

**ЭНЕРГЕТИКА УСТАНОВИВШИХСЯ РЕЖИМОВ
ЭЛЕКТРОПРИВОДА ПО СИСТЕМЕ МАГНИТНЫЙ
УСИЛИТЕЛЬ — ДВИГАТЕЛЬ ПОСТОЯННОГО ТОКА**

М. А. БОРОВИКОВ

(Представлено научным семинаром электромеханического факультета)

В практических расчетах электроприводов часто бывает необходимым определять энергетические показатели работы привода в установившихся режимах.

Основными энергетическими показателями привода по системе магнитный усилитель (МУ)-двигатель постоянного тока являются: полезная механическая мощность P_m , отдаваемая с вала, потребляемая из сети переменного тока электрическая мощность P_1 , к. п. д. η и коэффициент мощности $\cos \varphi_c$ привода. Приводы постоянного тока по системе МУ-двигатель в последнее время применяются очень широко и выполняются на большой диапазон мощностей [1, 2], поэтому знание к. п. д. и коэффициента мощности и разработка методов их определения является очень важным для проектирования таких систем электропривода.

В настоящей работе предлагается методика определения указанных энергетических показателей на примере системы МУ-двигатель, выполненной по схеме привода типа ПМУ [1] в однофазном исполнении.

На рис. 1 приведена исследуемая система привода. Здесь $Я$ — якорь двигателя постоянного тока, независимого возбуждения; ω_1 — рабочие обмотки магнитного усилителя, соединенного по схеме с самоподмагничиванием; В1—В4 — вентили для выпрямления переменного тока и создания эффекта самоподмагничивания; $\omega_{см}$ — обмотка смещения магнитного усилителя. В системе кроме внутренней положительной обратной связи по току имеются и внешние обратные связи по току и напряжению двигателя. Положительная внешняя обратная связь по току осуществляется с помощью обмотки ω_2 усилителя; отрицательная обратная связь по напряжению вводится на обмотку управления МУ ω_1 , совмещающую функции задающей обмотки и обмотки обратной связи по напряжению.

Определение необходимых энергетических показателей привода производится с помощью схемы замещения МУ, работающего на активную нагрузку (рис. 1 предыдущей статьи сборника), при допущении, что реальные несинусоидальные напряжения и ток в рабочей цепи магнитного усилителя можно заменить синусоидальными, обе-

спечивающими такие же действующие значения, как и реальные [3, 4]. Для упрощения расчетов будем считать активное сопротивление рабочей цепи магнитного усилителя $R_{м\dot{y}} = r_{м\dot{y}} + r_{в}$ неизменным, так как оно изменяется в сравнительно небольших пределах [4] и учет его нелинейности, не увеличивая значительно точности расчетов, только усложняет их.

В качестве исходных данных для расчета энергетических показателей, как и в случае расчета механических характеристик, используются нагрузочные характеристики вход-выход магнитного усилителя $I_{н} = f(I\omega)_{y}$, работающего на различные активные сопротивления нагрузки $R_{н} = \text{const}$ (см. предыдущую статью сборника). При заданном значении сопротивления нагрузки $R_{н}$, среднее значение напряжения на нем определится по выражению

