

НЕКОТОРЫЕ ВОПРОСЫ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ ПО СИСТЕМЕ МУС-Д

М. А. БОРОВИКОВ

(Представлено научным семинаром электромеханического факультета)

В настоящее время отечественной промышленностью освоены серии качественных силовых магнитных усилителей, поэтому из задачи проектирования привода по системе магнитный усилитель с самонасыщением — двигатель постоянного тока (МУС-Д) исключается проектирование магнитного усилителя, как это представлялось несколько раньше [1]. Проектирование привода теперь следует понимать как выбор готовых серийных электрических машин и аппаратов и их компоновка с целью обеспечения заданных технических показателей.

В каждом конкретном случае структура электропривода определяется требованиями, предъявляемыми к нему в отношении диапазона регулирования, быстродействия, точности и т. д. Поэтому и выбор некоторых элементов привода, в основном управляющих, носит специфический характер. Но такие вопросы, как выбор двигателя и магнитного усилителя для питания его являются общими во всех случаях. Кроме того, богатый практический опыт по конструированию различных систем автоматического регулирования позволяет сделать конкретной и задачу синтеза структуры привода.

Целью настоящей работы является обоснование методики выбора двигателя и магнитного усилителя при проектировании системы МУС-Д, а также решение вопросов выбора управляющих элементов для заданной структуры привода.

Выбор двигателя

Особенностью работы двигателя при питании его от магнитных усилителей по схемам рис. 1 является повышенный нагрев его за счет пульсаций тока якоря. Если, как это принято в классической теории электропривода, допустить, что нагрев определяется средними потерями, то увеличение перегрева, а следовательно, и мощности двигателя при его выборе, может быть учтено коэффициентом формы тока якоря

$$K_{\text{фя}} = \frac{I_{\text{яф}}}{I_{\text{я}}}, \quad (1)$$

где $I_{\text{яф}}$, $I_{\text{я}}$ — соответственно действующее (среднеквадратичное) и среднее значения тока якоря.

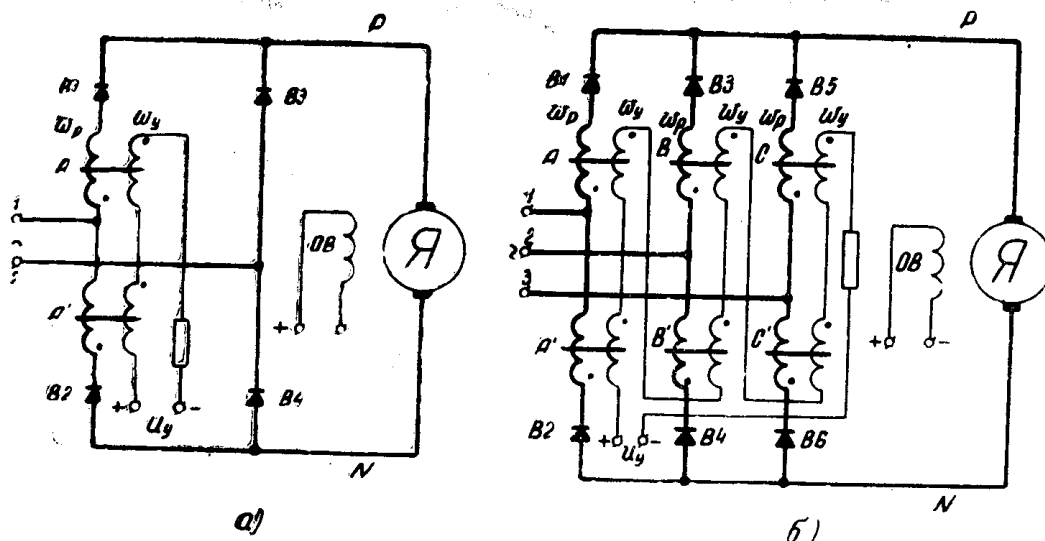


Рис. 1.

Выбор двигателя из условия нагрева при известном $K_{гЯ}$ может быть произведен в следующем порядке:

1. По нагрузочной диаграмме определяется эквивалентный момент двигателя:

$$M_{э} = \sqrt{\frac{\sum M_i^2 t_i}{\sum \gamma_i t_i}}, \quad (2)$$

где M_i — значение момента, который должен развивать двигатель в течение времени t_i в регулировочном цикле;

γ_i — коэффициент, учитывающий ухудшение условий охлаждения двигателя при работе на пониженных скоростях.

