

## ФИЗИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ В ФЕРРОМАГНИТНЫХ ПОДМАГНИЧИВАЕМЫХ УСТРОЙСТВАХ ПРИ ИМПУЛЬСНОМ УПРАВЛЕНИИ

В. П. ОБРУСНИК, А. В. КОБЗЕВ

(Представлена научно-техническим семинаром отдела статистических преобразователей НИИ АЭМ при ТПИ)

При построении систем регулирования—стабилизации напряжения, тока, мощности с силовыми ферромагнитными подмагничиваемыми устройствами (ФПУ) (например: магнитными усилителями (МУ) или подмагничиваемыми трансформаторами (ПТ), большое внимание уделяется выбору промежуточного усилителя. При этом, вследствие взаимовлияния этих двух элементов [3, 4, 5], выбор последнего в значительной мере определяет такие характеристики регулятора, как схема силовой части, к. п. д., стойкость к перегрузкам и коротким замыканиям, быстродействие, коэффициент усиления по мощности. Авторами статьи установлено, что наибольший положительный эффект при использовании этого взаимовлияния можно получить, если для управления простейшим ФПУ (рис. 1, а) с одной обмоткой управления применить промежуточный полупроводниковый усилитель класса  $D$ , реализующий способ импульсного подмагничивания, подробно описанный в работах [1, 2]. Кратко он заключается в том, что в обмотку управления, шунтированную обратным вентилем, подаются узкие, однополярные импульсы напряжения с удвоенной частотой сети в моменты, когда ток в этой обмотке минимален. При этом резко снижается требуемая мощность блока управления, упрощается схема силовой цепи и повышается ее к. п. д. Легко формируются характеристики, обеспечивающие естественную защиту от перегрузок и коротких замыканий. Такой способ импульсного подмагничивания ФПУ в настоящее время применен в ряде промышленных установок, он обеспечивает им высокую надежность и хорошие эксплуатационные качества.

Ниже дается анализ физических процессов, энергетических соотношений и других показателей, импульсно подмагничиваемых ФПУ, с целью их теоретического обоснования, объяснения существа происходящих явлений, выявления возможности оптимизации и получения практических выводов.

Рассуждения проводятся применительно к схеме одного из вариантов ФПУ на рис. 1, а, где квантование напряжения подмагничивания осуществляется быстродействующим ключом  $K$ . Для этой схемы можно выделить три цепи, каждая из которых характеризуется определенным законом изменения тока: цепь ключа, где протекает ток  $i_y$ , потребляемый от источника подмагничивания, цепь обмотки  $W_y$  с током подмагничивания  $i_d$  и цепь диода  $D$ , в которой протекает ток  $i_d$ .

На активном сопротивлении обмотки  $W_y$  при протекании тока  $i_d$

выделяется мощность  $P_d$ . По отношению к мощности нагрузки  $P_H$  она характеризуется коэффициентом передачи мощности самого ФПУ, равным

