

IV. ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЕ СУДОВ

УДК 62-83:629.5

ИССЛЕДОВАНИЕ НЕСИММЕТРИЧНЫХ РЕЖИМОВ РАБОТЫ СУДОВЫХ ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

А.Ф. Бурков, Дальрыбвтуз, Владивосток

При работе судовых электрических приводов наряду с нормальными режимами возможно возникновение несимметричных (специальных) переходных и установившихся режимов. В ряде случаев такие режимы могут вызывать аварийные ситуации. В статье рассматриваются основные несимметричные (специальные) режимы.

В настоящее время большинство судовых электроприводов (ЭП) содержат трехфазные асинхронные двигатели (АД) с короткозамкнутым или фазным ротором, в процессе эксплуатации которых возможно возникновение специальных режимов работы, отличных от нормальных.

У трехфазных АД, управляемых контактными коммутационными аппаратами (ККА), при эксплуатации, кроме технологических отклонений, возможно возникновение статических несимметричных режимов работы в основном по причинам неисправностей обмоток статора и ротора, а также несимметричных переходных режимов, главным образом из-за разрегулировки ККА. Вопросам исследования таких режимов посвящено ряд работ с различной степенью детализации [1,2,3].

Основным несимметричным переходным режимом работы, оказывающим определенное влияние на изменение величин токов и моментов, является неодновременное подключение фазных обмоток АД к сети.

При одновременном включении обмоток статора двигателя токи статора и ротора после момента включения определяются как [2]:

$$\left. \begin{aligned} \overset{\Gamma}{i}_s &= \overset{\Gamma}{I}_s \cdot e^{j\omega t} + \overset{\Gamma}{I}_{s1} \cdot e^{\alpha_1 t} + \overset{\Gamma}{I}_{s2} \cdot e^{\alpha_2 t}; \\ \overset{\Gamma}{i}_r &= \overset{\Gamma}{I}_r \cdot e^{j\omega t} + \overset{\Gamma}{I}_{r1} \cdot e^{\alpha_1 t} - \overset{\Gamma}{I}_{r2} \cdot e^{\alpha_2 t}. \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

В формуле (1) $\overset{\Gamma}{I}_s$, $\overset{\Gamma}{I}_r$ – векторы амплитуд установившихся значений токов статора и ротора, соответственно; $\overset{\Gamma}{I}_{s1} \cdot e^{\alpha_1 t}$, $\overset{\Gamma}{I}_{r1} \cdot e^{\alpha_1 t}$ – векторы свободных составляющих токов статора и ротора, создающие основной поток; $\overset{\Gamma}{I}_{s2} \cdot e^{\alpha_2 t}$, $\overset{\Gamma}{I}_{r2} \cdot e^{\alpha_2 t}$ – векторы составляющих токов, создающих потоки рассеяния (α_1 , α_2 – коэффициенты затухания).

Коэффициенты затухания α_1 и α_2 равны:

$$\left. \begin{aligned} \alpha_1 &= -\frac{R_s \cdot R_r}{L_m \cdot (R_s + R_r)}; \\ \alpha_2 &= -\frac{R_s + R_r}{L_{\sigma s} + L_{\sigma r}}. \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

Здесь R_s и R_r – активные сопротивления обмоток статора и ротора, соответственно; L_m – взаимная индуктивность; $L_{\sigma s}$ и $L_{\sigma r}$ – индуктивности рассеяния обмоток статора и ротора, соответственно.

Выражение для электромагнитного момента M двигателя имеет вид [2]:

$$\begin{aligned} M &= \frac{3}{2} \cdot L_m \cdot \left(I_s^r \cdot e^{j\omega t} + I_{s1}^r \cdot e^{\alpha_1 t} + I_{s2}^r \cdot e^{\alpha_2 t} \right) \times \\ &\quad \times \left(I_r^r \cdot e^{j\omega t} + I_{r1}^r \cdot e^{\alpha_1 t} - I_{r2}^r \cdot e^{\alpha_2 t} \right). \end{aligned} \quad (3)$$

Составляющая установившегося значения вращающего момента M_{ycm} в (3) равна:

$$M_{ycm} = \frac{3}{2} \cdot L_m \cdot \left(I_s^r \cdot e^{j\omega t} \right) \times \left(I_r^r \cdot e^{j\omega t} \right). \quad (4)$$

Составляющая M_{ycm} представляет собой момент, развиваемый АД с заторможенным ротором после окончания переходных процессов. Определяется по статической механической характеристике двигателя.

Апериодическая составляющая момента $M_{ан}$ может быть определена по формуле:

$$M_{ан} = 3 \cdot L_m \cdot I_{s2}^r \cdot e^{(\alpha_1 + \alpha_2)t} \times I_{r1}^r. \quad (5)$$

Составляющая $M_{ан}$ у многих АД затухает за 1...2 периода напряжения сети.

Сумма M_{ycm} и $M_{ан}$ представляет полезный вращающий момент двигателя $M_{\text{дв}}$, нарастающий по экспоненциальному закону:

$$M_{\partial e} = M_{yctm} + M_{an} = M(\omega) \cdot k_{\partial} \cdot \left(1 - e^{-(\alpha_1 + \alpha_2)t}\right). \quad (6)$$

$M(\omega)$ для формулы (6) определяется по формуле Клосса [4]. k_{∂} в формуле (6) – коэффициент динамичности.

Знакопеременная составляющая M_{3n} , являющаяся основной причиной вибраций АД при пуске, после некоторых преобразований определяется по формуле:

$$M_{3n} = \frac{M_n}{\cos \varphi_K} \cdot \cos(\omega \cdot t - \varphi_K) \cdot e^{-\alpha_1 t}. \quad (7)$$

Здесь M_n – пусковой момент двигателя; φ_K – угол сдвига фаз между током и напряжением в режиме короткого замыкания [4].

В случае одновременного включения фаз АД аperiodическая и знакопеременная составляющие отличаются от соответствующих значений одновременного включения.

Равенство нулю аperiodических составляющих токов обеспечивается подключением обмоток двигателя в области максимума соответствующего напряжения. В этом случае отсутствуют качающиеся поля, которые являются причиной возникновения знакопеременных моментов, и вид механической характеристики соответствует статической [5].

При сдвиге момента подключения одной из фаз на $\pi/4$ составляющая M_{3n} увеличивается по сравнению с одновременным включением (7) и определяется как:

$$M_{3n} = \sqrt{2} \cdot \frac{M_n}{\cos \varphi_K} \cdot \cos\left(\omega \cdot t - \varphi_K - \frac{\pi}{4}\right) \cdot e^{-\alpha_1 t}. \quad (8)$$

Более подробно несимметричные переходные режимы рассмотрены в [2].

Работа трехфазного АД при обрыве обмотки статора достаточно полно освещена в литературе [6,7].

С точки зрения энергетических показателей, в области малых нагрузок использование трехфазного АД в двухфазном режиме при определенных условиях более экономично. Это подтверждено проведенными экспериментальными исследованиями [8].

По другим видам ненормальных режимов (одновременная несимметрия статора и ротора, короткое замыкание обмоток статора, повреждение обмотки ротора и пр.) опубликованы работы [6,9 и др].

В настоящее время динамично развивающимся направлением развития судовых ЭП является использование в их составе полупро-

водниковых приборов (ПП). При использовании управляемых ПП в силовых цепях ЭП, кроме вышеуказанных режимов, возможно возникновение несимметричных режимов питания статорных обмоток АД, обусловленное специфическими эксплуатационными особенностями ПП.

Во время работы ПП в ключевых режимах, в отличие от режимов, используемых для регулирования параметров, вероятность выхода из строя ПП повышается, так как при прямом включении АД в сеть величина пускового тока достигает 10-кратного значения от номинального, а при отключении двигателей возможно превышение амплитудного значения напряжения ПП над амплитудой фазного напряжения сети в 1,8 раза [10].

В этом случае, на основе анализа несимметричных режимов по причинам неисправностей ПП, необходимо оценить их опасность для АД и оставшихся в работе ПП.

Для силовых модулей устройств с встречно-параллельным соединением тиристоров выделяются три основных вида несимметрии [7]:

- внутрифазовая (наличие одинакового по абсолютному значению для всех фаз угла рассогласования $V\alpha$ из-за разных углов открытия встречно-параллельно соединенных вентилей);
- междуфазовая ($V\alpha = 0$, но углы открытия тиристоров разных фаз различны);
- общая (наличие $V\alpha$ и разностей углов открытия вентилей разных фаз).

Результаты аналитических исследований трехфазной системы «тиристорный коммутатор-активно-индуктивная нагрузка» («TK-RL»), приведенные в [11], показывают, что при внутрифазовой несимметрии в выходном напряжении отсутствуют постоянная составляющая и гармоники, кратные трем. В случаях, когда имеет место междуфазовая несимметрия, отсутствуют постоянная составляющая напряжения и четные гармоники. При общей несимметрии выходное напряжение содержит как постоянную составляющую, так и полный спектр высших гармоник.

Если допустить, что при заданном скольжении параметры двигателя не зависят от тока и напряжения, то в этом случае АД при питании несинусоидальным напряжением на основе «принципа суперпозиции» в первом приближении эквивалентен системе из нескольких АД, расположенных на одном валу [12]. Каждому условному двигателю отдельной гармоники v соответствует своя схема замещения [7], причем от v зависят как индуктивные, так и активные сопротивления роторных цепей. Исходя из схемы замещения, электромагнитный момент v -й гармоники выражается уравнением [7]:

$$M_v = \frac{3 \cdot U_{sv}^2 \cdot (1 + g_v \cdot s_v)}{\sigma^2 \cdot R_{rH}' \cdot s_v \cdot \omega_0 \cdot v \cdot \left[\left(\frac{R_s}{\sigma \cdot R_{rH}'} + g_v + \frac{1}{s_v} \right)^2 + \left(\frac{X_{KH}}{\sigma^2 \cdot R_{rH}'} \right)^2 \cdot v^2 \cdot \varepsilon_v^2 \right]}, \quad (9)$$

где U_{sv} – фазное напряжение v -й гармоники; g_v – расчетный коэффициент для v -й гармоники; s_v – скольжение для v -й гармоники прямого и обратного полей; σ – коэффициент рассеяния; R_{rn}^l – приведенное активное сопротивление обмотки ротора в номинальном режиме; ω_0 – угловая скорость электромагнитного поля статора; v – номер гармоники; R_s – активное сопротивление обмотки статора; $X_{кн}$ – индуктивное сопротивление короткого замыкания в номинальном режиме; ε_v – относительное значение индуктивного сопротивления v -й гармоники.

Анализ механических характеристик системы «тиристорный коммутатор-асинхронный двигатель» («ТК-АД») в квазиустановившемся режиме, полученных аналитически при известных допущениях, позволяет сделать вывод, что при внутрифазовой несимметрии электромагнитный момент асинхронного двигателя будет определяться как:

$$M = \sum M_{vnp}, \quad (10)$$

т.е. искажение кривой результирующего момента минимально.

В формуле (10) $\sum M_{vnp}$ – результирующий момент гармоник полей прямого вращения.

При междуфазовой несимметрии:

$$M = \sum M_{v1np} + \sum M_{v1ob}, \quad (11)$$

где $\sum M_{v1np}$, $\sum M_{v1ob}$ – результирующие моменты нечетных гармоник полей прямой и обратной последовательностей, соответственно.

Если несимметрия имеет общий характер, то:

$$M = \sum M_{vnp} + \sum M_{vob} + M_{пост}. \quad (12)$$

Здесь $\sum M_{vob}$ – результирующий момент гармоник полей обратного вращения; $M_{пост}$ – постоянная составляющая момента. Искажение механической характеристики в данном случае существенно.

В формулах (10)...(12) составляющие M_{vnp} и M_{vob} определяются по (9), а $M_{пост}$ – по значениям постоянной составляющей тока.

В общем случае в зависимости от вида несимметрии и степени ее проявления специальные режимы АД можно условно разделить на четыре группы.

Специальные режимы первой группы возникают при технологической несимметрии или небольшой разрегулировке в процессе работы.

Ко второй группе относятся несимметричные режимы, которые не приводят к полной потере управляемости.

В третью группу входят режимы, возникающие по причинам пробоя ПП.

Специальные режимы четвертой группы связаны с полным закрытием одного или нескольких ПП.

Наибольшую опасность представляют несимметричные режимы четвертой группы в связи с высокой вероятностью возникновения постоянной составляющей момента $M_{пост}$ (12), наличие которой одновременно с двигательным режимом создает режим динамического торможения. $M_{пост}$ обычно вносит наибольшее искажение в механическую характеристику АД, так как ее значение прямо пропорционально постоянной составляющей тока, которая ограничена только активным сопротивлением обмоток. Оставшиеся исправными ПП будут функционировать в более загруженных по току режимах при условии примерных равенств момента сопротивления M_c на валу АД до и после возникновения несимметричного режима.

Библиографический список

1. Адкинс Б. Общая теория электрических машин / Пер. с англ. М.; Л.: Госэнергоиздат, 1960. 272 с.

2. Ковач К.П., Рац И. Переходные процессы в машинах переменного тока / Пер. с нем; под ред. А.И. Вольдека. М.; Л.: Госэнергоиздат, 1963. 744 с.

3. Петров И.И., Мейстель А.М. Специальные режимы работы асинхронного электропривода. М.: Энергия, 1968. 264 с.

4. Чиликин М.Г., Сандлер А.С. Общий курс электропривода. М.: Энергоиздат, 1981. 576 с.

5. Wood W. Transient torques in induction motors, due to switching of the supply / W. Wood, F. Flynn, A. Shanmugasandaram // Proc. IEE. 1965. № 7. V. 112.

6. Трещев И.И. Несимметричные режимы судовых машин переменного тока. Л.: Судостроение, 1965. 248 с.

7. Туганов М.С. Судовой бесконтактный электропривод. Л.: Судостроение, 1978. 288 с.

8. Исследование и разработка способов естественного повышения коэффициента мощности судоремонтных заводов: Отчет о НИР. № ГР. 81006260 / Рук. Осокин Б.В. Владивосток: Дальневост. высш. инж. морск. уч-ще, 1982. 75 с.

9. Вольдек А.И. Электрические машины. Л.: Энергия, 1978. 832 с.

10. Петров Л.П. и др. Асинхронный электропривод с тиристорными коммутаторами // Библиотека по автоматике. М.: Энергия, 1970. Вып. 380. 128 с.

11. Туганов М.С., Кулешов В.И., Фархутдинов Ф.Х. Обобщенный метод исследования электромагнитных процессов в системе «трехфазный тиристорный коммутатор-индуктивно-активная нагрузка» // Электричество. 1976. № 9. С. 77-80.

12. Копылов И.П. Электромеханические преобразователи энергии. М.: Энергия, 1973. 400 с.

УДК 62-83:629.5

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА ГАРМОНИЧЕСКОГО АНАЛИЗА К ИССЛЕДОВАНИЯМ РЕЖИМОВ РАБОТЫ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

А.Ф. Бурков, Дальрыбвтуз, Владивосток

Рассматривается метод гармонического анализа применительно к аналитическим исследованиям некоторых режимов работы судовых электроприводов.

В настоящее время наиболее широкое применение на судах нашли электроприводы (ЭП) переменного тока, включающие, как правило, трехфазные электрические двигатели (ЭД) переменного тока. При использовании в ЭП систем управления (СУ), в состав которых входят силовые модули (СМ) преобразователей частоты и напряжения на базе силовых полупроводниковых приборов (СПП) [в общем случае систем «полупроводниковый преобразователь-асинхронный двигатель» («ПП-АД»)], возможно возникновение различного рода специальных режимов работы ЭД. В ряде случаев такие режимы могут явиться причинами возникновения аварийных ситуаций. Таким образом, актуальной является задача аналитических исследований несимметричных режимов работы ЭП.

Одним из аналитических подходов к анализу электромагнитных процессов в системах «ПП-АД» относится метод гармонического анализа [1, 2, 3]. Учитывая относительную громоздкость расчетов, ниже в качестве примера рассматривается обобщенный метод исследования электромагнитных процессов трехфазной системы «силовой модуль – активно-индуктивная нагрузка» («СМ-RL») при помощи средств вычислительной техники, предложенный в [2], в основу которого положены выводы, приведенные в [3].

Поскольку на закон изменения тока во времени влияет не только приложенное к нагрузке напряжение, но и электромагнитные процессы в ней, выходные характеристики СМ оказываются зависящими от характера нагрузки. АД в общем случае является относительно сложной нагрузкой (потребителем), содержащей кроме комплексных сопротивлений электродвижущие силы (ЭДС) машины.

В рассматриваемом методе для приближенного анализа двигатель на рабочем участке механической характеристики при

$$\omega = \omega \pm V\omega_{\partial\partial\partial\partial} \quad (1)$$

представляется эквивалентной RL-нагрузкой. Схема замещения системы «СМ-RL» показана на рис. 1.

Если СУ отпирает тиристоры VS_i без задержки [$i = 1 \dots 6$ – номера тиристоров (рис. 1)], то:

$$\alpha_i = (0 \dots \varphi)^0. \quad (2)$$

В формуле (2) φ – параметр нагрузки, определяемый по формуле:

$$\varphi = \arctg\left(\frac{\omega \cdot L_H}{R_H}\right). \quad (3)$$

В этом случае без учета падений напряжений на тиристорах:

$$\vec{U}_A = \vec{E}_A; \vec{U}_B = \vec{E}_B; \vec{U}_C = \vec{E}_C. \quad (4)$$

На рис. 2 приведена векторная диаграмма для рассматриваемого случая.

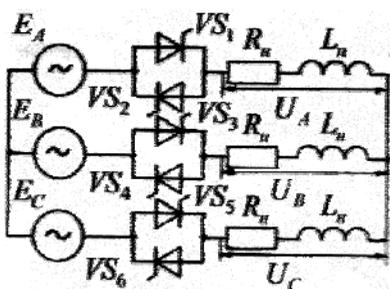


Рис. 1. Схема замещения системы «СМ-RL» без нулевого провода:
 E_A, E_B, E_C – ЭДС источника (сети);
 $VS_1 \dots VS_6$ – тиристоры силового модуля;
 R_n, L_n – активно-индуктивная нагрузка;
 U_A, U_B, U_C – напряжение RL-нагрузки

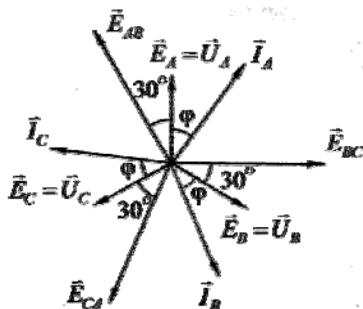


Рис. 2. Векторная диаграмма ЭДС, напряжений и токов системы «СМ-LR»
 φ – угол сдвига фаз между напряжением и током

Для количественной оценки токов и напряжений RL-нагрузки необходимо иметь информацию о форме кривой выходного напряжения трехфазного СМ, которая в общем случае, например для фазы А, показана на рис. 3.