$$U_{н} = I_{н} \cdot R_{н}. \quad (1)$$

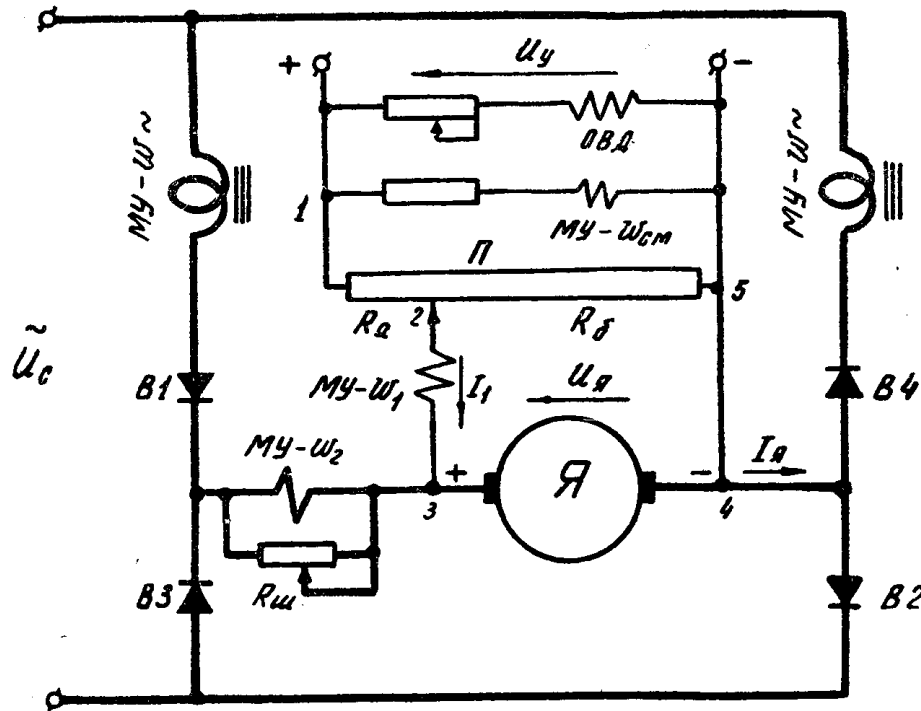


Рис. 1.

Действующие значения тока и напряжения на выходе МУ пропорциональны соответствующим средним значениям

$$I_{\sim} = \gamma_1 \cdot I_{н}, \quad (2)$$

$$U_{н\sim} = \gamma_2 \cdot U_{н}. \quad (3)$$

По выражению (2) и (3) осуществляется приведение средних значений напряжения и тока нагрузки к стороне переменного тока. Величины коэффициентов приведения γ_1 и γ_2 зависят от схемы выпрямления и характера нагрузки. Для однофазной мостовой схемы при активной нагрузке $\gamma_1 = \gamma_2 = 1,11$ [3]. Так как магнитный усилитель искажает кривую тока, $\gamma_1 \neq 1,11$. При нагрузке МУ на активные сопротивления $\gamma_1 = \gamma_2$ и изменяются при изменении нагрузки в пределах $1,11 \div 1,21$. При нагрузке МУ на противо э. д. с. в общем случае $\gamma_1 \neq \gamma_2$. Рассматривая только режим непрерывных токов, можно также принять, что $\gamma_1 = \gamma_2 = 1,11 \div 1,21$. Для простоты будем

считать коэффициенты приведения неизменными и равными 1,15.

После приведения нагрузки к стороне переменного тока будем иметь значения I_{\sim} , U_{\sim} , $I_{\sim} R_{\text{МУ}}$. При этом коэффициент мощности привода может быть найден (рис. 1 предыдущей статьи сборника) по выражению

$$\cos \varphi_c = \frac{U_{\sim} + I_{\sim} R_{\text{МУ}}}{U_c} \quad (4)$$

Зная $\cos \varphi_c$, можно найти потребляемую из сети мощность P_1

$$P_1 = U_c \cdot I_{\sim} \cos \varphi_c \quad (5)$$

Мощность на валу определяется по обычному выражению

$$P_M = \frac{(M - \Delta M) \cdot n}{975} \quad (6)$$

где M — электромагнитный момент двигателя;

ΔM — момент потерь.

К. п. д. привода будет определяться выражением

$$\eta = \frac{P_M}{P_1 + \Delta P} = \frac{(M - \Delta M) n}{975 (U_c \cdot I_{\sim} \cos \varphi_c + \Delta P)} \quad (7)$$

где ΔP — дополнительные потери в ОВД, в обмотках управления МУ и в потенциометре П.

Сущность метода определения указанных показателей для схемы рис. 1 заключается в построении траектории рабочей точки МУ, то есть зависимости ампервитков управления $(I\omega)_y$ от тока нагрузки I_n , $(I\omega)_y = f(I_n)$ при определенном положении движка потенциометра П. Траектория рабочей точки МУ для любого заданного тока нагрузки $I_n = I_a$ определяет величину сопротивления нагрузки $R_n = R_a$, а следовательно, скорость и напряжение (см. предыдущую статью сборника) двигателя. Определив скорость и напряжение двигателя, по выражениям (4)—(7) могут быть определены все необходимые энергетические показатели.

Для построения траектории рабочей точки МУ строим ряд нагрузочных характеристик $I_n = f(I\omega)_y$ для разных значений $R_n = \text{const}$ (рис. 2). По токовым характеристикам, используя (1) и (3), строим кривые действующего значения напряжения $U_{\sim} = f(I\omega)_y$ для тех же сопротивлений. На рис. 2 изображено по три нагрузочных характеристики тока и напряжения, чтобы не слишком затемнять чертеж.

