

РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРОПРИВОДА МУС-Д с ППУ КЛАССА Д

В. А. СЕВАСТЬЯНОВ, А. П. ИНЕШИН, А. П. РЫБАКОВА
(Рекомендована научным семинаром кафедры ЭПП Томского
политехнического института)

За последние годы отечественные и зарубежные станкостроительные заводы и проектные организации переходят на применение комплектных приводов, причем значительное внимание уделяется использованию магнитных усилителей с самонасыщением (МУС). Из отечественных приводов подобного типа в диапазоне регулирования скорости исполнительного электродвигателя 10:1 и 100:1 наиболее известны широкоприменяемые в промышленности ПМУМ, разработанные ЭНИМСом [2]. Как показано в работе [6, 8] и других исследованиях, разработка подобных приводов более широкого диапазона при требуемой жесткости механических характеристик, динамических показателях и надежности работы вызывает необходимость создания принципиально новых схемных решений регуляторов для систем МУС-Д. и способов стабилизации.

На базе проведенных исследований ряда существующих приводов [6, 2] и рекомендации ЭНИМСа кафедрой «Электропривод и автоматизация промышленных установок» Ульяновского политехнического института разработан и исследован в отраслевой лаборатории института неререверсивный электропривод постоянного тока по системе МУС-Д с ППУ класса Д диапазона регулирования скорости 200:1, отвечающий вышеуказанным требованиям, для механизма подачи суппортов карусельного станка.

Электрическая схема этого привода изображена на рис. 1. Здесь ИД — исполнительный электродвигатель; СПТ — статический преобразователь тока для питания электродвигателя, состоящий из трехфазного выпрямителя и МУС с выходом на переменном токе, включенного по схеме с вынесенной контурной обратной связью; ППУ — промежуточный полупроводниковый усилитель класса Д, используемый в качестве предварительного каскада усиления и включающий широтно-импульсный модулятор (ШИМ), импульсный усилитель (ИУ) и выходной каскад (К); ЗС — задатчик скорости с переменным коэффициентом передачи (m), выполненный на базе серийного переключателя ПП-36 завода НВА, в виде высокоомного дискретного потенциометра (3 ком) и обеспечивающий постоянство статической ошибки по диапазону в функции уставки скорости за счет введения во входной контур ППУ добавочных