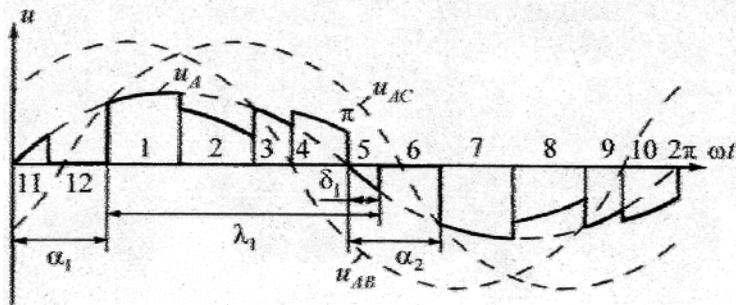


Рис. 3. Кривая напряжения фазы А на выходе силового модуля: α_1, α_2 – углы открытия тиристоров VS_1, VS_2 ; λ_1 – угол проводимости тиристора VS_1 ; δ_1 – дополнительный угол проводимости тиристора

Форма одного периода выходного напряжения СМ состоит из 12-ти характерных участков ($n = 12$). Участки 1, 3, 5, 7, 9 и 11 соответствуют одновременно включенным тиристорам в трех фазах (рисунок 1). На 2, 4, 8 и 10 участках одновременно включены тиристоры в двух фазах. На участках 6 и 12 включен тиристор в одной фазе.

Интервалы существования кривых напряжения (рисунок 3) зависят от углов открытия тиристоров α_i и от углов их проводимости λ_j , которые выражаются соотношением [3]:

$$\lambda_j = \pi - \alpha_i + \delta_k, \quad (5)$$

где $\delta_k = f(\alpha, \varphi)$ – дополнительный угол проводимости тиристора при RL-нагрузке.

Фазный ток на n -м участке определяется из дифференциального уравнения для цепи фазы А с последовательным соединением R_H и L_H (см. рис. 1):

$$u_A = A_n \cdot \sin(\omega \cdot t + \psi_n) = R_H \cdot i_n + L_H \cdot \frac{di_n}{dt}, \quad (6)$$

где A_n – коэффициент амплитуды напряжений; ψ_n – угол между фазным и линейным напряжениями на n -м участке.

Решение уравнения (6) имеет вид:

$$i_n = A_n \cdot \sin(\omega t - \varphi - \psi_n) + \left[i_{nH} - A_n \cdot \sin(\gamma_n - \varphi + \psi_n) \right] \cdot e^{-\frac{\omega t - \gamma_n}{\text{tg} \varphi}}, \quad (7)$$

где γ_n – угол, соответствующий началу участка n ; i_{nH} – начальное значение тока на n -м участке.

Так как конечное значение тока i_{nK} равно $i_{(n+1)H}$, то начальное значение тока в общем виде на участке $n+1$ определяется как:

$$i_{(n+1)H} = A_n \cdot \sin(\beta_n - \varphi + \psi_n) + \left[i_{(n+1)H} - A_n \cdot \sin(\gamma_n - \varphi + \psi_n) \right] \cdot e^{-\frac{\beta_n - \gamma_n}{\text{tg} \varphi}}, \quad (8)$$

где β_n – конечное значение угла на n -м участке.

Математическое описание работы системы «СМ–RL» нагрузка (при известных допущениях) в несимметричных режимах, например, для случаев разрыва цепей одного тиристора VS_2 (режим *a*), двух разнополярных тиристоров VS_2, VS_3 (режим *b*) и двух однополярных тиристоров VS_2, VS_4 (режим *c*) (рисунок 1) является частным случаем обобщенного метода исследований [2].

Для режима *a*, подставляя в (7) пределы углов проводимостей тиристоров из известных форм кривых выходного напряжения СМ, после преобразований получается следующее уравнение углов:

$$\sin(\delta_1 - \varphi) \cdot e^{\frac{\delta_1}{\text{tg} \varphi}} = \sin \varphi \cdot e^{-\frac{\pi}{\text{tg} \varphi}}. \quad (9)$$

Уравнения углов для режима *b* имеют вид:

$$\left. \begin{aligned} \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot \sin\left(\delta_1 - \varphi - \frac{\pi}{6}\right) \cdot e^{\frac{\delta_1}{\text{tg} \varphi}} &= \sin \varphi \cdot e^{-\frac{\pi}{\text{tg} \varphi}} - \frac{1}{2} \cdot \sin(\delta_4 - \varphi) \cdot e^{\frac{\delta_4 - \frac{\pi}{3}}{\text{tg} \varphi}}; \\ \sin(\delta_4 - \varphi) \cdot e^{\frac{\delta_4}{\text{tg} \varphi}} &= \frac{1}{2} \cdot \sin \varphi \cdot e^{\frac{2\pi}{3 \cdot \text{tg} \varphi}} + \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot \sin \varphi \cdot e^{-\frac{\pi}{\text{tg} \varphi}}. \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

Соответственно уравнения углов для режима *c* имеют вид:

$$\left. \begin{aligned} \sin(\delta_1 - \varphi) \cdot e^{\frac{\delta_1}{\operatorname{tg} \varphi}} &= \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot \sin \varphi \cdot e^{-\frac{5 \cdot \pi}{6 \cdot \operatorname{tg} \varphi}} - \frac{1}{2} \cdot \sin \varphi \cdot e^{-\frac{\pi}{3 \cdot \operatorname{tg} \varphi}}; \\ \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot \sin\left(\delta_6 - \varphi - \frac{\pi}{6}\right) \cdot e^{\frac{\delta_6}{\operatorname{tg} \varphi}} &= \frac{1}{2} \cdot \sin \varphi \cdot e^{\frac{2 \cdot \pi}{3 \cdot \operatorname{tg} \varphi}} + \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot \sin \varphi \cdot e^{-\frac{7 \cdot \pi}{6 \cdot \operatorname{tg} \varphi}} - \\ &\quad - \frac{1}{2} \sin(\delta_1 - \varphi) \cdot e^{\frac{3 \cdot \delta_1 - \pi}{3 \cdot \operatorname{tg} \varphi}}. \end{aligned} \right\} (11)$$

Согласно выражениям (9)...(11), для приближенного анализа электромагнитных коммутационных процессов системы «СМ–АД» при несимметричных режимах по причине обрыва силовых цепей одного или нескольких тиристоров достаточно определять только δ_1 – для режима *a*, δ_1 и δ_4 – для режима *b* и δ_1 , δ_6 – для режима *c*.

Рассчитанные δ_k для конкретного сочетания α_i и φ позволяют исследовать гармонический состав выходных характеристик СМ разложением в тригонометрический ряд Фурье [4].

При исследовании рассматриваемых режимов системы «СМ–АД» фазные величины напряжений могут быть представлены в виде:

$$u_s(\omega t) = \frac{a_{0\varphi}}{2} + \sum_{v=1}^{\infty} U_{sv} \cdot \sin(v \cdot \omega \cdot t + \theta_{v\varphi}). \quad (12)$$

Коэффициент $a_{0\varphi}$ в (12) определяется по формуле:

$$a_{0\varphi} = \frac{1}{\pi} \cdot \sum_{n=1}^c A_n \cdot \int_0^{\pi} \sin(\omega \cdot t + \psi_n) \cdot d(\omega \cdot t), \quad (13)$$

где c число кусочно-непрерывных участков в периоде выходного напряжения $u_s(\omega t)$.

Амплитуда v -й гармоники фазного напряжения U_{sv} в (12) выражается как:

$$U_{sv} = \sqrt{a_{v\varphi}^2 + b_{v\varphi}^2}. \quad (14)$$

Здесь

$$a_{v\phi} = \frac{1}{\pi} \cdot \sum_{n=1}^c A_n \cdot \int_0^{\pi} \sin(\omega \cdot t + \psi_n) \cdot \cos(v \cdot \omega \cdot t) \cdot d(\omega \cdot t), \quad (15)$$

$$b_{v\phi} = \frac{1}{\pi} \cdot \sum_{n=1}^c A_n \cdot \int_0^{\pi} \sin(\omega \cdot t + \psi_n) \cdot \sin(v \cdot \omega \cdot t) \cdot d(\omega \cdot t). \quad (16)$$

Значение $\theta_{v\phi}$ в (12) определяется как:

$$\theta_{v\phi} = \operatorname{arctg} \left(\frac{a_{v\phi}}{b_{v\phi}} \right). \quad (17)$$

Соответственно, фазные величины токов:

$$i_s(\omega t) = I_{s0} + \sum_{v=1}^{\infty} I_{sv} \cdot \sin(v \cdot \omega \cdot t + \xi_{v\phi}). \quad (18)$$

Здесь I_{s0} – постоянная составляющая тока; I_{sv} – амплитудное значение тока фазы v -й гармоники; $\xi_{v\phi}$ – сдвиг тока по фазе.

Постоянная составляющая тока I_{s0} в (18) определяется по формуле:

$$I_{s0} = \frac{U_{s0}}{\cos \varphi}. \quad (19)$$

Амплитудное значение тока фазы v -й гармоники I_{sv} в (18) определяется по формуле:

$$I_{sv} = \frac{U_{sv}}{Z_v} = \frac{U_{sv}}{\sqrt{\frac{R^2 + (v \cdot \omega \cdot L)^2}{R^2 + \omega^2 \cdot L^2}}}, \quad (20)$$

где Z_v – гармоническое сопротивление фазы.

Сдвиг тока по фазе $\xi_{v\phi}$ в (18) определяется как:

$$\xi_{v\phi} = \theta_{v\phi} + \varphi. \quad (21)$$

Таким образом, при помощи описанного математического аппарата можно приблизительно построить кривые выходных характеристик СМ (мгновенных значений напряжения и тока) при возникновении специальных режимов, связанных с полным закрытием одного или нескольких тиристоров, провести анализ и оценить их количественно с целью решения вопросов необходимости специальных защит ЭП и СПП или достаточности используемых их видов для конкретных случаев специальных режимов.

К основным недостаткам рассмотренного подхода необходимо отнести следующее.

Относительная громоздкость выкладок не приводит к высокой идентификации предложенной математической модели исследуемым характеристикам главным образом по причинам замены реальной электрической машины эквивалентной RL-нагрузкой. Так как параметры схемы замещения АД зависят от целого ряда факторов, затруднителен учет фазных ЭДС и зависимости $\varphi = f(s)$.

Принятые допущения недостаточно адекватно отображают форму кривой напряжения на выходе СМ, информация о которой является исходной для количественного расчета выходных характеристик.

При математическом моделировании электромагнитных процессов в специальных режимах, для определения δ_k используется итерационный метод. Полное закрытие одного или нескольких СПП соответствует режиму

$$\alpha_i = \pi + \delta_k, \quad (22)$$

что уменьшает скорость итерационного процесса, так как его сходимость зависит от степени несимметрии углов α_i , и увеличивает время расчетов [5].

Библиографический список

1. Григо В.М., Ткачев В.М., Федоров А.В. Гармонический анализ кривых напряжения и тока простейших тиристорных преобразователей частоты с непосредственной связью при активно-индуктивной нагрузке // Известия вузов. Энергетика. 1972. №. 3. С. 27-32.

2. Туганов М.С., Кулешов В.И., Фархутдинов Ф.Х. Обобщенный метод исследования электромагнитных процессов в системе «трехфазный тиристорный коммутатор–индуктивно-активная нагрузка» // Электричество. 1976. № 9. С. 77-80.

3. Шубенко В.А., Браславский И.Я. Тиристорный асинхронный электропривод с фазовым управлением. М.: Энергия, 1972. 200 с.

4. Романовский П.И. Ряды Фурье. М.: Изд-во физ.-мат. лит., 1959. 304 с.

5. Бахвалов Н.С. Численные методы. М.: Наука, 1975. 632 с.

УДК 62-83:629.5

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА ПЕРЕМЕННЫХ СОСТОЯНИЙ К ИССЛЕДОВАНИЯМ РЕЖИМОВ РАБОТЫ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

А.Ф. Бурков, Дальрыбвтуз, Владивосток

Рассматривается метод переменных состояний применительно к аналитическим исследованиям некоторых режимов работы судовых электроприводов.

Большое многообразие схем управления (СУ) судовых электроприводов (ЭП) ставит вопрос о возможностях использования для аналитических исследований возможных режимов работы ЭП различных математических моделей.

Один из подходов к анализу электромагнитных процессов в системах, включающих в качестве электромеханических преобразователей асинхронные двигатели (АД), управляемые СУ с силовыми полупроводниковыми приборами (ПП), подразумевает применение метода переменных состояний. Этот метод основан на составлении дифференциальных уравнений в матричной форме, описывающих состояние системы на каждом интервале постоянства структуры, который соответствует реальным физическим процессам в системе [1,2,3].

В случае линейности АД и моделирования силовых ПП «идеальными ключами» электромагнитные процессы в системе «тиристорный коммутатор-асинхронный двигатель» («ТК-АД») описываются системой дифференциальных уравнений для неподвижных относительно статора фазных осей А, В и С, которая в матричном виде представляется как [2]:

$$\begin{pmatrix} u_s \\ 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} (R_s + pL_{\sigma s}) \cdot A_{1h} + pL_m \cdot B_{1h} & \frac{3}{2} \cdot pL_m \cdot A_{2h} \\ pL_m \cdot B_{2h} + \omega_r \cdot L_m \cdot B_{3h} & (R_r + pL_r) \cdot A_{3h} + \frac{2}{3} \omega_r \cdot L_r \cdot B_{4h} \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} i_s \\ i'_r \end{pmatrix}. \quad (1)$$

Здесь u_s – столбцовая матрица фазных напряжений статора; i_s – матрица действительных значений фазных токов статора; i_r' – матрица приведенных токов ротора к статорной цепи; R_s , R_r – активные сопротивления фаз обмоток статора и ротора АД, соответственно; p – оператор дифференцирования; $L_{\sigma s}$ – индуктивность рассеяния обмотки статора; L_m – взаимная индуктивность; L_r – индуктивность роторной цепи; ω_r – угловая скорость ротора; A_{kh} – единичная матрица ($k = 1, 2, 3$; $h = 3, 2, 1$ – индекс режима работы системы); B_{kh} – матричные коэффициенты.

При работе системы «ТК-АД» в несимметричных режимах исходное уравнение в форме Коши в ортогональной системе координат α, β при совмещении оси фазы А статора с ортогональной осью α имеет вид:

$$\left(\begin{array}{c} p \\ \omega_r \end{array} \right) X_h = C_h X_h, \quad (2)$$

где X_h – столбцовая матрица переменных для случая h ; C_h – матрица параметров системы.

После определения собственных значений и векторов матрицы C_h и выделения вещественного решения для случая $h = 3$ (включены тиристоры в трех фазах) выражения мгновенных значений токов представляются в виде:

$$\left. \begin{array}{l} i_{s\alpha} = \sum_{i=1}^3 I_{si} \cdot e^{\lambda_i \cdot t} \cdot \cos(\omega_i \cdot t + \varphi_{si}); \\ i_{s\beta} = \sum_{i=1}^3 I_{si} \cdot e^{\lambda_i \cdot t} \cdot \sin(\omega_i \cdot t + \varphi_{si}); \\ i'_{r\alpha} = \sum_{i=1}^3 I'_{ri} \cdot e^{\lambda_i \cdot t} \cdot \cos(\omega_i \cdot t + \varphi_{ri}); \\ i'_{r\beta} = \sum_{i=1}^3 I'_{ri} \cdot e^{\lambda_i \cdot t} \cdot \sin(\omega_i \cdot t + \varphi_{ri}). \end{array} \right\} \quad (3)$$

Здесь I_{sj} , I'_{ri} – амплитуды составляющих тока статора и приведенного тока ротора, соответственно; λ_j – декременты затухания; ω_j – угловые скорости; φ_{sj} , φ_{ri} – начальные фазы составляющих токов.

При $h = 2$ (отключена фаза А):

$$\left. \begin{aligned} i_{s\alpha} &= 0; \\ i_{s\beta} &= \sum_{j=1}^3 I_{sj} \cdot e^{\lambda_j \cdot t} \cdot \sin(\omega_j \cdot t + \varphi_{sj}); \\ I'_{r\alpha} &= \sum_{j=1}^3 I'_{rj} \cdot e^{\lambda_j \cdot t} \cdot \cos(\omega_j \cdot t + \varphi_{rj}); \\ I'_{r\beta} &= \sum_{j=1}^3 I'_{rj} \cdot e^{\lambda_j \cdot t} \cdot \sin(\omega_j \cdot t + \varphi_{rj}). \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

В случае $h = 1$ (отключены цепи питания статора ЭД):

$$\left. \begin{aligned} i_{s\alpha} &= 0; \\ i_{s\beta} &= 0; \\ I'_{r\alpha} &= I'_r \cdot e^{-\alpha_r \cdot \omega_r \cdot t} \cdot \cos[(1-s) \cdot \omega_r \cdot t + \varphi_r]; \\ I'_{r\beta} &= I'_r \cdot e^{-\alpha_r \cdot \omega_r \cdot t} \cdot \sin[(1-s) \cdot \omega_r \cdot t + \varphi_r], \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

где s – скольжение АД.

Амплитудное значение приведенного тока ротора I'_r равно:

$$I'_r = \sqrt{[i'_{r\alpha}(t)]^2 + [i'_{r\beta}(t)]^2}. \quad (6)$$

Начальная фаза φ_r определяется как:

$$\varphi_r = \arctg \left[\frac{i'_{r\beta}(t)}{i'_{r\alpha}(t)} \right]. \quad (7)$$

Моменты коммутации тиристоров (границы между режимами работы) определяются решением полученных трансцендентных уравнений:

$$i_{s\alpha} = 0; i_{s\beta} = 0. \quad (8)$$

Значения реальных фазных токов и электромагнитных моментов в трехфазной системе координат по преобразованным в α, β осях находятся по известным выражениям [4].

Метод мгновенных значений на каждом интервале постоянства структуры для анализа электромагнитных процессов в системе «ТК–АД» при несимметричных режимах является достаточно обоснованным и строгим.

К его основным недостаткам следует отнести относительную сложность математического описания при использовании для исследования несимметричных режимов.

Кроме того, отсутствует аналитическое решение выражения (1) из-за необходимости нахождения моментов коммутации тиристоров решением трансцендентных уравнений, а сложность алгоритмизации делает достаточно трудоемкой задачу практического исследования электромагнитных процессов.

Библиографический список

1. Беспалов В.Я., Машинян Л.Х., Соколова Е.М. Метод расчета статических характеристик асинхронных двигателей, управляемых тиристорами // Электричество. 1979. № 7. С. 34-39.
2. Глазенко Т.А., Хрисанов В.И., Усольцев А.А. Математическая модель асинхронного электропривода с маловентильным непосредственным преобразователем частоты // Известия вузов. Электромеханика. 1983. № 4. С. 34-40.
3. Chattopadhyay A.K. State-variable steady analysis of a phase-controlled cyclo-converter induction motor drive / A.K. Chattopadhyay, J.T. Rao // IEEE Trans. on Ind. Appl. 1979. Vol. 15. № 3. P. 313-319.
4. Копылов И.П. Электромеханические преобразователи энергии. М.: Энергия, 1973. 400 с.