Далее необходимо построить характеристики обратных и прямых связей. Для схемы рис. 1 результирующие ампервитки МУ складываются из суммы ампервитков обмоток ω_1 и ω_2

$$(I\omega)_y = (I\omega)_1 + (I\omega)_2 \quad (8)$$

Ампервитки обмотки ω_1 можно условно разделить на две составляющих: $(I\omega)_3$ — задающие ампервитки, определяющие характеристику прямой связи, и $(I\omega)_u$ — ампервитки отрицательной обратной связи по напряжению. При этом результирующие ампервитки будут определяться как алгебраическая сумма задающих ампервитков, ампервитков обмотки токовой обратной связи $(I\omega)_r = (I\omega)_2$, и ампервитков обратной связи по напряжению

$$(I\omega)_y = (I\omega)_3 + (I\omega)_r - (I\omega)_u \quad (9)$$

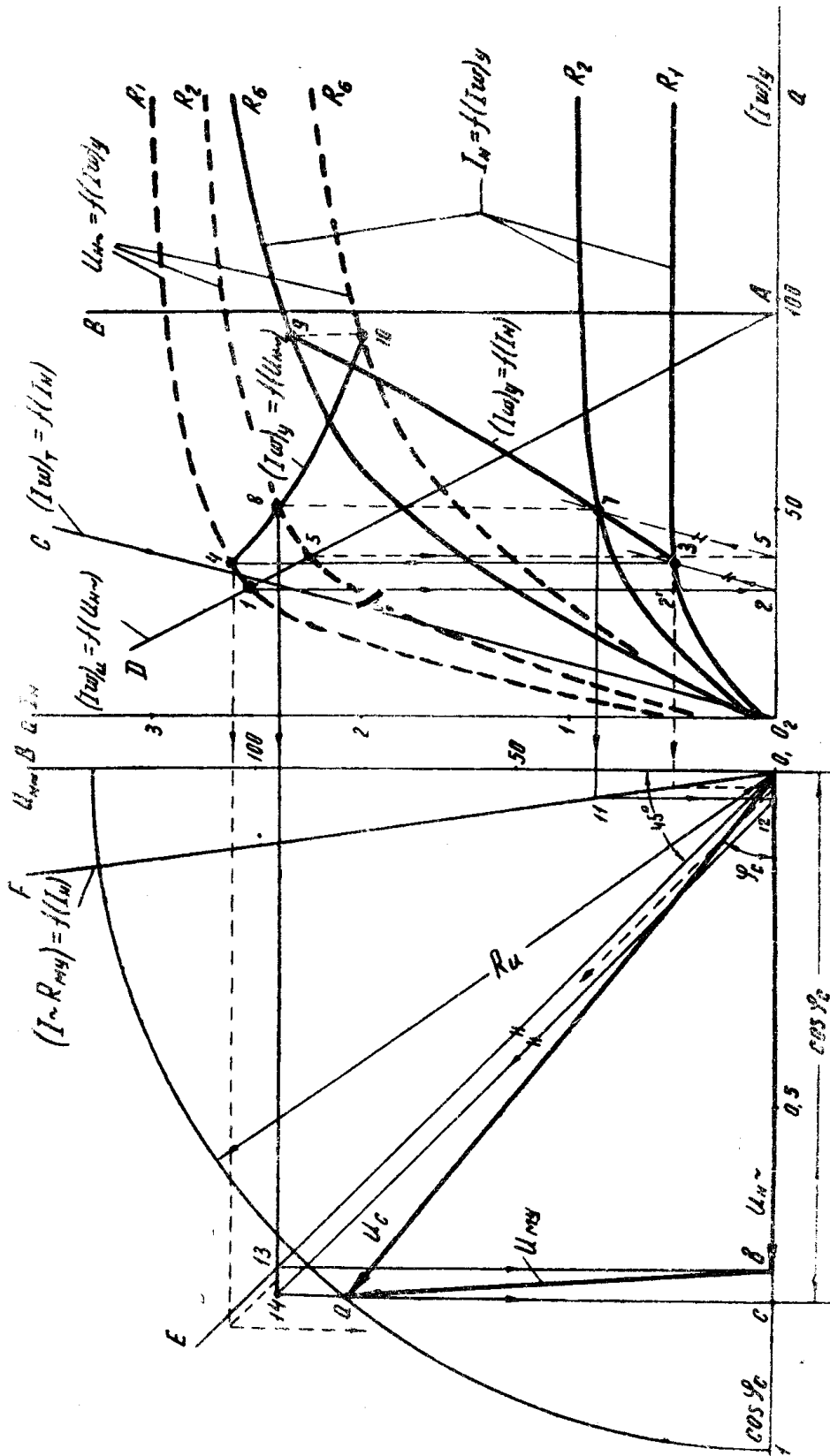


Рис. 2.

