

## ОСОБЕННОСТИ РАБОТЫ ППУ В РЕГУЛИРУЕМОМ ЭЛЕКТРОПРИВОДЕ ПО СИСТЕМЕ МУС-Д

А. П. ИНЕШИН, В. А. СЕВАСТЬЯНОВ, В. А. ПАРАМОНОВ

(Рекомендовано научным семинаром электромеханического факультета)

Развитие автоматизированных электроприводов металлорежущих станков идет как по пути дальнейшего расширения электрического диапазона регулирования скорости, так и по линии удовлетворения технологического требования повышения быстродействия привода, особенно при возмущающем воздействии со стороны нагрузки. Применение безынерционных промежуточных усилителей дает возможность при этом реализовать практически любой коэффициент усиления, обеспечивающий достижение необходимой статической точности, а также значительно улучшить динамические характеристики привода.

Сочетание промежуточного полупроводникового и силового магнитного усилителей часто дает наилучшее решение задачи построения быстродействующего преобразователя: ППУ-МУС с достаточной выходной мощностью. Так в [1] указывается, что введение транзисторного усилителя в цепь управления магнитного усилителя улучшает быстродействие последнего при малых сигналах. Действительно постоянная времени обмотки управления, последовательно с которой включен транзистор, составляет:

$$T_{\text{МУ}} = \frac{L_{\text{ОУ}}}{R_{\text{ОУ}} + R_{\text{ТР}}},$$

где  $L_{\text{ОУ}}$ ,  $R_{\text{ОУ}}$  — соответственно индуктивность и сопротивление обмотки управления;

$R_{\text{ТР}}$  — эквивалентное сопротивление транзистора.

При малых сигналах, когда триод близок к запирающему,  $R_{\text{ТР}}$  имеет относительно большое значение и  $T_{\text{МУ}}$  сильно уменьшается. При этом создается впечатление, что применение ППУ постоянного тока, рассчитанного на линейный режим работы, когда выходной триод обладает большим внутренним сопротивлением, и есть наиболее приемлемый по условиям динамики вариант сочетания ППУ и МУС. Однако в [2] справедливо показано, что уменьшение длительности переходного процесса в обычном магнитном усилителе с самонасыщением при управлении от полупроводникового триода происходит за счет увеличения потенциальной выходной мощности транзисторного усилителя. Харак-

тер рассматриваемого переходного процесса существенным образом зависит от параметра:

$$E'_k = \frac{E'_k}{E_m},$$

то есть соотношения приведенной ЭДС питания коллекторной цепи

$$E'_k = E_k \frac{W_p}{W_y}$$

к ЭДС питания рабочей цепи магнитного усилителя  $E_m$ .

Здесь  $W_y$ ,  $W_p$  соответственно, числа витков обмоток управления и рабочей магнитного усилителя.

Применительно к серийно выпускаемым электроприводам типа ПМУ-П [1] и транзисторному усилителю условие достижения предельного быстродействия явно не выполняется, то есть

$$E'_k = \frac{E_k}{E_m} \cdot \frac{W_p}{W_y} < 1.$$

Это приводит к нарушению режима вынужденного намагничивания МУС, появлению пиков коллекторного перенапряжения при запираии выходного транзистора, существенно различной длительности переходного процесса при увеличении — уменьшении сигнала управления. Шунтирование емкостью обмотки управления МУС с целью снятия коллекторных перенапряжений на выходном триоде несколько уравнивает величины постоянных времени переходных процессов. Отмеченные обстоятельства позволяют отнести преобразователь ППУ постоянного тока — МУС к элементам систем регулирования, инерционность которых зависит от величины и знака рассогласования.

Действие помех на входе ППУ в реальной системе регулируемого привода практически исключает возможность работы полупроводниковых триодов в линейном режиме усиления. Основные помехи поступают по цепи корректирующей обратной связи, причем спектр помех не случаен, а представляет сумму двух-трех четко выраженных частот, среди которых определяющей является помеха основной гармоники выходного напряжения силового МУС.

