

ЭЛЕКТРОННАЯ МОДЕЛЬ ЭЛЕКТРОМАШИННОГО УСИЛИТЕЛЯ ПОПЕРЕЧНОГО ПОЛЯ С ЕГО ВНУТРЕННИМИ ОБРАТНЫМИ СВЯЗЯМИ

В. П. ЛАГУНОВ, В. М. РИККОНЕН

(Представлена научным семинаром кафедр электрических машин и общей электротехники)

Электромашинные усилители с поперечным полем (ЭМУ) широко применяются в современных системах автоматического регулирования. Протекание переходных процессов в этих системах в значительной степени определяется статическими и динамическими свойствами ЭМУ, на которые, в свою очередь, оказывают сильное влияние его внутренние жесткие и гибкие обратные связи.

Рациональное использование этих связей дает возможность в некоторых случаях избежать специальные стабилизирующие устройства, а изменение коэффициентов отдельных обратных связей позволяет в широких пределах изменять скорость протекания переходного процесса на выходе усилителя.

По этой причине часто бывает важно исследовать раздельное влияние внутренних обратных связей, особенно гибких, на переходные процессы усилителя.

В том случае, когда ЭМУ применяется в системе, в которой предусмотрена глубокая форсировка, необходимо учитывать нелинейность кривой намагничивания второй ступени усилителя.

Учитывая вышесказанное, значительный интерес представляют структурная схема и электронная модель ЭМУ, в которых учитываются внутренние обратные связи, а также имеется возможность исследовать раздельное влияние их на динамические свойства ЭМУ. Кроме того, эта схема и модель должны учитывать нелинейность отдельных связей и параметров усилителя. Для получения соответствующей структурной схемы и модели необходимо рассмотреть дифференциальное уравнение переходных процессов ЭМУ, учитывающее вышечисленные факторы.

При составлении общего дифференциального уравнения ЭМУ для любых режимов нет необходимости использовать коэффициенты взаимной индуктивности между обмотками. Вывод получается проще и нагляднее, если при составлении этих уравнений оперировать с результирующими потоками, действующими по продольной и поперечной осям. Рассмотрим указанные потоки.

Поток в продольной оси. ЭМУ существенно отличается от обычных генераторов постоянного тока тем, что намагничивающая сила (н.с.) управляющей обмотки и сопротивление короткозамкнутой поперечной цепи относительно очень малы. Поэтому на режимы на-

званных обмоток оказывают большое влияние такие факторы, которые не влияют или почти не влияют на характеристики обычных генераторов.

К ним можно отнести следующие:

1. Размагничивающее действие потерь в стали якоря.
2. Замедленная коммутация тока поперечной цепи.
3. Сдвиг поперечных щеток, создающий по продольной оси машины в зависимости от направления сдвига размагничивающий или намагничивающий поток.