$$K'_p = \frac{P_H}{P_d} \quad (1)$$

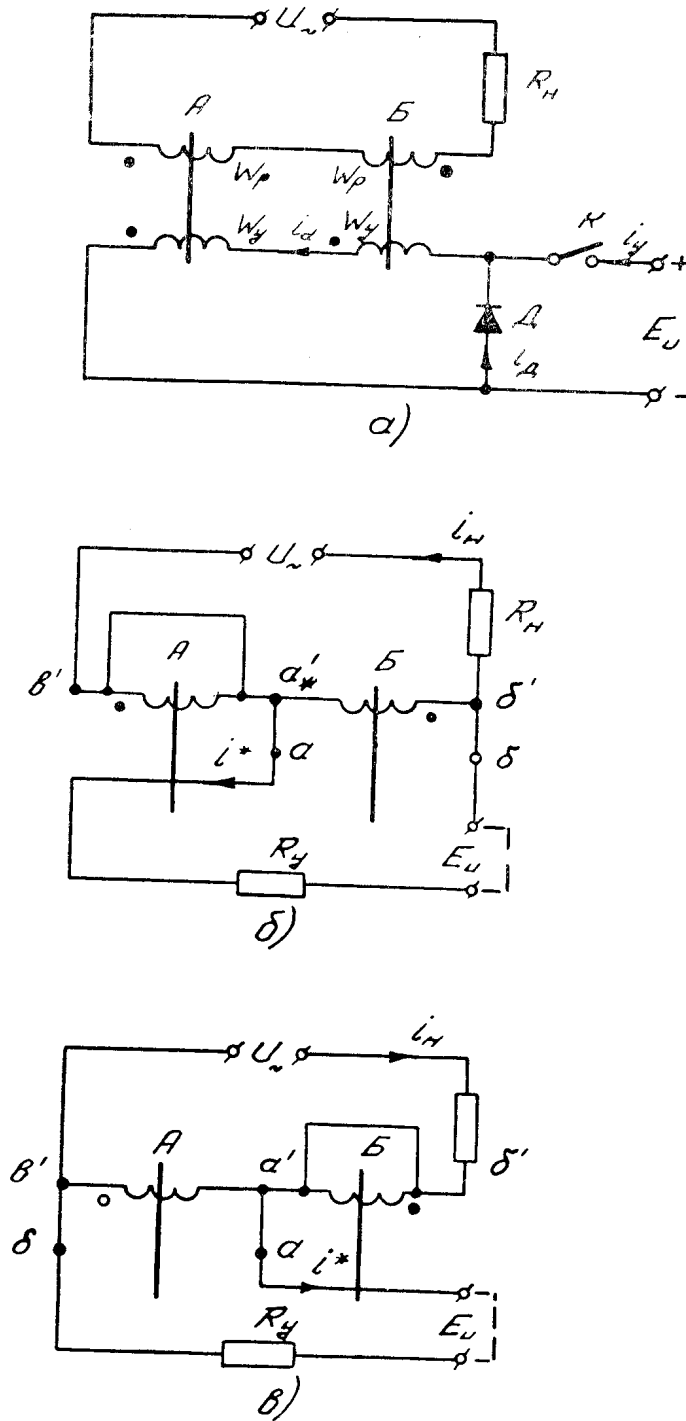


Рис. 1

Этот коэффициент  $K'_p$  зависит от конструктивных параметров ФПУ и не зависит от способа управления.

От источника подмагничивания потребляется мощность  $P_y$ , которая характеризует коэффициент передачи по мощности в цепи подмагничивания

$$K''_p = \frac{P_d}{P_y} \quad (2)$$

Коэффициент  $K''_p$  характерен только для импульсного подмагничивания, поэтому ниже будет проанализирован более подробно.

Очевидно, что общий коэффициент усиления по мощности ФПУ, управляемого от промежуточного усилителя, будет равен произведению  $K'_p$  и  $K''_p$ :  $K_p = K'_p \cdot K''_p$ .

Поскольку включение диода  $D$  обеспечивает ФПУ режим работы со свободными четными гармониками тока, то для составления расчетной схемы будут использованы выводы, известные в теории МУ [6]. Так, интервал насыщения сердечника  $A$  может быть представлен схемой на рис. 1, б — в предположении, что числа витков рабочей обмотки и обмотки управления ФПУ одинаковы. При насыщении сердечника  $A$  его рабочая обмотка как бы закорачивается, а ненасыщенный сердечник  $B$  шунтируется цепью управления. Если принять условие, что  $R_n \ll R_y$ , то ток в цепи управления будет полностью определяться рабочей цепью и равен в этот полупериод току нагрузки:  $i^* = i_n$ . В следующий полупериод сердечники меняются местами, и этот интервал можно представить схемой (рис. 1, в). Здесь зажим б перебрасывается в точку в, а ток  $i^* = i_n$  по-прежнему протекает от зажима а к зажиму б. Таким образом, через цепь управления протекает выпрямленный ток нагрузки и рабочую цепь можно рассматривать по отношению к цепи управления как генератор тока четных гармоник. Описанные явления хорошо отражаются схемой замещения контура подмагничивания ФПУ на рис. 2, а, где

$E_u$  — э. д. с. источника подмагничивания,

$R_u$  — внутреннее сопротивление этого источника,

$R_y$  — сопротивление обмотки управления,

$L_y$  — индуктивность ненасыщенного сердечника с обмоткой  $W_y$ ,

$i_{2n} \sim$  токи генераторов четных гармоник при  $n = 1, 2, 3 \dots$

В дальнейшем с целью упрощения и лучшего выяснения физической сущности процессов к рассмотрению принят только генератор тока удвоенной частоты  $i_2 \sim$  и для цепи с импульсным управлением получена схема на рис. 2 б, где элементы  $K$  и  $D$  перенесены со схемы на рис. 1, а. Здесь при замкнутом ключе  $K$  ток протекает через источник подмагничивания  $E_u, R_u$ , а при разомкнутом — через обратный клапан  $D$ . Поскольку диод с током можно рассматривать как элемент, проводящий в обоих направлениях, то схема рис. 2, б преобразуется в схему рис. 2, в, которая и принята за расчетную.

По методу наложения схема на рис. 2, в представлена двумя ее составляющими: одна на рис. 2, г, где действует только источник э. д. с.  $E_u$ , а зажимы генератора тока разомкнуты (его внутреннее сопротивление  $R_r$  принимается равным  $\infty$ ), и другая на рис. 2, д, где действует только генератор тока, а зажимы источника эдс закорочены (его внутреннее сопротивление равно нулю).