РАСЧЕТ КОНТАКТНЫХ СИСТЕМ КОНТАКТОРОВ ПРИ ИХ РАБОТЕ В СПЕЦИАЛЬНЫХ РЕЖИМАХ

А.Ф. Бурков; Н.Д. Крицкий, Дальрыбвтуз, Владивосток

Рассматривается расчет контактных систем контактных коммутационных аппаратов (контакторов) при работе их в условиях бездуговой коммутации электрических цепей переменного тока.

Контакторы представляют собой однопозиционные аппараты и могут находиться в установившемся режиме (контакты замкнуты или разомкнуты) или переходном (процесс замыкания или размыкания контактов).

При работе в специальных режимах (в условиях бездуговой коммутации) можно выделить следующие основные этапы расчета контакторов [1]:

- определение необходимых для нормальной работы контактных систем величин (расчет контактных систем);
- расчет электромагнитных механизмов и построение необходимых зависимостей;
- анализ полученных результатов с целью определения возможностей использования контактных аппаратов.

Коммутирующие контакты являются основным звеном контакторов (контактных коммутационных аппаратов). При работе контакторов в специальных режимах определяющим становится расчет контактов в замкнутом состоянии.

При установившемся режиме, когда коммутирующие контакты замкнуты, их переходное сопротивление R_k для одного разрыва электрической цепи равно [2]:

$$R_k = R_c + R_n. \quad (1)$$

Здесь R_c – сопротивление, обусловленное стягиванием линий тока к площадкам соприкосновения; R_n – сопротивление посторонних слоев и пленок.

Сопротивление стягивания R_c зависит от материала контактов, числа их площадок касания n , силы нажатия контактов F_k .

При расчете контактных систем используются определенные контактные модели. Наиболее распространены модели Хольма, в основу которых положена идеализированная картина контактирования двух изотропных проводников [3].

При относительно небольших токах I применяется сферическая модель контактов (рис. 1, 1), в которой реальная контактная поверх-

ность представлена сферой радиуса a с бесконечной тепло- и электропроводностью; ток и тепловой поток направлены вдоль радиальных линий, а эквипотенциальными и изотермическими поверхностями являются сферы.

Применительно к силовым аппаратам более приемлема эллиптическая модель контактов (рис. 1, 2). Здесь круглая контактная площадка радиусом a представлена в виде бесконечно тонкого диска, через который ток входит в полубесконечную область, а эквипотенциальными и изотермическими поверхностями контактирующих элементов являются софокусные эллипсоиды.

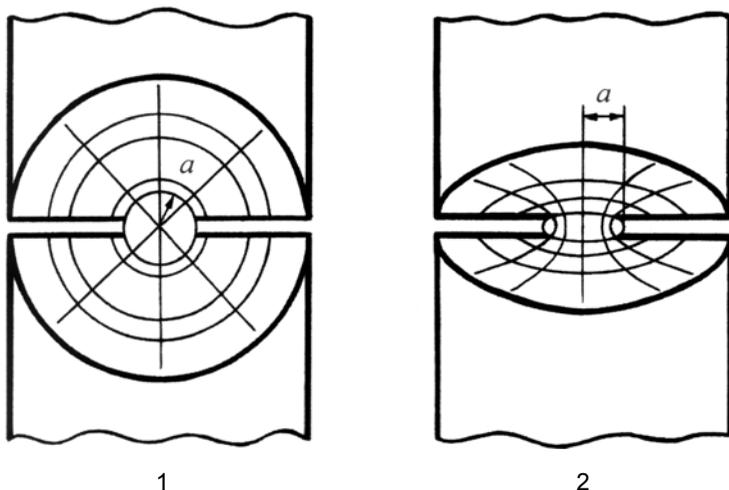


Рис. 1. Модели контактов, используемые при расчете контактных систем: 1 – сферическая модель контактов; 2 – эллиптическая модель контактов

Зависимость сопротивления R_c от силы нажатия контактов F_k неоднозначна и характеризуется видом деформации микровыступов контактируемых материалов.

На основании исследований установлено, что при изменении силы контактного нажатия от минимального $F_{k \min}$ до максимального $F_{k \max}$ значений происходит чередование упругой и пластической деформаций [4, 5].

Общее сопротивление стягивания R_c контактной пары с числом площадок касания n равно:

$$R_c = \frac{\rho}{k_c \cdot n} \cdot \sqrt{\frac{\pi \cdot \chi}{F_k}}, \quad (2)$$

где ρ – удельное сопротивление среды; k_c – коэффициент пропорциональности; χ – коэффициент деформации.

Коэффициент k_c в формуле (2) зависит от модели контактов.
При сферической контактной модели

$$k_c = \pi, \quad (3)$$

а при эллиптической контактной модели

$$k_c = 2. \quad (4)$$

Коэффициент χ в формуле (2) определяется видом деформации.
При упругой деформации

$$\chi = \xi \cdot H_B, \quad (5)$$

а при пластической деформации

$$\chi = \sigma_{см}. \quad (6)$$

В формуле (5) ξ – коэффициент, характеризующий обработку контактирующих поверхностей; H_B – твердость материала контактов по Бринеллю.

В формуле (6) $\sigma_{см}$ – сопротивление контактного материала смятию.

Кроме сопротивления R_c в формулу (1) входит сопротивление посторонних слоев и пленок R_n которое является функцией материала и температуры контактов, окружающей среды. Эта составляющая оказывает большее влияние на контакты, коммутирующие относительно небольшие токи.

К одной из основных причин возникновения пленок относятся окислительные процессы контактных поверхностей в окружающей среде. Значение сопротивления R_n вследствие фриттинг-процессов не является постоянным и определяется на основании опытных данных [4]. Известны отдельные работы по математическому описанию составляющих R_n [6].

Переходное сопротивление R_k (1) в первую очередь зависит от силы контактного нажатия F_k . С достаточной точностью зависимость сопротивления R_k от силы F_k может быть выражена эмпирической формулой [7]:

$$R_k = R_0 + \frac{k_0}{(0,102 \cdot F_k)^m}, \quad (7)$$

где R_0 – составляющая сопротивления R_k (в большинстве случаев $R_0 \approx 0$); k_0 – коэффициент, учитывающий физические свойства и вид контактов; m – коэффициент формы контактов.

Наличие сопротивления R_k приводит к выделению теплоты в зоне контактирования. Нагрев замкнутых контактов характеризуется взаимодействием сложных теплофизических процессов, обусловленных внутренними источниками теплоты в отдельных контактных площадках, где происходит стягивание линий тока, и термоэлектрическими эффектами Пельтье, Томсона и Колера, возникающими из-за взаимодействия электрических и тепловых процессов [8]. Эти эффекты протекают независимо от выделения тепла в контакте по закону Джоуля-Ленца.

Термоэлектрический «эффект Пельтье» был открыт в 1834 г. французским физиком Жаном Шарлем Атаназом Пельтье (1785-1845 гг.) [9]. «Эффект Пельтье» возникает при прохождении тока через место контактирования проводников из двух разнородных металлов [7]. Он объясняется наличием контактной разности потенциалов. Если электрическое поле, создаваемое контактной разностью потенциалов, ускоряет электроны, то в месте контактирования выделяется тепло, а если поле задерживает движение электронов, то тепло поглощается. Согласно «эффекту Пельтье» количество выделенного или поглощенного тепла Q пропорционально величине тока I , проходящего через контакт (спай) [10]:

$$Q = k_p \cdot I. \quad (8)$$

В формуле (8) k_p – «коэффициент Пельтье», определяемый по формуле:

$$k_p = -T \cdot \Delta\alpha, \quad (9)$$

где T – абсолютная температура, К; α – разность термоэлектрических коэффициентов проводников.

Термоэлектрический «эффект Томсона» открыл в 1856 г. английский физик Уильям Томсон (1824-1907 гг.) [11]. Суть его заключается в том, что если вдоль проводника, по которому протекает электрический ток, существует перепад температур, то в дополнение к теплоте, выделяемой в соответствии с законом Джоуля-Ленца, в объеме проводника в зависимости от направления тока выделяется или поглощается дополнительное количество теплоты Q («теплота Томсона»), пропорциональное силе тока I , времени t и перепаду температур $(T_2 - T_1)$ [12]:

$$Q = k_T \cdot (T_2 - T_1) \cdot I \cdot t, \quad (10)$$

где k_T – «коэффициент Томсона», зависящий от природы материала.

«Эффект Колера» («туннельный эффект») возникает вследствие переноса тока туннельными электронами через контактные пленки [13]. При этом анодная сторона пленки оказывается перегретой по сравнению с ее катодной стороной. «Эффект Колера» вызывает температурную асимметрию в жидком мостике из расплавленного металла, появляющегося между контактами в процессе их размыкания.

В расчетах, не требующих высокой точности, термоэлектрическими эффектами Пельтье, Томсона и Колера, вследствие их незначительного влияния на нагрев контактной площадки и отсутствия процесса образования электрической дуги, можно пренебречь. Однако необходимо учитывать электродинамические силы, обусловленные стягиванием линий тока, и другие явления, которые будут рассмотрены ниже.

При определении зависимостей между величинами R_k , F_k и I должна быть установлена взаимосвязь между температурой контактируемых площадок ϑ_n и падением напряжения на замкнутых контактах U_k .

Согласно рассматриваемым контактными моделям Хольма (см. рис. 1) предполагается, что контактируемые поверхности являются эквипотенциальными, изотермическими и имеют максимальную температуру ϑ_n :

$$\text{grad } \vartheta_n = 0. \quad (11)$$

Разбив контакт по мере удаления от площадки касания на несколько сечений (0...3) для $R_c = \text{var}$ (рис. 2), за нулевое значение принимается контактируемая поверхность с нулевым потенциалом u .

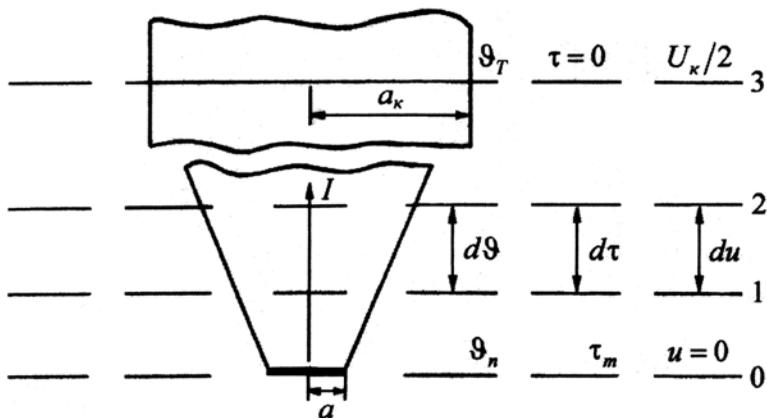


Рис. 2. Контактная модель для тепловых расчетов

При протекании тока I через элементарный объем контакта, ограниченный, например, сечениями 1 и 2 (см. рис. 2), уравнение баланса мощности без учета отвода тепла от боковых поверхностей может быть выражено как [7]:

$$\frac{(du)^2}{dR} = \frac{d\tau}{dR_T} - \frac{d(\tau + d\tau)}{d(R_T + dR_T)}. \quad (12)$$

В формуле (12) R и R_T – электрическое и тепловое сопротивления между сечениями 1 и 2 (см. рис. 2), соответственно; τ – превышение температуры.

После некоторых преобразований интеграл выражения (12) имеет вид:

$$\int_{U_K/2}^0 u \cdot du = - \int_0^\tau (\lambda \cdot \rho) \cdot d\tau, \quad (13)$$

где λ – коэффициент теплопроводности.

Превышение температуры τ в (13) определяется как:

$$\tau = T_n - T_T. \quad (14)$$

В формуле (14)

$$T_n = \vartheta_n + 273, \quad (15)$$

$$T_T = \vartheta_T + 273, \quad (16)$$

где T_n – температура токоведущей контактной детали в месте контактирования, К; T_T – температура токоведущей контактной детали в точке, значительно удаленной от контактной площадки, К; ϑ_T – температура токоведущей контактной детали в точке, значительно удаленной от контактной площадки, °С.

Таким образом, выражение, устанавливающее связь между температурой T_n и падением напряжения U_K , представляется следующим образом [14]:

$$T_n = T_T + \frac{U_K^2}{8 \cdot \lambda \cdot \rho}. \quad (17)$$

Падение напряжения U_K в формуле (17) равно:

$$U_K = I \cdot R_K. \quad (18)$$

С учетом отвода тепла от боковых поверхностей температура в месте контактирования T_n , согласно формуле Ньютона, равна [7]:

$$T_n = T_0 + \frac{\rho \cdot U_K \cdot I}{\lambda_T \cdot p \cdot S \cdot R_K} + \frac{U_K \cdot I}{2 \cdot \sqrt{\lambda \cdot \lambda_T \cdot p \cdot S}}, \quad (19)$$

где T_0 – температура окружающей среды, К; λ_T – коэффициент теплопроводности с поверхности проводника; p – периметр сечения контакта; S – площадь соприкосновения контактов.

В формуле (19)

$$T_0 = \vartheta_0 + 273, \quad (20)$$

где ϑ_0 – температура окружающей среды, °С.

Исходя из (19), с увеличением площади соприкосновения контактов S улучшается теплоотвод из контактной зоны.

Выражения (17) и (19) получены для сферической контактной модели (см. рис. 1, 1).

При больших токах характер температурного поля существенно искажается. В этом случае, как отмечалось выше, приемлема эллиптическая модель контактов (см. рис. 1, 2).

Для эллиптической контактной модели зависимость между температурой площадки соприкосновения контактов T_n и напряжением U_k имеет вид [8]:

$$T_n = \frac{T_m}{\cos\left(\frac{U_k \cdot \sqrt{K_n}}{4 \cdot \lambda \cdot a \cdot R_k}\right)}, \quad (21)$$

где K_n – число Лоренца.

В случае $R_k = R_c$ формула для определения силы контактного нажатия F_k при сферической модели контактов, исходя из (2) и (17), после некоторых преобразований представляется как:

$$F_k = \frac{\chi \cdot \rho \cdot I^2}{8 \cdot \pi \cdot \lambda \cdot n \cdot (T_n - T_T)}, \quad (22)$$

или с учетом отвода тепла от боковых поверхностей (19):

$$F_k = \frac{\chi}{2 \cdot \pi \cdot n \cdot \left[\frac{\sqrt{\lambda \cdot \lambda_T \cdot \rho \cdot S \cdot (T_n - T_0)}}{\rho \cdot I^2} - \sqrt{\frac{\lambda}{\lambda_T \cdot \rho \cdot S}} \right]}. \quad (23)$$

При $R_k \neq R_c$ (1) сила F_k определяется как:

$$F_k = \frac{\chi \cdot \rho^2 \cdot I^2}{\pi \cdot n \cdot \left[\sqrt{8 \cdot \lambda \cdot \rho \cdot (T_n - T_T)} - l \cdot R_n \right]^2}. \quad (24)$$

Для эллиптической модели контактов сила контактного нажатия F_k выражается следующим образом [15]:

$$F_k = \frac{\chi \cdot \pi \cdot K_n \cdot I^2}{16 \cdot \lambda^2 \cdot \left[\arccos \left(\frac{T_T}{T_n} \right) \right]} \quad (25)$$

В практике проектирования и эксплуатации контакторов установились ориентировочные границы удельных давлений, равных отношению силы F_k к номинальному току I_n [7, 14].

Определение сил нажатия F_k при замкнутых контактах по приведенным выше зависимостям является необходимым, но не достаточным условием, учитываемым при расчете электромагнитных механизмов контакторов.

При пусковых токах, токах короткого замыкания и перегрузок возрастает значение U_k и, следовательно, температура T_n (21).

Кроме того, возникают значительные электродинамические силы F_d , обусловленные стягиванием линий тока и направленные встречно силам нажатия F_k , что также приводит к увеличению температуры T_n в месте контактирования вследствие увеличения сопротивления R_k (7). Величина силы F_d определяется по зависимости Двайта [16]:

$$F_d = I_m^2 \cdot \ln \left(\frac{a_k}{a} \right) \cdot 10^{-7}, \quad (26)$$

где I_m – величина максимально возможного тока в цепи; a_k – радиус сечения контакта до стягивания линий тока (см. рис. 2).

Влияние на увеличение переходного сопротивления оказывают и электромагнитные силы F_m , возникающие за счет пинч-эффекта при сжатии контактной площадки магнитным полем, которые вызывают появление усилий отброса F_n , совпадающих по направлению с электродинамическими силами F_d [7]:

$$F_n = F_m \cdot \left(\frac{k_n}{1 - k_n} \right). \quad (27)$$

Здесь k_n – коэффициент Пуассона.

В результате значительного повышения температуры T_n материал контактов может расплавиться и произойдет их сваривание. Процессы плавления и сваривания контактов исследуются в основном экспериментально, так как при аналитических расчетах этих явлений делаются существенные допущения, искажающие во многом исследуемые зависимости.

Кроме того, вследствие локального нагрева и взрывного испарения областей стягивания линий тока l_m необходимо учесть возможность образования сил F_n , которые определяются как [17]:

$$F_n = \frac{k_n \cdot \pi \cdot \rho \cdot \xi \cdot H_B \cdot l_m^2 \cdot t}{c \cdot m_a \cdot F_k}, \quad (28)$$

где k_n – коэффициент пропорциональности; t – время прохождения тока l_m ; c – теплоемкость контактного материала; m_a – масса атома материала контактов.

Таким образом, необходимая для нормальной работы коммутирующих контактов сила полезных сопротивлений F_{nc} контакторов определяется из условия:

$$F_{nc} \geq F_k(F_\Sigma), \quad (29)$$

где
$$F_\Sigma = F_\partial + F_n + F_l. \quad (30)$$

В правую часть неравенства (29) подставляется большее из двух полученных значений (F_k или F_Σ).

Библиографический список

1. Бурков А.Ф. Специальные режимы работы контактных коммутационных аппаратов. Владивосток: Мор. гос. ун-т им. адм. Г.И. Невельского, 2007. 56 с.
2. Буль Б.К. Основы теории электрических аппаратов / Под ред. Г.В. Буткевича; Б.К. Буль [и др.]. М.: Высш. шк., 1970. 600 с.
3. Хольм Р. Электрические контакты / Пер. с англ. М.: Изд-во иностранной лит., 1961. 347 с.
4. Залесский А.М., Кукеков Г.А. Тепловые расчеты электрических аппаратов. Л.: Энергия, 1967. 380 с.
5. Лысов Н.Е. Сваривание одноточечных и плоских контактов // Электротехника. 1964. № 4. С. 6-10.
6. Хомицкий О.В. Схватывание слаботочных электрических контактов // Известия вузов. Электромеханика. 1975. № 10. С. 1116-1121.
7. Таев И.С. Электрические аппараты. Общая теория. М.: Энергия, 1977. 272 с.
8. Александров Г.Н. Теория электрических аппаратов / Под ред. Г.Н. Александрова; В.В. Борисов [и др.]. М: Высш. шк., 1985. 312 с.
9. Пельтье / (<http://liverum.com/content/PEL.T.E-46903>).
10. Пельтье эффект / (= <http://www.booksite.ru/fulltext/1/001/008/087/728>).
11. Томсон, Уильям / (<http://www.krugosvet.ru/articles/04/1000463/1000463a1>).

