

## КОМПЕНСАЦИЯ РЕАКЦИИ ЯКОРЯ В БЕСКОЛЛЕКТОРНЫХ ЭМУ

А. И. СКОРОСПЕШКИН, Э. Н. ПОДБОРСКИЙ

(Представлена семинаром кафедр электрических машин  
и общей электротехники)

С развитием полупроводниковой техники появилась возможность создать бесколлекторные ЭМУ, не имеющие скользящих контактов, однако, способ компенсации реакции якоря в предложенных схемах [1] этих усилителей имеет тот существенный недостаток, что позволяет осуществить компенсацию только продольной составляющей н.с. реакции якоря.

На рис. 1 представлена схема бесколлекторного ЭМУ, в которой компенсируется реакция якоря как по продольной, так и по поперечной осям. Обмотка 1 с числом пар полюсов  $p_d$  служит для запуска асинхронного двигателя. При включении обмотки управления 2 на постоянное напряжение в статоре усилителя возникает поток управления с числом пар полюсов  $P_1$  и в обмотке 3 наводится э. д. с. Выпрямитель 4, собранный на полупроводниковых диодах, предназначен для

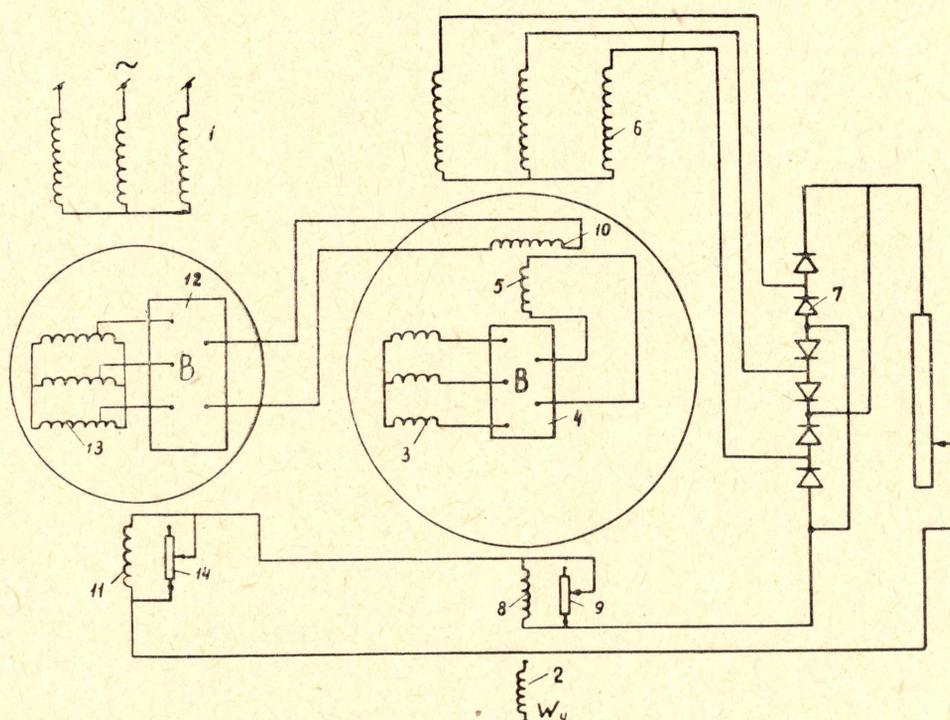


Рис. 1.

питания обмотки 5, которая создает поток с числом пар полюсов  $P_2$ , вращающийся относительно статора. В обмотке 6 этот поток наводит э.д.с. При включении выпрямителя 7 на нагрузку по обмотке 6 протекает переменный ток и создает н.с. реакции якоря. Компенсация продольной составляющей н.с. реакции якоря ведется за счет увеличения тока в обмотке 5 при увеличении нагрузки с помощью обмотки обратной связи 8.

Соппротивлением 9 регулируется степень продольной компенсации.