Для схемы рис. 2, г, могут быть составлены уравнения: для интервала времени, когда к обмотке  $W_y$  приложено напряжение управляющего импульса, то есть ключ  $K$  находится в положении 1, и  $0 \leq \alpha \leq \alpha_n$ ,

$$E_u - R_u \cdot i_y - R_y \cdot i_d - L_y \frac{di_L}{dt} = 0. \quad (3)$$

Учитывая, что  $\alpha = \omega t$  и в рассматриваемом интервале  $i_y' = i_d = i_L$ , можно получить

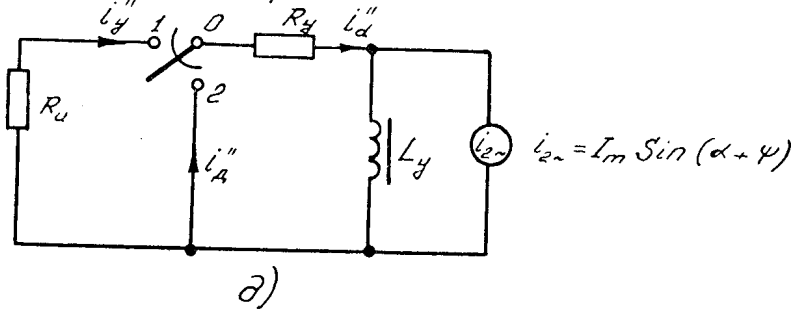
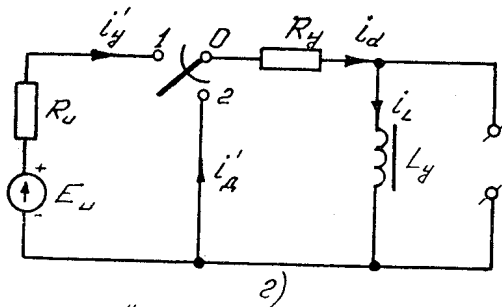
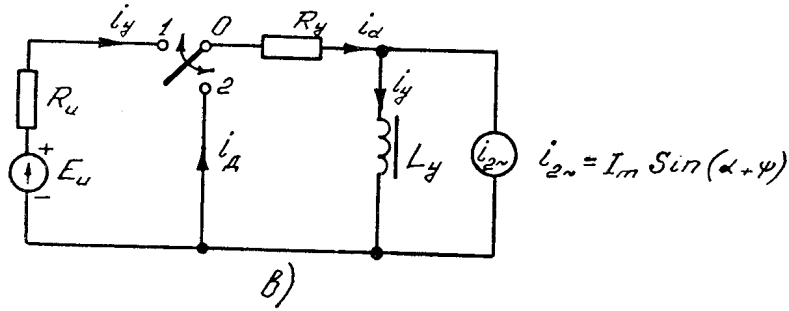
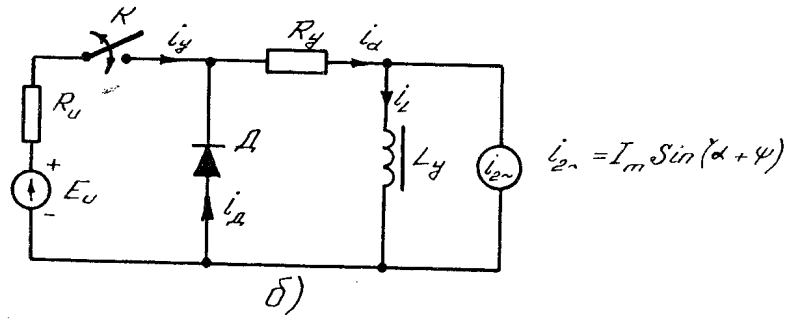
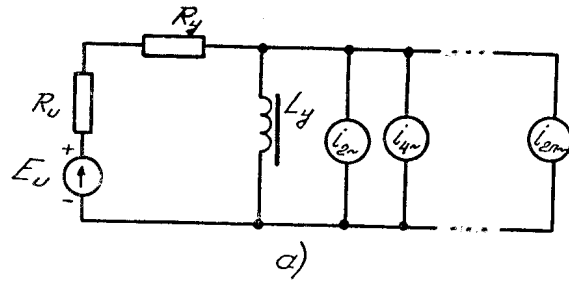


Рис. 2

$$\omega L_y \frac{di_L}{d\alpha} + Ri_L = E_u, \quad (4)$$

где

$$R = R_u + R_y.$$

Для интервала паузы, когда источник напряжения постоянного тока отключен, ключ  $K$  находится в положении 2 и  $\alpha_u \leq \alpha \leq \alpha_T$ :

$$\omega L_y \frac{di_L}{d\alpha} + R_y i_L = 0. \quad (5)$$

Решая (4), (5) и припасовывая решения, получаем при

$$i_L = K_1 e^{-\frac{R}{\omega L_y} \cdot \alpha} + \frac{E_u}{R}, \quad (6)$$

где

$$k_1 = \frac{\frac{E_u}{R} \left( e^{-\frac{R_y}{\omega L_y} \cdot \alpha_T} \cdot e^{\frac{R_y}{\omega L_y} \alpha_u} - 1 \right)}{1 - e^{-\frac{R}{\omega L_y} \alpha_u} \cdot e^{\frac{R_y}{\omega L_y} \cdot L_u} \cdot e^{-\frac{R_y}{\omega L_y} \cdot \alpha_T}}, \quad (7)$$