12. Томсона эффект (термоэлектрический) / (<http://www.cultinfo.ru/fulltext/1/001/008/111/269>).

13. Пуды А.Е. Влияние теплоемкости пленки на нагрев квазиметаллического контакта с учетом туннельного эффекта / (http://www.rusnauka.com/DN2006/Matemathics/4_pudi).

14. Сахаров П.В. Проектирование электрических аппаратов. М.: Энергия, 1971. 560 с.

15. Александров Г.Н. Проектирование электрических аппаратов / Под ред. Г.Н. Александрова; В.В. Борисов [и др.]. Л.: Энергоатомиздат, 1985. 448 с.

16. Брон О.Б. К вопросу об электродинамических силах в контактах // Электротехника. 1965. № 1. С. 8-11.

17. Раховский В.И. Физические основы коммутации электрического тока в вакууме. М.: Наука, 1970. 536 с.

УДК 629

РАСЧЕТ ВЕЛИЧИНЫ НАПРЯЖЕНИЯ И ЕМКОСТИ АККУМУЛЯТОРНОЙ БАТАРЕИ ДЛЯ КОМБИНИРОВАННОЙ ЭНЕРГОУСТАНОВКИ

**В.В. Веревкин; В.В. Миханошин,
МГУ им. адм. Г.И. Невельского, Владивосток**

Одной из важнейших задач при разработке комбинированных энергоустановок для морского транспорта является расчет энергоемкости химического накопителя энергии. Рассмотрены факторы, влияющие на выбор величины напряжения и емкости АБ. Приведены зависимости времени работы гребного электродвигателя от энергоемкости АБ. Определена методика расчета емкости АБ в зависимости от мощности синхронного генератора.

Известно, что, чем больше напряжение в линии электропередачи, тем меньший нужен ток для передачи той же мощности. При уменьшении тока в проводнике уменьшаются омические потери на нагрев проводов и можно уменьшить их сечение. Таким образом, применив повышенное напряжение, можно сэкономить на проводниках: чем тоньше кабель, тем он дешевле. При использовании частотных преобразователей также целесообразно применять высокое напряжение: чем меньше коммутируемый ток, тем меньше потери в силовых ключах. Например, у первых гибридных автомобилей Prius напряжение аккумуляторной батареи (АБ) составляло 274 В, в последующих сериях оно равно 500 В [1]. С другой стороны, чем больше напряжение электроустановки, тем большую опасность представляет для человека ее обслуживание и эксплуатация. Поэтому напряжение должно выбираться максимально возможным при условии сохранения требований по электробезопасности.

Энергоемкость АБ определяется как произведение емкости на напряжение. При увеличении напряжения число последовательно соединенных элементов увеличивается, а число параллельных ветвей уменьшается, что благоприятно сказывается на работе АБ. Так как известно, что предпочтительнее использовать для равномерного разряда элементов последовательное соединение.

Расчет емкости и выбор напряжения химического источника энергии должен производиться из условия возможности потребления АБ полной мощности дизель-генератора (ДГ) при стоянке судна. Это необходимо для обеспечения непрерывной работы дизеля с номинальной нагрузкой на валу [2]. Примем мощность синхронного генератора (СГ) $P_{СГ} = 25$ кВт, коэффициент полезного действия (КПД) управляемого выпрямителя при полной нагрузке $\eta_{ув} = 0,9$. Тогда зарядная мощность АБ определится выражением

$$P_{з.аб} = P_{СГ} \cdot \eta_{ув} = 22,5 \text{ кВт.}$$

Определим зависимость зарядного тока и емкости от номинального значения напряжения для свинцово-кислотной и щелочной АБ. Примем следующий ряд значений напряжений АБ: 110, 220, 380, 660, 1000, 1200 В.

Число элементов кислотной АБ:

$$n_{кисл} = \frac{U_{аб}}{U_{1кисл}}, \quad (1)$$

где $U_{1кисл} = 2В$ – среднее разрядное напряжение одного элемента кислотной АБ.

Число элементов щелочной АБ:

$$n_{щел} = \frac{U_{аб}}{U_{1щел}},$$

где $U_{1щел} = 1,25В$ – среднее разрядное напряжение одного элемента щелочной АБ.

Зарядное напряжение кислотной АБ:

$$U_{зкисл} = U_{1зкисл} \cdot n_{кисл}, \quad (2)$$

где $U_{1зкисл} = 2,4В$ – зарядное напряжение одного элемента кислотной АБ.

Зарядное напряжение щелочной АБ:

$$U_{зщел} = U_{1зщел} \cdot n_{щел},$$

где $U_{1зщел} = 1,8В$ – зарядное напряжение одного элемента щелочной АБ.

Зарядный ток АБ:

$$I_3 = \frac{P_{3.аб}}{U_{3.аб}}, \quad (3)$$

где $U_{3.аб}$ – зарядное напряжение аккумуляторной батареи, В.

Нормальный зарядный ток АБ щелочных и кислотных АБ в зависимости от индивидуальных особенностей изменяется от 0,1С до 0,25С, где С – емкость аккумулятора. При большем токе АБ можно повредить, при меньшем – заряд происходит более медленно. Поэтому емкость АБ можно рассчитать из соотношения

$$C = (4 \div 10) I_3.$$

Результаты расчетов сведены в таблицу, из которой видно, что при $U = 110$ В для подвода зарядного тока к кислотной АБ нужен кабель с сечением жилы не менее 35 мм^2 , а при $U = 660$ В для того же типа АБ сечение должно быть $2,5 \text{ мм}^2$. Из сравнения видно, что при увеличении напряжения в 6 раз, сечение токопровода уменьшилось в 14 раз.

Расчетные параметры АБ

	$U_{аб1}$	$U_{аб2}$	$U_{аб3}$	$U_{аб4}$	$U_{аб5}$	$U_{аб6}$
Номинальное напряжение АБ, В	110	220	380	660	1000	1200
Число элементов кислотной АБ, $n_{кисл}$	55	110	190	330	500	600
Число элементов щелочной АБ, $n_{щел}$	88	176	304	528	800	960
Зарядное напряжение кислотной АБ, В	132	264	456	792	1200	1440
Зарядное напряжение щелочной АБ, В	158,4	316,8	547,2	950,4	1440	1728
Зарядный ток кислотной АБ, А	170,5	85,2	49,3	28,4	18,8	15,6
Зарядный ток щелочной АБ, А	142	71	41,1	23,7	15,6	13
Емкость кислотной АБ, А·ч	682- 1705	340,8- 852	197,2- 493	113,6- 284	75,2- 188	62,4- 156
Емкость щелочной АБ, А·ч	568- 1420	284- 710	164,4- 411	94,8- 237	62,4- 156	52-130

На рис. 1 показаны зависимости зарядного тока от напряжения АБ.

Из рис. 1 видно, что при напряжении АБ 380 В оба графика имеют наибольшую кривизну: при увеличении напряжения более 380 В зарядный ток уменьшается незначительно, а при уменьшении напряжения менее 380 В зарядный ток резко возрастает. Следовательно, при выбранной мощности СГ напряжение АБ следует принять 380 В.

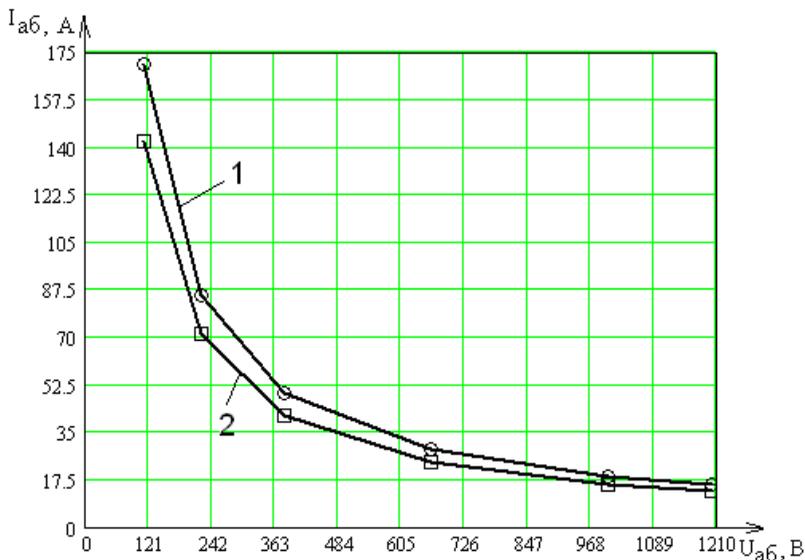


Рис. 1. Зависимость зарядного тока от напряжения АБ:
1 – для свинцово-кислотной АБ; 2 – для щелочной АБ

Расчет емкости АБ. Энергоемкости АБ должно хватать для обеспечения требуемого времени работы АД заданной мощности на гребной винт как при одиночной работе, так и при работе в параллель с дизелем. Расчет емкости АБ удобно производить численным методом. Пусть требуемое количество энергии в сутки для питания гребного электродвигателя $Q_{ад} = 70$ кВт·ч, напряжение АБ $U_{аб} = 380$ В, допустимая глубина разряда АБ $H = 20$ %, зарядный и разрядный ток не более $0,1C$, где C – емкость АБ в А·ч, КПД инвертора, от которого питается АБ, $\eta_u = 0,9$. Тогда АБ должна отдать

$$Q_{аб} = Q_{ад} / \eta_u = 77,8 \text{ кВт·ч.}$$

Емкость АБ определяется по формуле:

$$C = \frac{Q_{аб} \cdot 1000}{U_{аб} \cdot H}. \quad (4)$$

Подставив значения величин H , $Q_{аб}$ и $U_{аб}$, получим $C = 1024$ А·ч. Сравнивая эту величину с ранее найденным значением емкости при $U = 380$ В, видно, что она более чем в 2 раза (для кислотных АБ) и почти в 2,5 раза (для щелочных АБ) ее превосходит при $C = 10I_3$. Следова-

тельно, береговой зарядный агрегат должен быть во столько же раз мощнее судового СГ.

Требуемое количество энергии определяется суммой

$$Q_{аб} = \sum_{i=1}^n P_i t_i, \quad (5)$$

где P_i – мощность, развиваемая АД за время t_i .

Мощность на винте пропорциональна частоте его вращения в третьей степени

$$P_e = k\omega^3, \quad (6)$$

где k – конструктивный коэффициент.

Зависимость времени работы АД при питании его от АБ от мощности на винте выражается из формулы (4), ч:

$$t = \frac{C \cdot U \cdot H}{P_e}.$$

График зависимости $t = f(P_e)$ построен на рис. 2. На рис. 3 изображена зависимость мощности на винте при различных режимах хода.

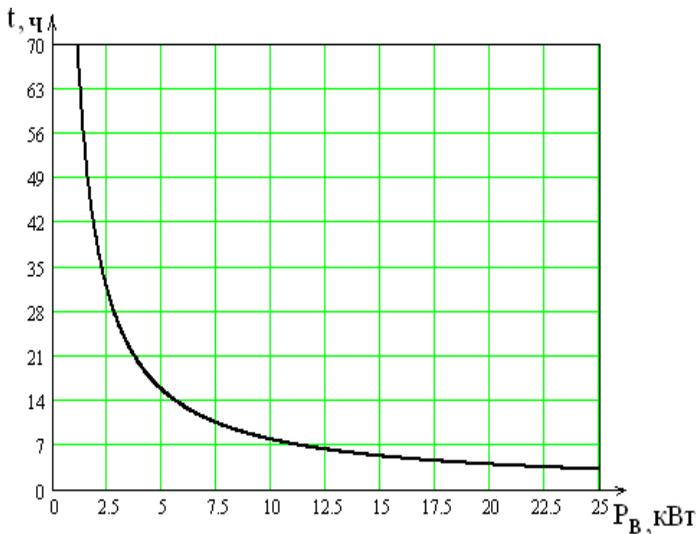


Рис. 2. График зависимости $t = f(P_e)$

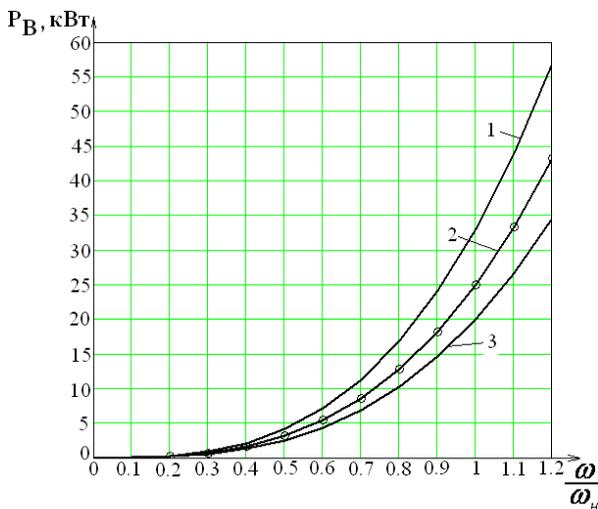


Рис. 3. Зависимость мощности на винте от частоты его вращения:
 1 – швартовый режим; 2 – режим с номинальной нагрузкой на борту;
 3 – режим холостого хода

По приведенному выше (см. рис. 2) графику можно определить время работы АБ на АД в зависимости от нагрузки последнего.

При $\omega = \omega_n$ в режиме с номинальной нагрузкой мощность на винте равна мощности СГ. Из графика, изображенного на рис. 3, можно определить время работы АД от АБ при заданной скорости вращения винта. Например, при $\omega/\omega_n = 0,74$ мощность $P_B = 10$ кВт (на кривой 2), по этому значению мощности определяется время работы АБ, в данном случае оно равно 8 ч.

Из вышеизложенного можно сделать следующие выводы.

1. Целесообразно использовать максимально допустимое напряжение АБ, последовательно соединяя элементы. При этом улучшаются условия работы АБ, можно применять относительно тонкие соединительные кабели, уменьшаются тепловые потери в преобразователях и проводниках.

2. Емкость АБ и мощность СГ выбираются в зависимости от условий эксплуатации судна. Для пассажирского катера и любого другого судна, работа которого характеризуется режимами с частыми остановками, энергоемкость АБ нужно рассчитывать из условия возможности потребления АБ полной мощности ДГ при стоянке судна. При $P_{CG} < P_{3.аб}$ увеличивается длительность процесса заряда, при $P_{CG} > P_{3.аб}$ при стоянке судна дизель будет работать в неэкономичных долевых режимах. Чем больше энергоемкость АБ, тем мощнее можно использовать АД и тем меньше может быть дизель.

Библиографический список

1. <http://www.ecrostech.com/prius/original/PriusFrames/htm>.
2. *Веревкин В.Ф.* Применение комбинированных энергоустановок на судах: Тез. докл. / Межвуз. НТК «Проблемы морского транспорта на ДВ». Владивосток: ДВГМА, 1997.

УДК 629.12.066:044:5(075.8)

УПРАВЛЕНИЕ СВЕТОВЫМ ПОТОКОМ РЫБОПРОМЫСЛОВОГО СВЕТОТЕХНИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ

В.А. Герасимов; В.К. Усольцев; А.Н. Шеин, ДВГТУ, Владивосток

Рассмотрены варианты реализации процесса управления напряжением питания промышленного светотехнического оборудования, выполнен анализ технико-экономической эффективности применения различных способов регулирования.

Для повышения эффективности промысла сайры на рыбопромысловых судах широко используется световое поле, управление интенсивностью которого осуществляется изменением напряжения, подводимого к промышленным светильникам (люстрам). Источниками света в люстрах являются лампы накаливания, при этом общая мощность устанавливаемого на одном судне светотехнического оборудования составляет несколько сот киловатт и, очевидно, оптимизация затрат на регулирование напряжения может обеспечить значительный экономический эффект.

По относительному объему одновременно регулируемого светотехнического оборудования можно выделить: индивидуальное, групповое и общее регулирование.

Индивидуальное регулирование всех люстр требует больших технических и экономических затрат и поэтому используется редко.

Групповое регулирование позволяет получить определенную гибкость в управлении интенсивностью светового потока, упрощает размещение дополнительного оборудования на судне, но требует наличия соответствующего числа регуляторов напряжения.

Общее регулирование напряжения оказывается наиболее эффективным, если регулирование осуществляется специально выделенным для этих целей генератором судовой электростанции. При этом для регулирования напряжения не требуется дополнительного силового оборудования, а достаточно изменить систему возбуждения генератора.

При групповом регулировании используются тиристорные регуляторы напряжения (ТРН), число которых равно числу выделенных групп нагрузки. При этом может сохраняться общее регулирование напряжения, питающего ТРН и нагрузку, подключенную непосредственно к сети.

На кафедре электрооборудования, автоматики и технологии (ЭОАТ) ДВГТУ был выполнен сравнительный анализ различных тиристорных регуляторов переменного напряжения. Анализировались полууправляемые и полностью управляемые ТРН при наличии и отсутствии нулевого провода и различных способах включения нагрузки. Были разработаны, установлены и проверены в эксплуатации различные типы ТРН, а также определены преимущественные области применения конкретного типа ТРН.

Наибольшее распространение на судах получило общее регулирование напряжения, которое при значительных снижениях затрат обеспечивает достаточную промышленную эффективность светотехнического оборудования. По ряду причин общее регулирование напряжения часто целесообразно выполнять при помощи регулятора напряжения синхронного генератора, выделенного из состава судовой электростанции исключительно для целей промышленного освещения.

Штатные регуляторы синхронных генераторов, применяемых на судах, не обеспечивают глубокого регулирования напряжения, необходимого для управления световым потоком. Поэтому были выполнены исследования различных вариантов глубокого регулирования напряжения при максимальном использовании элементов штатных систем возбуждения.

На отечественных рыбопромысловых судах применяются преимущественно синхронные генераторы (СГ) с управляемой системой прямого амплитудно-фазового компаундирования (ПАФК), функциональная схема которых приведена на рис. 1.

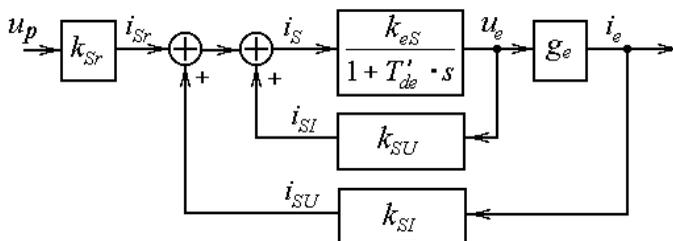


Рис. 1. Функциональная схема СГ с управляемой системой ПАФК:
 u_e, i_e – выходные напряжение и ток генератора; T'_{de} , k_{eS} – постоянная времени и коэффициент передачи нагруженного генератора;
 k_{SU}, k_{SI} – коэффициенты компаундирования по напряжению и току; u_p , k_{Sr} – напряжение регулятора и коэффициент регулирования;
 $i_s, i_{SI}, i_{SU}, i_{Sr}$ – ток возбуждения СГ и его составляющие

Исследования показали, что динамические параметры СГ зависят от выходного напряжения и тока (проводимости) нагрузки. Зависимость параметров СГ типа МСК от выходного напряжения u_e и проводимости нагрузки g_e приведена на рис. 2.