Для компенсации поперечной составляющей н.с. реакции якоря используется обмотка 10, сдвинутая на 90 электрических градусов относительно обмотки 5. Пропорционально току нагрузки будут расти: н.с. обмотки 11, напряжение на выходе выпрямителя 12, питающегося от обмотки 13 и, следовательно, ток в обмотке 10. Степень поперечной компенсации регулируется сопротивлением 14.

Обмотка 13 служит вторичной обмоткой для приводного двигателя и одновременно является генераторной для питания выпрямителя 12, а обмотка 11 с числом пар полюсов  $P_1$  служит обмоткой возбуждения.

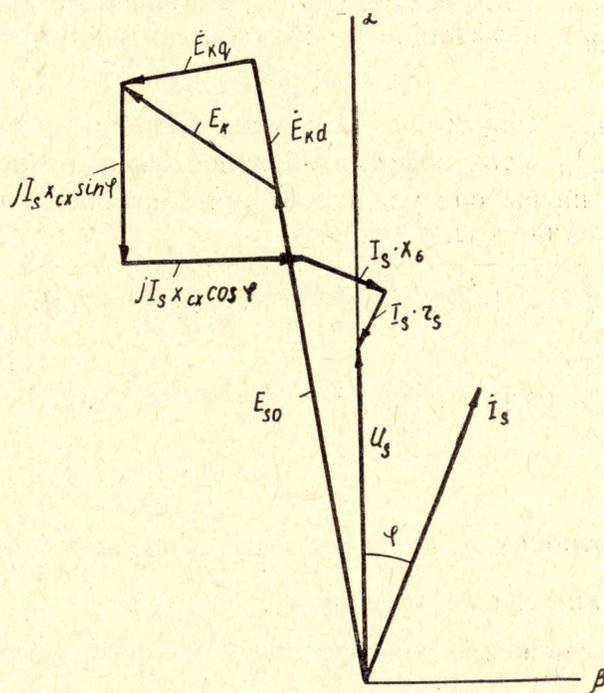


Рис. 2.

На рис. 2 представлена векторная диаграмма выходного каскада неявнополюсного усилителя в предположении, что ток, напряжение и э.д.с. изменяются во времени по синусоидальному закону и параметры машины постоянны. Для упрощения выводов, а также для получения наиболее удобного при практических расчетах уравнения внешней характеристики вектор напряжения направляется по вещественной оси  $\alpha$ , которая опережает ось  $\beta$  на  $90^\circ$  при вращении векторов против часовой стрелки. На рисунке обозначены:

$E_{s0}$  — фазное значение э.д.с. выходной обмотки при холостом ходе,

$E_k$  — э.д.с. компенсации,

$E_{kd}$ ,  $E_{kq}$  — компенсирующие э.д.с. соответственно по продольной и поперечной осям,

$jI_s X_{cx} \sin \varphi$  — падение напряжения в синхронном индуктивном сопротивлении, спроектированное на вектор напряжения,

$jI_s X_{cx} \cos \varphi$  — падение напряжения в синхронном индуктивном сопротивлении, спроектированное на ось,

$I_s r_s$  — падение напряжения в активном сопротивлении выходной обмотки.

Из диаграммы рис. 2 находим фазное напряжение:

$$U_H = \sqrt{(E_{so} + E_{kd})^2 + E_{kq}^2 - (I_s X_{cx} \cos \varphi - I_s r_s \sin \varphi)^2 - I_s X_{cx} \sin \varphi - I_s r_s \cos \varphi}, \quad (1)$$

где

$$E_{kd} = k_{ad} \frac{W_{ocd}}{W_y} \cdot I_{nd} K_{ocd},$$

$$R_{ad} = \frac{E_{so}}{I_y} \text{ — сопротивление намагничивания,}$$

$W_{ocd}$  — число витков обмотки обратной связи по продольной оси,

$W_y$  — число витков обмотки управления,

$I_{ocd} = K_{ocd} I_H$  — ток обмотки обратной связи по продольной оси,

$K_{ocd}$  — коэффициент обратной связи по продольной оси,

$$E_{kq} = R_{aq} K_{ocq} I_H;$$

$R_{dq}$  — сопротивление намагничивания по поперечной оси,

$I_{ocq} = K_{ocq} I_H$  — ток обмотки обратной связи по поперечной оси.

