

5. З. Я. Лурье. Аналоговое вычислительное устройство для определения погрешности экспериментальной корреляционной функции.— Механизация и автоматизация управления, 1968, № 6.
6. В. А. Тихонов. Машинные алгоритмы обобщенного гармонического анализа для систем оперативной обработки информации.— Труды семинара «Алгоритмизация производственных процессов», Киев, 1963.
7. В. А. Тихонов. Система оперативного корреляционного анализа.— В сб. «Методы математического моделирования и теория электрических цепей». Труды семинара, вып. 4. Киев, 1967.
8. С. Е. Вентцель. Теория вероятностей. М., Физматгиз, 1962.
9. В. А. Тихонов, В. Т. Тертышный, Ю. П. Юрченко. О построении аналого-дискретных устройств для параллельного и параллельно-последовательного корреляционного анализа.— В сб. Методы представления и аппаратный анализ случайных процессов и полей». Труды III Всесоюзного симпозиума. Л., 1970.
10. В. А. Тихонов, Ю. П. Юрченко, В. Т. Тертышный. Аналого-дискретный коррелятор. Авторское свидетельство № 290291.— ОИПОТЗ, 1971, № 2.
11. В. А. Тихонов, В. Т. Тертышный, Ю. П. Юрченко. Специализированное вычислительное устройство для оперативного корреляционного анализа.— Механизация и автоматизация управления, 1969, № 5.

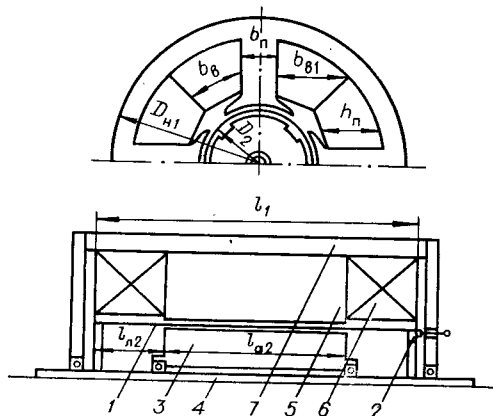
Поступила в редакцию 11 мая 1972 г.,  
окончательный вариант — 31 июля 1972 г.

УДК 681.327.6

**В. Ф. ГРИНЧЕНКО, В. Г. КАГАН,  
А. В. НЕСТЕРОВ, А. М. ШОР**  
(Новосибирск)

### О ХАРАКТЕРИСТИКАХ БЫСТРОДЕЙСТВУЮЩИХ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ ДЛЯ ВНЕШНИХ УСТРОЙСТВ ВВОДА — ВЫВОДА ЭЦВМ

Быстродействие электромеханических устройств ввода — вывода ЭЦВМ (например, графопостроителей, АЦПУ и т. п.) прежде всего определяется характеристиками исполнительных электродвигателей. Поэтому актуально определение наилучших предельных характеристик исполнительного двигателя, занимающего некоторый физический объем. Обсуждению этого вопроса посвящена настоящая работа.



Совокупность требований, которым должен отвечать электродвигатель при использовании его в различных устройствах, весьма разнообразна, поэтому он должен характеризоваться не одним, а несколькими выходными параметрами. В качестве таких выходных параметров будем рассматривать электромагнитный момент электродвигателя, его скорость, добротность, мощность, приемистость, коэффициент полезного действия и электромеханическую постоянную времени. Объектом для исследования выбран один из конструктивных ва-

риантов малоинерционного двигателя постоянного тока с полым цилиндрическим печатным якорем (ДПЯ) (см. рисунок). Основные элементы ДПЯ: цилиндрический полый якорь 1, коллектор 2, внутреннее ярмо 3, вал 4, полюса 5, обмотка возбуждения 6, корпус 7. Вал двигателя опирается на два крайних подшипника. Внутреннее ярмо опирается на вал через подшипники и может оставаться неподвижным при работе двигателя. Вес печатной обмотки с изоляционной цилиндрической основой значительно меньше веса вала и внутреннего ярма двигателя. Конструкция коллектора торцевая, с толщиной пластин, равной двум высотам печатного проводника якоря. В этом случае момент инерции коллектора существенно меньше момента инерции печатной обмотки якоря.