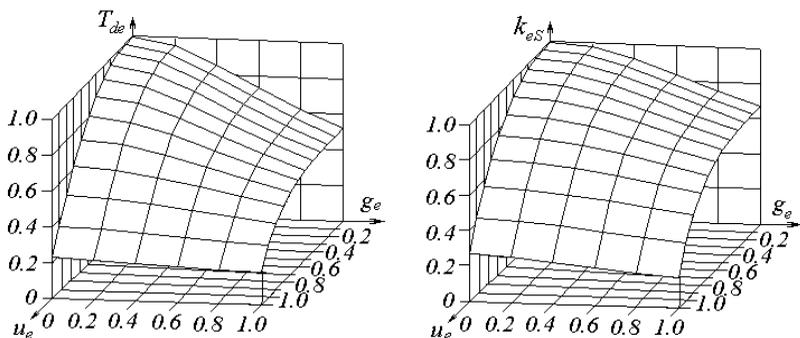


Рис. 2. Зависимость параметров СГ от режима работы

Как следует из этого рисунка, параметры СГ существенно зависят от рабочего напряжения и сравнительно мало зависят от величины нагрузки. Компаундирование по току снижает чувствительность параметров СГ к характеру нагрузки, а компаундирование по напряжению увеличивает постоянную времени, коэффициент передачи и чувствительность параметров СГ к напряжению.

Были проведены исследования влияния рабочего напряжения на качество переходного процесса при ступенчатом изменении заданного напряжения. На рис. 3 приведены переходные характеристики, характеризующие влияние изменения параметров СГ на качество переходных процессов.

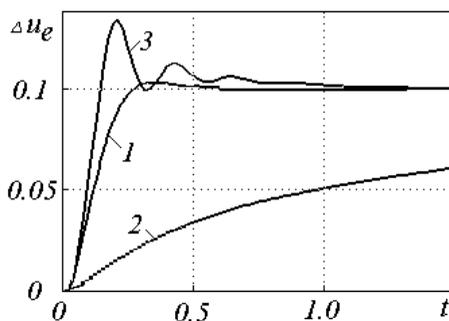


Рис. 3. Влияние рабочего напряжения СГ на качество переходного процесса при линейном ПИ-регуляторе

Переходной характеристике системы регулирования с линейным ПИ-регулятором в точке настройки регулятора соответствует кривая 1,

при рабочем напряжении выше точки настройки – кривая 2, при напряжении ниже точки настройки – кривая 3. Линейный регулятор при глубоком регулировании напряжения не обеспечивает удовлетворительного регулирования напряжения во всем рабочем диапазоне.

Существенное улучшение качества процесса регулирования можно получить при использовании нелинейного ПИ-регулятора, включающего нелинейную модель компенсируемой части передаточной функции СГ. На рис. 4 приведена блок-схема нелинейной модели СГ с нелинейным ПИ-регулятором. Моделирование показало, что переходные характеристики при применении нелинейного регулятора не чувствительны к рабочему напряжению СГ. Результаты моделирования были экспериментально подтверждены на лабораторном СГ с системой возбуждения типа МСК.

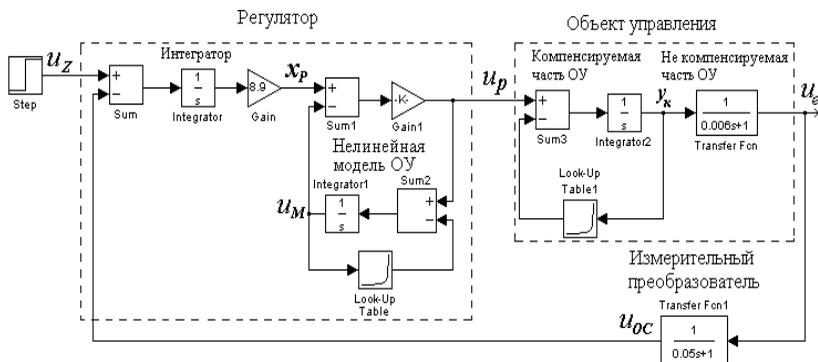


Рис. 4. Нелинейная модель СГ и ПИ-регулятора в среде MatLab

Практическое применение нелинейного регулятора связано с определенной сложностью его настройки. Вместе с тем, если в системе регулирования допускается изменение задающего сигнала с некоторой ограниченной интенсивностью (как, например, в рассматриваемом случае), то достаточно высокие показатели качества процесса регулирования можно получить при использовании задатчика интенсивности. Рис. 5 иллюстрирует эффективность применения этого устройства.

Для различных типов генераторов, отличающихся системами возбуждения, были разработаны, установлены на судах и проверены в эксплуатации пять типов регуляторов напряжения. В общей сложности переоборудовано свыше 70 судовых отечественных и зарубежных синхронных генераторов. Результаты эксплуатации показали высокую техническую и экономическую эффективность от применения разработанных регуляторов напряжения.

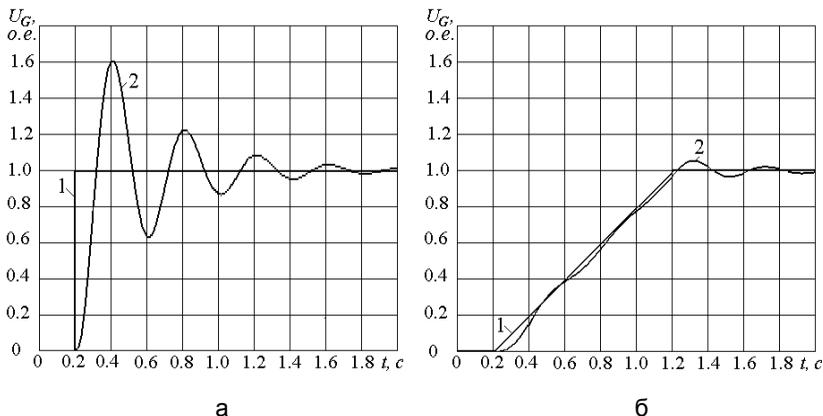


Рис. 5. Влияние задатчика интенсивности на качество процессов:
 а – переходный процесс при ступенчатом задании изменения напряжения СГ и линейном ПИ-регуляторе; б – переходный процесс изменения напряжения СГ с линейным ПИ-регулятором и задатчиком интенсивности;
 1 – изменение задающего напряжения; 2 – изменение напряжения СГ

УДК 629.12.012.9

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ЭКСПЛУАТАЦИИ ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЯ ТРАЛОВЫХ ЛЕБЕДОК

В.Н. Густилин, Дальрыбвтуз, Владивосток

По принципиальной схеме электропривода траловой лебедки ЛЭТРС-2 построена функциональная модель для режима работы «Выбирать», по функциональной модели получена техническая структура диагностики (ТСД) на логических элементах «И», «НЕ», позволяющая контролировать работоспособность схемы.

Оценка эффективности осуществляемых задач по поиску неисправностей в схемах электропривода траловой лебедки ЛЭТРС-2 производится на основе экономического анализа, которая позволяет прийти к окончательному решению о целесообразности и оптимальности данного метода поиска неисправностей.

Данный экономический расчет производится для того, чтобы показать, насколько эффективным будет использование в схемах электропривода траловой лебедки схемы поиска неисправностей на логических ТТЛ-элементах, насколько уменьшатся затраты при проведении ремонтных работ при выходе их из строя.

Схемы поиска неисправностей на логических ТТЛ-элементах потребляют сравнительно небольшую мощность, обладают большим быстро-

действием, большой нагрузочной способностью, высокой помехозащищенностью. Эти устройства более надежны в работе и просты в обслуживании. Применяя эту схему, можно быстро найти неисправность и устранить ее в кратчайшие сроки. Комплектующие изделия, необходимые для построения технической структуры диагностики, приведены в табл. 1.

Таблица 1

Затраты на приобретение комплектующих изделий и материалов

Материалы и комплектующие изделия	Ед. измерения	Кол-во	Цена за ед., руб.	Сумма, руб.
Логический элемент И (ИМС ТТЛ) серии SN74F	шт.	18	200	3600
Логический элемент НЕ (ИМС ТТЛ) серии SN74F	шт.	10	120	1200
Печатная плата	шт.	1	70	70
Соединительный провод	шт.	6	14	84
Крепежные детали	шт.	16	5	80
Всего				5034

Итого суммарные затраты на материалы и комплектующие в ценах 2006 г. составляют:

$$Z_{\text{мат}} = 5034 \text{ руб.}$$

Все затраты на основную заработную плату на стадии производства приведены в табл. 2.

Таблица 2

Расчет основной заработной платы

Технологическая операция	Разряд работников	Норма времени, час	Часовая тарифная ставка, руб./час	Тариф. заработная плата, руб.
Изготовление чертежей	Инженер	80	50	4000
Макетирование	Инженер	35	50	1750
Изготовление плат	3	15	25	375
Общая сборка			40	600
Наладка	4	15	40	800
Всего	5	20		7525

Часовая тарифная сетка использована за 2006 г. Дополнительная заработная плата составляет 20 % от основной:

$$Z_{\text{доп}} = 0,2 \cdot Z_{\text{осн}} = 0,2 \cdot 7525 = 1505 \text{ руб.}$$

Отчисления в социальный фонд составляют 26 % от суммы основной и дополнительной заработной платы:

$$Z_{\text{соц}} = 0,26 (Z_{\text{осн}} + Z_{\text{доп}}) = 0,26 (7525 + 1505) = 2348 \text{ руб.}$$

Общезаводские расходы составляют 30 % от основной заработной платы:

$$Z_{\text{общ.зав}} = 0,3 \cdot Z_{\text{осн}} = 0,3 \cdot 7525 = 2258 \text{ руб.}$$

Цеховые расходы составляют 60 % от основной заработной платы:

$$Z_{\text{цех}} = 0,6 \cdot Z_{\text{осн}} = 0,6 \cdot 7525 = 4515 \text{ руб.}$$

Внепроизводственные расходы составляют 5 % от производственной себестоимости:

$$Z_{\text{внепр}} = 0,05 \cdot C_{\text{произв}} = 0,05 \cdot 23185 = 1160 \text{ руб.}$$

Плановая прибыль составляет 25 % от производственной себестоимости:

$$П_{\text{пл}} = 0,25 \cdot C_{\text{полн}} = 0,25 \cdot 24345 = 6086 \text{ руб.}$$

Расчет цены изделия сведем в табл. 3.

Таблица 3

**Расчет цены схемы поиска неисправностей
на логических ТТЛ-элементах**

Наименование статей калькуляции	Затраты, руб.
Комплекующие и основные материалы	5034
Основная заработная плата	7525
Дополнительная заработная плата	1505
Отчисления на социальное страхование	2348
Цеховые расходы	4515
Общезаводские расходы	2258
Итого производственная себестоимость	23185
Внепроизводственные расходы	1160
Итого полная себестоимость	24345
Прибыль плановая	6085
Цена изделия	30430

Расчет годовых эксплуатационных расходов

Заработная плата электромеханика:

$$Z_{\text{Эл.мех}} = O \cdot 1,3 \cdot 0,3 = (15000 \cdot 1,3 \cdot 0,3) \cdot 12 = 288000 \text{ руб.}$$

Заработная плата электрика:

$$Z_{\text{эл}} = O \cdot 1,3 \cdot 0,3 = (12000 \cdot 1,3 \cdot 0,3) \cdot 12 = 230400 \text{ руб.}$$

Заработная плата обслуживающего персонала за год:

$$Z_{перс} = (Z_{электр} + Z_{эл} + Z_{доп} + Z_{соц}) \cdot Ч =$$

$$= [(288000 + 230400) \cdot 1,25 \cdot 1,26] \cdot 2 = 816480 \text{ руб.}$$

Амортизационные отчисления составляют 10 % от балансовой стоимости оборудования:

$$A = 0,1 \cdot C_{полн} = 0,1 \cdot 24345 = 2434,5 \text{ руб.}$$

Расходы на текущий ремонт составляют 8 % от себестоимости:

$$Z_{рем} = 0,08 \cdot C_{полн} = 0,08 \cdot 24345 = 1948 \text{ руб.}$$

Расходы на электроэнергию за год:

$$Z_{эн} = M_{уст} \cdot K_{мощн} \cdot T_{раб} \cdot K_{вр} \cdot Ц_{эн} = 1,6 \cdot 0,9 \cdot 5804 \cdot 1,6 = 160470 \text{ руб.}$$

Таблица 4
Расчет годовых эксплуатационных расходов

Наименование статей калькуляции	Затраты, руб.
Заработная плата обслуживающего персонала	816480
Амортизационные отчисления	2434,5
Затраты на текущий ремонт	1948
Расходы на электроэнергию	160470
Всего	981332,5

Установка данных схем поиска неисправностей в схемах электропривода ваерной лебедки позволяет существенно сократить время поиска неисправности. Сокращается число необходимого обслуживающего персонала, общее время ремонта, за счет чего достигается экономия средств. При использовании данных схем общее время ремонта сокращается в среднем на 60 %, что дает экономию по заработной плате обслуживающего персонала.

Экономическая эффективность составляет:

$$\mathcal{E} = 816480 - (816480 \cdot 0,6) = 326592 \text{ руб.}$$

Затраты на изготовление прибора окупятся:

$$T_{ок} = Ц_{из} / \mathcal{E} = 30430 / 326592 = 0,09 \text{ года.}$$

В статье разработана техническая структура диагностики схемы электропривода траловой лебедки ЛЭТРС-2. Произведен поиск неисправностей с помощью метода логических функций и матрицы функций предпочтения. Данные расчеты позволяют задать алгоритм поиска неисправностей. Техническая структура диагностики на логических элементах самостоятельно обнаруживает неисправный элемент.

Внедрение данной системы диагностики в схему электропривода повысит эффективность данного оборудования, ускорит время поиска неисправности.

Экономический расчет показал, что данная система диагностики окупит затраты на ее изготовление в течение 33 дней и даст существенную экономию оплаты труда ремонтного и обслуживающего персонала. Таким образом, современное автоматизированное судовое электрооборудование немислимо без систем технического диагностирования.

Библиографический список

1. *Мозгалевский А.В.* Техническая диагностика судовой автоматики. Л.: Судостроение, 1972. 160 с.
2. *Мозгалевский А.В., Калавин В.П.* Системы диагностирования судового оборудования. Л.: Судостроение, 1987. 224 с.
3. *Густилин В.Н.* Техническая структура диагностики схемы электропривода траловой лебедки ЛЭТРс-2 // Международные научные чтения «Приморские зори – 2007». Владивосток, 2007. С. 270.

УДК 629.12.012.9

ПОИСК НЕИСПРАВНОСТЕЙ И ПОСТРОЕНИЕ ТЕХНИЧЕСКОЙ СТРУКТУРЫ ДИАГНОСТИКИ ОПРЕСНИТЕЛЬНОЙ УСТАНОВКИ ТР «ИВАН АЙВАЗОВСКИЙ»

В.Н. Густилин, Дальрыбвтуз, Владивосток

По принципиальной схеме электропривода опреснительной установки ТР «Иван Айвазовский» установлена последовательность поиска неисправностей по показателю безотказности, построена функционально-диагностическая модель, по которой получена техническая структура диагностики (ТСД) на логических элементах «И», «НЕ», позволяющая контролировать работоспособность схемы.

1. Принцип действия опреснительной установки

Опресняемая вода через подогреватель поступает в опреснитель из магистрали забортной воды под давлением 3 атм. В корпусе опреснителя вода доводится до кипения и испаряется, образуя в опреснителе пар, который поступает в конденсатор, где конденсируется и направляется в цистерну или азратор, если эта вода предназначена для питья.

Система автоматического регулирования опреснительной установки ведет непрерывный контроль количества дистиллята и сигнализирует, если его соленость превышает норму. Система поддерживает постоянный уровень, в корпусе опреснителя периодически откачивая дистиллят, из цистерны сбора направляя его в запасную. Периодически добавляя дистиллят из запасной цистерны в теплый ящик, САР следит за уровнем воды в цистернах сбора дистиллята и теплом ящике.

Все элементы САР, за исключением регулятора уровня, электро-механические. Уровень воды в корпусе опреснителя поддерживается постоянным поплавковым регулятором прямого действия, который меняет в зависимости от условий диаметр проходного отверстия.

В состав принципиальной электрической схемы автоматизированной водоопреснительной установки транспортного рефрижератора «Иван Айвазовский» входят (рис. 1):

- поплавковый регулятор прямого действия,
- два солемера СЭКС-58,
- два переключающихся электромагнитных клапана, первый пропускает дистиллят или в аэратор, или в цистерну, а второй клапан – мытьевую воду либо в теплый ящик, либо в цистерну.

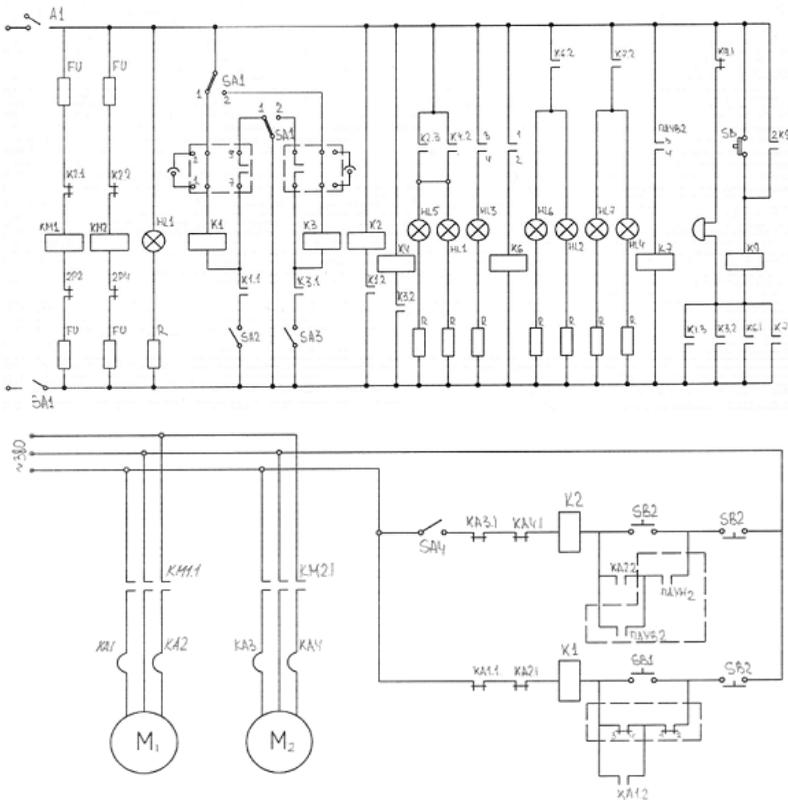


Рис. 1. Принципиальная электрическая схема водоопреснительной установки транспортного рефрижератора «И. Айвазовский»

Поплавковые датчики уровня устанавливаются на цистерне сбора дистиллята и на теплом ящике.

