

**К ВОПРОСУ АНАЛИЗА И УЛУЧШЕНИЯ ЭКСПЛУАТАЦИОННОЙ
НАДЕЖНОСТИ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ УСИЛИТЕЛЕЙ
В ЭЛЕКТРОПРИВОДАХ МУС-Д**

В. А. СЕВАСТЬЯНОВ, А. П. ИНЕШИН, А. И. ЕСИН

(Рекомендовано научным семинаром кафедры ЭПП Томского
политехнического института)

Промежуточный усилитель (ПУ) является важнейшим звеном современного автоматизированного электропривода с широким диапазоном регулирования скорости. Почти все обратные связи системы автоматического регулирования (САР) замыкаются через ПУ, поэтому большинство аварийных режимов связано с его неисправностью.

В данной статье на основе опыта внедрения полупроводниковых магнитных усилителей в электроприводы тяжелых станков УЗТС дается анализ и рассматриваются специфические особенности схемных решений и работы промежуточных полупроводниковых усилителей — ППУ в цепи управления силового магнитного усилителя самонасыщения — МУС, а также даются рекомендации по улучшению надежности их работы. В системах электропривода с исполнительным электродвигателем постоянного тока на входе и выходе ПУ действуют сигналы постоянного тока. Поэтому, при конструировании промежуточных усилителей для таких систем отдавалось предпочтение полупроводниковым усилителям (ППУ) постоянного тока.

Типичным в этом отношении представляется транзисторный вариант ППУ для приводов серии ПМУ-9М ЭНИМС [1]. Схема такого усилителя приведена на рис. 1 и является приспособленным вариантом усилителя типа УПП-3, разработанного ранее ЭНИМС для приводов ЭМУ-Д.

Схема представляет трехкаскадный нереверсивный ППУ постоянного тока, полупроводниковые триоды которого включены по схеме с общим эмиттером с непосредственной связью между каскадами. При этом обеспечиваются достаточно высокие коэффициенты усиления по напряжению и току при максимальной простоте схемы самого усилителя.

С целью уменьшения величины постоянной времени цепи смещения напряжение питания выбрано повышенным — 60 в, а последовательно с обмоткой смещения включено дополнительное омическое сопротивление R_7 .

Величина напряжения питания коллекторных цепей ППУ выбрана с запасом и составляет 25в, что для примененных типов полупроводниковых триодов меньше допустимого коллекторного напряжения — 40в.