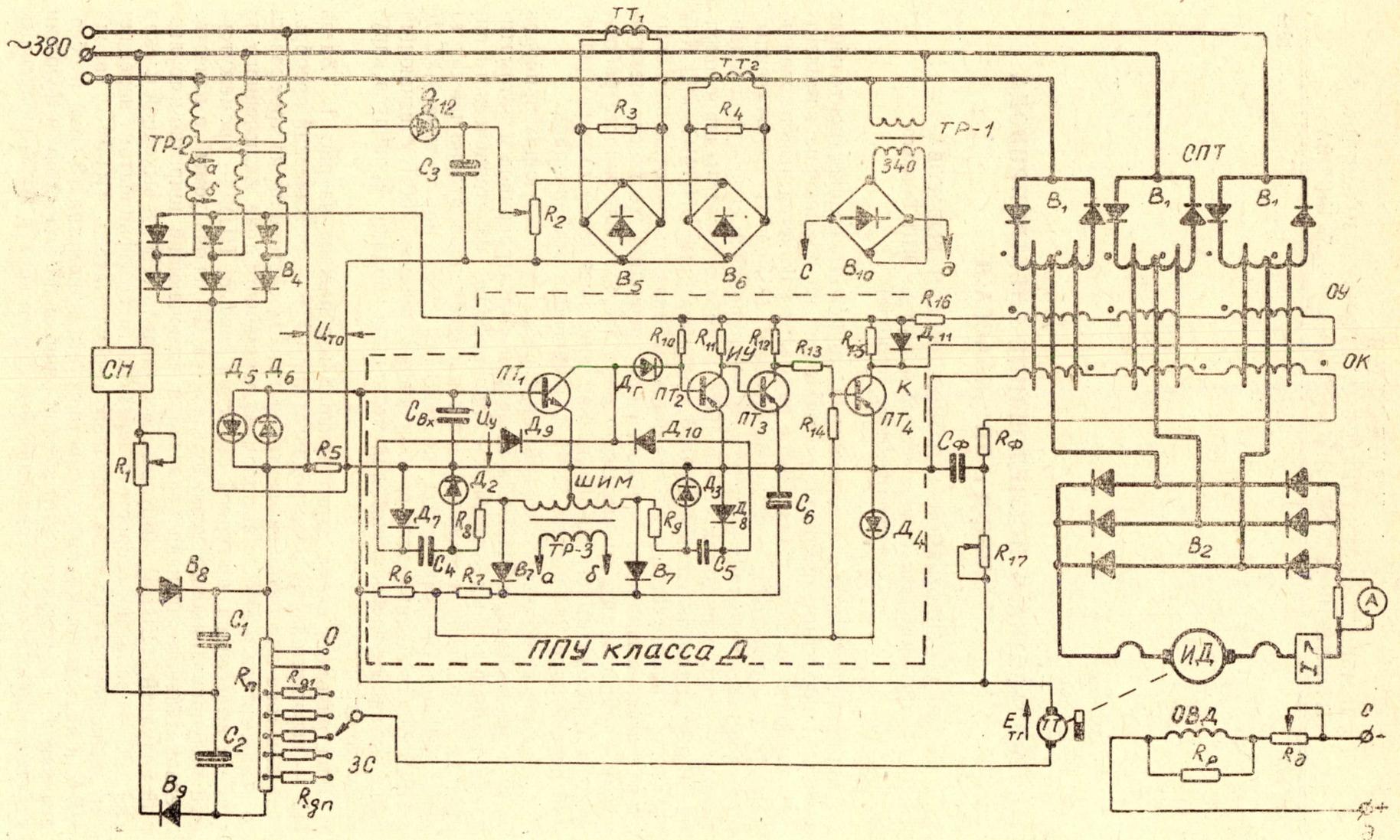


Рис. 1.

сопротивлений R_0 [7]; ТГ — тахогенератор типа ТМГ-30П, используемый в качестве датчика скорости. В качестве статического преобразователя тока может быть использован с незначительной переделкой комплектный силовой блок ПМУ-9М-1 ЭНИМС, серийно изготавливаемый Прокопьевским заводом «Электромашина».

Основные технические данные указанного электропривода сведены в таблицу № 1. Здесь двигатель П-41, с целью улучшения динамики и уменьшения влияния зубцовой пульсации, выбран несколько завышенной мощности (6 квт вместо 4,5 квт).

Исходное состояние схемы определяется нулевым положением регулятора, при этом $U_3=0$, ПТ₁ открыт за счет положительного смещения на его базе по цепи R_6 и находится в насыщении. Поэтому, при разряде конденсатора C_4 (C_5) ввиду малого сопротивления перехода коллектор—эмиттер, напряжение на его выходе равно нулю. Триод ПТ₂ за счет отрицательного смещения по R_{10} открыт и по его цепи эмиттер-коллектор течет ток. Нагрузкой ПТ₂ является R_{11} , подающее одновременно отрицательное смещение на базу ПТ₃. Однако ввиду открытия ПТ₂ база ПТ₃ находится под нулевым потенциалом, что приводит к его закрыванию. Триод ПТ₄ открыт ввиду отрицательного смещения на его базе по цепи R_{12} и R_{13} , поэтому по ОУ течет ток смещения, что приводит к минимальному выходу МУС ($I_a=0,3a$) и двигатель находится в состоянии покоя. При переводе регулятора в рабочее положение на входе ППУ появляется $U_3 \neq 0$ полярности: — на базе, + на эмиттере ПТ₁, что приводит к закрытию ПТ₁, пробоем D_7 и подаче положительных периодических импульсов напряжения с частотой 100 гц. на базу ПТ₂. Серия отрицательных импульсов на выходе ПТ₂ инвертируется и усиливается в ПТ₃, что приводит к появлению импульсов положительной полярности на базе ПТ₄ той же частоты, вызывая уменьшение тока смещения и открывание МУС. Таким образом, выходное напряжение ИУ прямоугольной формы и относительной длительности γ управляет работой выходного каскада усилителя — полупроводникового ключа — К в цепи нагрузки (ОУ). Среднее значение тока в обмотке управления, включенной в цепь питания на время $T^* = \gamma T_k = K_1 U_y$ в течение периода коммутации T_k , пропорционально входному сигналу U_y . Вращение электродвигателя приводит к появлению $E_{тр}$ и выходу МУС пропорциональному $U_y = (U_3 - E_{тр}) m$ в соответствии с уставкой скорости. Возрастание нагрузки на валу двигателя вызывает уменьшение n и $E_{тр}$, что приводит к увеличению U_y , более отрицательному потенциалу на базе ПТ₁, увеличению выхода МУС и восстановлению n до заданного значения.