Ампервитки токовой обратной связи $(I\omega)_T$ прямо пропорциональны току нагрузки

$$(I\omega)_T = \beta \cdot I_n = \frac{R_{III}}{R_{III} + R_2} \cdot I_n. \quad (10)$$

Здесь R_2 — сопротивление токовой обмотки.

Для определения ампервитков $(I\omega)_3$ и $(I\omega)_u$ рассмотрим контур 1—2—3—4—5 схемы рис. 1. Применяя принцип наложения для определения тока в обмотке ω_1 , получим необходимые выражения

$$(I\omega_3) = c_1 \cdot U_y = \frac{R_6 \cdot \omega_1}{\left(\frac{R_6 \cdot R_a}{R_1} + R_a + R_5 \right) \cdot R_1} U_y, \quad (11)$$

$$(I\omega)_u = \alpha \cdot U_n = \frac{(R_a + R_6) \cdot \omega_1}{R_a \cdot R_6 + R_1 \cdot R_a + R_1 \cdot R_6} U_n, \quad (12)$$

где R_1 — сопротивление цепи обмотки ω_1 ;

R_a и R_6 — сопротивления плеч потенциометра П;

U_y — напряжение на потенциометре П.

Таким образом, $c_1 = \text{const}$ и $\alpha = \text{const}$ для определенного положения движка потенциометра П.

Пользуясь теперь (11), строим на рис. 2 вертикаль AB задающих ампервитков для определенного положения движка потенциометра П. По (12) определяем величину ампервитков $(I\omega)_u$ в функции от среднего напряжения и, пересчитывая среднее напряжение в действующее, строим зависимость ампервитков обратной связи по напряжению от действующего напряжения нагрузки $(I\omega)_u = f(U_{n-})$, откладывая ее влево от вертикали AB , так как обратная связь отрицательная. Эта зависимость представлена на рис. 2 лучом AD . Строим далее по (10) характеристику положительной обратной связи по току, откладывая ее из начала координат I_n , $(I\omega)_y$ (луч O_2C).

После построения всех характеристик связей можно построить траекторию рабочей точки МУ. Для того, чтобы найти, например, точку работы магнитного усилителя на сопротивление $R_n = R_1$, необходимо точку 1 пересечения луча AD с кривой $U_{n-} = f(I\omega)_y$ спроектировать на ось абсцисс и из полученной точки 2 провести прямую, параллельную характеристике токовой обратной связи O_2C до пересечения в точке 3 с кривой $I_n = f(I\omega)_y$ при $R_n = R_1$. Нетрудно убедиться, что для точки 3 соблюдено условие (9), то есть она и является искомой точкой траектории $(I\omega)_y = f(I_n)$ для данного положения движка потенциометра П. Аналогичными построениями находятся другие точки траектории (точки 7...9). По токовой траектории рабочей точки, переносом ее вверх по вертикали до пересечения с соответствующими кривыми напряжения, получим кривую изменения напряжения на выходе МУ при изменении нагрузки, или траекторию рабочей точки усилителя в осях U_{n-} , $(I\omega)_y$, $(I\omega)_y = f(U_{n-})$ (кривая 4—8—10).

По зависимости $(I\omega)_y = f(I_n)$, задаваясь значениями тока $I_n = I_a$, по известным значениям сопротивления нагрузки $R_n = R_3$, находим с помощью вспомогательных характеристик $I_a = f(n)$ при $R_3 = \text{const}$ (см. предыдущую статью сборника) скорость двигателя n . По току находится значение электромагнитного момента

$$M = c_M I_a = \frac{1}{1,03} \frac{E}{n} I_a. \quad (13)$$

Таким образом, будет получена механическая характеристика двигателя в схеме рис. 1 для определенного положения движка потенциометра П, то есть определенного значения сопротивления R_6 . На рис. 3 приведены характеристики для двух значений R_6 , причем $R_{61} > R_{62}$.