В дальнейшем под объемом ДПЯ  $V$  понимается объем цилиндра с диаметром  $D_{н1}$  и длиной  $l_1$ . Магнитная индукция принята во всех сечениях одинаковой и равной индукции насыщения стали  $B_m$ . Величина воздушного зазора  $\delta$  считается малой по сравнению с другими размерами двигателя.

Указанные допущения незначительно снижают общность выводов, но существенно облегчают исследование.

В ходе дальнейшего рассмотрения выходные параметры ДПЯ выражаются через минимальное количество геометрических размеров двигателя. Исследуется зависимость выходных параметров от изменения геометрии двигателя. Определяются предельные возможные значения выходных параметров и соответствующая геометрия двигателя. Проводится совместное рассмотрение выходных характеристик двигателя, позволяющее наилучшим образом выбрать в конкретных условиях соотношения его геометрических размеров.

**Оптимизация выходных параметров двигателя.** Приведем выражения, показывающие зависимость электромагнитного момента, скорости, мощности, приемистости, к. п. д., электромеханической постоянной времени от геометрических размеров двигателя, а также определим экстремальные значения этих параметров.

**1. Максимизация момента и критической скорости.** Уравнение для электромагнитного момента ДПЯ имеет вид \*

$$M = B_{\delta} j_2 \pi k_{32} \alpha_p D_2^2 l_{a2} h_2, \quad (1)$$

где  $B_{\delta}$  — индукция в воздушном зазоре;  $j_2$  — плотность тока якоря;  $k_{32}$  — коэффициент заполнения медью якоря;  $\alpha_p$  — коэффициент полюсного перекрытия;  $D_2$  — диаметр якоря;  $l_{a2}$  — длина активной части якоря;  $h_2$  — высота проводников якоря.

Индукция в рабочем воздушном зазоре определяется соотношением

$$B_{\delta} = \frac{j_1 h_{п} b_{в} k_{31} \mu_0}{2 k_{3\sigma} h_2 k_{н}}, \quad (2)$$

где  $j_1$  — плотность тока обмотки возбуждения;  $h_{п}$  — высота полюса;  $k_{31}$  — коэффициент заполнения медью окна обмотки возбуждения;  $\mu_0$  — магнитная постоянная;  $b_{в}$  — ширина окна возбуждения;  $k_{3\sigma}$  — коэффициент заполнения медью зазора;  $k_{н} > 1$  — коэффициент насыщения.

Кроме того, из условия равенства магнитного потока во всех сечениях магнитопровода

$$B_{\delta} = \frac{b_{п} 2p}{D_2 \pi \alpha_p \sigma} B_m \quad (3)$$

где  $2p$  — число пар полюсов,  $b_{п}$  — ширина полюса,  $\sigma$  — коэффициент рассеяния.

\* В. Г. Каган. Оценка предельной добротности электродвигателей. — Малоинерционные электродвигатели с печатным цилиндрическим якорем и системы их управления. Новосибирск, НЭТИ, 1970.

Учитывая допущения, касающиеся теплового расчета, будем иметь:

$$j_2 = \cos \psi \sqrt{\frac{k_{v2} \Delta v_{д2}}{\rho_m k_{32} 2h_2}}, \quad (4)$$

$$j_1 = \sqrt{\frac{k_{v1} \Delta v_{д1}}{\rho_m h_{п} k_{31}}}, \quad (5)$$

где  $\psi$  — угол скоса лобовых частей якоря;  $k_{v1}$ ,  $k_{v2}$ ,  $\Delta v_{д1}$ ,  $\Delta v_{д2}$  — коэффициенты теплоотдачи и допустимые перегревы обмоток возбуждения и якоря;  $\rho_m$  — удельное электрическое сопротивление меди.

$$\cos \psi = l_{л2} \left[ l_{л2}^2 + \left( \frac{\pi D_2}{2p} \right)^2 \right]^{-1/2}, \quad (6)$$

где  $l_{л2}$  — вылет лобовой части якоря.