2. По эквивалентному моменту находится «эквивалентный» средний ток двигателя

$$I_{Яэ} = \frac{M_{э}}{c_M}. \quad (3)$$

3. Находится эквивалентный среднеквадратичный ток двигателя $I_{Яэф}$, определяющий его нагрев.

$$I_{Яэф} = K_{гЯ} I_{Яэ}. \quad (4)$$

Условием правильности выбора двигателя считается условие

$$I_{Яном} > K_{гЯ} I_{Яэ}. \quad (5)$$

Коэффициент формы тока $K_{гЯ}$ является сложной функцией относительной скорости двигателя v параметра якорной цепи $\operatorname{tg} \varphi$ и относительной величины тока якоря. Получить выражения для его определения можно лишь при значительной идеализации, как было произведено в работе [1]. В реальных случаях значения $K_{гЯ}$ изменяются в сравнительно небольших пределах: при питании двигателя от однофазного усилителя $K_{гЯ}$ в области номинальных нагрузок в среднем находится в пределах $1,25 \div 1,3$ (см. рис. 2); при питании трехфазного усилителя $K_{гЯ} = 1,01 \div 1,04$ при изменениях v и $\operatorname{tg} \varphi$ (см. рис. 3). Аналогичные же

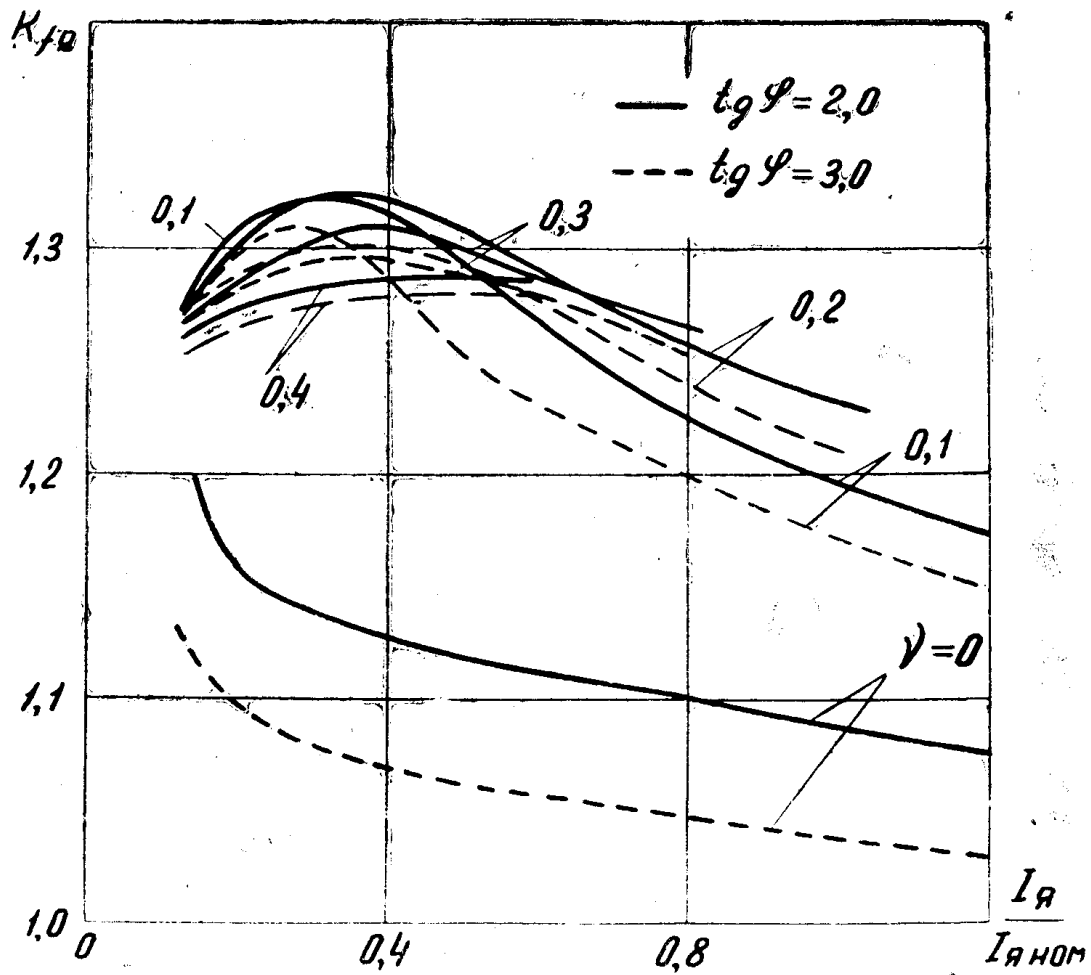


Рис. 2.