Использование структуры с параллельной коррекцией в приводах МУС-Д является вынужденным, ввиду существенной неустойчивости параметров ППУ и МУС. Параллельная корректирующая обратная связь при соответствующем выборе ее параметров, не изменяя статических характеристик системы, обеспечивает ее устойчивость и стабилизирует динамические характеристики преобразователя. Однако в приводе МУС-Д охват цепью параллельной коррекции звеньев с наибольшими коэффициентами усиления и неустойчивостью ППУ и МУС ввиду известного дискретного характера работы МУС и наличия значительных пульсаций в его выходном напряжении, приводит к передаче по цепи коррекции на вход ППУ сильнейшего уровня помех. Неблагоприятное соотношение помеха — полезный сигнал приводит в этом случае к значительному изменению исходных статических характеристик системы, а также сказывается на ее динамических показателях.

Входным сигналом для цепи коррекции, выполненной в виде контура РС, является напряжение якоря исполнительного двигателя [1], равное

$$U_{я} = C_e \cdot n + I_{я} R_{я} + L_{я} \frac{dI_{я}}{dt}.$$

При работе на основном рабочем нижнем участке диапазона регулирования скорости, преобладающими в якорном напряжении  $U_{я}$  являются пульсирующие составляющие, пропорциональные току якоря  $I_{я}$  и его производной. На рис. 1а, характеристикой 1 представлена экспериментально снятая зависимость помехи  $U_{ш}$  (переменной составляющей

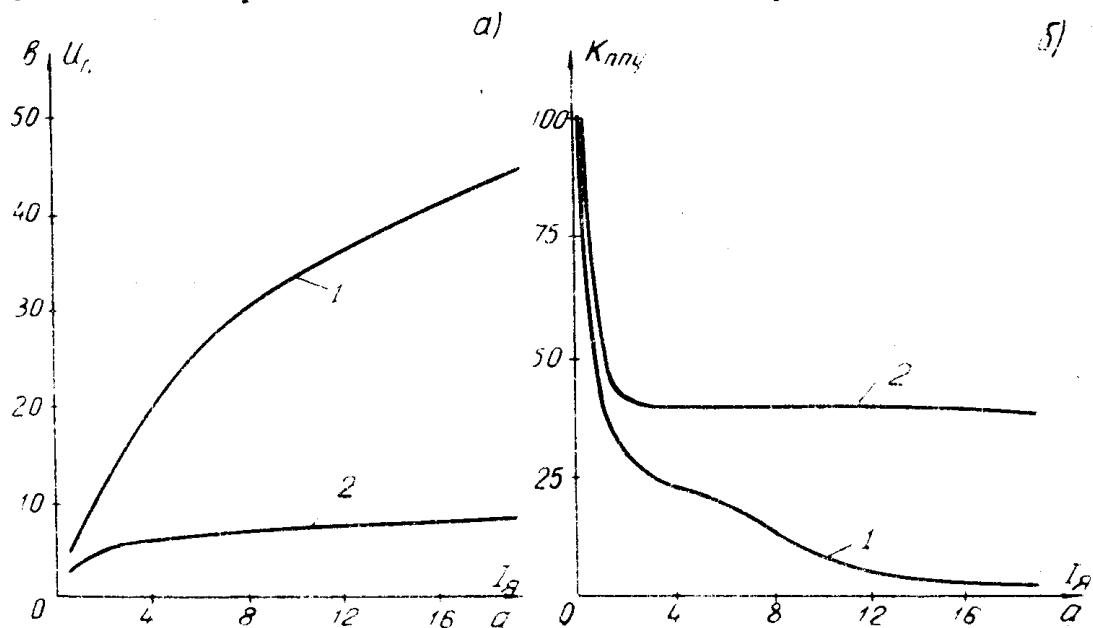


Рис. 1.

шей якорного напряжения) от тока якоря при работе исполнительного двигателя привода ПМУ-П на скорости  $n=30$  об/мин,  $D=100:1$ .

Величина напряжения помехи быстро растет при загрузке двигателя и достигает нескольких десятков вольт, при этом форма импульсов помехи, следующих с частотой пульсаций выпрямленного напряжения силового преобразователя (300 гц), изменяется по мере регулирования угла выхода в насыщение дросселей МУС.