Для определения коэффициента мощности $\cos \varphi_{c\dot{z}}$ [силовой части схемы в левом квадранте рис. 2 строим окружность радиусом R_u , равным в масштабе действующему напряжению сети. Эта окружность будет представлять геометрическое место концов вектора напряжения сети при условии, что оно постоянно. Проведем вспомогательный луч O_1E под углом 45° для переноса значений $U_{н\sim}$ из правого квадранта на ось абсцисс левого квадранта. В левом квадранте строим также зависимость действующего значения падения напряжения на активном сопротивлении $R_{му}$ от тока нагрузки, то есть зависимость $(I \sim R_{му}) = f(I_n)$ (луч O_1F). При принятых допущениях ($R_{му} = \text{const}$, $\gamma_1 = \text{const}$) эта зависимость будет линейной.

Пусть, например, требуется определить величину коэффициента мощности при работе системы в точке 7 кривой 3—7—9. Определяем напряжение $U_{н\sim}$ на нагрузке для этой точки (точка 8) и переносим полученное значение в левый квадрант (горизонталь 8—13). Значение тока I_n в точке 7 также переносим в левый квадрант до луча O_1F , и в точке 11 получаем величину падения напряжения $(I \sim R_{му})$. Точку 11 проектируем на ось абсцисс и из полученной точки 12 проводим прямую, параллельную лучу O_1E до пересечения с горизонталью 8—13 в точке 14. Проектируя точки 13 и 14 на ось абсцисс, получаем треугольник напряжений baO_1 , у которого сторона O_1b представляет действующее напряжение нагрузки $U_{н\sim}$, а сторона ba —напряжение $U_{му}$, так как отрезок bc представляет падение напряжения на сопротивлении $R_{му}$, а O_1a —напряжение сети. Следовательно, угол aO_1b является углом φ_c для заданной нагрузки МУ.

Так как $\cos \varphi_c = \frac{O_1c}{O_1a} = \frac{O_1c}{R_u}$, то для получения значений $\cos \varphi_c$

достаточно на оси абсцисс построить шкалу его значений, принимая радиус окружности за единицу. При этом отрезок O_1c будет одновременно представлять и значение коэффициента мощности привода для данного тока $I_n = I_n$, то есть и момента двигателя М. Прделав аналогичные построения для всей траектории 3—7—9 и подсчитывая при этом значения момента на валу, получим зависимость коэффициента мощности от момента нагрузки $\cos \varphi_c = f(M_b)$. Зависимости $\cos \varphi_c = f(M_b)$ для двух положений движка потенциометра П приведены на рис. 3.

Пользуясь далее выражениями (5), (6) и (7) по механической характеристике и зависимости $\cos \varphi_c = f(M_b)$, можно определить значения P_1 , P_m и η и построить зависимости к. п. д. привода от момента на валу двигателя для любого положения движка потенциометра П. Зависимости $\eta = f(M_b)$ для двух случаев приведены на рис. 3.

Все приведенные в работе построения и графики относятся к реальному двигателю типа МИ-12Ф, $U_{ном} = 110$ в; $P_{ном} = 0,12$ квт; $I_{н\text{ ном}} = 1,46$ а; $n_{ном} = 2000$ об/мин; $R_{я} = 2,2$ ом; $R_{ов} = 600$ ом; $\eta_{ном} = 0,74$, включенному по схеме рис. 1. Магнитный усилитель выполнен из стали марки Э-42, штамп Ш-40У, набор пакета 36 мм; $\omega_{\sim} = 600$; $\omega_1 = 1000$; $\omega_2 = 40$; $\omega_{см} = 1000$; выпрямители типа Д-304.

Построенные описанными способами зависимости $\cos \varphi_c = f(M_b)$ и $\eta = f(M_b)$ отличались от снятых экспериментально не более чем