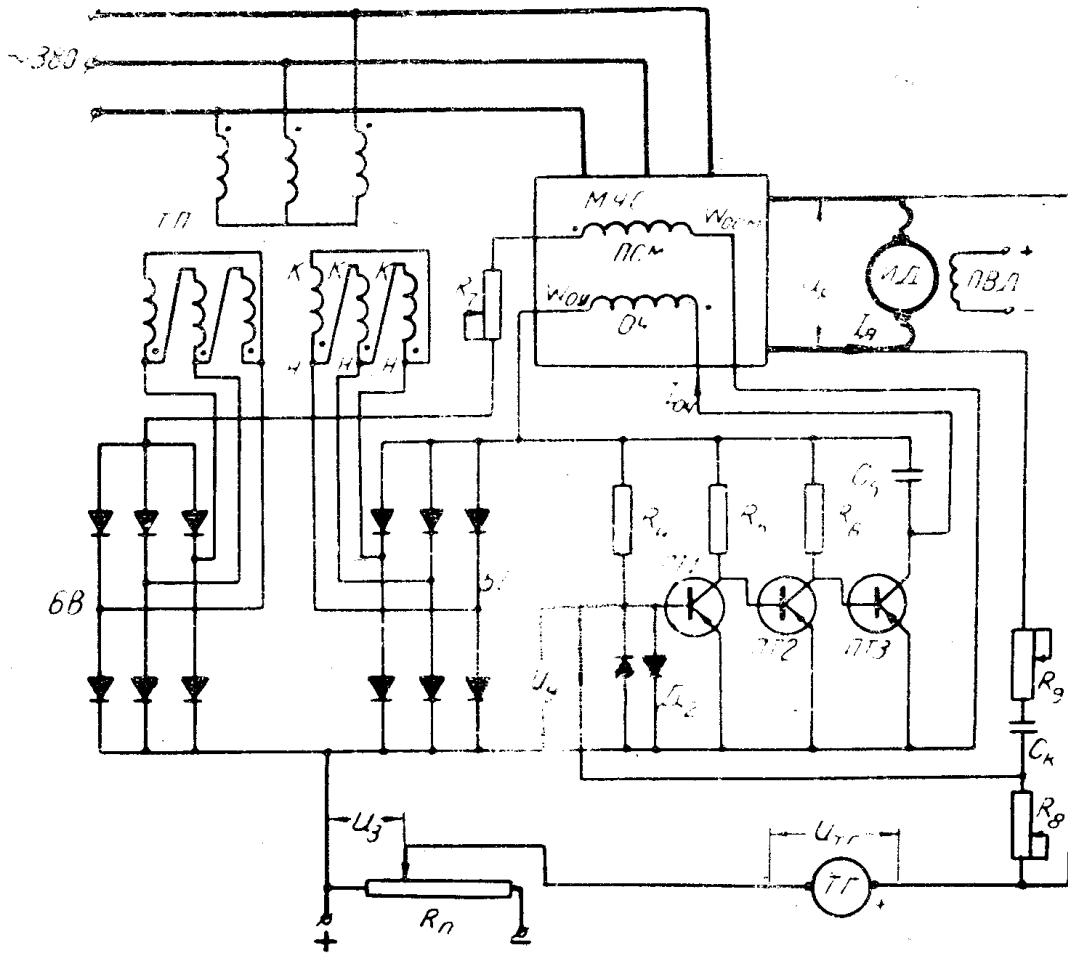


Рис. 1.

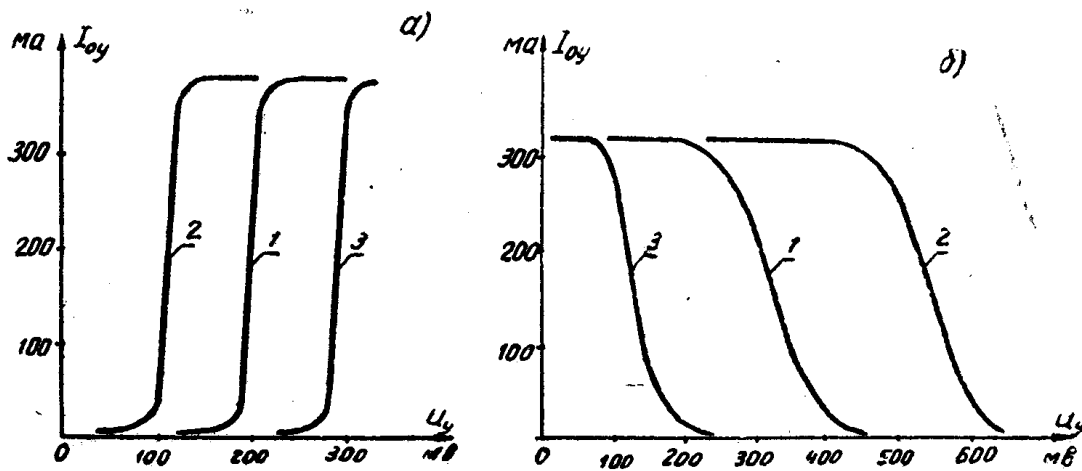


Рис. 2.

Настройка этого усилителя производится подбором сопротивления R_4 в цепи базового смещения ПТ₁ при отключенной входной цепи ППУ и имеет целью достижения минимальной зоны нечувствительности характеристики вход — выход усилителя — рис. 2а (кривая 2). В реальной схеме привода, когда входная цепь ППУ подключена, эта характеристика имеет несколько увеличенную зону нечувствительности, рис. 2а (кривая 1). При коротком замыкании входной цепи ППУ зона нечувствительности еще больше возрастает, рис. 2а (кривая 3, снятая при малом сопротивлении входной цепи усиления). Таким образом, типовая характеристика ППУ имеет значительную, по сравнению с шириной линейного участка, зону нечувствительности.