На входе ППУ в установившемся режиме работы привода, кроме сигнала ошибки  $U_y$ , равного разности задающего напряжения и ЭДС тахогенератора, действует передаваемое цепью RC коррекции значительное переменное напряжение помехи. При этом ППУ работает в четком режиме вынужденного переключения с частотой, определяемой помехой, аналогично известным типам преобразователей постоянного напряжения в трапециoidalную форму.

Исходная статическая характеристика вход—выход  $I_{0y}(U_y)$  (зависимость тока управления  $I_{0y}$  МУС от сигнала ошибки  $U_y$  неперверсивного ППУ), отличающаяся наличием зоны нечувствительности и крутым рабочим линейным участком (рис. 2, характеристика 1), теперь под влиянием помехи значительно изменяется (рис. 2, характеристики 2÷5, соответствующие различным токам нагрузки). При малых сигналах на входе усилителя, соответствующих небольшим нагрузкам двигателя, помеха действует как эквивалентное напряжение линеаризации, компенсируя зону нечувствительности ППУ и этим несколько повышая его начальный статический коэффициент усиления. При больших нагрузках исполнительного двигателя эквивалентный рост помехи приводит к дальнейшему сдвигу характеристик ППУ, принудительному открыванию усилителя при  $U_y = 0$  (детектирование помехи) и существ-

венному снижению коэффициента усиления  $K_{ппу}$ . Величина последнего при изменении тока якоря от холостого хода до номинального значения падает с  $80 \div 100$  до  $5 \div 15$  (рис. 16, кривая 1), ухудшая статические характеристики привода и возможный диапазон регулирования скорости.

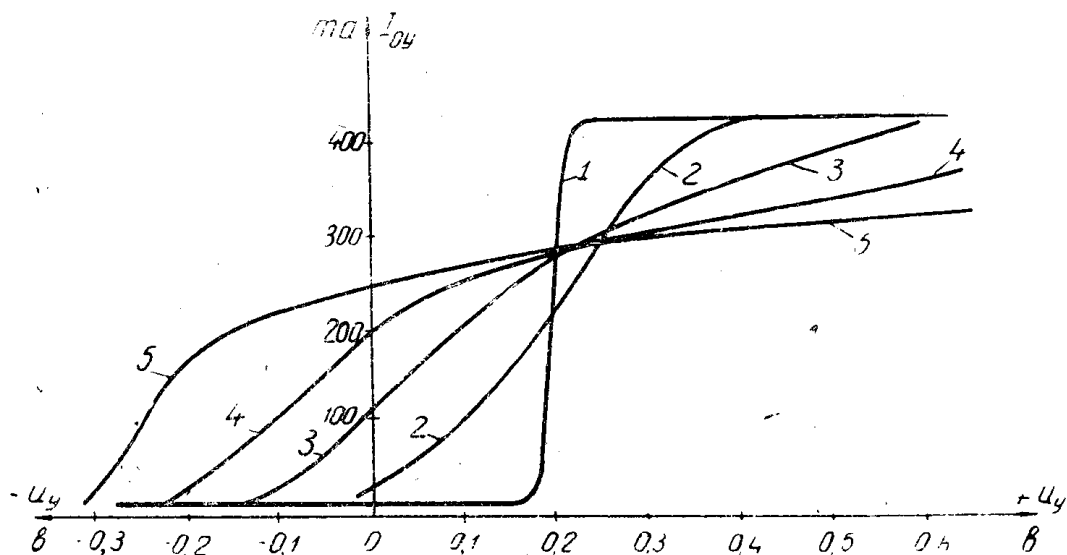


Рис. 2.

Принудительное открывание ППУ при детектировании помехи приводит к явлению самохода — неуправляемому вращению привода при снятии задающего напряжения и первоначально загруженном электродвигателе.