Напряжение на выходе усилителя при постоянстве сигнала управления в общем случае будет равно

$$U_H = \frac{1}{K_U} \left[ \sqrt{\left( E_{so} + R_{ad} \frac{W_{ocd}}{W_y} K_{ocd} I_H \right)^2 + (R_{aq} K_{ocq} I_H)^2 - K_I^2 I_H^2 (X_{cx} \cos \varphi - r_s \sin \varphi)^2 - K_I X_{cx} I_H \sin \varphi - K_I I_H r_s \cos \varphi} \right], \quad (2)$$

где

$K_U = \frac{U_s}{U_H}$  — отношение действующего значения фазного напряжения к выпрямленному,

$K_I = \frac{I_s}{I_H}$  — отношение действующего значения фазного тока к выпрямленному.

### 1. Внешняя характеристика при «полной поперечной компенсации»

Этот режим имеет место при

$$R_{aq} K_{ocq} = K_I (X_{cx} \cos \varphi - r_s \sin \varphi)$$

и практически осуществляется установкой движка сопротивления 14 в таком положении, при котором кривая фазного напряжения имеет наименьшее искажение во всем диапазоне изменения нагрузки.

В этом случае уравнение внешней характеристики значительно упрощается и принимает вид:

$$U_H = \frac{1}{K_U} \left( E_{so} + R_{ad} \frac{W_{ocd}}{W_y} K_{ocd} I_H \right) - K_I X_{cx} I_H \sin \varphi - K_I r_s I_H \cos \varphi. \quad (3)$$

Из уравнения (3) видно, что, изменяя сопротивлением 9 коэффициент обратной связи по продольной оси, можно регулировать жесткость внешних характеристик.

Следует заметить, что уравнение (3) справедливо только при постоянных параметрах усилителя, а при изменении нагрузки изменяется индуктивность выходной обмотки и взаимная индуктивность выходной обмотки и обмотки 5. Но учитывая, что отношение этих индуктивностей практически не зависит от тока нагрузки, уравнение внешней характеристики бесколлекторного ЭМУ при полной поперечной компенсации и ненасыщенном первом каскаде примет вид:

$$U_H = \frac{1}{K_U} (E_{so} + K_{ocd} R_{ad} I_H) \frac{X_{cx}}{X_{cx0}} - \frac{K_I}{K_U} X_{cx} I_H \sin \varphi - \frac{K_I}{K_U} r_s I_H \cos \varphi.$$

В этом уравнении угол

$$\varphi = \frac{\gamma}{2} + \alpha,$$

где  $\gamma$  — угол коммутации,

$\alpha$  — угол зажигания.

Углы  $\gamma$  и  $\alpha$  можно рассчитывать по формулам [2].

$X_{cx0}$  — ненасыщенное синхронное индуктивное сопротивление выходного каскада.

Коэффициенты  $K_I$  и  $K_U$  определяются соответственно по кривым 1 и 2 рис. 3, а зависимости  $X_{cx}$  для нескольких значений  $K_{ocd}$  определяются кривыми 3, 4 рис. 3.