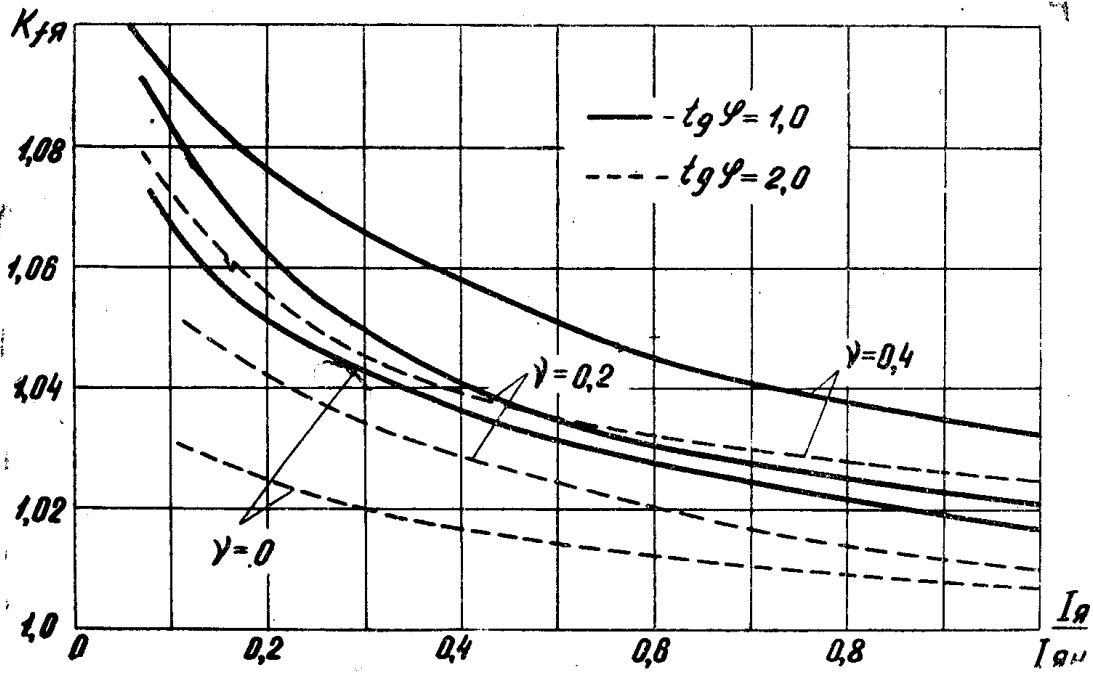


Рис. 3.

результаты приводятся в работах других авторов [2, 3]. Поэтому использование выражения (5) не вызывает затруднений.

Как обычно, указанный выше порядок реализуется после предварительного выбора двигателя.

Выбор магнитных усилителей

В приводах мощностью до 1 квт целесообразно применять однофазные усилители, достоинством которых является меньшее по сравнению с трехфазными количество составляющих элементов (сердечников, вентилях). При мощностях свыше 1 квт рекомендуется применять трехфазные усилители, обеспечивающие лучшее использование заложенных в них материалов, повышенный к. п. д., меньшие пульсации выходного напряжения, равномерную загрузку всех фаз сети и т. д.

Выбор магнитных усилителей должен производиться по допустимому току рабочих обмоток и по напряжению питающей сети. Выбор по току производится по выражениям: для однофазного

$$I_{pном} \geq \frac{K_{гЯ} I_{Яном}}{\sqrt{2}}, \quad (6)$$

для трехфазного

$$I_{pном} \geq \frac{K_{гЯ} I_{Яном}}{\sqrt{3}}. \quad (7)$$

Так как в информации на магнитные усилители [4] не приводятся токи рабочих обмоток, чаще приходится выбирать МУ по среднему току нагрузки. Условие выбора в обоих случаях при этом будет иметь вид

$$I_n \geq I_{Яном}, \quad (8)$$

где I_n — каталожное значение тока нагрузки МУ.

При выполнении условия (8) опасности перегрева рабочих обмоток при двигательной нагрузке не возникает, так как каталожные данные составлены при работе усилителя на активную нагрузку, когда $K_{гЯ}$ имеет значения большие, чем при наличии индуктивности в цепи нагрузки, которой всегда обладает якорь двигателя.