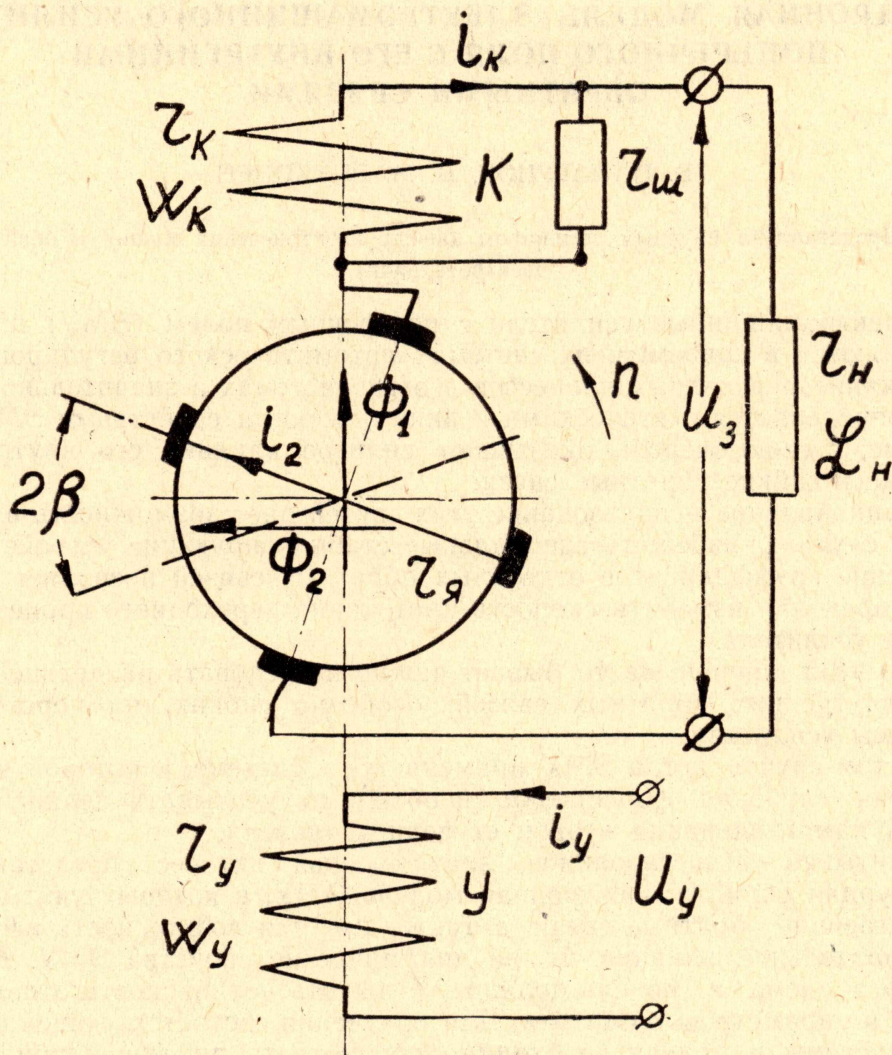


Рис. 1. Принципиальная схема ЭМУ.

4. Поток, имеющийся в недокомпенсированной машине за счет отсутствия равенства потоков продольной реакции якоря и компенсационной обмотки.

При ненасыщенной магнитной системе обычно считают, что н.с. за счет потерь в стали, действующая против н.с. обмотки управления, пропорциональна току поперечной цепи [1]. Такое положение справедливо в том случае, когда сохраняется пропорциональность между током i_2 и поперечным потоком. При наличии же насыщения магнитной системы второй ступени усиления и смещения щеток его с геометрической нейтрали это положение становится несправедливым. В этих слу-

чаях более правильно считать, что F_c за счет потерь в стали пропорциональна потоку поперечной цепи [2]

$$F_c = \kappa'_c \Phi_2 = \kappa_c e'_3,$$

где κ'_c и κ_c — коэффициенты пропорциональности между F_c и потоком поперечной оси Φ_2 и э. д. с. на продольных щетках e'_3 .

Размагничивающее действие токов замедленной коммутации в секциях, коммутируемых короткозамкнутыми щетками усилителя, теоретически и экспериментально исследованы многими авторами. Большинство из них при аналитическом расчете этого действия пользуются выражением, приведенном в [5]. Согласно этому выражению F_z является нелинейной функцией относительно тока поперечной цепи i_2 . Эта нелинейность в основном вносится за счет нелинейной зависимости переходного сопротивления щеточного контакта от величины тока поперечной цепи. Особенно она резко выражена в области малых значений поперечного тока.