2. Метод поиска неисправности по показателю безотказности

Время работы водоопреснителя за 10 лет – 120 месяцев. Исходя из этого 6 месяцев (180 суток) длится рейс. За 10 лет судно стоит у стенки в порту 10 месяцев, в доке – 6 месяцев. Следовательно, 120 месяцев – 16 месяцев = 104 месяца судно находится в море, что составляет 104 месяца × 30 суток = 3524 суток. В сутки опреснитель работает 12 часов, тогда $T = 12 \text{ часов} \times 3524 \text{ суток} = 42288 \text{ часов}$ – время работы за 10 лет.

Вероятность надежности (безотказной работы) равна $P(t) = e^{-\lambda t}$, где λ – интенсивность отказа элементов [9], приведена в табл. 1; t – время работы за 10 лет.

Вероятность отказа определяется как $q = 1 - P$.

Таблица 1

Интенсивности отказов элементов

Интенсивность отказов	Значения, (час) ⁻¹	Интенсивность отказов	Значения, (час) ⁻¹
λ_1	$0,625 \times 10^{-6}$	λ_8	$0,0524 \times 10^{-6}$
λ_2	$0,625 \times 10^{-6}$	λ_9	$0,0003 \times 10^{-6}$
λ_3	$0,625 \times 10^{-6}$	λ_{10}	$0,0003 \times 10^{-6}$
λ_4	$0,0004 \times 10^{-6}$	λ_{11}	$0,0541 \times 10^{-6}$
λ_5	$0,0004 \times 10^{-6}$	λ_{12}	$0,0443 \times 10^{-6}$
λ_6	$0,0630 \times 10^{-6}$	λ_{13}	$0,0541 \times 10^{-6}$
λ_7	$0,0630 \times 10^{-6}$	λ_{14}	$0,613 \times 10^{-6}$
		λ_{15}	$0,557 \times 10^{-6}$

Способ поиска дефектов по показателю безотказности

Вероятность отказа:

$$\begin{aligned}
 P_{z_1} &= e^{-\lambda_1 t} = 0,99685 \\
 P_{z_2} &= e^{-\lambda_2 t} = 0,99685 \\
 P_{z_3} &= e^{-\lambda_3 t} = 0,99685 \\
 P_{z_4} &= e^{-\lambda_4 t} = 0,99685 \\
 P_{z_5} &= e^{-\lambda_5 t} = 0,96290 \\
 P_{z_6} &= e^{-\lambda_6 t} = 0,99667 \\
 P_{z_7} &= e^{-\lambda_7 t} = 0,99667 \\
 P_{z_8} &= e^{-\lambda_8 t} = 0,99787 \\
 P_{z_9} &= e^{-\lambda_9 t} = 0,96290 \\
 P_{z_{10}} &= e^{-\lambda_{10} t} = 0,96290 \\
 P_{z_{11}} &= e^{-\lambda_{11} t} = 0,99756 \\
 P_{z_{12}} &= e^{-\lambda_{12} t} = 0,99874 \\
 P_{z_{13}} &= e^{-\lambda_{13} t} = 0,99756 \\
 P_{z_{14}} &= e^{-\lambda_{14} t} = 0,99654 \\
 P_{z_{15}} &= e^{-\lambda_{15} t} = 0,99748
 \end{aligned}$$

Показатель безотказности:

$$\begin{aligned}
 q_1 &= 1 - P_{z_1} = 1 - 0,99685 = 0,00315 \\
 q_2 &= 1 - P_{z_2} = 1 - 0,99685 = 0,00315 \\
 q_3 &= 1 - P_{z_3} = 1 - 0,99685 = 0,00315 \\
 q_4 &= 1 - P_{z_4} = 1 - 0,99685 = 0,00315 \\
 q_5 &= 1 - P_{z_5} = 1 - 0,96290 = 0,0371 \\
 q_6 &= 1 - P_{z_6} = 1 - 0,99667 = 0,0033 \\
 q_7 &= 1 - P_{z_7} = 1 - 0,99667 = 0,0033 \\
 q_8 &= 1 - P_{z_8} = 1 - 0,99787 = 0,00212 \\
 q_9 &= 1 - P_{z_9} = 1 - 0,96290 = 0,0371 \\
 q_{10} &= 1 - P_{z_{10}} = 1 - 0,96290 = 0,0371 \\
 q_{11} &= 1 - P_{z_{11}} = 1 - 0,99756 = 0,00244 \\
 q_{12} &= 1 - P_{z_{12}} = 1 - 0,99874 = 0,00126 \\
 q_{13} &= 1 - P_{z_{13}} = 1 - 0,99756 = 0,00244 \\
 q_{14} &= 1 - P_{z_{14}} = 1 - 0,99654 = 0,00346 \\
 q_{15} &= 1 - P_{z_{15}} = 1 - 0,99748 = 0,00252
 \end{aligned}$$

По результатам расчетов построим алгоритм поиска неисправности по значениям вероятности отказа $q(t)$: $q_4, q_5, q_9, q_{10}, q_{12}, q_8, q_{13}, q_{11}, q_{15}, q_1, q_2, q_3, q_6, q_7, q_{14}$.

Из построенного алгоритма видно, что блок Z_4 будем проверять первым, так как q_4 имеет самое большое значение вероятности отказа, а затем последующие блоки в соответствии с полученным алгоритмом; если окажется, что блок Z_4 исправен, то проверку производить в соответствии с алгоритмом, до устранения неисправности.

3. Построение технической структуры диагностики электрической схемы опреснительной установки

При разработке диагностического обеспечения использовалась функциональная модель (рис. 2) и строилась таблица функции неисправности, затем она минимизировалась по известной методике (см. табл. 1).

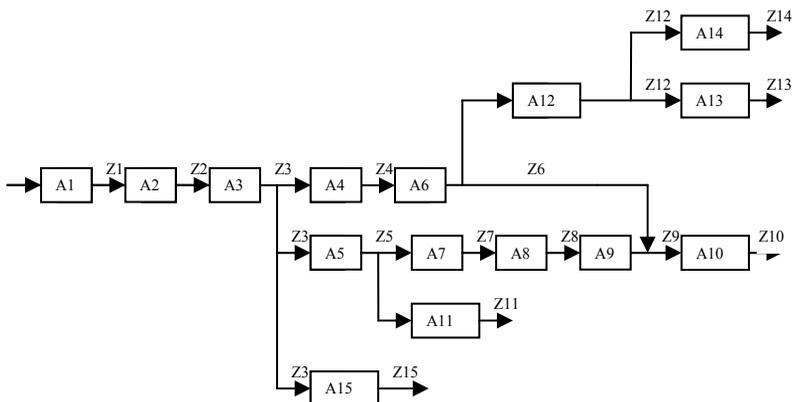


Рис. 2. Функционально-диагностическая модель водоопреснительной установки транспортного рефрижератора «И. Айвазовский»

Спецификация к функционально-диагностической модели:

- A1 – переключатель В 4;
- A2 – переключатель солемера П 1;
- A3 – выключатель В 3 второго солемера;
- A4 – датчик верхнего уровня ПДУВ 2;
- A5 – датчик нижнего уровня ПДУН 2;
- A6 – контакты 1, 2 датчика ПДУН 1;
- A7 – контакты 3, 4 датчика ПДУВ 1;
- A8 – катушка питания ПМ 1;
- A9 – магнитный пускатель ПМ;
- A10 – электродвигатель П-91 М;
- A11– контрольная лампа понижения уровня ЛКЗ;

- A12 – реле Р 6 в цепи питания;
- A13 – контрольные лампы ЛК 2, ЛК 6;
- A14 – предупредительный звонок;
- A15 – электромагнитный клапан.

Таблица 2

Минимизированная таблица функций неисправностей

Si / Zi	Z1	Z2	Z4	Z7	Z8	Z9	Z10	Z11	Z13	Z14	Z15
S0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
S1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
S2	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
S3	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
S4	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
S5	1	1	1	0	0	0	1	0	1	1	1
S6	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	1
S7	1	1	1	0	0	0	1	0	1	1	1
S8	1	1	1	1	0	0	0	1	1	1	1
S9	1	1	1	1	1	0	0	1	1	1	1
S10	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1
S11	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1
S12	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	1
S13	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1
S14	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1
S15	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0

По известной методике [11], используя табл. 2, получена табл. 3.

Таблица 3

Переключательные функции для водоопреснительной установки рефрижератора «И. Айвазовский»

S_i	$Z_{i \min}$	$F_i(X_{i \min})$
S0	Z10Z11Z13Z14Z15	Z10Z11Z13Z14Z15
S1	Z1	Z1
S2	Z1Z2	Z1Z2
S3	Z2Z4Z7	Z2Z4Z7
S4	Z2Z4	Z2Z4
S5	Z4Z5	Z4Z5
S6	Z4Z13Z14	Z4Z13Z14
S7	Z5Z8	Z5Z8
S8	Z5Z8	Z5Z8
S9	Z8Z9	Z8Z9
S10	Z4Z9Z10	Z4Z9Z10
S11	Z1Z11	Z1Z11
S12	Z4Z14	Z14Z13
S13	Z13Z14	Z13Z14
S14	Z13Z14	Z13Z14
S15	Z14Z15	Z14 Z15

По полученным переключательным функциям строим техническую структуру диагностики на логических элементах. Всего потребовалось 15 элементов «И» и 17 элементов «НЕ». Такая схема окупается за месяц эксплуатации прирешительной установки, поэтому может быть рекомендована для применения.

Библиографический список

1. *Мозгалеvский А.В.* Техническая диагностика судовой автоматик. Л.: Судостроение, 1972. 160 с.
2. *Мозгалеvский А.В., Калавин В.П.* Системы диагностирования судового оборудования. Л.: Судостроение, 1987. 224 с.
3. *Слесаренко В.Н.* Опреснение морской воды. М.: Энергоатомиздат, 1991. 280 с.
4. *Богомольный А.Е.* Судовые вспомогательные и рыбопромысловые механизмы. Л.: Судостроение, 1993. 384 с.
5. *Эльпинер Л.И.* Водоснабжение морских судов. М.: Транспорт, 1975. 200 с.
6. *Авакян А.Б., Санин М.В., Эльпинер Л.И.* Опреснение воды в природе и народном хозяйстве. М.: Наука, 1987. 172 с.
7. *Мозгалеvский А.В.* Техническая диагностика судовой автоматик. Л.: Судостроение, 1972. 160 с.
8. *Мозгалеvский А.В., Калавин В.П.* Системы диагностирования судового оборудования. Л.: Судостроение, 1987. 224 с.
9. *Кутасин Б.П.* Современные системы судовой автоматик. М.: Транспорт, 1964. 140 с.
10. Системы электроавтоматик на промысловых судах / Под ред. Ю.И. Быховского. Мурманск, 1972. 446 с.
11. *Густилин В.Н.* Техническая структура диагностики подруливающих устройств с винтом фиксированного шага // Научные труды Дальрыбвтуза. Владивосток: Дальрыбвтуз, 2004. Вып. 16. С. 28-30.

УДК 551.46.077:538.945

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ГЕЛИЕВОГО СОСУДА НА ХАРАКТЕРИСТИКУ ПЕРВИЧНОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ

Е.И. Есипенко, Дальрыбвтуз, Владивосток

Исследовано влияние гелиевого сосуда первичного преобразователя на его передаточную характеристику. Разработана методика измерений. Создана установка для исследования экранирующих свойств гелиевого сосуда. Определена зависимость индукции магнитного поля в центре гелиевого сосуда от частоты внешнего магнитного поля.

Блоки электронной аппаратуры, первичный преобразователь, функционально соединенные вместе, образуют комплекс магнитометрической аппаратуры. Необходимо определить характеристики комплекса. При исследовании комплекса для определения его характеристик первичный преобразователь охлаждался в гелиевом сосуде, этот же сосуд можно использовать при береговых измерениях магнитного поля.

Для таких работ применение гелиевого сосуда позволяет производить долговременные измерения без заливки сосуда жидким гелием. Гелиевый сосуд изготовлен из металла и поэтому экранирует первичный преобразователь от внешнего переменного магнитного поля. Величину ослабления магнитного поля определим методом, не использующим сверхпроводящий магнитометр, чтобы исключить влияние передаточной характеристики магнитометра. Магнитное поле создаем системой катушек Гемгольца, а измерение напряженности магнитного поля проводим индуктивной катушкой.

Катушки Гемгольца наматывались на корпус гелиевого сосуда таким образом, чтобы первичный преобразователь находился на одинаковом расстоянии от обеих катушек (рис. 1).

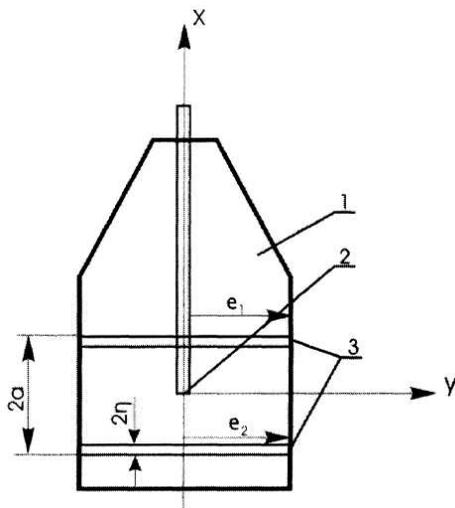


Рис. 1. Создание напряженности магнитного поля:
1 – сосуд; 2 – индуктивная катушка; 3 – система катушек Гемгольца

Катушки Гемгольца имеют радиус $e = 0,225$ м. Одна секция системы Гемгольца имеет 32 витка провода ПЭЛ-0,51, намотка однослойная, ширина намотки $1,8 \cdot 10^{-2}$ м.

Расчет напряженности магнитного поля между катушками производим по формуле:

$$H_x = \frac{1,6\omega l}{\sqrt{5}e_{cp}} \left[1 - \frac{0,6\Delta}{e_{cp}} + 0,16 \frac{\Delta^3}{e_{cp}^3} + 0,005 \frac{\Delta^2}{e_{cp}^2} - 0,1 \frac{\mu^2}{e_{cp}} + 0,64 \frac{\Delta\eta^2}{e_{cp}^3} - 0,23 \frac{\Delta\eta^4}{e_{cp}^4} + \left(0,96 \frac{\Delta}{e_{cp}^4} - 1,152 \frac{\eta^2}{e_{cp}^4} \right) (2X^2 - Y^2) - \dots \right],$$

где $\Delta = 2a - e$; 2η – ширина катушки; e – радиус провода обмотки;

$$\mu = \frac{e_1 - e_2}{2}; \quad e_{cp} = \frac{e_1 + e_2}{2}; \quad \omega - \text{количество витков в катушке.}$$

Для напряженности в центре системы катушек $X = 0$ и $Y = 0$. Принимаем $\Delta = 0$; $\eta = 9 \cdot 10^{-3}$ м; $C = 2,55 \cdot 10^{-4}$ м; $M = 0$; $E_{cp} = 0,0225$ м.

Подставляя значение параметров системы катушек, получаем зависимость индукции магнитного поля катушек Гемгольца от тока в них:

$$H_{x0} = 1,278 \cdot 10^{-4} \text{ Тл.}$$

Измерительная катушка изготовлена из медного провода ПТВ-0,13. Намотка многослойная – 500 витков. Внутренний диаметр – $16,3 \cdot 10^{-3}$ м. Внешний диаметр – $17,7 \cdot 10^{-3}$ м.

Для исследования экранирующих свойств гелиевого сосуда была собрана схема (рис. 2).

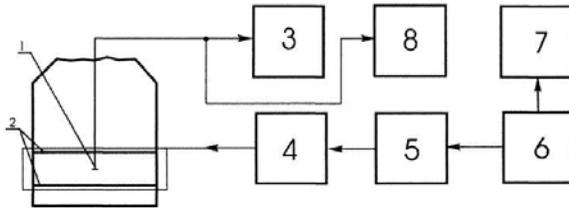


Рис. 2. Измерение напряженности магнитного поля: 1 – измерительная катушка; 2 – система катушек Гемгольца; 3 – вольтметр; 4 – измеритель тока; 5 – усилитель; 6 – генератор; 7 – частотомер; 8 – осциллограф

Ток в катушке два задается генератором 6, так как генератор не рассчитан на входной ток, равный десятым долям ампера, с генератора сигнал подается на усилитель постоянного тока с равной амплитудно-частотной характеристикой от 0,5 до 200 Гц. С усилителя 5 ток через измеритель тока 4 подается в катушки Гемгольца 2. Переменное магнитное поле системы катушек Гемгольца 2 индуцирует ЭДС в измерительной катушке 1. ЭДС измерительной катушки 1 измеряется вольтметром 3, частота тока генератора контролируется частотомером 7, и форма сигнала на измерительной катушке контролируется осциллографом 8.

Амплитудное значение магнитной индукции равно:

$$B_{\max} = \frac{E_{cp}}{4fK_{sw}},$$

где E_{cp} – среднее значение ЭДС, индуцируемой в измерительной катушке; f – частота магнитной индукции; K_{sw} – постоянная измерительной катушки.

Величины E_{cp} и f измеряются приборами, а постоянная K_{sw} рассчитывается. Для многослойной катушки постоянная равна:

$$K_{sw} = \frac{\pi\omega d_{cp}}{4} \left(1 + \frac{4}{3} \frac{\xi}{d_{cp}} \right), \quad (1)$$

где ω – количество витков; d_{cp} – средний диаметр обмотки; 2ξ – толщина обмотки.

Для исследуемой измерительной катушки: $\omega = 500$; $d_{cp} = 17 \cdot 10^{-3}$ м; $\xi = 3,5 \cdot 10^{-4}$ м; постоянная $K_{sw} = 1,135 \cdot 10^{-1}$ м².

Амплитудное значение магнитной индукции рассчитываем по формуле (1) и рассчитанные данные сводим в таблицу.

B_{\max}	10^{-5} Тл	2,54	2,52	2,5	2,35	2,22	1,94	1,71	1,61	1,36	1,27	1,15	1,08
f	Гц	1	3	5	10	15	20	25	30	40	50	60	70

Частоту среза определяем на уровне $0,7 B_{\max}$; $f_{\text{срез}} \approx 23$ Гц. Графическая зависимость B_{\max} в центре гелиевого сосуда от частоты тока 0,2 А показана на рис. 3.



Рис. 3. Зависимость индукции магнитного поля в центре гелиевого сосуда от частоты тока 0,2 А в катушках Гемгольца

Библиографический список

Есипенко Е.И. Работа сверхпроводниковой аппаратуры под водой: Тез. докл. / III междунар. конф. «Рыбохозяйственные исследования Мирового океана». Владивосток: Дальрыбвтуз, 2005. С. 23.

УДК 629.12

УПРАВЛЯЕМЫЙ СУДОВОЙ ЭЛЕКТРОПРИВОД

С.А. Лоншаков, Дальрыбвтуз, Владивосток

Рассмотрен управляемый электропривод как устройство, находящее все более широкое применение в морской отрасли. Уделено внимание особенностям его эксплуатации, вопросам конструктивно-го исполнения и перспективам дальнейшего развития.