Для уменьшения постоянной времени ОУ, с целью повышения быстродействия, последовательно с ней включено добавочное сопротивление R_{16} . Защита ПТ₄ от перенапряжений на обмотке управления, возникающих при переходных процессах, осуществляется диодом D_{11} . Пробой ПТ₄ (по переходу эмиттер-коллектор), или обрыв входной цепи ППУ приводят к нулевому выходу МУС на любой скорости, т. к. в этом случае по ОУ течет максимальный ток смещения. Диоды D_5 и D_6 защищают вход ППУ от перенапряжений.

Стабилизация электропривода осуществляется электромагнитным путем по производной суммарного магнитного потока МУС. Для снятия сигнала коррекции используется свободная обмотка управления ОК-МУС [1]. Сигнал коррекции отличается малым содержанием помех, действие которых ослаблено введением простого интегрирующего контура.

№ п-п	Наименование	Т и п	Ед.	Номинальные данные				
				P_n (кВт)	U_n (В)	I_n (а)	n_n (об/мин)	η_n (%)
1.	Исполнительный эл. двигатель	И-41	1	6,0	340	21	3000	84
2.	Магнитный усилитель	5ТА520094	1	5,0	380	17	—	—
3.	Тахогенератор	ТМГ—30П	1	0,02	230	0,87	4000	—
4.	Переключатель	ПП36—21	1	—	—	—	—	—
5.	Трансформатор тока	Тк—20.45/50	2	—	—	—	—	—

В схеме предусмотрен узел токоограничения, выполненный на базе трансформаторов тока и опорного стабилитрона δ_{12} . При превышении током якоря допустимого значения происходит пробой δ_{12} и на вход ППУ подается сигнал (на сопротивление $R_5 = 150$ ом), ограничивающий ток на выходе МУС. В силу известных особенностей статического преобразователя тока на базе МУС электрическое торможение в схеме отсутствует. Реверс и быстрое торможение осуществляется с помощью электромагнитных муфт, широко применяемых в станках.

Данные по конструктивному выполнению, номенклатуре изделий, описанию работы указанных узлов привода и теоретические исследования приведены в [7] и других статьях авторов.

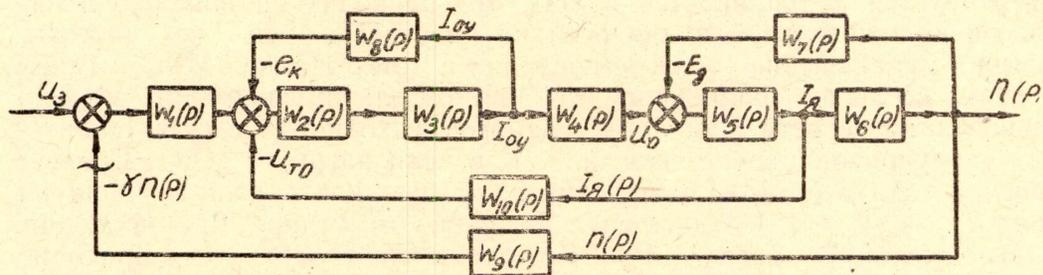


Рис. 2.