Из рисунка очевидны следующие геометрические соотношения:

$$\begin{aligned} D_{н1} &= D_2 + 2b_{п} + 2h_{п}; \\ l_1 &= l_{а2} + 2l_{л2}; \\ b_{в} &= \frac{\pi}{4p} (D_2 + 1,5b_{п}) - 0,5b_{п}; \\ l_{л2} &= 0,35 (D_{н1} - 2,4b_{п}). \end{aligned} \quad (7)$$

Вводя относительные величины — относительный диаметр якоря  $x = \frac{D_2}{D_{н1}}$ ,

относительную ширину полюса  $y = \frac{b_{п}}{D_{н1}}$ , относительную длину двигателя

$z = \frac{l_1}{D_{н1}}$ , записывая

$$V = \frac{\pi}{4} D_{н1}^3 z \quad (8)$$

и подставляя (2) — (8) в (1), получим

$$M = 0,5 c_m f_m(x, y, z) V^{5/4}, \quad (9)$$

где

$$c_m = (B_m \mu_0 \pi \alpha_p k_{v2} \Delta v_{д2} k_{32})^{1/2} (\sigma k_{36} k_{н} 2\rho_m)^{-1/2} (k_{31} k_{v1} \Delta v_{д1})^{1/4} \rho^{-1/4}; \quad (10)$$

$$f_m = \frac{x^{3/2} y^{1/2} (1,4z - 1 + 2,4y) (1 - x - 1,5y)^{1/4} (1 + x - 3y)^{1/2} (1 - 2,4y)}{[(1 - 2,4y)^2 + (1,1x)^2]^{1/2} z^{5/4}}. \quad (11)$$

Для типичных значений численных коэффициентов:

$$\begin{aligned} \Delta v_{д1} = \Delta v_{д2} &= 100^\circ \text{C}; \quad k_{32} = 0,65; \quad k_{31} = 0,5; \quad k_{v1} = k_{v2} = 50 \text{ Вт/м}^2 \cdot ^\circ\text{C}; \\ \mu_0 &= 1,25 \cdot 10^{-6} \text{ Г/м}; \quad k_{36} = 4; \quad \alpha_p = 0,8; \quad k_{н} = 1,2; \quad \sigma = 1,15; \quad \rho_m = 0,2 \cdot 10^{-7} \text{ Ом} \cdot \text{м}; \\ B_m &= 1,5 \text{ Т}; \quad E_{ст} = 2 \cdot 10^{11} \text{ Н/м}^2; \quad \gamma_{ст} = 8 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3; \quad k_m = 10; \quad \tau = 10^8 \text{ Н/м}^2 \end{aligned} \quad (12)$$

имеем  $C_m = 1,5 \cdot 10^5 \text{ Н/м}^{11/4}$ .

Далее проведем исследование  $f_m(x, y, z)$  на экстремум.

При большом числе независимых переменных удобно использовать метод последовательной оптимизации, т. е., например, в данном случае сначала определим  $x_m$ ,  $y_m$  при различных фиксированных  $z$ , доставляющие максимум  $f_m$ , а затем при фиксированных найденных  $x_m$ ,  $y_m$  определим  $z_m$ , при котором  $f_m$  имеет наибольшее значение. Последняя операция, естественно, возможна при независимости  $x_m$ ,  $y_m$  от  $z$ .

Проведение такого исследования с помощью ЦВМ показало, что  $x_m$ ,  $y_m$  действительно имеют место и практически не меняются в диа-

пазоне  $z=1\div 5$ . Кроме того, найдено  $z_m$ . Подставив  $x_m, y_m, z_m$  в (9), получим предельно достижимое значение момента двигателя

$$M_m = c_m c_{KM} V^{5/4}, \quad (13)$$

где  $c_{KM} = 0,5 f_m(x_m, y_m, z_m) = 4 \cdot 10^{-2}$ . Для дальнейших оценок удобно ввести относительную величину момента

$$M^* = \frac{M}{M_m} = \frac{f_m(x, y, z)}{f_m(x_m, y_m, z_m)}. \quad (14)$$

Наибольшая скорость вращения ДПЯ  $\omega$  ограничивается наименьшим значением его критической скорости  $\omega_{кр}$ . Критическую скорость для рассматриваемого двигателя можно определить как величину собственной частоты колебаний двухмассовой (ядро, вал) системы с общим упругим звеном, которым является вал. Выражение для критической скорости в этом случае имеет вид

$$\omega = \omega_{кр} = \omega_2 \left[ 1 + \left( \frac{\omega_2}{\omega_1} \right)^2 \right]^{-1/2}, \quad (15)$$