При  $\alpha_u \leq \alpha \leq \alpha_T$ :

$$i_L = k_2 e^{-\frac{R_y}{\omega L_y} \alpha} \quad i'_y = 0, \quad i'_d = i_L, \quad (8)$$

где

$$k_2 = \frac{\frac{E_u}{R} e^{\frac{R_y}{\omega L_y} \alpha_u} \left( 1 - e^{-\frac{R}{\omega L_y} \alpha_u} \right)}{1 - e^{-\frac{R}{\omega L_y} \alpha_u} \cdot e^{\frac{R_y}{\omega L_y} \alpha_u} \cdot e^{-\frac{R_y}{\omega L_y} \alpha_T}}. \quad (9)$$

Мощность, рассеиваемая в активном сопротивлении обмотки управления, будет равна

$$P_d = \frac{1}{\alpha_T} \int_0^{\alpha_T} R_y i_d^2(\alpha) \cdot d\alpha = \left( \frac{E_u}{R} \right)^2 \cdot R_y \cdot \gamma + \frac{R_y}{\alpha_T} \cdot k_1^2 \frac{\omega L_y}{2R} \left( 1 - e^{-\frac{2R}{\omega L_y} \alpha_u} \right) + \frac{R_y}{\alpha_T} 2k_1 \frac{E_u}{R} \cdot \frac{\omega L_y}{R} \left( 1 - e^{-\frac{R}{\omega L_y} \alpha_u} \right) + \frac{R_y}{\alpha_T} k_2^2 \frac{\omega L_y}{2R_y} \left( e^{-\frac{2R_y}{\omega L_y} \alpha_u} - e^{-\frac{2R_y}{\omega L_y} \alpha_T} \right). \quad (10)$$

Здесь  $\gamma = \frac{\alpha_u}{\alpha_T}$  — относительная длительность управляющего импульса.

Мощность, потребляемая от источника подмагничивания:

$$P_y = \frac{1}{\alpha_T} \int_0^{\alpha_T} E_u \cdot i'_y(\alpha) d\alpha = \frac{E_u^2}{R} \gamma + \frac{E_u}{\alpha_T} k_1 \frac{\omega L_y}{R} \left( 1 - e^{-\frac{R}{\omega L_y} \alpha_u} \right). \quad (11)$$

Для наглядности анализа и выводов приняты допущения:  $L_y \rightarrow \infty$ ;  $R_u = 0$ . Тогда

$$i_y = i_d = i_L = \lim_{L_y \rightarrow \infty} k_1 \cdot e^{-\frac{R_y \alpha}{\omega L_y}} + \lim_{L_y \rightarrow \infty} \frac{E_u}{R_y} = \frac{E_u}{R} \gamma; \quad 0 \leq \alpha \leq \alpha_u \quad (12)$$

$$\left. \begin{aligned} i_y &= 0 \\ i_d = i_L &= \lim_{L_y \rightarrow \infty} k_2 e^{-\frac{R_y \alpha}{\omega L_y}} = \frac{E_u}{R} \gamma \end{aligned} \right\} \alpha_u \leq \alpha \leq \alpha_T. \quad (12a)$$

$$\left. \begin{aligned} P_d &= \lim_{L_y \rightarrow \infty} P_d(L_y) = \frac{E_u^2}{R} \gamma^2 \\ P_y &= \lim_{L_y \rightarrow \infty} P_y(L_y) = \frac{E_u^2}{R} \gamma^2 \end{aligned} \right\}. \quad (13)$$

Как и следовало ожидать, при отсутствии генератора тока и  $R_u=0$  мощность, потребляемая от источника подмагничивания  $P_y$ , равна мощности, рассеиваемой в активном сопротивлении обмотки управления  $P_d$ , то есть коэффициент передачи мощности в цепи подмагничивания равен единице.

В схеме рис. 2,  $\partial$  на удвоенной частоте всегда  $\omega L_y \gg R$  и в интервале  $0 \leq \alpha \leq \alpha_u$ ,

$$i''_y = i''_d = I_m \sin(\alpha + \psi), \quad i_L = 0, \quad (14)$$

а в интервале паузы, когда  $\alpha_u \leq \alpha \leq \alpha_T$ , можно получить

$$i_L = 0, \quad i''_y = 0, \quad i''_d = I_m \sin(\alpha + \psi). \quad (15)$$

Тогда по методу наложения:  $i_y = i_y' + i_y''$ ;  $i_d = i_d' + i_d''$ .

$$i_d = i_y = k_1 e^{\frac{R}{\omega L_y} \alpha} + \frac{E_u}{R} + I_m \sin(\alpha + \psi) \quad (16)$$