Поскольку напряжение помехи, связанное с величиной тока якоря исполнительного двигателя, определяет режим переключения ППУ, влияя также на величину его коэффициента усиления, то выход преобразователя и его вход дополнительно связаны нелинейной паразитной обратной связью через помеху. Экспериментально замеренное время нарастания ( $t_n = 0,84$  сек.) и спада ( $t_c = 0,26$  сек.) тока силовой цепи характеризует переходный процесс открывания — запирающего преобразователя ППУ—МУС при работе на омическую нагрузку в разомкнутой САР и наличии на входе ППУ искусственной помехи, аналогичной по величине и частоте таковой в замкнутой системе привода. По сравнению с аналогичными данными переходного процесса при отсутствии помехи ( $t'_n = 0,52$  сек. и  $t'_c = 0,14$  сек.) длительность реального переходного процесса существенно затянулась. В замкнутой системе электропривода из-за действия помехи наиболее неблагоприятно протекает переходный процесс по возмущающему воздействию, особенно при сбросе нагрузки (осциллограмма рис. 3), отличающийся большими величинами перерегулирования и колебательностью.

Стремление избавиться от паразитной обратной связи через помеху, устранить зависимость параметров напряжения помехи от величины выходного напряжения преобразователя привело авторов к использованию другого вида коррекции, основанной на особенности работы силового магнитного усилителя с самонасыщением [3]. В примененной схеме МУС с вынесенной контурной обратной связью напряжения четных гармоник в обмотках управления подавлены. При возникновении переходного процесса в МУС на свободных обмотках управления возникает

сигнал, пропорциональный производной «постоянной» составляющей магнитного потока. Введение гибкой обратной связи при этом эквивалентно применению дифференцирующего трансформатора [3]. Экспериментальные исследования этого вида электромагнитной коррекции показали ее высокую эффективность и значительно лучшее соотношение сигнал-помеха напряжения, снимаемого с обмотки коррекции.

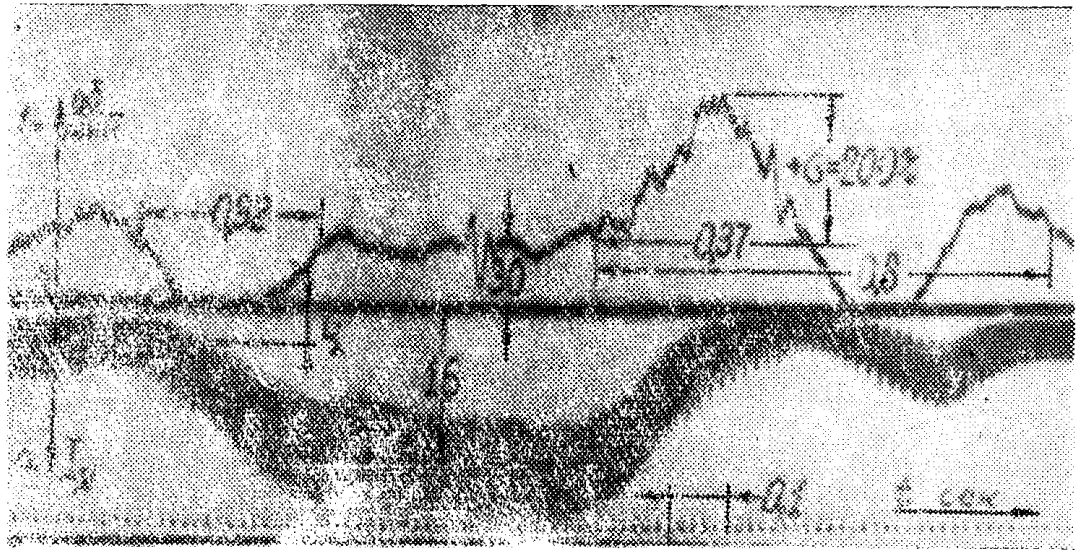


Рис. 3.

ППУ постоянного тока при этом также вводится в режим вынужденного переключения исходной помехой, представляющей подавленное напряжение наводки 300 гц, индуктированное в обмотке коррекции со стороны силовой цепи МУС. Ввиду сильной электромагнитной связи между обмотками управления и коррекции МУС в последней при переключениях ППУ дополнительно трансформируется в виде переменной составляющей прямоугольное выходное напряжение ППУ. Суммарная помеха в цепи коррекции при этом имеет примерно постоянную амплитуду (рис. 1а, характеристика 2) и изменяет форму по мере открывания МУС и ППУ. Ввиду лучшего по сравнению с коррекцией РС соотношения: сигнал-помеха и независимости величины помехи от тока нагрузки электродвигателя удастся, при установке в цепи электромагнитной коррекции простейшего фильтра, сохранить величину статического коэффициента усиления ППУ при воздействии помехи на уровне 40 при первоначальном его значении  $80 \pm 100$ . рис. 1б (кривая 2). Это дает возможность расширить диапазон регулирования скорости исполнительного двигателя до 200:1 при удовлетворительных динамических показателях и избежать явления «самоход». Однако паразитная обратная связь входа и выхода ППУ через помеху (точнее через форму помехи) по цепи коррекции по-прежнему остается, что неблагоприятно продолжает отражаться на динамике электропривода.