Определение напряжения, на которое следует выбирать магнитный усилитель, можно производить на основании уравнений механических характеристик двигателя, выведенных в работах [5, 6]. Для системы с однофазным усилителем (рис. 1а) имеем:

$$U_c \geq \frac{\pi (C_E P_{ном} + I_{Яном} K_{гЯ} K_2)}{2\sqrt{2} \left[1 - \left(\frac{\beta_y}{2\xi} \right)_{мин} \right]}. \quad (9)$$

Для системы с трехфазным усилителем (рис. 1б) линейное напряжение питания должно определяться в соответствии с выражением:

$$U_n \geq \frac{\pi (C_E P_{ном} + I_{Яном} K_{гЯ} K_3)}{3\sqrt{2} \left[1 - \left(\frac{\beta_y}{2\xi} \right)_{мин} \right]}, \quad (10)$$

где $\beta_y = \frac{\Delta B}{B_s}$ — относительное приращение индукции в сердечниках в рабочий или управляющий полупериоды;

$\xi = \frac{U_m 10^8}{\omega W_{ps} B_s}$ — коэффициент модуляции сердечников на холостом ходу [7].

Как показывает анализ реальных систем, значения $(\beta_y/2\xi)_{\min}$ и $(\beta_y \xi)_{\min}$ в обоих случаях не достигают значений, меньших 0,3 при номинальном значении тока в цепи управления. Подставляя 0,3 в эти выражения, получим:

для однофазного МУ

$$U_c \geq 1,58 (C_E n_{\text{ном}} + I_{\text{я}} g_{\text{я}} K_3), \quad (11)$$

для трехфазного

$$U_{\text{л}} \geq 1,05 (C_E n_{\text{ном}} + I_{\text{я}} g_{\text{я}} K_3). \quad (12)$$

При применении селеновых выпрямителей для магнитных усилителей, величина напряжения в обоих случаях должна быть увеличена на $\sqrt{2} E_B$. Коэффициент запаса K_3 , учитывающий сопротивление рабочих обмоток МУ, вентилях и влияние остаточной индуктивности L_s , ориентировочно можно принимать равным 2,5 ÷ 3.

В тех случаях, когда скорость двигателя регулируется не от 0, а от некоторого значения $n_{\text{мин}}$, напряжение, на которое следует выбирать усилитель, можно уменьшить в $\xi_{\text{макс}}$ раз. Для однофазного усилителя это значение [7] определяется по выражению

$$\xi_{\text{макс}} = \frac{1}{\sqrt{1 - \left(\frac{C_E n_{\text{мин}}}{U_m}\right)^2 - \frac{C_E n_{\text{мин}}}{U_m} \left(\frac{\pi}{2} - \arcsin \frac{C_E n_{\text{мин}}}{U_m}\right)}}. \quad (13)$$

Для трехфазного МУ значение $\xi_{\text{макс}}$ может быть найдено из соответствующего уравнения для β_y (см. [6]) при подстановке в него $\Delta B = 2B_s$ и $E = C_E n_{\text{мин}}$:

$$\xi_{\text{макс}} = \frac{1}{1 - \frac{C_E n_{\text{мин}}}{U_m} \frac{\pi}{3}}. \quad (14)$$

Значение напряжения U_m в (13) и (14) следует, как и раньше, определить по соответствующим выражениям (9) и (10).

Выбор вентилях

Выбор полупроводниковых вентилях выпрямительного моста МУ производится по среднему рабочему току и максимальному обратному напряжению. Средний ток через вентилях однофазного МУ определяется выражением

$$I_{\text{вср}} \approx \frac{1}{2} I_{\text{я ном}}, \quad (15)$$

для трехфазного

$$I_{\text{вср}} \approx \frac{1}{3} I_{\text{я ном}}. \quad (16)$$

Максимальное обратное напряжение на вентилях при полном насыщении сердечников усилителей равно амплитудному значению напряжения сети

$$U_{\text{вобр}} = U_m \quad (17)$$

В реальных случаях полного насыщения сердечников добиться невозможно, поэтому на рабочих обмотках в отрицательные полупериоды питающего напряжения всегда наводится э. д. с., вычитающаяся из обратного напряжения на вентиле. В среднем максимальное значение обратного напряжения за счет этого уменьшается на 15—20% для железо-кремнистых усилителей, то есть

$$U_{\text{всб}} \geq 0,85 U_m. \quad (18)$$

Выбор шунтирующего вентиля $V_{\text{ш}}$ для устранения неустойчивости привода по схеме рис. 1б на низких скоростях [8] производится на основании выражения:

$$I_{\text{в.л}} \geq I_{\text{ном}} \left(\frac{3\alpha_{s \text{ макс}}}{\pi} - 1 \right). \quad (19)$$