Учитывая вышеизложенное, продольный поток может быть выражен уравнением

$$\Phi_1 = \lambda_1 [\omega_y i_y + \omega_k i_k \mp x \omega_y i_2 - k_c \Phi_2 - f_2(i_2) i_2 - (\omega_y - \omega_d) i_3], \quad (1)$$

где Φ_1 , λ_1 — магнитный поток и магнитная проводимость по продольной оси;

ω_1 , ω_k , ω_y и ω_d — число витков обмоток управления, компенсационной, якоря и дополнительного полюса;

$x = \frac{2p\beta}{\pi}$ — относительное смещение с нейтрали щеток попереч-

ной цепи (β — угол смещения, p — число пар полюсов);

$f_2(i_2) i_2$ — намагничивающая сила за счет реакции коммутационных токов в поперечной цепи;

$\kappa'_c \Phi_2$ — намагничивающая сила за счет потерь в стали якоря.

Поток в поперечной оси. В случае, когда щетки поперечной цепи находятся в нейтральном положении и когда поперечная магнитная цепь ненасыщена, магнитный поток прямо пропорционален поперечному току. При смещении щеток поперечной цепи с нейтрального положения значение поперечного магнитного потока уменьшается на величину, пропорциональную x . Во многих типах усилителей поперечные и продольные щетки тесно связаны между собой, по этой причине при смещении поперечных щеток происходит смещение и продольных. В этом случае появляется поперечная составляющая продольного потока, пропорциональная величине относительного смещения щеток и току i_3 .

При наличии насыщения поперечной магнитной цепи нарушается пропорциональность между токами i_2 , i_3 и результирующим потоком поперечной оси.

Выражение для поперечного потока с учетом вышеперечисленных факторов будет иметь следующий вид:

$$\Phi_2 = S \lambda_2 [(1-x) \omega_y i_2 \mp x \omega_y i_3], \quad (2)$$

где S — функция, выражающая нелинейность характеристики холостого хода второй ступени усиления $I_3 = f(i_2)$, для линейной ненасыщенной части характеристики $S = 1$;

λ_2 — значение магнитной проводимости поперечной оси для ненасыщенной магнитной системы.

Уравнения равновесия э. д. с. принимают следующий вид:
для обмотки управления

$$U_y = r_y i_y + \sigma_y \omega_y p \Phi_1; \quad (3)$$

для поперечной цепи усилителя

$$e_2 = c \Phi_1 = r_a i_2 + f_1(i_2) i_2 + \sigma_a \omega_a p \Phi_1; \quad (4)$$

для продольной цепи усилителя

$$e'_3 = c \Phi_2 = r_3 i_3 - (\sigma_a \omega_3 - \sigma_k \omega_k) p \Phi_1 + r_k i_k + L_n p i_3; \quad (5)$$

для контура компенсационная обмотка — шунтирующее сопротивление

$$\sigma_k \omega_k p \Phi_1 + R_k i_k - r_{ш} i_3 = 0. \quad (6)$$

В уравнениях (3) — (6) приняты следующие обозначения:

σ_y, σ_a и σ_k — коэффициенты рассеяния обмоток управления, якоря и компенсационной;

e'_3 — э. д. с., наведенная за счет результирующего потока Φ_2 , на продольных щетках;

c — коэффициент пропорциональности между э. д. с. e_2, e'_3 и потоками Φ_1 и Φ_2 ;

$r_3 = r_a + r_d + r_k + r_{ш3}$ — сумма активных сопротивлений обмоток якоря, дополнительного полюса, компенсационной и переходного сопротивления щеточного контакта по продольной оси;

$R_k = r_k + r_{ш}$ — общее сопротивление контура компенсационная обмотка — шунтирующее сопротивление;

$f_1(i_2) i_2$ — падение напряжения под щетками поперечной цепи.