Крутизна рабочего линейного участка характеристики усилителя зависит от характера его нагрузки и численно определяется динамическим коэффициентом усиления:

$$K_d = \frac{\Delta U_{\text{вых}}}{\Delta U_{\text{вх}}} = \frac{\Delta I_{\text{оу}} \cdot R_{\text{оу}}}{\Delta U_y} = 500 \div 1000,$$

где приращения берутся на линейной части характеристики. Статический коэффициент усиления, равный:

$$K_{\text{ст}} = \frac{U_{\text{вых}\cdot\text{н}}}{U_{\text{вх}\cdot\text{н}}} = \frac{I_{\text{оу}\cdot\text{н}} \cdot R_{\text{оу}}}{U_{y\cdot\text{н}}} = 70 \div 150,$$

характеризует усилительные свойства ППУ с учетом зоны нечувствительности. Здесь индекс «н» означает «номинальный».

Вопросы температурной стабилизации полупроводникового усилителя с непосредственными связями каскадов достаточно полно рассмотрены в [2], где показано, что в подобных усилителях температурная стабильность последующих каскадов определяется таковой предыдущих, а температурная стабильность всего усилителя зависит, главным образом, от температурных характеристик первого каскада.

Нестабильность каскада принято характеризовать коэффициентом неустойчивости S , с увеличением которого стабильность каскада усилителя уменьшается и наоборот. При требовании от схемы высокой температурной стабильности рекомендуется брать S в пределах $1,5 \div 4$, [2], в то время как для первого каскада ППУ (рис. 1) коэффициент неустойчивости равен

$$S = (1 + B) \geq (1 + 15), \quad \text{где } B = \frac{\alpha}{1 - \alpha} \geq 15 \text{ (для П13),}$$

здесь α — коэффициент усиления триода по току для схемы включения с общей базой, а B соответственно с общим эмиттером. Это приводит к тому, что при повышении температуры нормально закрытые триоды ПТ₁ и ПТ₃ приоткрываются, характеристики вход — выход ППУ сдвигаются влево относительно оси $I_{\text{оу}}$ и зона нечувствительности усилителя уменьшается, что подтверждается экспериментальными характеристиками, рис. 3а.

С увеличением температуры растет величина нулевого тока выходного триода ПТ₃. При $t_1 = 20^\circ\text{C}$ он равен 4 ма, а при $t_2 = 50^\circ\text{C}$ соответственно 25 ма, что может привести к неуправляемому вращению (самходу) электродвигателя, поэтому вопрос температурной стабилизации выходного триода ПТ₃ заслуживает особого внимания. Для схем с непосредственным соединением существует условие взаимной компенсации нестабильных токов $I_{\text{к0}}$ смежных каскадов. Приращение напряжения

от температуры $U_k(t)$ может быть сколько угодно малым при небольшой разнице между нулевыми токами $I_{к0.k}$ предыдущего и $I_{к0.(k+1)}$ последующего каскада. Второй каскад предварительного усиления ППУ собран на триоде типа П13, а выходной на более мощном П4. Поэтому разница нулевых коллекторных токов ПТ₂ и ПТ₃ достигает значительной величины.