Значение максимального угла зажигания $\alpha_{s \text{ макс}}$ может быть найдено [8] в зависимости от заданных значений $v_{\text{мин}}$ и $I_{\text{макс}}$. Обратное напряжение на вентиле $V_{\text{ш}}$ равно максимальному напряжению на якоре

$$U_{\text{вш}} \geq U_{\text{л макс}}. \quad (20)$$

Если напряжение питания усилителя подобрано в соответствии с (12), то выражение (20) может быть записано следующим образом

$$U_{\text{вш}} \geq 0,8 U_m. \quad (21)$$

О выборе промежуточного усилителя

Необходимость выбора промежуточного усилителя определяется требованиями, которым должен удовлетворять привод в отношении диапазона регулирования, жесткости характеристик, пусковых свойств. Эти же требования определяют выбор структуры системы. Как показывает опыт, при требовании обеспечения диапазона регулирования до 50:1 можно применять системы без обратной связи по скорости, а только с обратными связями по напряжению и току (например, по схеме рис. 4). В качестве промежуточного усилителя очень удобно выбирать также магнитный усилитель MU_2 ; применение промежуточного магнитного усилителя не приводит к большим осложнениям системы и заметному снижению ее надежности, не вызывает особых затруднений в согласовании его со входом силового усилителя MU_1 и, кроме этого, позволяет осуществить суммирование большого числа сигналов управления.

Выбор промежуточного усилителя для схемы рис. 4 может быть произведен с помощью уравнения механической характеристики, выведенного для линеаризованной системы [9].

Пусть задано значение крутизны характеристики двигателя s :

$$s = \frac{\Delta n}{\Delta I_A} = \frac{I_{\text{ном}}}{I_{\text{ном}}}. \quad (22)$$

Из уравнения механической характеристики двигателя в схеме рис. 4 (см. [9]) получаем:

$$s = \left[R_2 - \frac{K_{\text{сбл}} (\beta + R_{\text{МУ}})}{K_{\text{сбл}} + R_{\text{У2}}} \right] \frac{1}{R_{\text{ном}} - r_A}, \quad (23)$$

где $R_{\text{ном}} = \frac{U_{\text{ном}}}{I_{\text{ном}}}$ — номинальное сопротивление двигателя;