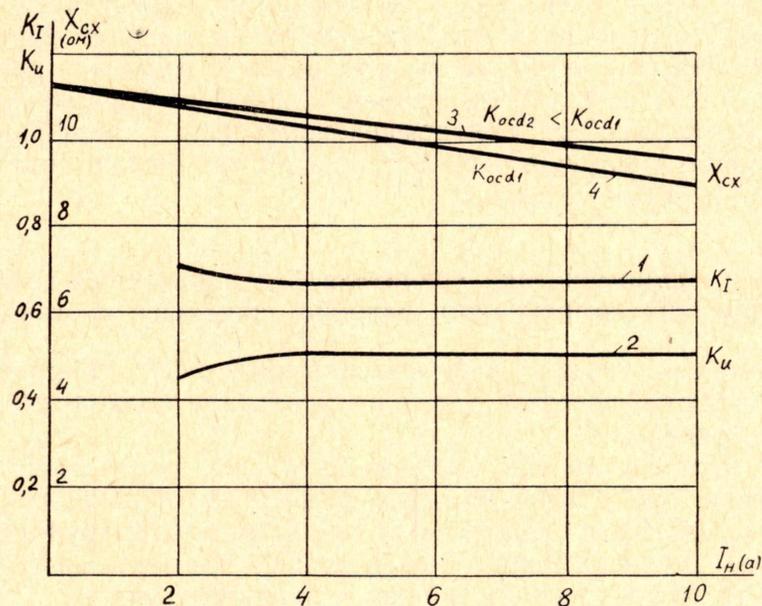


Рис. 3.

Экспериментально были получены внешние характеристики при полной поперечной компенсации с различной жесткостью, для которых  $K_{ocq} \approx \text{const}$ , а  $K_{ocd} = \text{var}$ .

На рис. 4 эти характеристики показаны сплошными линиями и для сравнения показаны пунктирными линиями характеристики, рассчитанные по уравнению (4). Как видно из рисунка, расчеты дают вполне удовлетворительные результаты. Важными достоинствами этого режима являются прямолинейность внешних характеристик и минимальный уровень пульсаций выходного напряжения.

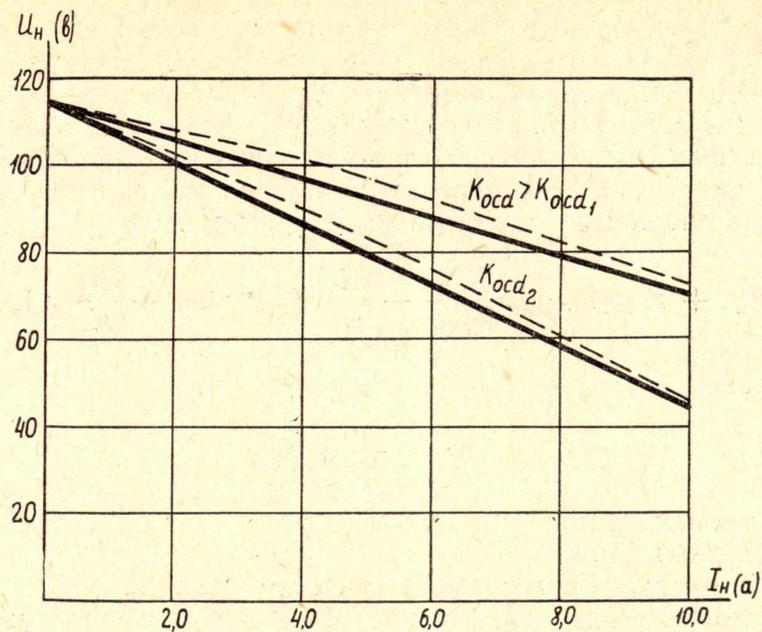


Рис. 4.

Однако эти характеристики прямолинейны только до определенных значений токов нагрузки. С дальнейшим возрастанием нагрузки, как было установлено из опыта, начинается насыщение первого и дополнительных каскадов усилителя. Это ведет к тому, что рост токов в обмотках 5 и 10 замедляется, реакция якоря по продольной и поперечной осям оказывается недокомпенсированной и линейность внешних характеристик нарушается. Напряжение на выходе при этом начинает снижаться более резко.

## II. Внешняя характеристика усилителя без поперечной компенсации с э.д.с. продольной компенсации, линейно зависящей от тока нагрузки

В имеющихся схемах [1] бесколлекторных ЭМУ возможен только этот режим работы, который в данном усилителе получается при замкнутой обмотке 11.