при  $0 \leq \alpha \leq \alpha_u$

$$i_y = 0; \quad i_d = k_2 e^{-\frac{R}{\omega L_y} \alpha} + I_m \sin(\alpha + \psi) \quad (17)$$

при  $\alpha_u \leq \alpha \leq \alpha_T$ .

$$\begin{aligned} P_y &= \frac{1}{\alpha_T} \int_0^{\alpha_T} E_u \cdot i_y(\alpha) d\alpha = \frac{E_u^2}{R} \gamma + \frac{E_u}{\alpha_T} k_1 \frac{\omega L_y}{R} \left( 1 - e^{-\frac{R}{\omega L_y} \alpha_u} \right) - \\ &\quad - \frac{E_u}{\alpha_T} I_m [\cos(\alpha_u + \psi) - \cos \psi]. \end{aligned} \quad (18)$$

$$\begin{aligned} P_d &= \frac{E_u^2}{R^2} \cdot R_y \cdot \gamma + \frac{1}{2} R_y I_m^2 + \frac{R_y}{\alpha_T} k_1^2 \frac{\omega L_y}{2R} \left( 1 - e^{-\frac{2R}{\omega L_y} \alpha_u} \right) + \\ &\quad + \frac{R_y}{\alpha_T} \cdot \frac{E_u}{R} 2k_1 \frac{\omega L_y}{R} \left( 1 - e^{-\frac{R}{\omega L_y} \alpha_u} \right) - \frac{R_y}{\alpha_T} 2k_1 I_m \cdot \frac{e^{-\frac{R}{\omega L_y} \alpha_u}}{\left( \frac{R}{\omega L_y} \right)^2 + 1}. \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& \left[ \frac{R}{\omega L_y} \sin(\alpha_u + \psi) + \cos(\alpha_u + \psi) \right] + \frac{R_y}{\alpha_T} 2k_1 \cdot I_m \frac{1}{\left( \frac{R}{\omega L_y} \right)^2 + 1} \times \\
& \times \left[ \frac{R}{\omega L_y} \sin\psi + \cos\psi \right] - \frac{R_y}{\alpha_T} \cdot \frac{E_u}{R} \cdot 2I_m \cos(\alpha_u + \psi) + \frac{R_y}{\alpha_T} \cdot \frac{E_u}{R} 2I_m \cos\psi + \\
& + \frac{R_y}{\alpha_T} k_2^2 \frac{\omega L_y}{2R_v} \left( e^{-\frac{2R_y}{\omega L_y} \alpha_u} - e^{\frac{2R_y}{\omega L_y} \alpha_T} \right) \frac{R_v}{\alpha_T} \cdot 2k_2 I_m \frac{e^{\frac{R_y}{\omega L_y} \alpha_T}}{\left( \frac{R_y}{\omega L_y} \right)^2 + 1} \times \\
& \times \left[ \frac{R_v}{\omega L_y} \sin(\alpha_T + \psi) + \cos(\alpha_T + \psi) \right] + \frac{R_y}{\alpha_T} 2k_2 \cdot I_m \frac{e^{-\frac{R_y}{\omega L_y} \alpha_u}}{\left( \frac{R_y}{\omega L_y} \right)^2 + 1} \times \\
& \times \left[ \frac{R_y}{\omega L_y} (\sin \alpha_u + \psi) + \cos(\alpha_u + \psi) \right]. \quad (19)
\end{aligned}$$

Для дальнейшего анализа процессов устанавливается связь максимального значения тока второй гармоники  $I_m$  со средним значением тока обмотки подмагничивания  $I_{дср}$ :

$$I_{дср} = \frac{1}{\alpha_T} \int_0^{\alpha_T} i_d(\alpha) d\alpha, \quad (20)$$

$$I_m = K_{M2} \cdot I_{дср}, \quad (21)$$

где

$K_{M2}$  — коэффициент модуляции тока подмагничивания второй гармоникой; он в общем случае нелинейно зависит от  $I_{дср}$ .

Из выражений (16) и (17) с учетом сделанных выше допущений можно найти:

при  $0 \leq \alpha \leq \alpha_u$

$$i_d = \lim_{L_y \rightarrow \infty} i_d(L_y) = \frac{E_u}{R} \gamma + I_m \sin(\alpha + \psi); \quad (22a)$$

при  $\alpha_u \leq \alpha \leq \alpha_T$

$$i_d = \lim_{\alpha_T \rightarrow \infty} i_d(L_y) = \frac{E_u}{R} \gamma + I_m \sin(\alpha + \psi). \quad (22b)$$

Тогда

$$I_{дср} = \frac{1}{\alpha_T} \int_0^{\alpha_T} i_d(\alpha) d\alpha = \frac{E_u}{R} \gamma. \quad (23)$$