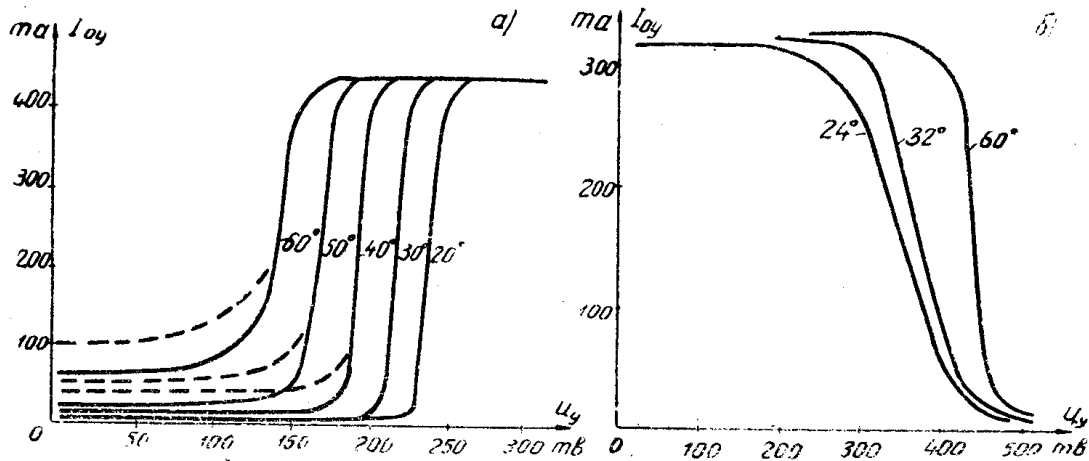


Рис. 3.

Неоднозначность (гистерезис) характеристик вход—выход ППУ, изображенных на рис. 3а, при увеличении и уменьшении входного напряжения U_y объясняется недостаточной температурной стабильностью выходного триода ПТ₃, ввиду принятого пассивного запираения.

Наибольшую опасность для схемы ППУ представляет воздействие пикового перенапряжения, возникающего в обмотках управления МУС при первичном подключении его силовых цепей в начальный режим холостого хода привода. В момент подключения МУС в сеть ток силовой цепи изменяется от нуля до I_{xx} . Это наводит ЭДС взаимной индукции в обмотках управления и смещения МУС. Величина импульса ЭДС взаимной индукции определяется скоростью изменения тока и достигает нескольких сот вольт, рис. 4.

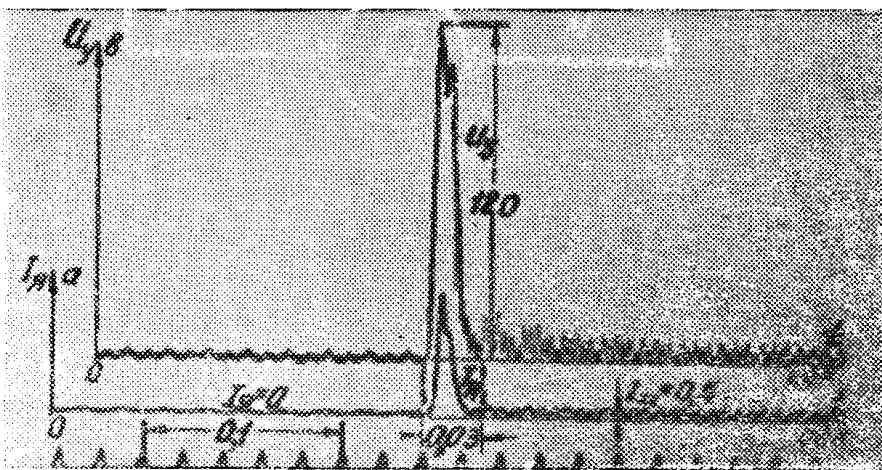


Рис. 4.

В обмотке смещения $e_{см}$ действует согласно с напряжением питания и вызывает лишь кратковременный бросок тока в ее контуре. Поэтому неисправности в цепи смещения отсутствуют.

ЭДС взаимной индукции $e_{оу}$ в обмотке управления ОУ, хотя и действует встречно напряжению питания E_k усилителя, но много больше его по величине. Триод $ПТ_3$ в силу известной обратимости выводов коллектор—эмиттер при смене полярности питающего напряжения полностью открывается и $e_{оу}$ прикладывается к диодам 5В в непроводящем направлении. Исследования показали, что диоды моста, взятые с большим запасом по обратному напряжению, например, Д7Ж ($U_{обр} = 400в$) выдерживают $5 \div 10$ повторных включений силовой цепи МУС. Диоды с номинально необходимым $U_{обр}$, например, Д7А ($U_{обр} = 50в$), выходят из строя при каждом включении.