В [4, 5] показано, что одной из основных нелинейностей, которые существенно влияют на работу усилителя, является нелинейность сопротивления щеточного контакта $f_1(i_2)$ по этой причине в уравнение (4) и введена указанная функция $f_1(i_2)$. С учетом выражений (1) — (6) система уравнений, описывающих переходный процесс электромашиного усилителя с поперечным полем при работе его на активно-индуктивную нагрузку принимает следующий вид:

$$\left. \begin{aligned} e_2 &= \frac{c_{12}}{r_y(1+T_1 p)} \left[U_y - r_y \frac{\omega_p(i_2)}{\omega_y} \left(\frac{c \Phi_2}{S c_{23}} \pm x i_3 \right) - \right. \\ &\quad \left. - r_y \frac{\kappa_c}{\omega_y} c \Phi_2 - r_y \frac{\omega_3}{\omega_y} (1 - \varepsilon) i_3 \right], \\ c \Phi_2 &= \frac{S c_{23}}{r_a(1+ST_a p)} [e_2 - f_1(i_2) i_2 \mp x r_a i_3], \\ i_3 &= \frac{1}{R_3(1+T_n p)} [c \Phi_2 + \frac{\sigma_a \omega_3 p}{c} (1 - \varepsilon) i_2]. \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

В системе уравнений (7) приняты дополнительные обозначения:

c_{12} и c_{23} — коэффициенты пропорциональности между e_2, e'_3 и токами i_y и i_2 ;

$\varepsilon = \frac{r_{ш}}{R_k} \cdot \frac{\omega_k}{\omega_3}$ — степень компенсации продольной реакции якоря ЭМУ;