где  $\omega_1$  — собственная частота колебаний вала, определяемая гибкостью вала и весом внутреннего ярма;  $\omega_2$  — собственная частота колебаний вала, определяемая гибкостью вала и его собственным весом. В нашем случае

$$\omega_1 = \sqrt{\frac{g}{f_1}} = 0,5 \frac{d_B^2}{D_2} \left[ \frac{3E_{ст}}{\gamma_{ст} l_{a2} l_{л2} (3l_1 - 4l_{л2})} \right]^{1/2}; \quad (16)$$

$$\omega_2 = \frac{d_B}{4} \left( \frac{\pi}{l_1} \right)^2 \sqrt{\frac{E_{ст}}{\gamma_{ст}}}, \quad (17)$$

где  $g$  — ускорение силы тяжести;  $f_1$  — статический прогиб вала от веса ярма;  $\gamma_{ст}$  — плотность стали;  $E_{ст}$  — модуль Юнга для стали. Диаметр вала двигателя определяется величиной передаваемого момента с учетом коэффициента форсировки по моменту  $k_m$

$$d_B = \sqrt[3]{\frac{2k_m M}{\pi \tau}}, \quad (18)$$

где  $\tau$  — допустимое касательное напряжение для стали.

Подставляя (16) — (18) в (15) с учетом (7) и (8), получим

$$\omega_{кр} = \frac{0,85 k_{\omega 2} (c_m c_{KM})^{1/3} (M^*)^{1/3} z^{-4/3} V^{-1/4}}{\left[ 1 + \left( \frac{k_{\omega 2}}{k_{\omega 1}} \right)^2 \frac{0,153 x^2 (1 - 2,4y)^2 (1,4z - 1 + 2,4y) (2,1z - 1 + 2,4y)}{(c_m c_{KM})^{2/3} z^{14/3} V^{1/6} (M^*)^{2/3}} \right]^{1/2}}, \quad (19)$$

где

$$k_{\omega 1} = \left( \frac{12E_{ст}}{\gamma_{ст}} \right)^{1/2} \left( \frac{2k_m}{\pi \tau} \right)^{2/3}; \quad k_{\omega 2} = \left( \frac{\pi^4 E_{ст}}{4\gamma_{ст}} \right)^{1/2} \left( \frac{2k_m}{\pi \tau} \right)^{1/3}.$$

Исследование (19) показало, что существуют  $x_\omega, y_\omega$ , практически не зависящие от  $z$ , при которых  $\omega_{кр}$  максимальна, однако, при изменении  $z$  критическая скорость тем больше, чем меньше  $z$ .

Реально двигатели не имеют относительную длину  $z < 1$ , поэтому принято  $z_\omega = 1$ ; в этом случае (19) упрощается и принимает вид

$$\omega_{кр} = 2,2 c_{KM}^{2/3} c_\omega f_\omega(x, y, z) V^{-1/6}, \quad (20)$$

где

$$c_\omega = k_{\omega 1} c_m^{2/3}; \quad f_\omega(x, y, z) = \frac{(M^*)^{2/3}}{x(1 - 2,4y)(0,4 + 2,4y)^{1/2}(1,1 + 2,4y)^{1/2}}$$

при значениях коэффициентов [по (12)]

$$c_{\omega} = 0,77 \cdot 10^3 \text{ м}^{1/3}/\text{с}.$$

Подставляя  $x_{\omega}$ ,  $y_{\omega}$ ,  $z_{\omega}$  в (20), найдем наибольшее возможное значение скорости двигателя

$$\omega_m = c_{\omega} c_{k\omega} V^{-1/6}, \quad (21)$$

где  $c_{k\omega} = 2,2 c_{kM}^{2/3} f_{\omega}(x_{\omega}, y_{\omega}, z_{\omega})$ . Относительная величина скорости двигателя  $\omega^* = \omega/\omega_m$ .

**2. Предельные соотношения для добротности, мощности и приемистости и к. п. д.** Добротность ДПЯ представляет собой отношение момента двигателя, отнесенного к моменту инерции его якоря. С учетом принятых допущений

$$\varepsilon = \frac{M}{I} \simeq \frac{M}{I_{\text{ц}} + I_{\text{в}}}, \quad (22)$$

где момент инерции цилиндра

$$I_{\text{ц}} = 0,5 \pi \gamma_{\text{м}} k_{32} D_2^3 h_2 l_1; \quad (23)$$

момент инерции вала

$$I_{\text{в}} = 0,5 \pi \gamma_{\text{ст}} \left( \frac{2k_{\text{м}}}{\pi \tau} \right)^{4/3} l_1 (M^*)^{4/3}. \quad (24)$$