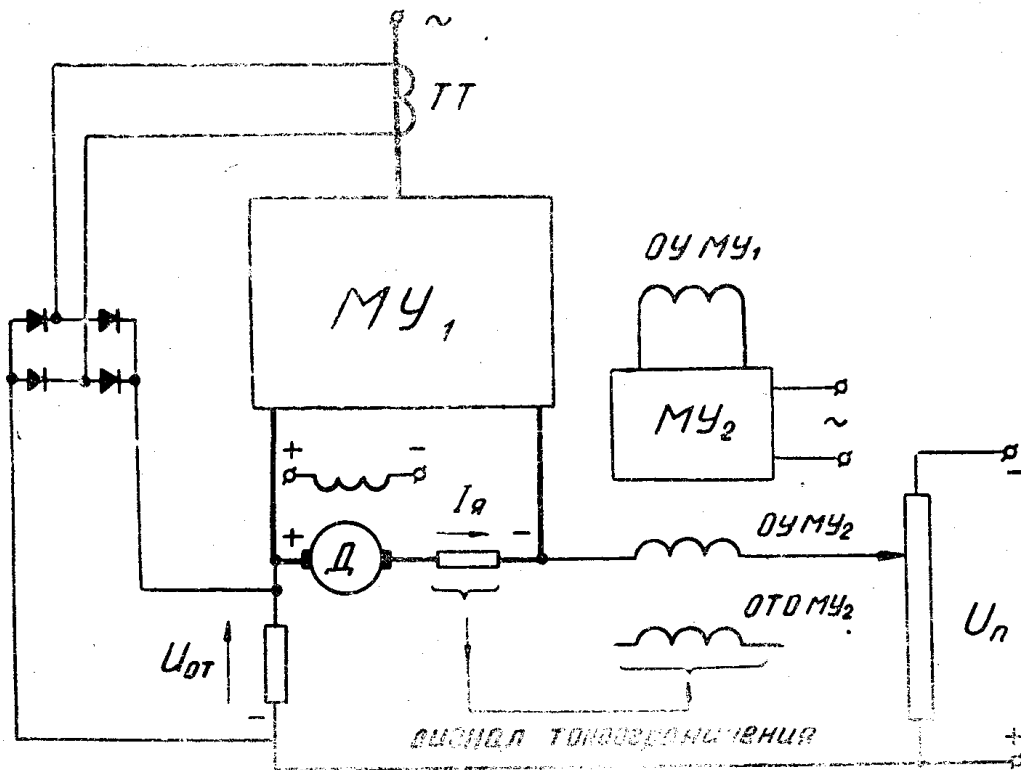


Рис. 4.

R_{y2} — полное сопротивление цепи управления $МУ_2$ в схеме рис. 4;

$K_{общ} = K_1 \cdot K_2$ — общий коэффициент усиления привода;

K_1 — коэффициент усиления $МУ_1$, в/а;

K_2 — коэффициент усиления $МУ_2$;

β — коэффициент положительной обратной связи по току.

Выражение (23) позволяет по известным значениям s и β найти значение $K_{общ}$ для любой части диапазона скоростей двигателя:

$$K_{общ} = \frac{[R_э - s(R_{ром} - r_я)] R_{y2}}{\beta - R_я + s(R_{юм} - r_я)}, \quad (24)$$

где $R_я$ — сопротивление якоря в реальной схеме (может отличаться от $r_я$ при введении добавочных сопротивлений).

По найденному $K_{общ}$ и известному K_1 может быть найден коэффициент усиления промежуточного усилителя K_2 , по которому подбирается характеристика и выбирается далее сам усилитель. Затем, по уточненным значениям K_1 и K_2 по описанной в [9] методике необходимо проверить, удовлетворяет ли привод поставленным требованиям.

Иногда вместо понятия «крутизна» характеристики пользуются понятием «стабильность работы на заданной скорости», которая определяется отношением изменения скорости к заданной при определенном изменении нагрузки двигателя.

$$\delta = \left(\frac{\Delta n}{n} \right) \Delta I_я = \text{const} \quad (25)$$

Если перепад нагрузки двигателя принять равным номинальному току якоря $\Delta I_{\alpha} = I_{\alpha \text{ ном}}$, то связь между крутизной характеристики и стабильностью будет определяться выражением

$$s = \delta v_0, \quad (26)$$

где $v_0 = \frac{n}{n_{\text{ном}}}$ — относительное значение заданной скорости.

Выбор схемы токоограничения двигателя

Без промежуточного усилителя обеспечить бесконтактное токоограничение двигателя в системе МУС-Д не представляется возможным, так как за счет небольшого приращения тока якоря от тока отсечки $I_{\text{отс}}$ до тока упора $I_{\text{уп}}$ должен быть получен сигнал, соизмеримый по мощности с сигналом от источника задающего напряжения. Причем этот сигнал необходимо подавать в общую цепь сравнения, так как МУ может иметь лишь две обмотки управления (как в приводе ПМУ-М).

Используя промежуточный магнитный усилитель, имеющий несколько обмоток управления, можно сравнительно просто решить задачу токоограничения.

Наиболее широко распространенная схема токоограничения (рис. 5а) может быть рассчитана с помощью выражения:

$$\frac{[U_{\text{п}} - I_{\text{уп}}(\gamma_{\text{я}} - \beta)] w_{\text{у}}}{R_{\text{у}2}} = \frac{(I_{\text{уп}} - I_{\text{отс}}) \gamma_{\text{ш}} w_{\text{то}}}{\gamma_{\text{то}} + R_{\text{ср}}}, \quad (27)$$

где $R_{\text{ср}} = \frac{R_{\text{а}} \cdot R_{\text{б}}}{R_{\text{а}} + R_{\text{б}}}$ — сопротивление потенциометра напряжения сравнения;

$\gamma_{\text{то}}$ — сопротивление обмотки токоограничения.

