинхронного двигателя

1. Вывод уравнений для тока и электромагнитного момента специального АД. В связи с тем, что конструкцией двигателя предусмотрено два статора, возникает необходимость учета взаимной индукции статорных обмоток, на которую, в свою очередь, может оказывать влияние величина

на индукции обмоток, их взаимное расположение и магнитная проницаемость гильзы [1]. Кроме того, для повышения точности расчета характеристик специального АД при выводе выражений необходимо учитывать потери в стали, оказывающие значительное влияние на электромагнитные процессы в двигателе.

2. *Применение современных методов моделирования с использованием ПК для оценки зависимостей основных характеристик от параметров.* Широкие возможности для этого дает комплекс программ математического моделирования MATLAB. Данное программное обеспечение предоставляет удобные средства для разработки алгоритма решения основных уравнений специального АД. Также в составе пакета MATLAB имеется большое количество функций для построения графиков.

3. *Сложное математическое описание электромагнитных процессов посредством использования методов математической теории планирования эксперимента.* Описание представляется полиномиальными зависимостями, непосредственно связывающими основные характеристики двигателя с его параметрами, которые впоследствии могут быть исследованы на оптимум. Кроме того, по результатам анализа математической модели специального АД методами планирования эксперимента возможно номографирование.

4. *Разработка инженерной методики расчета и проектирования специального АД, учитывающей результаты исследования с помощью метода планирования эксперимента, наряду с учетом конструкции данного электродвигателя.* В составе методики целесообразно использовать алгоритм проектирования двигателя, позволяющий производить предварительную оценку значений основных характеристик по полиномам и произвести оптимизацию по его относительным параметрам. Для возможности практического применения разработанной методики необходимо привести расчет АД.

5. *Построение макета и опытного образца специального АД для анализа точности полученных теоретических результатов и работоспособности методики проектирования.* Эти действия позволяют выполнить сравнение данных математического моделирования с данными экспериментальных исследований.

Основы теории планирования эксперимента (ПЭ) базируются на том [7], что результаты любых опытов в n -мерном факторном пространстве могут быть представлены линеализованными уравнениями вида:

$$\begin{cases} y_i = x_{0_i} b_0 + x_{1_i} b_1 + x_{2_i} b_2 + x_{k_i} b_k + \dots + \\ y_i = x_{0_{(i+1)}} b_0 + x_{1_{(i+1)}} b_1 + x_{2_{(i+1)}} b_2 + x_{k_{(i+1)}} b_k + \dots + \end{cases} \quad (1)$$

где y — функция цели (отклика); 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.

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

$$\bar{Y} = \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ \vdots \\ y_n \end{bmatrix} \quad (4)$$

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

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

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

$$\bar{C} = \bar{X}_t \bar{X}, \quad (7)$$

где $\bar{C}^{-1}$ — обратная матрица по отношению к выражению (7); $\bar{X}_t$ — транспонированная матрица.

Специальное построение информационной матрицы $\bar{X}_t$ 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 предполагается использовать планы факторных экспериментов, обладающие ортогональностью. Для них матрица $\bar{B}$ является диагональной, а матрица $\bar{X}$ при двухуровневом варьировании факторов обладает тремя свойствами:

$$\sum_{i=1}^N X_{ij} = 0; \quad (8)$$

$$\sum_{i=1}^N X_{il} X_{im} = 0; \quad (9)$$

$$\sum_{i=1}^N X_{ij}^2 = N, \quad (10)$$

где N — число опытов; i — номер опыта; j, l, m — номер факторов.

Представителями таких планов является полный факторный эксперимент и метод дробных реплик [8].

Для построения квадратичных моделей основное применение нашли планы на кубе и сфере, главным образом, симметричные, т. е. выполнено условие

$$\sum_{i=1}^N X_i = \sum_{i=1}^N X_i X_j = 0, \quad (11)$$

однако
$$\sum_{i=1}^N X_i^2 \neq N. \quad (12)$$

Матрица $\bar{B}$ -планов для построения квадратичных моделей в общем случае недиагональна. Однако для симметричных планов ее можно представить как блочно-диагональную:

$$\bar{B} = \begin{bmatrix} B_1 & 0 \\ 0 & B_2 \end{bmatrix}. \quad (13)$$

Подматрица $\bar{B}_1$ содержит диагональные элементы T_1 и T_{11} , необходимые для оценки свободного члена b_0 и квадратичных эффектов b_{ii} , а также внедиагональные элементы T_2 и T_3 , определяющие ковариацию между этими эффектами:

$$\bar{X} = \left\{ \begin{bmatrix} x_{01} & x_{11} & \cdots & x_{k1} \\ x_{02} & x_{12} & \cdots & x_{k2} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ x_{0n} & x_{1n} & \cdots & x_{kn} \end{bmatrix} \right\} \begin{matrix} \text{— для оценки } b_0; \\ \text{— для оценки } b_{ii}. \end{matrix} \quad (14)$$