Морскую отрасль сегодня по праву можно назвать прочным фундаментом для развития любой страны, которая имеет выход в море! Несмотря на широкую разветвленность специализаций флота, любое современное судно сегодня – это, прежде всего, комплекс самых последних научно-технических достижений, которые в совокупности обеспечивают высокие показатели (экономическую эффективность, техническую надежность, безопасность эксплуатации и др.).

Одной из самых больших и важных составляющих современного судна является его электротехническое оснащение. Независимо от назначения ни одно судно сегодня не обходится без систем навигации, связи, управления и прочих систем, перечень которых очень широк. Нашел свое применение в морской отрасли и электропривод.

Электропривод сегодня является весьма хорошо и достаточно полно изученным предметом исследования. Сам по себе электропривод является комплексом элементов, к которым относятся: электрический двигатель – объект, осуществляющий трансформацию электрической энергии в механическую; система управления электродвигателем – система, которая непосредственно питает электрический двигатель электрической энергией, и каким-то образом изменяя параметры электрической энергии, подаваемой в электрический двигатель, осуществляет управление им; и третий элемент, не всегда обязательный, но практически всегда используемый, это редуктор – объект, служащий для изменения угловых скоростей ведомого вала с целью повышения или уменьшения крутящих моментов.

Со времени изобретения первого электропривода прошло уже более 150 лет, и первые модели электропривода по своим техническим показателям даже отдаленно не походили на современные. Сегодня существует множество конструктивных исполнений электропривода, в

которых используются различные модели электродвигателей, различные системы управления и контроля работы электродвигателя.

В мире существует сотни различных производителей электродвигателей, систем управления. Некоторые компании разрабатывают готовые технологические решения под названием *электропривод*, в которые закладывают определенный потенциал для использования в различных отраслях производства. Одной из таких отраслей как раз и является морская.

Использование любого электрооборудования в морской отрасли имеет ряд своих особенностей. Во-первых, особые условия эксплуатации, такие как повышенная влажность, вибрация и качка, значительный перепад температур, постоянное присутствие в воздухе паров соли и пр. Во-вторых, надежность и безопасность использования, которые должны иметь свое максимально возможное значение, так как выход из строя любого, с виду второстепенного, устройства в морских условиях может привести к значительным финансовым потерям от задержки или простоя судна, а также стесненность пространства, в котором происходит работа судового персонала, способствует к возникновению несчастных случаев, в которых нередко страдают люди. Таким образом, можно сказать, что судовой электропривод – это совсем не тот электропривод, который используется в береговых условиях. Судовой электропривод надежней, компактней и безопасней.

Среди большого разнообразия судовых электроприводов широкое распространение сегодня получает управляемый электропривод, состоящий из асинхронного электродвигателя с короткозамкнутым ротором в совокупности с системой управления на основе преобразователя частоты. Именно этот технологический союз обеспечивает наибольшую эффективность и надежность среди аналогов на основе релейно-контакторной системы или тиристорного регулятора напряжения. Помимо этого современные преобразователи частоты строятся на полупроводниковых технологиях, что позволяет внести в них потенциал интеграции в компьютерные системы управления корабля, заложить в них возможности программируемых режимов работы и самодиагностики.

Так, к примеру, рассмотрим систему грузового устройства судна. Как правило, любое грузоподъемное устройство имеет как минимум 2-3 режима работы, все они сопровождаются значительными нагрузками и должны обеспечивать высокую плавность и точность, надежность и безопасность своей работы.

Конечно, каждый элемент грузового устройства является составной частью общей картины его работы, но самым гибким из этих элементов является именно система управления, поскольку только благодаря ее работе возможно достичь качественно новых показателей в режимах работы электродвигателя. Ведь отходя от некогда традиционных релейно-контакторных систем управления к полупроводниковым, мы получили возможность не просто регулировать конкретные показатели электрической энергии в определенных пределах, а изменять их

комплексно согласно просчитанным математическим моделям различных режимов работы электродвигателя. Это означает, что при полупроводниковой системе управления электродвигатель можно заставить работать с максимальным эффектом в любом допустимом для него режиме работы без переходов в критические режимы работы. Самыми опасными, как известно, для грузоподъемного устройства являются режимы пуска, торможения и останова груза на высоте.

В общем, современная система управления асинхронного электродвигателя (АД) на основе инверторного преобразователя частоты (ИПЧ) представлена на рис. 1.

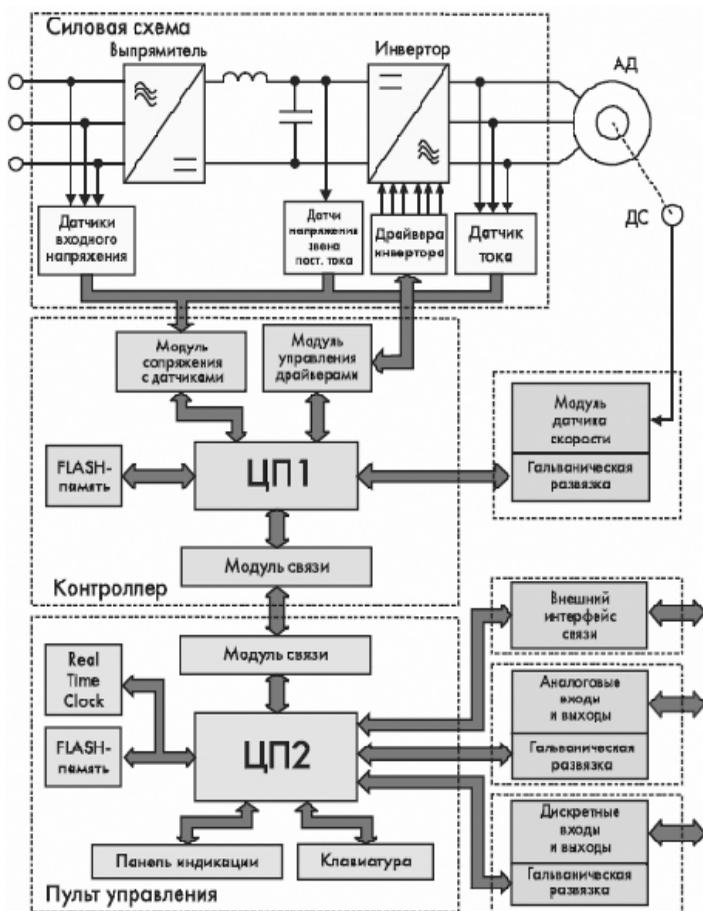


Рис. 1. Вариант построения системы управления электропривода «ИПЧ-АД»

Как видно, в ней сосредоточено довольно много различных функциональных элементов. В настоящее время большинство систем управления строится на двухпроцессорной основе. Первый процессор (ЦП1) выполняет основные функции преобразователя частоты (реализация алгоритмов управления инвертором, выпрямителем, опрос датчиков и т.д.), второй (ЦП2) обеспечивает работу пульта управления, связь с системой верхнего уровня и другие сервисные функции. Следует отметить, что распределение функций между микроконтроллерами может производиться и другим образом.

Управление драйверами инвертора осуществляется посредством формирования шестиканального ШИМ-сигнала с автоматическим добавлением «мертвого времени». В большинстве микроконтроллеров модуль ШИМ реализован аппаратно. Для получения формы выходного напряжения, близкого к синусоидальной, может использоваться программная или аппаратная коррекция «мертвого времени». Также в большинстве случаев реализуется аппаратная блокировка сигналов ШИМ в случае аварии.

Управление преобразователем может осуществляться с помощью пульта, дискретных или аналоговых сигналов.

Обычно в преобразователях частоты (ПЧ) имеется от четырех до восьми дискретных входов типа «открытый коллектор», выполняющих следующие функции: выбор частоты (или скорости вращения ротора), управление отключением и реверсом, аварийное отключение ПЧ. Для построения систем с обратной связью по скорости в ПЧ предусматривают входы для подключения датчика скорости. Как следствие преобразователи легко встраиваются в современные системы автоматизации.

Одним из ответственных элементов системы управления асинхронным двигателем является непосредственно силовая часть ПЧ, схем которых также на практике существует очень много. Одной из распространенных и часто используемых практических схем является схема преобразователя частоты со звеном постоянного тока (рис. 2).

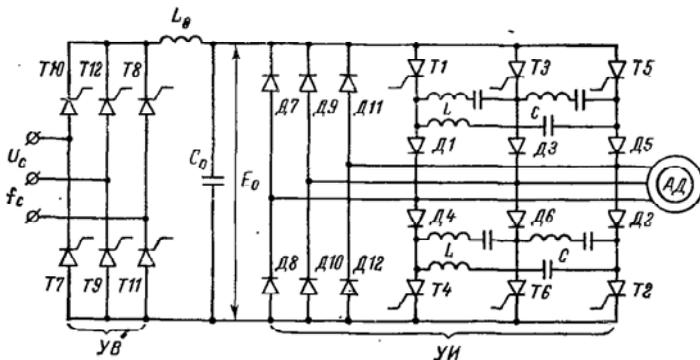


Рис. 2. Силовая часть схемы системы управления электропривода «ИПЧ-АД»

В схеме (см. рис. 2) тиристоры Т7-Т12 образуют управляемый выпрямитель (УВ). На выходе УВ включены дроссель L_0 и конденсатор C_0 , обеспечивающие вместе с диодами Д7-Д12 циркуляцию реактивной мощности. Управляемая группа тиристоров Т1-Т6 собрана в мостовую схему, с помощью схемы управления тиристоры могут открываться в требуемой последовательности и на любой отрезок времени, тем самым регулируя частоту на выходе. Конденсаторы C и индуктивности L вместе с диодами Д1-Д6 образуют цепи искусственной коммутации, обеспечивающие закрытие основных тиристоров Т1-Т6 в нужный момент времени. Отметим, что значение (амплитуда) напряжения на выходе ПЧ регулируется изменением E_0 на выходе УВ.

От рассмотрения работы электропривода грузового устройства очевидно, что в нормальных режимах работы он подвержен значительным переменным нагрузкам, как следствие повышенным нагрузкам подвергается и силовая часть ПЧ. Тем самым существует повышенная угроза выхода из строя любого составного элемента силовой части ПЧ, что может стать причиной несчастного случая. Следовательно, в электрической схеме системы управления электродвигателем судового грузового устройства должно быть уделено должное внимание состоянию силовых элементов преобразователя частоты, в частности, их программной диагностики; как следствие будет обеспечен дополнительный уровень безопасности эксплуатации судового грузового устройства. Достичь этого можно изучением различных режимов работы силовых элементов ПЧ при различных режимах работы управляемого ими электродвигателя. На базе полученных знаний создать некую математическую модель неисправных процессов и как следствие при возникновении в электрических сетях признаков подобных моделей можно будет на ранней стадии предопределить техническое состояние системы, тем самым повысить безопасность эксплуатации судовых грузовых устройств на базе электроприводов переменного тока.

Библиографический список

1. *Чиликин М.Г., Сандлер А.С.* Общий курс электропривода: Учебник для вузов. 6-е изд., доп. и перераб. М.: Энергоиздат, 1981. 576 с.
2. *Карташов Р.П.* Тиристорные преобразователи частоты с искусственной коммутацией. Киев: Техніка, 1979. 152 с.
3. *Масандилов Л.Б., Москаленко В.В.*, Регулирование частоты вращения асинхронных двигателей. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Энергия, 1978. 96 с.
4. *Бурков А.Ф.* Развитие судовых электроприводов. Владивосток: МГУ им. адм. Г.И. Невельского, 2007. 117 с.

КОМПЬЮТЕРНЫЙ ТРЕНАЖЕР СУДОВОЙ ЭЛЕКТРОСТАНЦИИ

В.Я. Молочков; И.Д. Молочкова, Дальрыбвтуз, Владивосток

Описывается тренажерная программа с встроенным электронным учебником по судовой электростанции, решающая задачи индивидуальной подготовки и переподготовки по обслуживанию судовой электростанции.

Наиболее сложной системой на судне, за которую отвечает электромеханик, является судовая автоматизированная электроэнергетическая система (САЭЭС). Навыки работы с ней, доведенные до автоматизма, являются необходимым условием безаварийной работы.

Существует ряд тренажеров для приобретения таких навыков, например тренажер фирмы Norcontrol, который требует значительных площадей, имеет мало посадочных мест, используется сразу для нескольких специальностей, не обеспечивает дистанционной работы по сети, трудно доступен студентам в индивидуальном порядке, не имеет режима обучения и имеет значительную стоимость. Поэтому весьма целесообразна разработка компьютерных аналогов таких тренажеров с привязкой к конкретной специальности и возможности индивидуального пользования.

С учетом этих замечаний к разрабатываемому компьютерному тренажеру были предъявлены следующие требования:

- доступность программы и возможность индивидуального пользования обучающимся и повышающим квалификацию;
- кроме тестового режима тренажера, наличие обучающего режима в виде электронного учебника, ссылки на разделы которого происходят при обучающем режиме и неправильных действиях с электростанцией;
- наличие всех режимов работы электростанции и синхронных генераторов;
- возможность моделирования нагрузок судовой электростанции в различных режимах работы судна.

В результате проведенных исследований на кафедре «Электрооборудование и автоматика судов» разработан компьютерный тренажер, отвечающий поставленным требованиям.

Структурная схема компьютерного тренажера судовой автоматизированной электроэнергетической установки приведена на рис. 1.

Данная разработка учитывает требования, изложенные выше, и построена с применением программных средств для работы в среде Windows. Программа предназначена для выработки навыков повседневной эксплуатации электрических станций.

Программа выполнена на языке C++ с использованием Microsoft foundation classes (MFC 4.2).

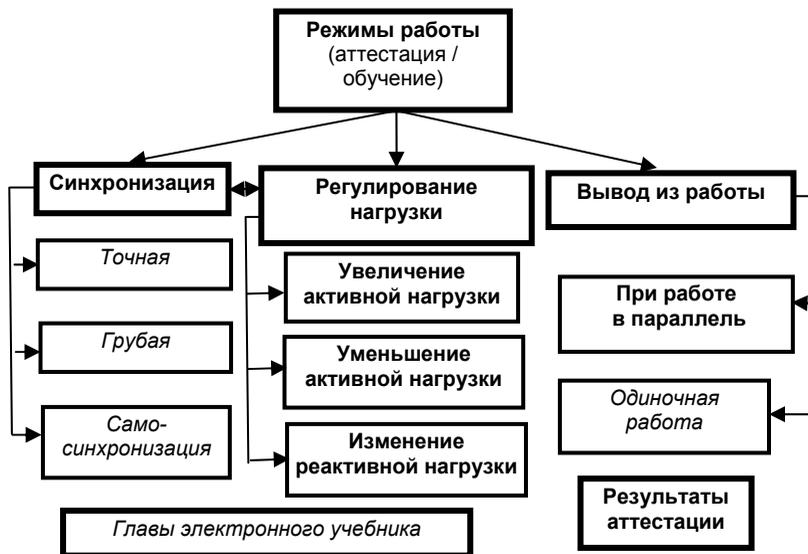


Рис. 1. Блок схема компьютерного тренажера САЭЭС

Задачи, решаемые программой:

1. Имитация работы судовой электрической станции в различных режимах.

2. Выработка соответствующих сообщений об ошибках с последующим разъяснением последствий этих ошибок в реальной ситуации.

3. Предоставление пошаговых инструкций для обучения пользователя основным навыкам обслуживания судовой электростанции.

Программа «Судовая электростанция» позволяет воспроизводить следующие операции по обслуживанию судовой электростанции:

- ввод в работу, включение и выключение генераторов;
- изменение нагрузки, ввод генераторов в параллельную работу при различных режимах синхронизации;
- перераспределение активной и реактивной нагрузки между параллельно работающими генераторами;
- вывод из действия работающих генераторов.

Режимы работы программы позволяют: производить обучение с привитием навыков работы на электростанции, производить проверку приобретенных навыков и знаний. В режиме обучения выдаются подсказки, позволяющие произвести ввод в действие и синхронизацию генераторов.

В обучающем режиме при совершении ошибочных действий пользователем (включение генератора в сеть при невыполненных условиях синхронизации, отключение при неснятой нагрузке и т.п.) выводится сообще-

ние об ошибке и раздел справочной системы, в котором описаны последствия ошибки. Кроме того, в электронном учебнике можно подробно изучить все разделы по устройству и эксплуатации электростанции.

В справочную систему (рис. 2) включены описания режимов работы электростанции, описание способов синхронизации, инструкции по работе с программой, а также описания последствий ошибок.

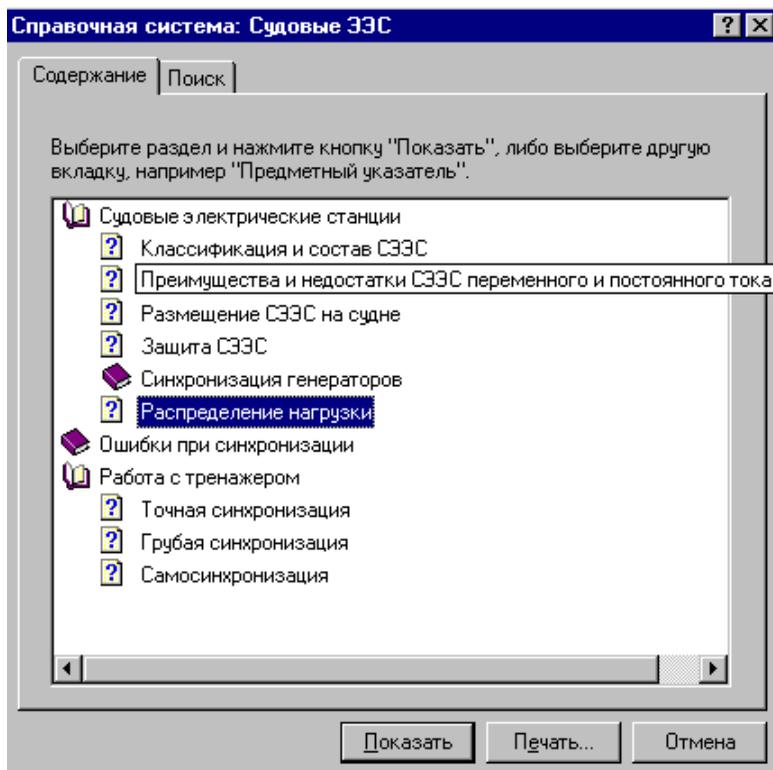


Рис. 2. Справочная система программы

Структура программы позволяет производить дальнейшее усовершенствование, в частности, реализацию автоматизированного приема зачета, ведение статистики ошибок студентов и т.д.

Взаимодействие пользователя с программой

Программа выполнена с использованием стандартных элементов управления Windows, имитирующих органы управления генераторами электростанции. Внешний вид рабочей панели программы-тренажера в режиме точной синхронизации представлен на рис. 3.