Структурная схема разработанной системы приведена на рис. 2. Рассматривая работу САР «в малом» [5], можно принять следующие значения передаточных функций

$$W_5(p) = \frac{1}{T_э p + 1}; \quad W_6(p) = \frac{R_э}{T_м p}; \quad C_э = \frac{U_n - I_{ян} R_я}{n_n}$$

Передаточная функция двигателя:

$$W_0(p) = \frac{1}{T_э T_м p^2 + T_м p + 1}, \quad (1)$$

где $T_м$, $T_э$ — соответственно электромагнитная и электромеханическая постоянные времени электродвигателя с учетом отнесенного к двигателю внутреннего сопротивления МУС.

$$T_M = \frac{GD^2 R_3}{375 C_e C_M}; \quad T_3 = \frac{L_{я}}{R_{я}}; \quad R_3 = R_{\phi} + R_L$$

R_{ϕ} — фиктивное внутреннее сопротивление МУС;

$L_{я}$ — индуктивность цепи якоря.

Передаточная функция МУС без учета запаздывания, влияние которого рассматривается в другой работе авторов:

$$W_{M\gamma}(p) = \frac{K_{M\gamma 1} \cdot K_{M\gamma 2}}{T_{M\gamma} \cdot p + 1}, \quad (2)$$

где $T_{M\gamma}$ — постоянная времени МУС;

$K_{M\gamma 1} = \frac{1}{R_{O\gamma} + R_{1\phi}}$; $K_{M\gamma 2} = K_1 R_3$ — коэффициенты усиления первого и второго каскадов МУС;

K_1 — коэффициент усиления МУС по току.

Введение стабилизирующей обратной связи, как принято в схеме рис. 1, эквивалентно применению дифференцирующего трансформатора [1], поэтому передаточную функцию звена коррекции можно представить в виде:

$$W_K(p) = \frac{e_K(p)}{I_{O\gamma}(p)} = \frac{K_K p}{T_{KP} + 1}, \quad (3)$$

где $K_K = \frac{M(R_{BX} + R_{L2})}{R_{OK} + R_{BX} + R_{L2}}$ — коэффициент передачи корректирующего звена [ом. сек.];

T_K — постоянная времени корректирующей цепи, зависящая от параметров МУС;

M — коэффициент, учитывающий наличие взаимной индукции между обмотками МУС.

Соответственно рис. 2 коэффициент усиления ППУ по напряжению, коэффициент передачи тахогенератора и входного контура ППУ [7] запишутся:

$$W_2(p) = K_{II} \cong \gamma; \quad W_3(p) = \gamma; \quad W_1(p) = m = \frac{R_{BX}}{R_{BX} + R_{T\gamma} + R_{\partial 1} + R_{PK}}$$

Пользуясь известными в линейной теории автоматического регулирования способами преобразования структурных схем, получим передаточную функцию замкнутой САР по управляющему воздействию.

Подставляя в нее значение передаточных функций звеньев САР и пренебрегая ввиду малости $T_K = 0$, после несложных преобразований получим:

$$W(p) = \frac{m \cdot K_{ППУ} \cdot K_{M\gamma 1} \cdot K_{M\gamma 2} \cdot K_{L1} \cdot K_{L2}}{a_0 p^4 + a_1 p^3 + a_2 p^2 + a_3 p + a_4}. \quad (4)$$