На рис. 5 представлены экспериментально полученные внешние характеристики при различных коэффициентах обратной связи  $K_{осд}$  (кривые 1, 2, 3). Нелинейность этих характеристик затрудняет практическое использование и делает необходимым применение дополнительных устройств для получения линейных характеристик.

## III. Внешняя характеристика усилителя без продольной компенсации с компенсацией поперечной реакции якоря, пропорциональной току нагрузки

Этот режим работы осуществляется при замкнутой накоротко обмотке 8. На рис. 5 кривыми 4, 5, 6 показаны внешние характеристики, полученные экспериментально при различной степени поперечной компенсации. Из кривых видно, что внешняя характеристика имеет тем большую кривизну, чем больше степень поперечной компенсации отличается от полной поперечной компенсации, которой соответствует кривая 5.

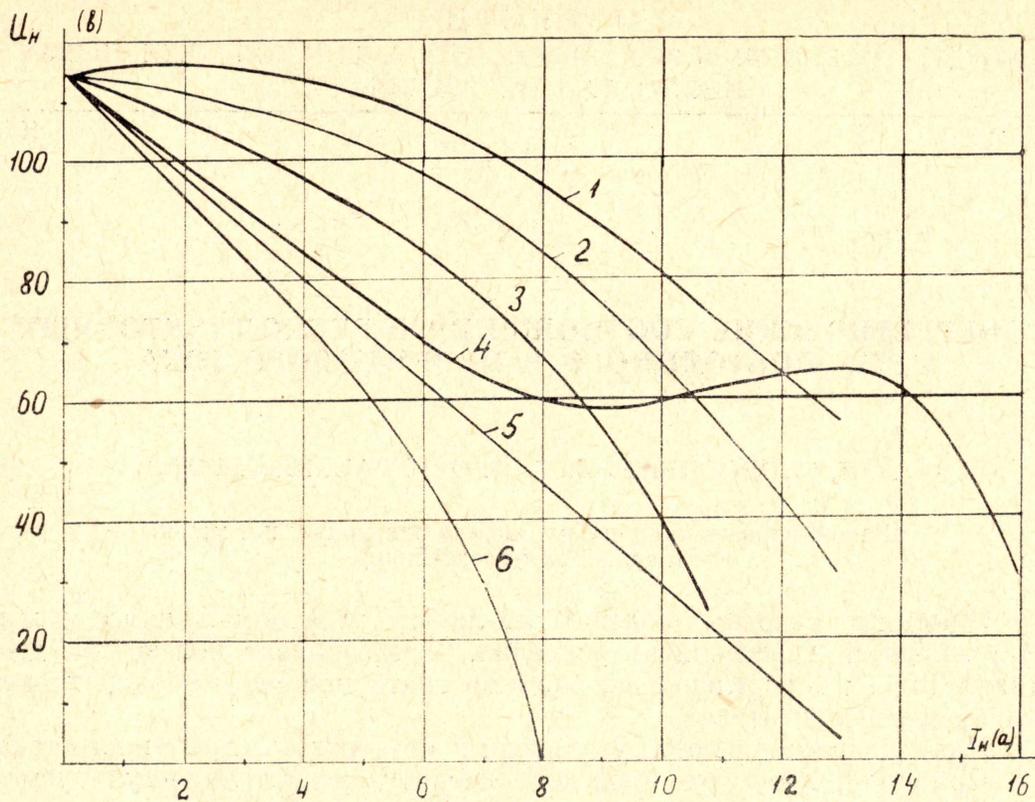


Рис. 5.

### Выводы

1. Наибольший интерес для практических целей представляет режим полной поперечной компенсации, обеспечивающий линейные внешние характеристики.

2. Все семейство внешних характеристик, в том числе и линейных, реализуется с помощью одной лишь линейной обратной связи по току, поэтому не требуется дополнительных устройств для получения линейных характеристик.

3. Величина тока установившегося короткого замыкания определяется насыщением первого и дополнительного каскадов усилителя и может быть заранее выбрана из условия допустимой перегрузки.