С учетом (23), (24) и (7), (8) с достаточной точностью имеем

$$\varepsilon = \frac{1}{k'_e (M^*)^{1/3} z^{2/3} V^{0,6} \left[ \frac{k_e x^4 (1-x-1,5y)^{1/2} (1+x-3y)}{z^{3/2} (M^*)^{4/3} y} + 1 \right]}, \quad (25)$$

где

$$k'_e = 0,54 (c_{\text{м}} c_{\text{кМ}})^{1/3} \pi \gamma_{\text{ст}} \left[ \frac{2k_{\text{м}}}{\pi \tau} \right]^{4/3};$$

$$k_e = \frac{0,06 \gamma_{\text{м}} k_{32} \pi \mu_0 \alpha_{\rho} \sigma [k_{\text{в1}} \Delta \nu_{\text{д1}} k_{31}]^{1/2}}{\gamma_{\text{ст}} B_{\text{м}} k_{3\delta} k_{\text{н}}^{0,1/2} (c_{\text{м}} c_{\text{кМ}})^{4/3} \left[ \frac{2k_{\text{м}}}{\pi \tau} \right]^{4/3}}.$$

Анализ (25) показал, что добротность двигателя возрастает с увеличением ширины полюса, длины машины и уменьшением диаметра якоря. Причем в последнем случае добротность стремится к бесконечности при стремлении диаметра якоря к нулю, момент двигателя при этом также стремится к нулю. Таким образом, задача отыскания наибольшей добротности двигателя в заданном объеме некорректна. Однако выражение (25) позволяет определить значения добротности при некоторых  $x$ ,  $y$ ,  $z$ . В частности, при  $x_{\text{м}}$ ,  $y_{\text{м}}$ ,  $z_{\text{м}}$  (25) дает значение добротности  $\varepsilon_{\text{м}}$ , соответствующее величине добротности при максимально допустимом моменте в заданном объеме двигателя.

Зависимость добротности  $\varepsilon_{\text{м}}$  от объема представляется в виде

$$\varepsilon_{\text{м}} = c_{\varepsilon} V^{-0,6}, \quad (26)$$

где

$$c_{\varepsilon} = \frac{1}{k'_e z_{\text{м}}^{2/3} \left[ \frac{k_e x_{\text{м}}^4 (1-x_{\text{м}}-1,5y_{\text{м}})^{1/2} (1+x_{\text{м}}-3y_{\text{м}})}{z_{\text{м}}^{3/2} y_{\text{м}}} + 1 \right]}.$$

Из предыдущего ясно, что увеличение добротности относительно  $\varepsilon_{\text{м}}$  возможно только при одновременном уменьшении момента двигателя.

Выбрав  $\epsilon_m$  в качестве базовой величины, введем понятие относительной добротности

$$\epsilon^* = \epsilon / \epsilon_m.$$

Будем рассматривать электромагнитную мощность двигателя, т. е.

$$P = M\omega, \quad (27)$$

где  $M$  — электромагнитный момент в соответствии (9) и  $\omega$  — наибольшая возможная скорость двигателя по (19). Анализ (27) показывает, что имеются такие  $x_p, y_p, z_p$ , при которых рассматриваемая мощность достигает своего наибольшего значения

$$P_m = c_p c_{кр} V^{13/12}, \quad (28)$$

где

$$c_p = k_{\omega 1} c_m^{5/3}; \quad c_{кр} = 2, 2 c_{км}^{5/3} f_p(x_p, y_p, z_p).$$

Удобно также ввести относительную величину мощности  $P^* = P/P_m$ .

Приемистость двигателя, представляющая собой скорость изменения его мощности, равна

$$\Pi = M\epsilon, \quad (29)$$

где  $M, \epsilon$  — электромагнитный момент и добротность двигателя соответственно по выражениям (8) и (25). Исследование (29) показало, что существуют  $x_{\Pi}, y_{\Pi}$ , практически не зависящие от  $z$ , при которых  $\Pi$  максимальна, однако при изменении  $z$  приемистость тем больше, чем больше  $z$ .