Здесь

$$a_0 = T_3 \cdot T_{M\gamma} \cdot T_M \cdot T_K = 0,$$

$$a_1 = T_3 \cdot T_{M\gamma} \cdot T_M + K_{ППУ} \cdot K_{M\gamma 1} \cdot K_K \cdot T_3 \cdot T_M;$$

$$a_2 = T_{M\gamma} \cdot T_M + T_3 \cdot T_M + K_{ППУ} \cdot K_{M\gamma 1} \cdot K_K \cdot T_M;$$

$$a_3 = T_{\text{му}} + T_{\text{м}} + K_{\text{ппу}} \cdot K_{\text{му1}} \cdot K_{\text{к}};$$

$$a_4 = 1 + m \cdot K_{\text{ппу}} \cdot K_{\text{му1}} \cdot K_{\text{му2}} \cdot K_{\text{д1}} \cdot K_{\text{д2}}$$

$$K_{\text{д1}} = \frac{1}{R_3}; \quad K_{\text{д2}} = \frac{R_3}{C_e}.$$

Условие устойчивости привода по Гурвицу при $a_1 > 0; a_2 > 0; a_3 > 0; a_4 > 0$ запишется в виде:

$$\left. \begin{aligned} & (T_{\text{му}} \cdot T_{\text{м}} + T_{\text{э}} \cdot T_{\text{м}} + K_{\text{ппу}} \cdot K_{\text{му1}} \cdot K_{\text{к}} \cdot T_{\text{м}}) \times \\ & \quad \times (T_{\text{му}} + T_{\text{м}} + K_{\text{ппу}} \cdot K_{\text{му1}} \cdot K_{\text{к}}) > \\ & > (T_{\text{э}} \cdot T_{\text{му}} \cdot T_{\text{м}} + K_{\text{ппу}} \cdot K_{\text{му1}} \cdot K_{\text{к}} \cdot T_{\text{э}} \cdot T_{\text{м}}) \times \\ & \quad \times (1 + m \cdot K_{\text{ппу}} \cdot K_{\text{му1}} \cdot K_{\text{му2}} \cdot K_{\text{д1}} \cdot K_{\text{д2}}). \end{aligned} \right\} (6)$$

Отсюда следует, что при заданных параметрах привода устойчивость его работы улучшается с увеличением $K_{\text{к}}$, что практически может быть достигнуто за счет увеличения числа витков $W_{\text{к}}$ корректирующей обмотки и подбором сопротивлений стабилизирующего контура.

Аналитическое выражение механической характеристики без учета токоограничения в линейном приближении может быть получено согласно методике, изложенной в [4]. Уравнение статического равновесия при наличии нагрузки на валу применительно к рассматриваемой САР в замкнутом состоянии может быть представлено в виде:

$$[U_3 - \gamma(U_0 + \Delta U_0 - I_{\text{я}} R_{\text{э}}) C_e^{-1}] \cdot m \cdot K_{\text{ппу}} \cdot K_{\text{му}} = U_0 + \Delta U_0, \quad (7)$$

где под U_0 — понимается напряжение, взятое по фиктивной «характеристике холостого хода» МУС [5], $K_{\text{му}}$, — коэффициент усиления МУС.

Переходя к скорости, можно записать:

$$n = C_e^{-1} (U_0 + \Delta U_0 - I_{\text{я}} R_{\text{э}}). \quad (8)$$

Решая (7) и (8) совместно, получим:

$$n = C_e^{-1} \left(\frac{U_3 \cdot m \cdot K_{\text{ппу}} \cdot K_{\text{му}}}{1 + K_{\text{ппу}} \cdot K_{\text{му}} \cdot \gamma \cdot m \cdot C_e^{-1}} - \frac{I_{\text{я}} \cdot R_{\text{э}}}{1 + K_{\text{ппу}} \cdot K_{\text{му}} \cdot \gamma \cdot m \cdot C_e^{-1}} \right) \cdot (9)$$

Допуская, что статические коэффициенты, входящие в (9), изменяются по диапазону незначительно для рассматриваемой САР, имеем:

$$\gamma = 0,066; K_{\text{ппу}} = 78; K_{\text{му}} = 56; C_e = 0,09.$$

Поэтому, при $0,1 < m < 0,5$, что имеет место в данной схеме,

$$K_{\text{ппу}} \cdot K_{\text{му}} \cdot \gamma \cdot m \cdot C_e^{-1} \approx (300 + 1500) \gg 1.$$