Постоянная времени магнитного усилителя самонасыщения однозначно связана с его коэффициентом усиления по мощности [3]

$$T_{\text{му}} = \frac{K_p}{K_{\text{дин}}},$$

где  $K_p$  — коэффициент усиления МУС по мощности;

$K_{ши}$  — динамический коэффициент МУС, приводимый в каталогах.

Существенное снижение  $T_{му}$  МУС, вплоть до уничтожения самоподмагничивания  $T_{му} \rightarrow 0$ , достигается увеличением мощности выхода ППУ.

Увеличение выходной мощности ППУ равносильно требованию высокого КПД выходного каскада. Поэтому наиболее целесообразно строить схемы ППУ как импульсные усилители класса Д с элементами широтно-импульсной модуляции. Следует отметить, что схемы ППУ с ШИМ уже достаточно разработаны и исследованы применительно к системам электромашиной автоматики [4].

Заслуживает внимания широтно-импульсный модулятор, состоящий из реостатно-емкостной схемы; с целью получения широтно-импульсного преобразования с высоким коэффициентом усиления используется схема с поочередным разрядом емкостей на управляемое сопротивление, в качестве которого применяется полупроводниковый триод, управляемый входным сигналом постоянного тока.

Работа ППУ класса Д с такой схемой ШИМ по сравнению с ППУ постоянного тока при наличии помех по цепи электромагнитной коррекции и прочих равных условиях (равные коэффициенты усиления и выходные мощности ППУ) отличается следующими двумя особенностями: переключение ППУ теперь производится не помехой, а специальным источником напряжения коммутации (в простейшем случае напряжением сети промышленной частоты); воздействие входного сигнала постоянного тока с наложенной помехой на процесс широтно-импульсной модуляции осуществляется в промежутки времени, соответствующие разряду емкости, на остальное время ШИМ как бы самоотключается от источника входного сигнала и помехи.

Последнее обстоятельство позволяет условно считать рассматриваемый ППУ класса Д импульсным элементом, на вход и с выхода которого поступают последовательности импульсов. Охват такого импульсного элемента цепью обратной связи сводится [5] к преобразованию звеном обратной связи по определенному закону выходной последовательности импульсов и последующей ее подаче на вход импульсного элемента. В частном случае эффект такого охвата при соответствующих параметрах цепи обратной связи может быть и нулевым. Применительно к ППУ класса Д это означает, что настройка фильтра в цепи электромагнитной коррекции должна производиться не только с целью подавления напряжения помехи, но и из условия обеспечения благоприятного фазового соотношения между напряжением коммутации ШИМ и помехи. При этом трансформированные с выхода ППУ в цепь коррекции импульсы помехи подавляются и сдвигаются во времени фильтром цепи обратной связи. Таким образом проникая на вход ППУ, они не оказывают на ШИМ существенного воздействия. Поскольку в процессе регулирования скорости электродвигателя под нагрузкой на всем диапазоне уставок скорости относительная продолжительность включения  $\gamma$  изменяется от нуля до единицы, то получить компенсации паразитной обратной связи через помеху во всем диапазоне не удастся.

Практически важно обеспечить компенсацию помехи в диапазоне низких рабочих скоростей, где  $\gamma$  регулируется от 0 до 0,3. Из этого условия с учетом частоты источника коммутации и параметров цепи электромагнитной коррекции производится настройка фильтра. Осциллограмма рис. 4, снятая в замкнутой системе привода с ППУ класса Д на низкой скорости вращения электродвигателя, показывает улучшение динамических характеристик системы по сравнению с ранее применен-

ным ППУ постоянного тока, с примерно теми же значениями коэффициента усиления и выходной мощности ППУ. При работе системы на средних и верхних уставках скорости, когда  $\gamma = 0,3 \div 1$ , компенсация воздействия помехи на ППУ нарушается. Однако ввиду большей эффективности действия сигнала по цепи главной обратной связи, указанное обстоятельство не сказывается на протекании переходных процессов.