Как видно из (23), среднее значение тока подмагничивания  $I_{дср}$  не зависит от степени его модуляции, а зависит только от параметров цепи и уровня регулирования, и выражение (21) примет вид

$$I_m = K_{M2} \cdot \frac{E_u}{R} \gamma. \quad (24)$$

С учетом (24), а также сделанных допущений, что  $R_u = 0$ ;  $L_y \rightarrow \infty$  из выражений (18, 19) можно получить удобные расчетные зависимости:

$$P_y = \lim_{L_y \rightarrow \infty} P_y(L_y) = \frac{E_u^2}{R} \gamma^2 - K_{M2} \frac{E_u^2}{R \alpha_T} \gamma [\cos(\alpha_u + \psi) - \cos\psi], \quad (25)$$

$$P_d = \lim_{L_y \rightarrow \infty} P_d(L_y) = \frac{E_u^2}{R} \gamma^2 \left( 1 + \frac{1}{2} K_{M2}^2 \right). \quad (26)$$

На рис. 3 приведены временные диаграммы токов в цепи с импульсным подмагничиванием, построенные по выражениям (16, 17). Расчетные токи  $i_d$ ,  $i_y$  и  $i_j = i_d \cdot i_y$  на этом рисунке очень близки к временным ди-

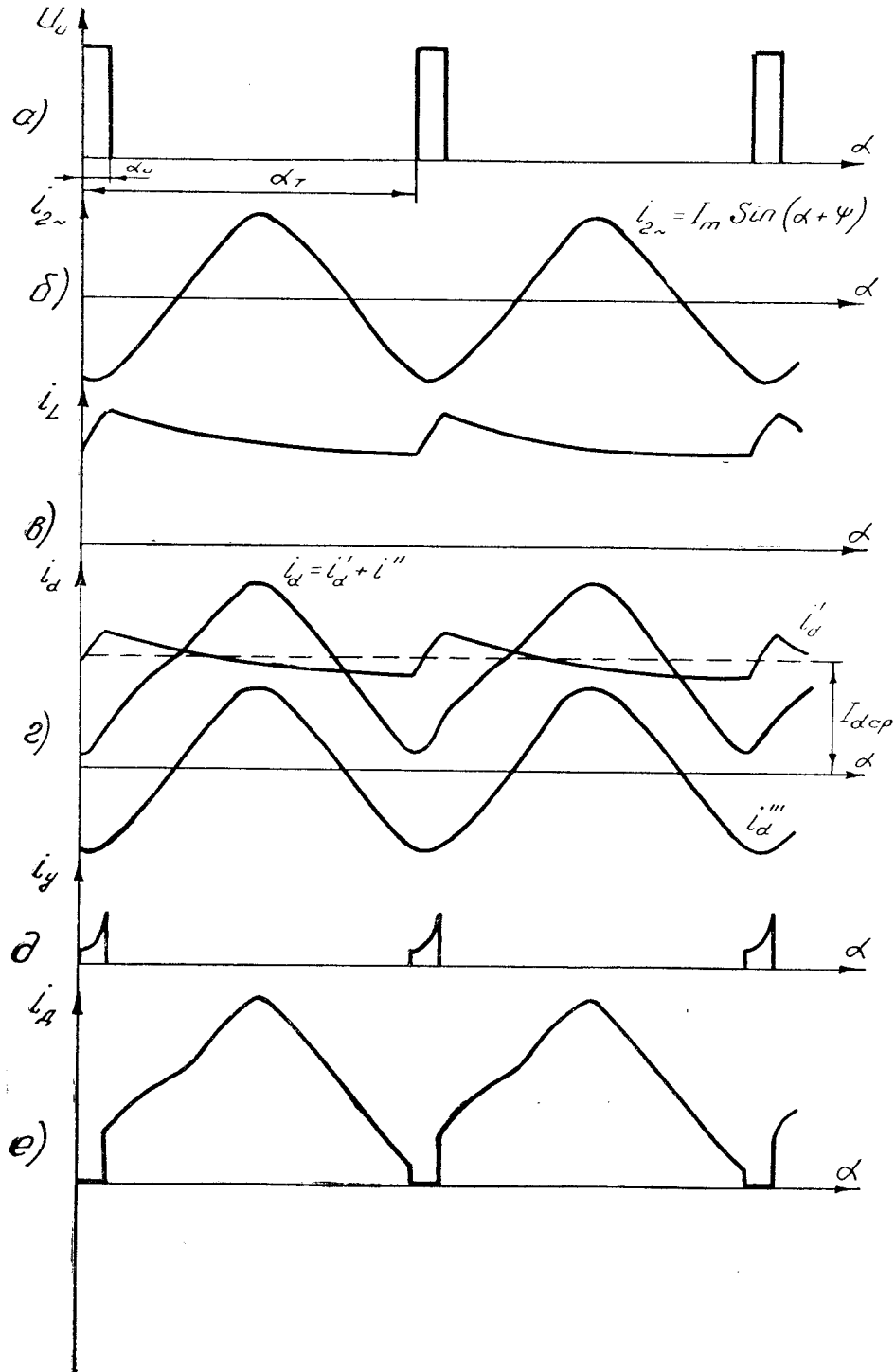


Рис. 3



аграммам, снятым опытно в реальных ФПУ, что подтверждает правильность расчетной схемы рис. 2, в.