Напряжение сравнения выбирается следующим образом:

$$U_{\text{ср}} \frac{R_{\text{а}}}{R_{\text{а}} + R_{\text{б}}} = I_{\text{отс}} \gamma_{\text{ш}}. \quad (28)$$

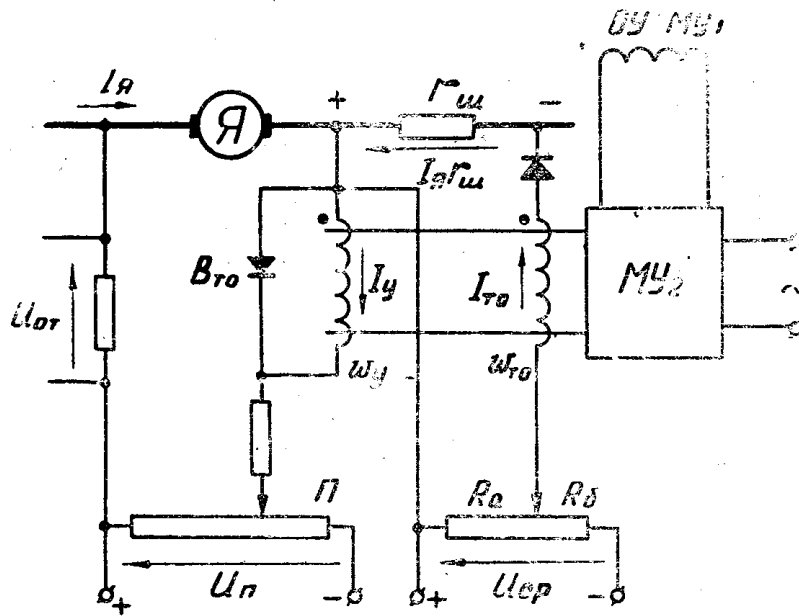
Подобрать параметры узла токоограничения в соответствии с выражением (27) не всегда удастся, так как величина м. д. с. управления оказывается очень большой. Некоторое облегчение дает применение последовательного нелинейного сопротивления с характеристикой барретора, позволяющего ограничить величину тока в обмотке управления.

В случае невозможности подбора нужного барретора ограничение тока в обмотке управления МУ₂ можно обеспечить, включая параллельно обмотке управления нелинейный элемент с характеристикой стабиловольта, например, кремниевый стабилитрон. Подобной характеристикой обладают также селеновые выпрямители в прямом направлении. Количество и тип шайб подбирается на основании следующих соображений: 1. Вентиль токоограничения должен «открываться», когда ток в обмотке управления МУ близок к току насыщения (см. рис. 3 [9]), то есть

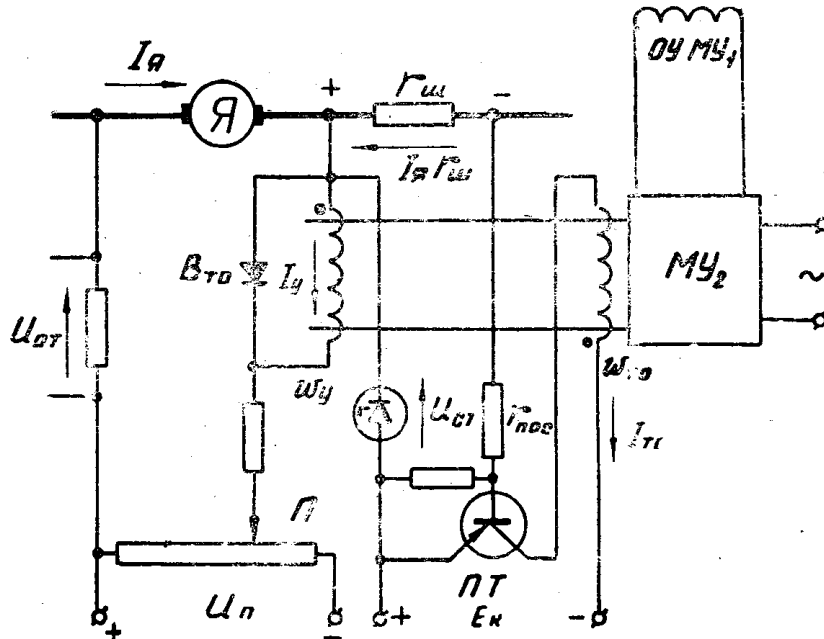
$$E_{\text{в то}} = I_{\text{у макс}} \gamma_{\text{у}}. \quad (29)$$

2. Вентиль должен быть рассчитан на ток

$$I_{\text{то}} \geq \frac{U_{\text{п}}}{R_{\text{у}2}} - I_{\text{у макс}}. \quad (30)$$



а)



б)

Рис. 5.

Необходимо отметить, что применение вентиля несколько сдвигает вправо характеристику управления МУ₂ за счет однонаправленного протекания токов четных гармоник. Этот сдвиг может быть устранен соответствующим подбором смещения усилителя.