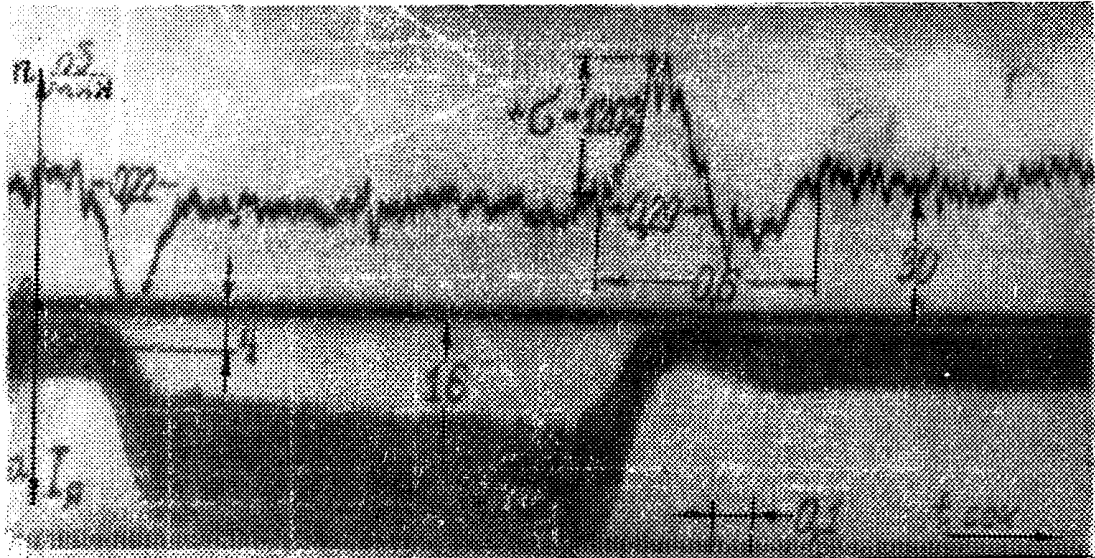


Рис. 4.

Более того, автоматическое снижение коэффициента усиления ППУ под влиянием помехи, повышает запас устойчивости системы, общий коэффициент усиления которой в разомкнутом состоянии выбирается по известным условиям обеспечения ее статической точности внизу диапазона и, как правило, оказывается избыточным при работе на среднем и верхнем участке диапазона.

### Выводы

1. Охват преобразователя ППУ—МУС цепью параллельной коррекции РС приводит к возникновению паразитных обратных связей в преобразователе через передаваемую помеху и ухудшению статических и динамических характеристик системы электропривода.

2. Электромагнитная коррекция преобразователя ППУ—МУС отличается лучшим соотношением сигнал-помеха, однако при применении ППУ постоянного тока в этом случае, паразитная обратная связь через помеху сохраняется.

3. Использование ППУ класса Д с внутренним источником коммутации в сочетании с электромагнитной коррекцией позволяет улучшить динамические качества привода за счет компенсации обратных связей через помеху и увеличения выходной мощности ППУ.

## ЛИТЕРАТУРА

1. А. Я. Петровский, Я. Б. Розман. Регулируемый электропривод с магнитными усилителями. «Энергия», 1964.
2. Р. А. Липман, И. Б. Негневицкий. Быстродействующие магнитные и магнитно-полупроводниковые усилители. ГЭИ, 1960.
3. М. А. Розенблат. Магнитные усилители. «Советское радио», 1960.
4. Т. А. Глазенко. Полупроводниковые усилители класса Д для систем электромашиной автоматики на постоянном токе. Ленинградский ДНТП, 1963.
5. С. Л. Попков, Ю. С. Попков. Непрерывные и дискретные следящие системы. «Энергия», 1964.