Из рассмотрения параметров электрического режима работы полупроводниковых триодов усилителя следует, что полупроводниковые триоды $ПТ_1$ и $ПТ_2$ ввиду непосредственной связи между каскадами работают с меньшими по сравнению с номинальными величинами коллекторных напряжений и токов и, следовательно, находятся в разгруженном режиме. В связи с тем, что выходной триод $ПТ_3$ работает на индуктивную нагрузку (ОУ МУС) и имеет нестабильную температурную характеристику, то он является наиболее слабым местом ППУ. При электрическом или тепловом пробое его коллекторного перехода $I_{оу}$ стремится к его максимальному значению и привод получает不受 управляемое вращение. Нулевой выход ППУ и остановка электропривода в этом случае может быть получена изменением режима работы выходного триода так, чтобы при отсутствии управляющего сигнала на входе ППУ выходной $ПТ_3$ был полностью открыт. Такой способ построения схемы ППУ принят также из условия надежности в известной схеме УПП-1 ЭНИМС [3] для систем ЭМУ-Д, где с целью компенсации начальных ампервитков обмотки управления предусмотрено дифференциальное включение дополнительной цепи смещения.

На рис. 4 приведена схема видоизмененного варианта ППУ, исследованная в отраслевой лаборатории Ульяновского политехнического

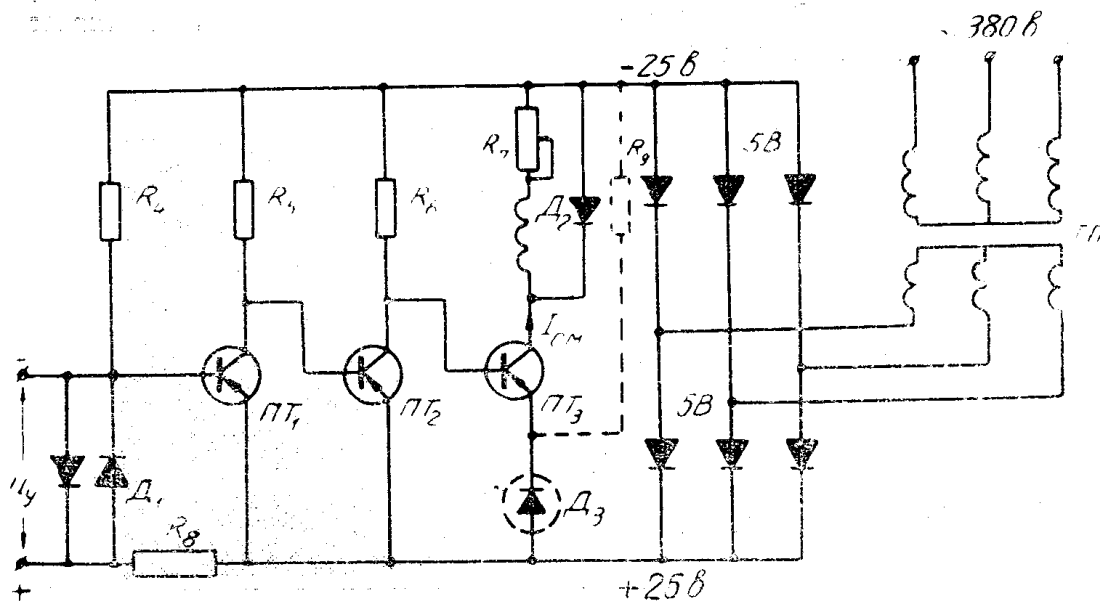


Рис. 5.

института для электропривода МУС-Д и максимально использующая схему серийно выпускаемого ППУ для электропривода ПМУ-9М ЭНИМС. Реализация этого варианта дает по сравнению с системой ЭМУ-Д с УПП-1 дополнительное схемное преимущество: поскольку выходной ПТ₃ нормально открыт, то обмотка МУС, включенная в его коллекторную цепь, нормально обтекается током I_{cm} и совмещает функции управления и смещения. Экспериментально установлено, что в схеме МУС с вынесенной контурной обратной связью, при регулировании скорости вращения двигателя вплоть до номинальной, реверса ампервитков не требуется, т. е. достаточно регулировать ток I_{cm} в совмещенной обмотке управления — смещения от максимума до нуля. В случае же схемы МУС с мостовой контурной связью, когда требуется реверс ампервитков управления, схема ППУ остается той же и отдельная цепь смещения создает дополнительные положительные ампервитки.