Изменение вида характеристики управления при включении В_{т0} — весьма незначительное.

Схема рис. 5а может быть несколько видоизменена, если вместо

источника напряжения сравнения применить кремниевый стабилитрон. При использовании маломощных стабилитронов (ток до 35 ма) требуется применять специальный усилитель токоограничения, который успешно может быть выполнен на одном полупроводниковом триоде. Схема токоограничения получает вид рис. 5б. При наличии стабилитронов на большие токи можно обойтись без дополнительного триода.

Параметры схемы токоограничения по рис. 5б могут быть рассчитаны на основании следующего выражения:

$$\frac{(I_{уп} - I_{отс}) \Gamma_{ш} \alpha W_{то}}{R_{вх}(1 - \alpha)} = (1,1 \div 1,2) I_{у макс} W_{у}, \quad (31)$$

где α — коэффициент усиления по току полупроводникового триода в схеме с общей базой;

$$R_{вх} = \Gamma_{пос} + \Gamma_6 + \Gamma_9 \left(\frac{\alpha}{1 - \alpha} + 1 \right) \quad \text{— входное сопротивление полупроводникового триода;}$$

$W_{то}$ — число витков обмотки токоограничения;

$I_{уп}, I_{отс}$ — соответственно значения токов упора и отсечки двигателя.

Кремниевый диод и сопротивление $\Gamma_{ш}$ выбираются на основании выражения

$$I_{отс} \Gamma_{ш} \geq U_{ст}, \quad (32)$$

где $U_{ст}$ — напряжение стабилизации диода.

Применение схемы рис. 5б позволяет эффективно ограничивать токи двигателя при установившихся режимах, получить хорошую пусковую диаграмму и приблизить систему МУС-Д по пусковым свойствам к наиболее совершенным системам электропривода. Для обеспечения устойчивой работы системы МУС-Д в режиме токоограничения необходимо включить форсирующее звено в цепь задержанной обратной связи по току, то есть шунтировать $\Gamma_{пос}$ на схеме рис. 5а емкостью (можно электролитической).

Устойчивая работа системы по схеме рис. 4 до вступления в действие узла токоограничения обеспечивается применением гибкой обратной связи, охватывающей промежуточный усилитель, и включением последовательного интегрирующего звена (шунтированием обмотки $W_{то}$ и $B_{то}$ емкостью). Расчет параметров корректирующих звеньев может производиться любыми известными методами теории автоматического регулирования после соответствующей линеаризации системы и определения параметров, определяющих поведение ее в динамике [10].

ЛИТЕРАТУРА

1. М. А. Боярченков. Некоторые вопросы применения однофазного магнитного усилителя с самонасыщением для управления электроприводом постоянного тока. *Электричество*. № 8, 1963.

2. А. Я. Петровский, Я. Б. Розман. Регулируемый электропривод с магнитными усилителями. Издательство «Энергия», 1964.

3. F. K ü m m e l. Verhalten von Magnetverstärkern bei Motorbelastung. *ETZ—A*, Bd. 8. № 11, 1959.

4. Магнитные усилители УМП и блоки промежуточных магнитных усилителей БО. *Информация* № 42 (630) ЦИНТИЭиП.

5. М. А. Боровиков. Расчет характеристик двигателя постоянного тока, регу-

лируемого при помощи однофазного магнитного усилителя с самонасыщением. Межвузовский сборник по вопросам автоматизации производства. Новосибирск, 1964.

6. М. А. Боровиков. Работа трехфазного магнитного усилителя с самонасыщением на якорь двигателя постоянного тока независимого возбуждения. Труды четвертого Всесоюзного совещания по автоматизированному электроприводу. Издательство «Энергия», 1965.

7. М. А. Боярченков, М. А. Розенблат. Работа магнитного усилителя на противо-э. д. с. Автоматика и телемеханика, т. XXIII, № 1, 1962.

8. М. А. Боровиков. Особенности работы трехфазного магнитного усилителя на якорь двигателя постоянного тока на низких скоростях. Известия ТПИ, том 153, 1965.

9. М. А. Боровиков. Расчет характеристик двигателя в автоматизированных системах МУС-Д методом линеаризации магнитного усилителя. Известия ТПИ, том 153, 1965.

10. М. А. Боровиков. Динамика электропривода по системе однофазный магнитный усилитель — двигатель. Известия вузов «Электромеханика», № 2, 1965.