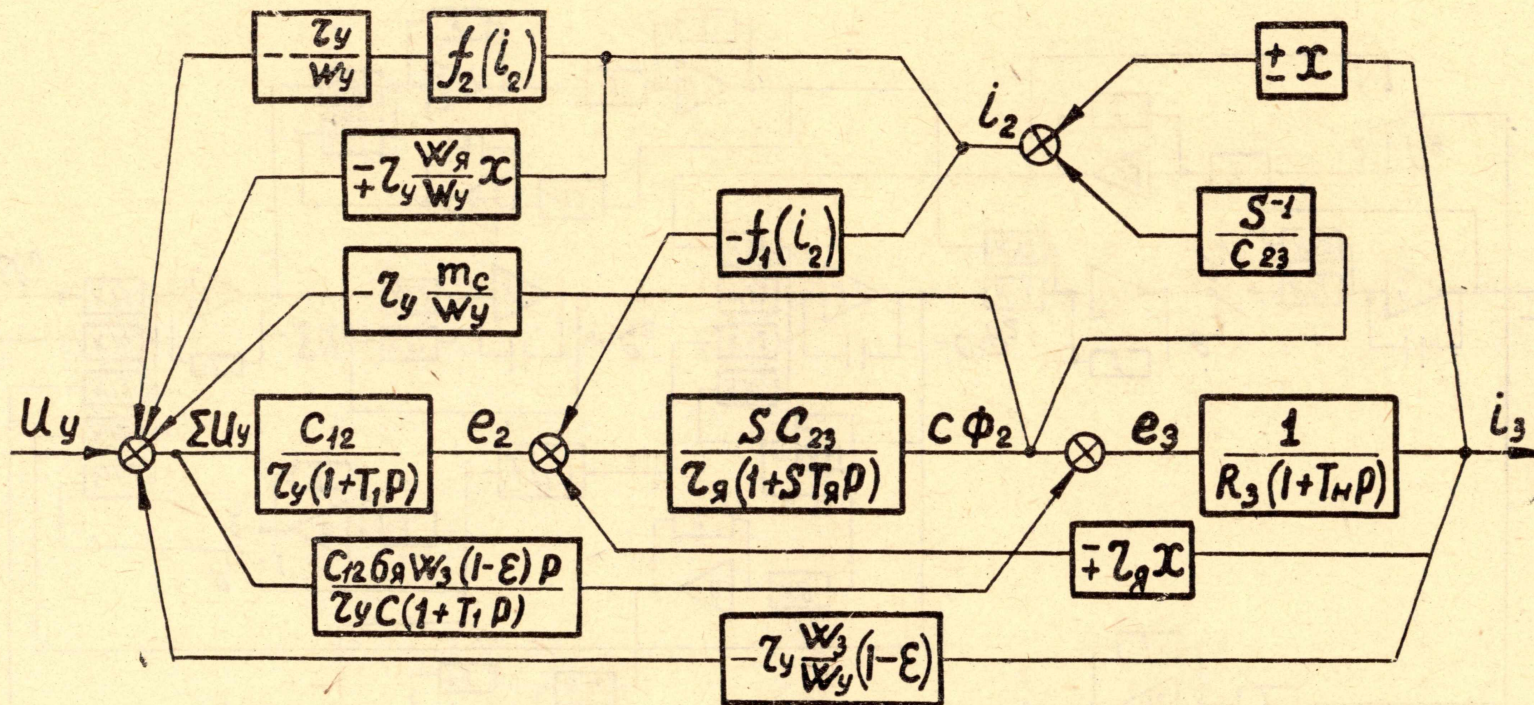


Рис. 2. Структурная схема ЭМУ при работе его на активно-индуктивную нагрузку.