Практические конструкции малоинерционных двигателей не имеют относительной длины, превышающей  $z=2,5$ , поэтому принято  $z_{\Pi} = 2,5$ ; в этом случае предельное значение приемистости по (29) имеет вид

$$\Pi_m = c_{\Pi} c_{кп} V^{2/3}, \quad (30)$$

где

$$c_{\Pi} = \frac{c_m^2 B_m 8 k_{z\delta} k_{\Pi} \rho_m^{1/2}}{\pi^2 \gamma_{ст} \left(\frac{2k_m}{\pi T}\right)^{4/3} \mu_0 \alpha \rho (k_{z1} k_{v1} \Delta v_{\Pi})^{1/2}}; \quad c_{кп} = 4 c_{км}^2 f_{\Pi}(x_{\Pi}, y_{\Pi}, z_{\Pi}).$$

Далее рассмотрим относительную величину электрических потерь в якоре ДПЯ, т. е.

$$\Delta = \frac{I_2^2 R_2}{P} = \frac{k_{v2} \Delta v_{\Pi 2} 2\pi l_{\Pi 2} D_2}{P} \left[ \frac{l_{\Pi 2} l_{a2}}{2 \left[ l_{\Pi 2}^2 + \left(\frac{\pi D_2}{4\rho}\right)^2 \right]} + 1 \right], \quad (31)$$

где  $I_2, R_2$  — ток и сопротивление якоря двигателя;  $P$  — мощность в соответствии с (27).

Анализ (31) показывает, что существуют  $x_{\Delta}, y_{\Delta}$ , практически не зависящие от  $z$ , при которых  $\Delta$  минимальны, причем чем меньше  $z$ , тем меньше  $\Delta$ , поэтому принято  $z_{\Delta} = 1$ . В этом случае (31) приобретает вид

$$\Delta_m = c_{\Delta} c_{к\Delta} V^{-5/12}, \quad (32)$$

где

$$c_{\Delta} = \frac{2\pi k_{v2} \Delta v_{\Pi 2}}{k_{\omega 1} c_m^{5/3}}; \quad c_{к\Delta} = \frac{f_{\Delta}(x_{\Delta}, y_{\Delta}, z_{\Delta})}{4 c_{км}^{5/3}}.$$

Относительную величину отношения электрических потерь к электромагнитной мощности выразим

$$\Delta^* = \Delta / \Delta_m.$$

К. п. д. якоря ДПЯ в этом случае

$$\eta = \frac{1}{1 + \Delta}. \quad (33)$$

**3. Минимизация электромеханической постоянной времени двигателя.** Будем рассматривать электромеханическую постоянную времени в виде

$$T_m = \frac{R_2 J}{\left(\frac{M}{I_2}\right)^2} = \frac{I_2^2 R_2}{\Pi} = \frac{k_{v2} \Delta v_{л2} 2\pi I_{л2} D_2}{\Pi} \left[ \frac{I_{л2} I_{a2}}{2 \left[ I_{л2}^2 + \left(\frac{\pi}{4\rho} D_2\right)^2 \right]} + 1 \right]. \quad (34)$$

Исследования (34) показывают, что имеются такие  $x_T, y_T$ , практически не зависящие от  $z$ , при которых  $T_m$  достигает минимума, причем чем больше  $z$ , тем меньше  $T_m$ , поэтому принято  $z_T = 2,5$ . В этом случае

$$T_m = c_T c_{KT} V^0, \quad (35)$$

где

$$c_{KT} = \frac{0,1}{c_{KM}^2} f_T(x_T, y_T, z_T);$$

$$c_T = \frac{\pi^3 \gamma_{CT} H_0 \alpha_p \sigma \Delta v_{л2} k_{v2} (k_{z1} k_{v1} \Delta v_{л1})^{1/2}}{c_M^2 4 B_m k_{z3} \delta k_H} \left[ \frac{2k_M}{\pi T} \right]^{4/3}.$$

Введем относительную величину

$$T^* = T_m / T_m.$$

Результаты исследования выходных показателей ДПЯ сведены в таблицу. Центральную часть таблицы занимает квадратная матрица, которую будем называть матрицей совместимости выходных показате-