Анализ выражений (25, 26) позволяет сделать ряд интересных выводов.

Так, если  $\gamma=1$ ,  $\alpha_u=\alpha_T$ , то есть дискретное управление переходит в непрерывное, то

$$P_y = \frac{E_u^2}{R},$$

$$P_d = \frac{E_u^2}{R} \left( 1 + \frac{1}{2} K_{M2}^2 \right) \text{ и } k''_p = \frac{P_d}{P_y} = 1 + \frac{1}{2} K_{M2}^2.$$

Отсюда получается, что если коэффициент модуляции тока подмагничивания  $K_{M2}$  равен 1, то коэффициент передачи по мощности в цепи подмагничивания  $K''_p$  будет равен 1,5.

Если же  $K_M=0$ , что имеет место при очень сильном насыщении сердечников постоянным полем, то  $K''_p=1$ . Очевидно, что при непрерывном подмагничивании энергетические соотношения в цепи управления не зависят от фазы токов четных гармоник.

При изменении же коэффициента модуляции максимально возможный диапазон изменения  $K''_p$  от 1 до 1,5. Ниже для оценки преимуществ импульсного подмагничивания необходимо сравнивать значения  $K''_p$ , характеризующие этот способ с  $K''_p=1 \div 1,5$ .

На рис. 4 приведены зависимости  $k''_p=f(\gamma; \Psi)$ , построенные по выражениям (25), (26) для коэффициента модуляции  $k_{M2}=1$ , а на рис. 5 — зависимость  $k''_{pmax}=f(k_{M2})$ , при  $\gamma=1/12$  ( $\alpha_u = \frac{\pi}{6}$ ). Анализ кривых рис. 4, 5 позволяет сделать еще ряд важных выводов.

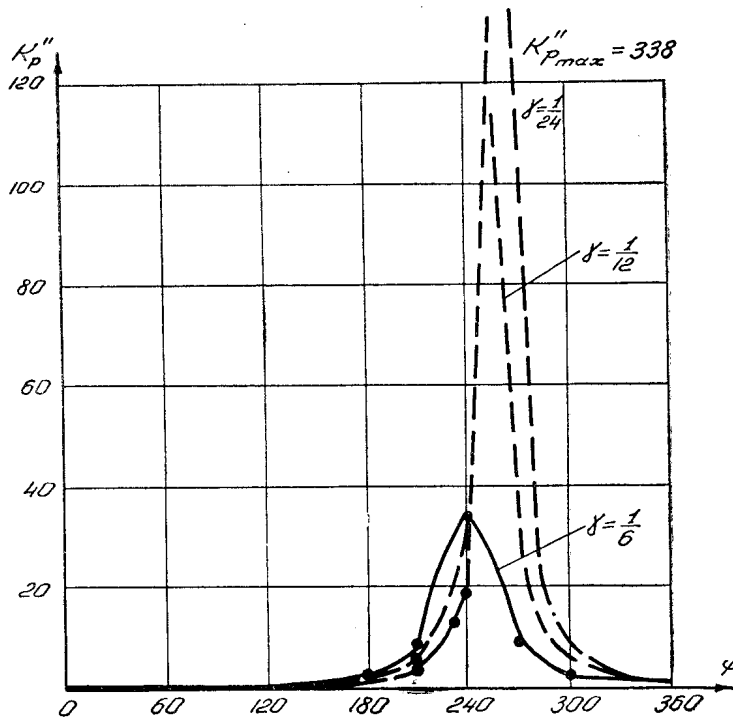


Рис. 4

1. Коэффициент передачи по мощности в цепи подмагничивания  $k''_p$  сильно зависит от фазы тока второй гармоники относительно импуль-

са. В частности, если  $\Psi = 0 \div 150^\circ$  (рис. 4), то  $K''_p$  при импульсном подмагничивании оказывается даже меньше, чем при непрерывном ( $K''_p < 1,5$ ). В то же время при  $\Psi = 240 \div 265^\circ$   $k''_p$  увеличивается в не-