Настройка улучшенного варианта ППУ производится так же, как и в схеме [1] подбором сопротивления R_4 в цепи базового смещения триода ПТ, при коротком замыкании входных клемм ППУ и имеет целью достижение минимальной зоны нечувствительности характеристики вход—выход усилителя при полностью открытом выходном триоде ПТ₃, обеспечивающим начальное смещение МУС.

При работе ППУ с реальной входной цепью его характеристика также получает увеличенную зону нечувствительности рис. 2 (кривая 1), которая еще более возрастает при обрыве входной цепи ППУ, приводя его к нулевому выходу и остановке привода, рис. 2б (кривая 2).

В схеме рис. 5 ввиду измененного режима полупроводниковых триодов повышение температуры приводит к более благоприятному, с точки зрения нулевого выхода, правому сдвигу характеристики выход—вход ППУ относительно оси I_{oy} , увеличению его зоны нечувствительности и снижению вероятности возникновения явления самохода при обрыве входной цепи ППУ.

Возрастание тока утечки через коллекторный переход ПТ при его закрытом состоянии, сказывается поэтому лишь в форме некоторого уменьшения величины максимального выхода ППУ, что может быть скомпенсировано частично изменением типа выходного ПТ₃ (П201 вместо П4) или при необходимости почти полностью установкой подпирającego смещения (цепь $D_3—R_9$, показанная на рис. 5 пунктиром).

С целью ограничения величины коллекторных перенапряжений выходного триода ПТ до уровня напряжения питания коллекторных цепей ППУ, его коллекторная нагрузка (последовательное соединение обмоток управления МУС и дополнительного омического сопротивления R_7) шунтирована обратным вентилем. В этом случае, при первичном подключении МУС к сети переменного тока, возникающий в совмещенной обмотке управления — смещения импульс перенапряжения также замыкается в упомянутом разрядном контуре $D_2—OU$ МУС и ограничивается до величины $100 \div 150$ в (рис. 4).

Таким образом, простыми схемными решениями при сохранении принципиальной схемы серийно выпускаемого полупроводникового усилителя к приводам ПМУ-9М-2 устраняется большинство возможных неисправностей исходной схемы. В таблице 1, для сравнения, приведены наиболее вероятные типовые неисправности обеих схем ППУ и их исследования применительно к электроприводу МУС-Д с данными типами ППУ.

Вопросы согласования промежуточного ППУ с силовым МУС с целью достижения оптимальной динамической характеристики этого

типа преобразователя осложняются действием помех на ППУ в реальных приводах и требуют дополнительного исследования и рассмотрения.

Таблица 1

№ п-н	Характеристика неисправности ПУ	Последствие неисправности ППУ в приводе	
		ППУ привода ШМУ-9М ЭНИМС ^а	Улучшенный вариант того же ППУ
1.	Обрыв входной цепи ППУ	При неблагоприятных обстоятельствах (неточная настройка и т. п.), не нулевой выход и неуправляемое вращение привода	Нулевой выход и остановка привода
2.	Короткое замыкание входной цепи ППУ	Нулевой выход и остановка привода	Нулевой выход и остановка привода
3.	Обрыв цепи смещения	Максимальный выход и неуправляемое вращение привода	Максимальный выход и неуправляемое вращение привода
4.	Тепловой или электрический пробой выходного триода ППУ	Максимальный выход и неуправляемое вращение привода	Нулевой выход и остановка привода

ЛИТЕРАТУРА

1. А. Я. Петровский, Я. Б. Розман. «Регулируемый электропривод с магнитными усилителями», «Энергия», 1964.
2. И. Ф. Николаевский. «Эксплуатационные параметры и особенности применения транзисторов», Связьиздат, 1963.
3. Я. С. Бровман, В. Г. Каган, Ф. Д. Кочубиевский, В. А. Найдис. «Электроприводы с полупроводниковым управлением. Системы с электромашинными усилителями», «Энергия», 1964.