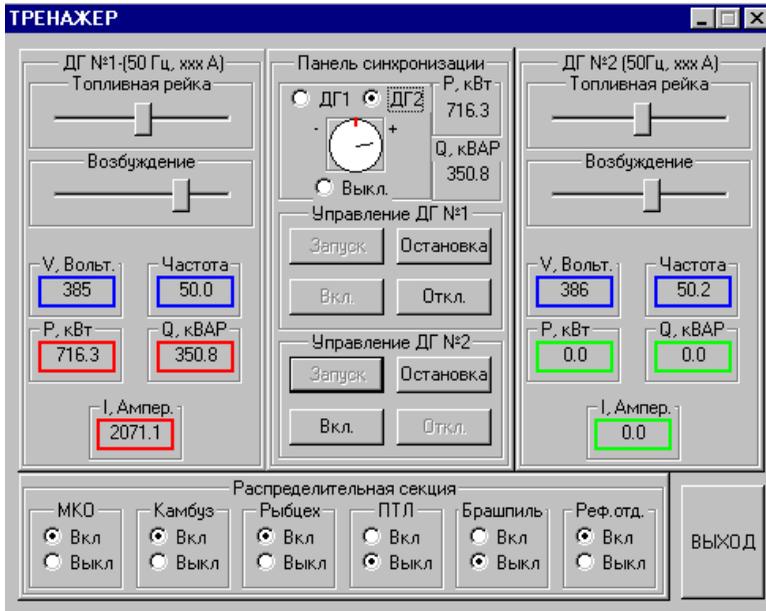


Рис. 3. Внешний вид тренажера

Экран программы выполнен в виде диалогового окна Windows, в котором расположены элементы управления двух генераторов, панели синхронизации и распределительной секции.

Пользователь при помощи элементов управления генераторами изменяет параметры их работы (частоту, напряжение), включает и выключает нагрузку и т.д. В соответствии с этими изменениями изменяется мощность, ток и другие параметры электростанции в целом.

Справочная система программы включает в себя описание режимов работы электрических станций, методов синхронизации, а также указания по работе с программой, назначение органов управления и описания ошибок, возникающих при работе.

Возможны следующие варианты выбора синхронизации генераторов станции:

1. Точная синхронизация.
2. Грубая синхронизация.
3. Самосинхронизация.

Режим работы пользователя с программой:

а) Работа.

В этом режиме пользователь может производить в произвольном порядке все возможные действия с электростанцией: ввод генератора в работу, включение и отключение нагрузки, включение генераторов на

параллельную работу, перераспределение нагрузки между параллельно работающими генераторами, отключение генераторов. В случае ошибочных действий выводится соответствующее сообщение и предлагается соответствующий раздел справочной системы.

б) Тренировка (обучение).

Режим предназначен для ознакомления пользователя с необходимой последовательностью действий при работе с программой. Элементы управления становятся доступными по мере выполнения необходимых действий. В процессе работы выводятся сообщения, которые описывают порядок действий при вводе генератора в работу, подключении нагрузки и при включении генераторов на параллельную работу. После выполнения всех необходимых действий все элементы управления становятся доступными и пользователь может совершать любые действия в произвольном порядке. В случае ошибочных действий выводится соответствующее сообщение и предлагается соответствующий раздел справочной системы.

Программа реализует стандартный механизм обработки сообщений Windows и MFC. Каждому элементу управления сопоставлена функция-обработчик, отвечающая за обработку сообщений, адресованных данному элементу управления (или группе элементов). При реализации переходных процессов используется таймер и функция обработки сообщений таймера.

В программе используются алгоритмы вычислений, позволяющие создать видимость работы электростанции в реальном режиме времени.

Библиографический список

1. *Молочкова И.Д.* Тренажерная подготовка: Метод. пособие. Владивосток: Дальрыбвтуз, 2006. 26 с.
2. *Молочкова И.Д.* Автоматизация судовой электростанции: Учеб. пособие. Владивосток: Дальрыбвтуз, 2006. 84 с.
3. *Михайлов В.С., Чекунов К.А.* Судовые электростанции и электродвижение судов: Учеб. пособие. Л.: Судовождение, 1973. 216 с.

УДК 378.147.026.7:621.3:004

ЭКСПЕРТНЫЕ СИСТЕМЫ В ПРАКТИКЕ ОБСЛУЖИВАНИЯ И РЕМОНТА ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЯ СУДОВ

В.Я. Молочков; И.Д. Молочкова, Дальрыбвтуз, Владивосток

Рассматриваются требования к разработке Экспертной системы по обслуживанию, диагностике и ремонту судового электрооборудования, приводятся данные по разработке такой системы в Дальрыбвтузе.

По оценкам специалистов, причинами 80 % всех аварий на судах являются неправильные действия судового персонала.

Безопасность плавания и выполнения работ на судах зависит не только от степени надежности судна и его элементов, но и от уровня квалификации персонала и организации работы различных служб на судне. В целом риск для жизни людей возникает как в связи с разрушением конструкций, неисправностью судовых систем, так и вследствие ошибочных действий членов экипажа из-за неточного восприятия информации, неправильного решения или ошибок при реализации принятого решения.

Согласно данным статистических отчетов огромные денежные затраты на различные технические усовершенствования не привели к снижению количества аварий судов.

Следует обратить внимание на сложность и многообразие функций, выполняемых командным составом и судовым персоналом, отметить оторванность электротехнического персонала в многомесячном рейсе, отсутствие помощи специалистов высокого класса по различным аспектам ремонта большого ассортимента электрооборудования судов.

Для помощи электротехническому персоналу судов по обслуживанию электрооборудования наиболее полно подходит компьютерная Экспертная система (ЭС) с направлением на обслуживание, диагностику и ремонт судового электрооборудования. При ее разработке можно учесть многолетний опыт обслуживания электрооборудования профессионалами и опыт специальных кафедр подготовки электротехнического персонала судов.

В Дальрыбвтузе ведется многолетняя работа по сбору и классификации характерных неисправностей электротехнических средств судов, методов и средств по диагностике и ремонту.

Изначально эта база данных явилась основой создания программы TREN (язык Pascal), которая многие годы использовалась для аттестации электротехнического персонала рыболовных судов. Ее дальнейшим развитием, а именно базой данных по ремонту и эксплуатации электрооборудования судов, является создание Экспертной системы по этому направлению для электромехаников и судомехаников судов.

Экспертная система – это компьютерная система, предназначенная для общения с непрограммирующим конечным пользователем. В данном случае – это электромеханик или судомеханик судна. Он ведет диалог с ЭС на естественном языке (используется язык логических построений Пролог). В процессе диалога ЭС «понимает» задачу пользователя, формализует ее, составляет программу решения, решает и выдает результат пользователю. Причем полученные решения бывают не только не хуже, а очень часто даже лучше рекомендаций, составленных экспертами-специалистами высокого класса в этой области техники.

Экспертная система для электротехнического персонала судов включает следующие разделы:

- ремонт механических узлов электрооборудования;
- ремонт силовых узлов электрооборудования;

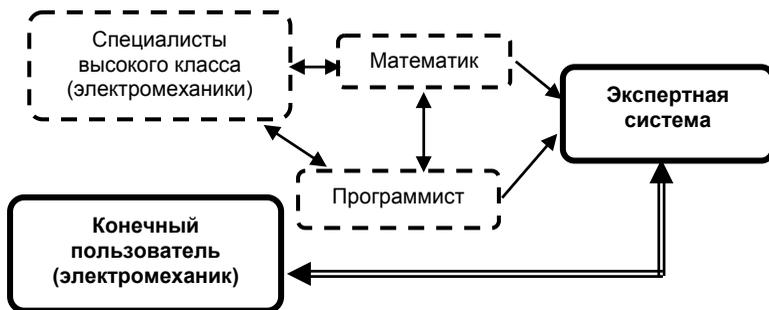
- ремонт средств автоматики;
- организация работ по обслуживанию и ремонту электрооборудования;
- техника безопасности.

Для эффективного взаимодействия с электротехническим персоналом, не знающим в достаточной степени программирование, Экспертная система должна иметь следующие функции:

- понимать естественный язык, на котором пользователь излагает свою задачу;
- уметь построить формальную модель этой задачи, т.е. формализовать ее с тем, чтобы применить формальные математические методы решения;
- составить программу решения задачи (или в простейшем случае найти эту программу в своем архиве – банке данных);
- запустить программу и получить результат;
- интерпретировать результат, т.е. представить его в форме, доступной пользователю;
- объяснить (при необходимости), каким образом был получен результат.

Из этих шести пунктов только четвертый (прогон программы) имеет традиционный характер. Остальные же имеют прямое отношение к искусственному интеллекту и используют языки высокого уровня для логических построений (в данном случае используется язык логических построений Пролог).

Если использование созданной Экспертной системы возможно специалистом среднего уровня, то создание Экспертной системы требует содружества специалистов высокого класса в этой области техники, аналитика-математика и программиста высокой квалификации (рисунок).



Структурная схема создания и использования ЭС

Замечено, что без экспертных систем эффективность труда специалиста среднего уровня при использовании ЭВМ не повышается, а снижается. Ему приходится тратить много времени на формализацию

задачи, программирование и отладку программы, что чаще всего ему одному не под силу.

В лице экспертных систем человек получает надежного партнера для решения своих насущных и сложных задач. Именно поэтому ЭС часто называют партнерскими системами.

Несмотря на то что создание ЭС, работающей в определенной предметной области, – дело чрезвычайно сложное, на это нужно идти, чтобы не готовить из каждого специалиста-инженера профессионального программиста (программирующего пользователя) и одновременно математика.

Эта проблема не может быть решена всеобщей компьютерной грамотностью, которая подразумевает лишь знакомство с компьютером и одним из алгоритмических языков, между тем от знакомства до профессионального использования языка программирования – дистанция огромного размера. Чтобы использовать все возможности компьютера, надо уметь создавать сложные программы. Здесь необходимы профессиональные знания всех тонкостей программирования, т.е. в таком случае все пользователи, независимо от специальности, должны стать профессиональными программистами. Следует отметить, что развитие языков программирования идет по пути упрощения пользования ими, создания объектно-ориентированных библиотек, вспомогательных оболочек и т.п., однако это в полной мере не снимает проблему.

Выход из этого трудного положения – создание экспертных систем, которые гарантируют возможность пользования всей мощью современного компьютера без овладения второй профессией – профессией программиста.

Понимание естественного языка является обязательной чертой всякой ЭС. При этом содержание задачи в компьютер может вводиться по-разному: с пульта дисплея или голосом через микрофон. Сам компьютер также может общаться с пользователем, выводя текст на экран дисплея или через синтезатор речи (диалоговой процессор).

Ограниченность предметной области ЭС дает возможность создать весьма полную базу знаний по тому или иному предмету, что обеспечивает компьютеру возможность эффективно понимать пользователя, так же, как понимают друг друга специалисты одной области, т.е. «с полуслова».

Созданная и постоянно обновляемая база знаний в заданной технической области не только позволяет понимать пользователя, но и отвечать на его вопросы. Для этого она содержит сведения о том, каким образом поступали раньше специалисты в той или иной ситуации и что из этого вышло. Эти знания представлены в виде так называемых продукций, т.е. конструкций вида «если..., то...». Они дают возможность формализовать задачу пользователя, т.е. составить такую цепочку, связанную причинно-следственными связями, чтобы в ее конце находился ответ на заданный пользователем вопрос или поставлен другой вопрос, на который нужно ответить пользователю.

Следует отметить, что особенно эффективны ЭС по выяснению неисправностей в действующих системах. Их база знаний состоит из продукций вида: «Если характеристика А не в норме, то следует осмотреть блоки Б, В и Г» и т.д. Эти экспертные знания помогут найти неисправности в сложной технической системе.

Для эффективной работы ЭС необходимо преобразовать описание исходной задачи в рабочую программу, которая ее решает. Эту функцию выполняет планировщик – программная система, планирующая процесс решения поставленной задачи на ЭВМ. Планировщик постоянно общается с базой знаний, откуда он черпает информацию о способах решения тех или иных задач, и о том, как составляются рабочие программы для ЭВМ.

Таким образом, одну ЭС составляют диалоговый процессор, база знаний и планировщик, которые и образуют интеллектуальный интерфейс между пользователем и компьютером.

ЭС имеет подсистему объяснения, которая позволяет при необходимости разъяснить пользователю, каким образом получено то или иное решение и обосновать его (известно, что человек плохо воспринимает необоснованные советы).

В данной разработке (программа TREN) на настоящее время имеются следующие элементы Экспертной системы:

- база данных в областях ремонта и эксплуатации электрооборудования, средств судовой автоматики, ремонта механических узлов электрооборудования и автоматики, организации работ на судне, охраны труда и окружающей среды на судах;
- специализированный диалоговый процессор, работающий в режимах обучения и тестирования.

Дальнейшее развитие предполагает разработку планировщика для работы с введенной базой данных и расширение диагностических функций системы (определение надежности и прогнозирование неисправности судовых электротехнических устройств по надежностным параметрам составляющих элементов судового электрооборудования и средств автоматики; поиск дефекта по информационному алгоритму с использованием информации о состоянии проверяемых объектов; определение неисправности логическими машинными вычислениями с использованием модулей типа «если ..., то ...» и базы данных, полученных практическим путем). Введение достаточных объемов учебной информации в виде электронного учебника и создание сетевых вариантов перечисленных программ.

Описанная выше последовательность разработки и имеющаяся база данных по ремонту и обслуживанию электрооборудования судов позволяет последовательно и целенаправленно формировать и обновлять компьютерную Экспертную систему для помощи электромеханикам и судомеханикам при обслуживании судового электрооборудования.

Библиографический список

1. *Марселлиус Д.* Программирование экспертных систем на турбо-Прологе. М., 1994. 256 с.
2. *Молочков В.Я.* Компьютерная система аттестации электромехаников судов рыбной промышленности: Учеб. пособие. Владивосток: Дальрыбвтуз, 1996. 94 с.
3. *Мендельсон Э.* Введение в математическую логику. М., 1984. 320 с.
4. *Коутс Р., Влейминк И.* Интерфейс «человек-компьютер». М., 1990. 502 с.
5. *Тимохин В.И.* Применение ЭВМ для решения задач распознавания образов. Л., 1983. 216 с.

УДК 629.12.03

СПОСОБ ТОКОВОГО НАГРЕВА ОБМОТОК НАХОДЯЩЕГОСЯ В ЭКСПЛУАТАЦИИ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

Н.П. Сологуб, МГУ им. адм. Г.И. Невельского, Владивосток

Предлагается способ предотвращения увлажнения изоляции асинхронных двигателей разных мощностей и скоростей, включаемых в последовательную цепь, с шунтированием некоторых из них емкостными сопротивлениями, во время перерывов в работе.

Анализ выходов из строя электрических машин на судах показывает, что более 90 % повреждений приходится на асинхронные двигатели. Доля витковых замыканий обмоток асинхронных двигателей составляет более 53 %. Большинство судовых асинхронных двигателей имеют всыпную двухслойную обмотку в полузакрытых пазах. При любом повреждении изоляции в таких двигателях – замыкании на корпус, междупазном или витковом замыкании – необходим ремонт, требующий полную перемотку двигателя. Стоимость ремонта асинхронного двигателя с перемоткой обмоток в настоящее время соизмерима со стоимостью нового двигателя и составляет от 20 до 300 долларов США за 1 кВт мощности. Как известно, одной из причин повреждений электродвигателей переменного тока является увлажнение изоляции обмоток. Некачественное изготовление и ремонт обмоток, старение изоляции, подвижность проводников обмоток всегда рассматриваются совместно с увлажнением обмоток, так как увлажнение усугубляет имеющиеся дефекты изоляции обмоток. Дефекты изоляции вызываются местным утончением изоляции, царапинами, микротрещинами, отслоениями, истираниями при подвижках проводников в пазах с частотой тока и другими многочисленными причинами. Повреждения изоляции как корпус-

ной, так и витковой и междуфазной наиболее часты в случаях, если обмотки после ремонта не подвергались вакуумной пропитке изоляции. Выявить местное ухудшение изоляции между витками обмотки достаточно сложно, поскольку сопротивление изоляции шунтируется очень малым сопротивлением витка провода.

При включении такого электродвигателя в работу между дефектными местами в изоляции по влажной поверхности проводников протекает ток, носителями которого могут быть как электроны, так и ионы веществ, растворенных в воде. Треки этих токов ухудшают состояние изоляции, что в итоге приводит к пробое изоляции и замыканию между фазами, между витками, на корпус. Поскольку диагностировать ухудшение, в частности, витковой изоляции достаточно сложно, возможно принятие мер по предотвращению замыканий, что вошло в практику.

Для этого изредка применяют широко известный подогрев электродвигателя переменного тока во время пауз в работе с помощью трубчатых нагревателей, встраиваемых внутрь его корпуса. Такой общеизвестный способ применяют только в электродвигателях переменного тока большой и средней мощности (брашпили, швартовные лебедки и т.д.). Это является одним из существенных недостатков известного способа сушки электродвигателей трубчатыми нагревателями, так как из-за сложности устройства их невозможно применять в маломощных электродвигателях.

Увлажнение изоляции электродвигателей может происходить и при высоких температурах окружающей среды, а для подсушки изоляции необходимо превышение температуры обмотки над температурой окружающей среды. Известен способ подогрева одинаковых асинхронных двигателей, например трюмных вентиляторов, при котором во время перерыва в работе собирается цепь из обмоток статоров и она подключается к источнику подходящего напряжения. Однако такой способ не пригоден для двигателей разных мощностей и скоростей, так как сопротивления обмоток разные.

Предлагаемый способ нагрева состоит в создании дополнительной электрической цепи из нескольких статорных обмоток асинхронных двигателей различных мощностей и скоростей с подключенными к ним элементами емкостного сопротивления. В образованную дополнительную электрическую цепь, во время перерывов в работе, подается напряжение переменного тока, производится нагрев обмоток и их отключение по завершении перерыва в работе. Перед сборкой электрической цепи определяют тип схемы соединения подготавливаемых к нагреву обмоток в каждом из электродвигателей («звезда», «треугольник»), электрическую цепь собирают из ряда последовательно соединенных каким-либо из этих типов или одновременно обоими типами их соединения обмоток данных электродвигателей. Каждый из подключаемых элементов емкостного сопротивления в данной цепи подключают параллельно обмоткам соответствующего электродвигателя. Параметры емкостных сопротивлений подбирают до их подключения таким обра-

зом, что они обеспечивают в режиме нагрева протекание тока величиной не более 0,35 от номинального тока электродвигателя в наиболее нагреваемой фазе обмотки. Причем отключение обмоток любого из электродвигателей из цепи нагрева производят непосредственно перед его пуском в работу от штатной питающей сети при одновременном отключении остальных электродвигателей из цепи нагрева. Вышеназванный подбор элементов емкостного сопротивления производят на основании предварительных инженерных расчетов электрической цепи нагрева. Наиболее целесообразно сборку дополнительной электрической цепи осуществлять при таком исполнении, когда источник напряжения нагрева выполняют разобщенным от питающей электрической сети.

Способ нагрева защищен патентом на изобретение №2241297.

Библиографический список

1. *Приходько В.М.* Способ токовой сушки изоляции асинхронных двигателей без демонтажа с судов // Морской транспорт. Сер. Техническая эксплуатация флота: Экспресс-информ. В/О «Мортехинформреклама». 1991. Вып. 19(759). С. 3-11.

2. *Сологуб Н.П.* Способ токового нагрева обмоток находящегося в эксплуатации электродвигателя переменного тока. Патент на изобретение № 2241297 РФ.