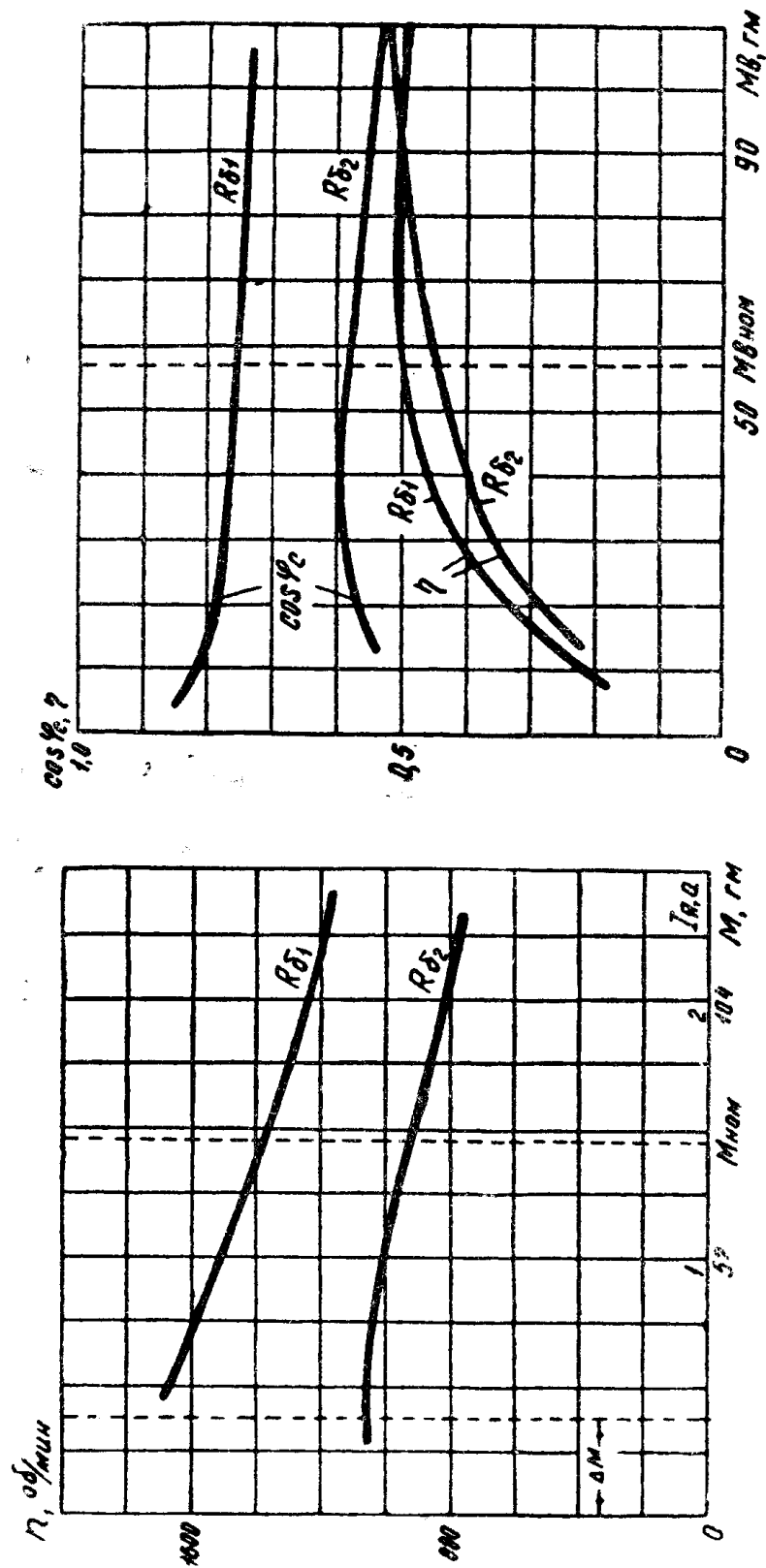


Рис. 3.

на 10 %, что в большинстве инженерных расчетов оказывается приемлемым.

Выводы

1. Использование нагрузочных характеристик вход-выход магнитных усилителей позволяет применять простые графоаналитические методы расчета энергетических показателей приводов по системе МУ-двигатель с различными обратными связями.

2. Коэффициент мощности привода пропорционален скорости вращения.

3. Приводы типа ПМУ имеют достаточно большой к. п. д., но низкий коэффициент мощности при глубоком регулировании скорости.

4. Описанный метод применим и для трехфазных схем магнитных усилителей и может быть рекомендован для инженерных расчетов, не требующих высокой точности.

ЛИТЕРАТУРА

1. Я. Б. Розман. Промышленные серии регулируемых электроприводов ПМУ и ПМС. ЦИНТИЭ, 1960.

2. H. Winkler. Новая гамма регулируемых при помощи магнитных усилителей приводов мощности от 2,8 до 187 квт, AEG Mitteilungen, т. 49, № 10/11, 1959.

3. М. А. Розенблат. Магнитные усилители. „Советское радио“, 1956.

4. Д. А. Аленчиков. Расчет статических характеристик систем с дроссельным управлением. Автоматика и телемеханика, т. XX, № 5, 1959.

5. Д. А. Аленчиков, В. С. Кулебакин. Метод расчета характеристик двигателей постоянного тока с дроссельным управлением. Автоматика и телемеханика, т. XX, № 7, 1959.

Поступила в редакцию
в мае 1962 г.