Выходные параметры ДПЯ, принимающие предельные значения	Относительные значения выходных параметров ДПЯ							Соотношения геометрических размеров		
	$M^*$	$\omega^*$	$\epsilon^*$	$P^*$	$\Pi^*$	$\Delta^*$	$T^*$	$x_i$	$y_i$	$z_i$
$M_m$	1	0,49	1	0,76	0,18	2,45	9	0,68	0,15	2,28
$\omega_m$	0,62	1	3,8	0,95	0,43	1,1	2,17	0,4	0,22	1
$\epsilon_m$	0	0	$\infty$	0	0	0	0	0	0	$\infty$
$P_m$	0,85	0,74	1,12	1	0,17	1,52	7,5	0,55	0,17	1,2
$\Pi_m$	0,6	0,65	9,2	0,62	1	2	1,01	0,38	0,22	2,5
$\Delta_m$	0,65	0,99	3,4	0,99	0,4	1	2,1	0,46	0,25	1
$T_m$	0,6	0,65	8	0,62	0,93	1,75	1	0,425	0,25	2,5

лей двигателя. В правой части таблицы приведены соотношения геометрических размеров двигателя  $x_i, y_i, z_i$  ( $i = M, \omega, \epsilon, P, \Pi, \Delta, T_m$ ), при которых его  $i$ -й выходной показатель достигает предельного значения. В строках матрицы объединены относительные величины выходных показателей двигателя, рассчитанных для определенного сочетания  $x_i, y_i, z_i$ . В столбцах матрицы соответственно объединены относительные величины некоторого выходного показателя двигателя, рассчитанные для различных сочетаний  $x_i, y_i, z_i$ . В целом матрица совместимости составлена достаточно единообразно. Исключением является добротность двигателя, о чем говорилось выше. Содержание таблицы наглядно показывает характер совместимости или противоречивости различных выходных показателей ДПЯ.

## ВЫВОДЫ

Определены не зависящие от объема соотношения геометрических размеров двигателя с печатным якорем, при которых тот или иной выходной показатель двигателя достигает своего предельного значения.

Предложена матрица совместимости, как наглядная форма, позволяющая судить о степени совместимости или противоречивости выходных показателей двигателя, что дает возможность использовать матрицу совместимости при выборе геометрии двигателя, отвечающего совокупности специфических требований к приводам устройств ввода — вывода ЭВМ.

*Поступила в редакцию 19 февраля 1973 г.*

УДК 621.317.33 : 621.317.733

М. А. ВАРГОЛА, В. Р. ВОЗНЮК, Г. А. ШТАМБЕРГЕР

*(Новосибирск, Ивано-Франковск)*

### ОБ ОДНОМ СВОЙСТВЕ МОСТОВЫХ ЦЕПЕЙ ДЛЯ РАЗДЕЛЬНОГО ИЗМЕРЕНИЯ АКТИВНОЙ СОСТАВЛЯЮЩЕЙ КОМПЛЕКСНОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ

При измерении комплексных сопротивлений с помощью уравновешенных мостов питание цепей стремятся осуществить «чисто» синусоидальными напряжениями. Если это оказывается невозможным или если в самой мостовой цепи имеют место нелинейные искажения, то указатель делается избирательным, и в этом случае значения составляющих комплексного сопротивления будут соответствовать результату измерения на заданной частоте. При несоблюдении подобных мер погрешность измерения может оказаться недопустимо большой, а в некоторых случаях невозможно привести мост к состоянию равновесия.

Переход к квазиуравновешенным цепям, используемым в фазовом и модульном режимах, позволяет, как известно [1], существенно упростить процесс измерения, облегчить проблему автоматизации, обеспечить возможность раздельного, независимого измерения составляющих и, как будет показано ниже, исключить влияние формы кривой питающего мост напряжения на результат измерения вещественной составляющей комплексного сопротивления.

В настоящей работе будет показана возможность измерения активной части комплексного сопротивления (не являющейся в заданном диапазоне функцией частоты) от формы напряжения, питающего квазиуравновешенный мост, в котором выполняются определенные фазовые или модульные соотношения.

Известная схема [1] для измерения в фазовом режиме активной составляющей  $R_1$  комплексного сопротивления  $Z_{1n} = R_1 + jX_{1n}$  приведена на рис. 1. Значение этой составляющей определяется по величине  $R_2$  при квадратуре между напряжениями  $\dot{U}_{cd}$  и  $\dot{U}_{cb}$ . Обычно в такой схеме используется фазовый указатель, на входные зажимы которого подаются синусоидальные напряжения.

В схеме рис. 1 применен фазовый нулевой указатель (НУ), состоящий из множительного устройства (МУ) с интегрирующим звеном