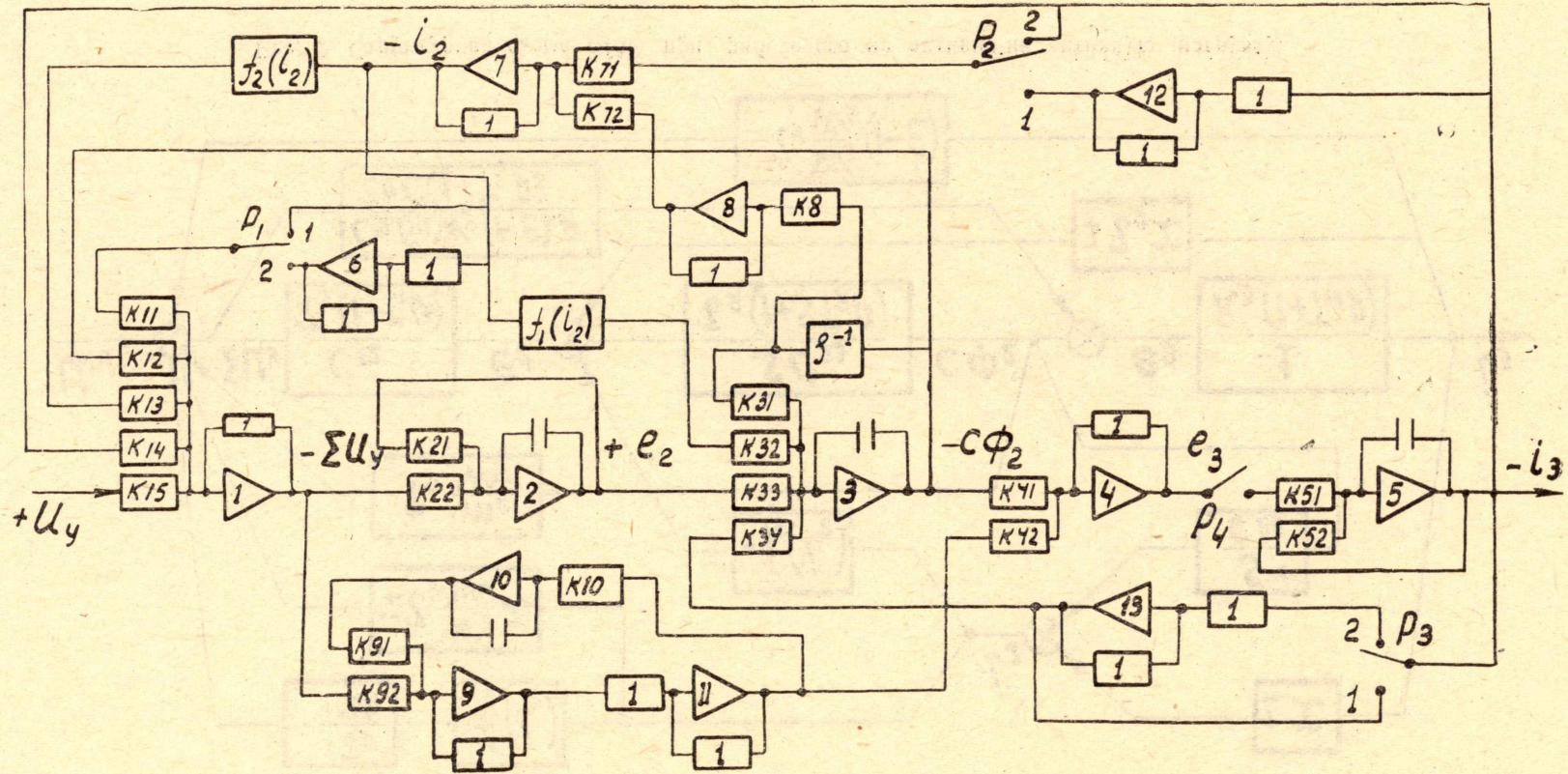


Рис. 3. Схема электронной модели ЭМУ при работе его на активно-индуктивную нагрузку.

$R_3 = r_3 + \frac{r_n r_{ш}}{R_k} + r_n$ — полное активное сопротивление цепи нагрузки.

$T_n = \frac{L_n}{R_3}$ — постоянная времени цепи нагрузки ЭМУ;

$$\omega_p(i_2) = \pm x\omega_y + f_2(i_2);$$

$$\omega_3 = \omega_y - \omega_d.$$

На основании системы уравнений (7) может быть построена структурная схема ЭМУ. Как видно из рис. 2, основная цепь прохождения сигнала управления состоит из последовательно соединенных звеньев: преобразование сигнала управления в э.д.с. второй ступени e_2 ; преобразование э.д.с. e_2 в э.д.с. на продольных щетках усилителя $e_3 = c\phi_2$ и преобразование e_3 в ток нагрузки i_3 . Кроме того, структурная схема содержит ряд жестких и гибких обратных связей, физическая сущность которых видна из рис. 2. Используя систему уравнений (7) или структурную схему, приведенную на рис. 2, можно построить электронную модель ЭМУ при работе на активно-индуктивную нагрузку, которая приведена на рис. 3. Данная модель позволяет исследовать как нагрузочный, так и режим холостого хода усилителя. В последнем случае рубильник P_4 разомкнут. Рубильники P_1 , P_2 и P_3 ставятся в положение 1 при сдвиге поперечных щеток по направлению и в положение 2 против направления вращения.

В модель введены три основные нелинейности, которые могут существенно влиять на режимы работы усилителя. С помощью данной модели можно исследовать влияние этих нелинейностей на работу усилителя как в статических, так и динамических режимах, определить границы допустимой линеаризации нелинейных параметров исходя из качества переходного процесса. Решение вышеперечисленных вопросов, как известно, аналитическими способами практически невозможно, поэтому использование модели в аналогичных случаях является наиболее рациональным методом исследования. Таким образом, предлагаемая модель ЭМУ позволяет весьма точно и физически наглядно воспроизвести статические и динамические характеристики усилителя и определить влияния отдельных внутренних обратных связей и параметров на эти характеристики и на устойчивость работы усилителя с учетом их нелинейности.

ЛИТЕРАТУРА

1. Н. М. Якименко. Электромашинный усилитель как элемент регулирующей системы. Электричество, № 9, 1948.
2. Ф. А. Горяинов. Электромашинные усилители. Госэнергоиздат, 1962.
3. П. С. Сергеев (ред.). Проектирование электрических машин. Госэнергоиздат, 1956.
4. В. В. Рудаков. Электромашинные усилители в системах автоматики. Госэнергоиздат, 1961.
5. В. П. Лагунов. Влияние нелинейности сопротивления щеточного контакта на процесс самовозбуждения электромашинного усилителя с поперечным полем на холостом ходу. Изв. ТПИ, т. 117, Изд. Томского госуниверситета, 1963.