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

$$\bar{B}_2 = \begin{bmatrix} T_3 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ 0 & T_3 & \dots & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \dots & T_3 & 0 \\ 0 & 0 & \dots & 0 & T_6 \end{bmatrix} \left. \begin{array}{l} \} \text{— для оценки } b_i; \\ \} \text{— для оценки } b_{ij}. \end{array} \right\} \quad (15)$$

Блочная-диагональная структура матрицы $\bar{B}$ позволяет получать достаточно простые формулы для расчета коэффициентов регрессии, их ошибок и ковариаций. Зависимость коэффициентов определяют с использованием критерия Стьюдента. Принято считать, что коэффициент регрессии значим, если выполнено условие

$$|b| \geq S_b t, \quad (16)$$

где S_b — дисперсия, с которой определялся коэффициент.

Адекватность получаемых полиномиальных зависимостей объектом исследования характеризуют величиной соответствия целевой функции, полученной из эксперимента y^3 и рассчитанной по полиному y^p [7].

Величина, характеризующая несовпадение этих величин, называется *дисперсией неадекватности* или *дисперсией адекватности* и вычисляется по формуле

$$S_{ag}^2 = \frac{1}{N - B} \sum_{i=1}^N (y_i^3 - y_i^p)^2, \quad (17)$$

где B — число значимых коэффициентов регрессии полинома.

Проверка гипотезы адекватности может проводиться с использованием критерия Фишера:

$$F = \frac{S_{ag}^2}{S_3^2}, \quad (18)$$

где S_3^2 — оценка дисперсии воспроизводимости, характеризующая точность измерений и воспроизводимость опытов.

Можно выделить три класса задач в электромеханике, в которых используется ПЭ [9], [10].

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.

Данное исследование имеет большое практическое значение. Так, внедрение специального АД в системы судовой вентиляции позволит улучшить такие важные показатели системы, как массогабаритные свойства, надежность, живучесть и т.д. Также, по сравнению с использованием традиционного электродвигателя, рассмотренный АД позволяет реализовать более гибкие режимы работы. В дальнейших исследованиях планируется разработать аппроксимированную и оптимизированную математическую модель с использованием методов математической теории планирования эксперимента. Для оценки зависимостей основных характеристик от параметров целесообразно воспользоваться современными методами моделирования. В результате сложное математическое описание электромагнитных процессов представляется полиномиальными зависимостями, непосредственно связывающими основные характеристики двигателя с его параметрами. При наличии упрощенной математической модели планируется разработать инженерную методику расчета и проектирования специального АД. На основании полученных результатов

целесообразным будет построение опытного образца двигателя и получение экспериментальных данных, которые, в свою очередь, необходимо сравнить с данными математической модели. Полученные разработки могут быть применены как в современном судостроении, так и для модернизации уже существующих систем. Наряду с внедрением специального АД в системах судовой вентиляции проводятся исследования по применению двигателя как привода судовых водометных движителей. Кроме того, полученные результаты планируется использовать для подачи заявки на получение патента на изобретение.

Список литературы

1. *Каракаев А. Б.* Устройства вентиляции и кондиционирования воздуха / А. Б. Каракаев, А. Г. Рябинин, Г. А. Рябинин. — М.: Петровская академия наук и искусств, 1997. — 128 с.
2. *Каракаев А. Б.* Специальные однофазные асинхронные двигатели для корабельных систем автоматики / А. Б. Каракаев. — СПб.: ГМА им. адм. С. О. Макарова, 1999. — 220 с.
3. *Вольдек А. И.* Электрические машины / А. И. Вольдек. — М.: Энергоатомиздат, 1978. — 832 с.
4. *Каракаев А. Б.* Устройства вентиляции и кондиционирования воздуха. / А. Б. Каракаев, А. Г. Рябинин, Г. А. Рябинин. — СПб.: СПбГУВК, 1997. — 238 с.
5. *Вознесенский В. А.* Статические методы планирования эксперимента в технико-экономических исследованиях / В. А. Вознесенский. — М.: Финансы и статистика, 1981. — 263 с.
6. *Адлер Ю. П.* Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий / Ю. П. Адлер, Е. В. Маркова, Ю. В. Грановский. — М.: Наука, 1975. — 285 с.
7. *Саутин С. Н.* Планирование эксперимента в химии и химической технологии / С. Н. Саутин. — Л.: Химия, 1975. — 48 с.
8. *Асатурян В. Н.* Теория планирования эксперимента. / В. Н. Асатурян. — М.: Радио и связь, 1983. — 148 с.
9. *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.
10. *Ивоботенко Б. Л.* Планирование эксперимента в электромеханике / Б. Л. Ивоботенко, Н. Ф. Ильинский, Н. П. Копылов. — М.: Энергия, 1975. — 184 с.