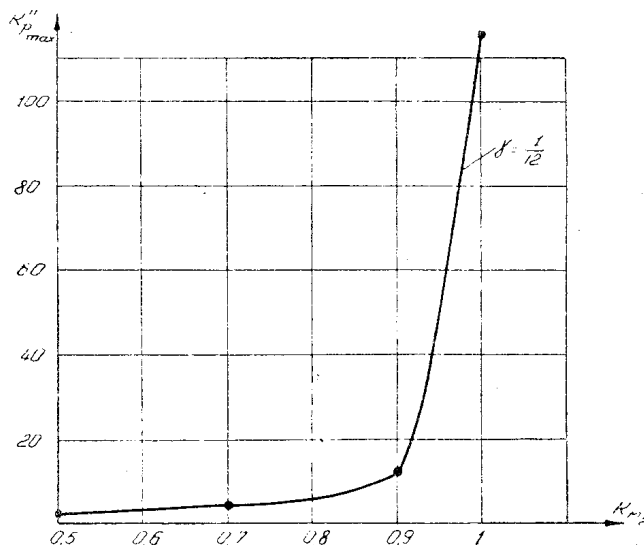


Рис. 5

сколько десятков раз. Это обстоятельство необходимо учитывать при проектировании промежуточных усилителей для импульсного управления ФПУ. В частности, учитывая, что фаза второй гармоники тока зависит от ряда факторов (степени подмагничивания, характера и величины нагрузки и т. д.), необходимо строить усилитель так, чтобы и фаза импульса изменялась в соответствии с изменением фазы второй гармоники тока.

2. Максимальное значение коэффициента  $k''_p$ , а следовательно, и общего коэффициента усиления ФПУ по мощности  $k''_p$ , очень сильно зависит от ширины импульса. Так, при  $\alpha_u = \frac{\pi}{12}$  ( $\gamma = \frac{1}{24}$ )

$$K''_{pmax} = 338,$$

(рис. 4), в то же время при  $\alpha_u = \frac{\pi}{3}$  ( $\gamma = \frac{1}{6}$ )  $k''_{pmax} = 34,7$ .

Отсюда следует, что для поддержания коэффициента усиления по мощности на достаточно высоком уровне необходимо ограничивать предельную ширину импульса.

Поскольку для управления ФПУ требуется определенное среднее значение напряжения  $U_y = E_u \cdot \gamma$ , то этот важный вывод может быть сформулирован несколько по-иному: при импульсном управлении ФПУ очень выгодным оказывается резко повысить напряжение источника питания  $E_u$ . А так как при этом максимальное, требуемое по условиям регулирования  $\gamma$  уменьшается в этой же пропорции, то  $k''_{pmax}$  резко возрастает. Наряду с уменьшением мощности блока управления, уменьшаются и токи в цепи ключа, что является дополнительным положительным фактором и позволяет значительно сократить габариты и вес промежуточного усилителя.

3. Максимальное значение коэффициента  $k''_p$  резко меняется при изменении коэффициента модуляции тока подмагничивания  $K_{M2}$  (рис. 5).

Например, при  $\gamma = \frac{1}{12}$  и  $K_{M2} = 1$ ,  $k''_p$  будет равен 115,5, но уже при  $K_{M2} = 0,9$ ,  $k''_p = 12,7$ , а при  $K_{M2} = 0,5$ ,  $k''_p = 2,22$ .

Вопрос нахождения оптимального коэффициента модуляции тока еще изучен недостаточно, но имеющиеся опытные данные показывают, что в номинальном режиме для большинства проектируемых ФПУ  $K_{м2}$  лежит в пределах  $0,85 \div 0,9$ , что при соответствующем ограничении скважности импульса и выборе фазы импульса в пределах  $(240 \div 260^\circ)$  дает выигрыш в коэффициенте усиления по мощности при импульсном управлении по сравнению с непрерывным в  $5 \div 10$  и более раз.

Проведенный анализ физических процессов при импульсном подмагничивании позволил дать ряд важных практических рекомендаций, использование которых при проектировании промежуточных усилителей улучшит характеристики ФПУ и расширит возможности применения импульсного способа подмагничивания в автоматических установках различного практического назначения.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. В. П. Обрусник, А. В. Кобзев. Способ импульсного управления. Авторское свидетельство № 245 842, кл. 21a<sup>2</sup>18/08. Бюллетень изобретений № 20, 1969.

2. В. П. Обрусник, А. В. Кобзев. Режимы работы и характеристики однофазных ТРПШ при импульсном подмагничивании. Доклады VI научно-технической конференции по вопросам автоматизации производства. Том II, изд-во ТГУ, г. Томск, 1969.

3. В. П. Обрусник, А. В. Кобзев. Промежуточные усилители для подмагничиваемых регуляторов. Доклады VI научно-технической конференции по вопросам автоматизации производства. Том II, изд-во ТГУ, Томск, 1969.

4. А. М. Бамдас, С. В. Шапиро. Стабилизаторы напряжения и тока с подмагничиваемыми трансформаторами. «Энергия», 1965.

5. Э. С. Ачильдиева-Фролова. Процессы в цепях управления трансформаторов, регулируемых изменением подмагничивания. Автореферат кандидатской диссертации. Горький, 1968.

6. М. А. Розенблат. Магнитные элементы автоматики и вычислительной техники. «Наука», 1966.

---