Тогда, пренебрегая единицей в знаменателе выражения (9), получим:

$$n = \frac{1}{\gamma} \left(U_3 - \frac{I_{\text{я}} R_{\text{э}}}{K_{\text{ппу}} \cdot K_{\text{му}} \cdot m} \right) = n_0 - \Delta n. \quad (10)$$

Из (10) следует, что при $I_{\text{я}} = \text{Const}$, Δn зависит от m . Выявим, как должно изменяться m по диапазону для обеспечения постоянства статической точности ($\Delta \% = \text{Const}$) в функции уставки скорости, что необходимо при работе привода подачи тяжелых станков [3]. Для этого в линейном приближении можно воспользоваться выражением:

$$K = \frac{\Delta n_{\text{р}} \%}{\Delta \%} - 1, \quad (11)$$

где: K — статический коэффициент усиления разомкнутой САР, требуемый для обеспечения необходимой статической точности ($\Delta\%$);

$\Delta n_p\%$ — относительное отклонение скорости в разомкнутой САР.

С другой стороны, для рассматриваемой САР в разомкнутом состоянии имеем:

$$K = m \cdot K_{ппу} \cdot K_{му} \cdot \gamma \cdot C_e^{-1} \quad (12)$$

Приравнивая правые части выражений (11) и (12), получим:

$$m \cdot K_{ппу} \cdot K_{му} \cdot \gamma \cdot C_e^{-1} = \frac{\Delta n_p\%}{\Delta\%} - 1.$$

Решая последнее равенство относительно « m » применительно к работе привода на нижнем пределе диапазона регулирования скорости при изменении нагрузки на валу от $0,3 M_n$ до M_n , пренебрегая единицей, найдем максимальное значение коэффициента передачи входного контура ППУ.

$$m_{\max} = \frac{1}{K_{\max}} \cdot \frac{\Delta n_{рм}\%}{\Delta\%} \quad (13)$$

Здесь,

$$\Delta n_{рм}\% = \left(\frac{n_{ом} - 0,3 I_{ян} \cdot R_{эм} \cdot C_e^{-1}}{n_{нм}} - 1 \right) \cdot 100\%$$

$$K_{\max} = K'_{ппу} \cdot K'_{му} \cdot \gamma \cdot C_e^{-1}$$

Индекс « m » означает, что значение физических величин в полученном уравнении относится к механической характеристике при работе электропривода на нижнем пределе диапазона, индекс « n » означает, что $M_c = M_n$, $K'_{ппу}$ и $K'_{му}$ — статические коэффициенты усилителей на нижнем пределе диапазона регулирования скорости.

Приравнивая указанные величины к текущим значениям при $M_c = M_n$, получим взаимосвязь между m и n для любой уставки скорости n_n , при потоке возбуждения $\Phi = \Phi_{ном}$

$$m = \frac{100}{K'} \left(\frac{n_o - 0,3 I_{ян} \cdot R_{э} \cdot C_e^{-1}}{n_n} - 1 \right) = f(n_n) \quad (14)$$

Здесь для обеспечения постоянства статической точности по диапазону можно принять $K' = K_{ппу} K_{му} \gamma C_e^{-1} \Delta\% = \text{Const}$, а $R_{э}$, в общем случае, является сложной функцией скорости n . Полагая для упрощения анализа, что $R_{э} = R_{э,р} = \text{Const}$, можно считать, что для обеспечения по диапазону $\Delta\% = \text{Const}$ взаимосвязь между m и n должна осуществляться по убывающему в функции скорости примерно гиперболическому закону.

Следует отметить, что выражение (14) справедливо в линейном приближении и может быть использовано для проведения анализа влияния m на жесткость механических характеристик по диапазону. В реальном приводе $K_{ппу}$; $K_{му}$; $R_{э}$ зависят от скорости, поэтому m является сложной функцией скорости электродвигателя и правильный подбор m по диапазону может быть осуществлен только экспериментальным путем.

На рис. 3 приведены статические характеристики электропривода, снятые экспериментальным путем. Из них следует, что в заданном диапазоне применение регулятора с переменным коэффициентом усиления

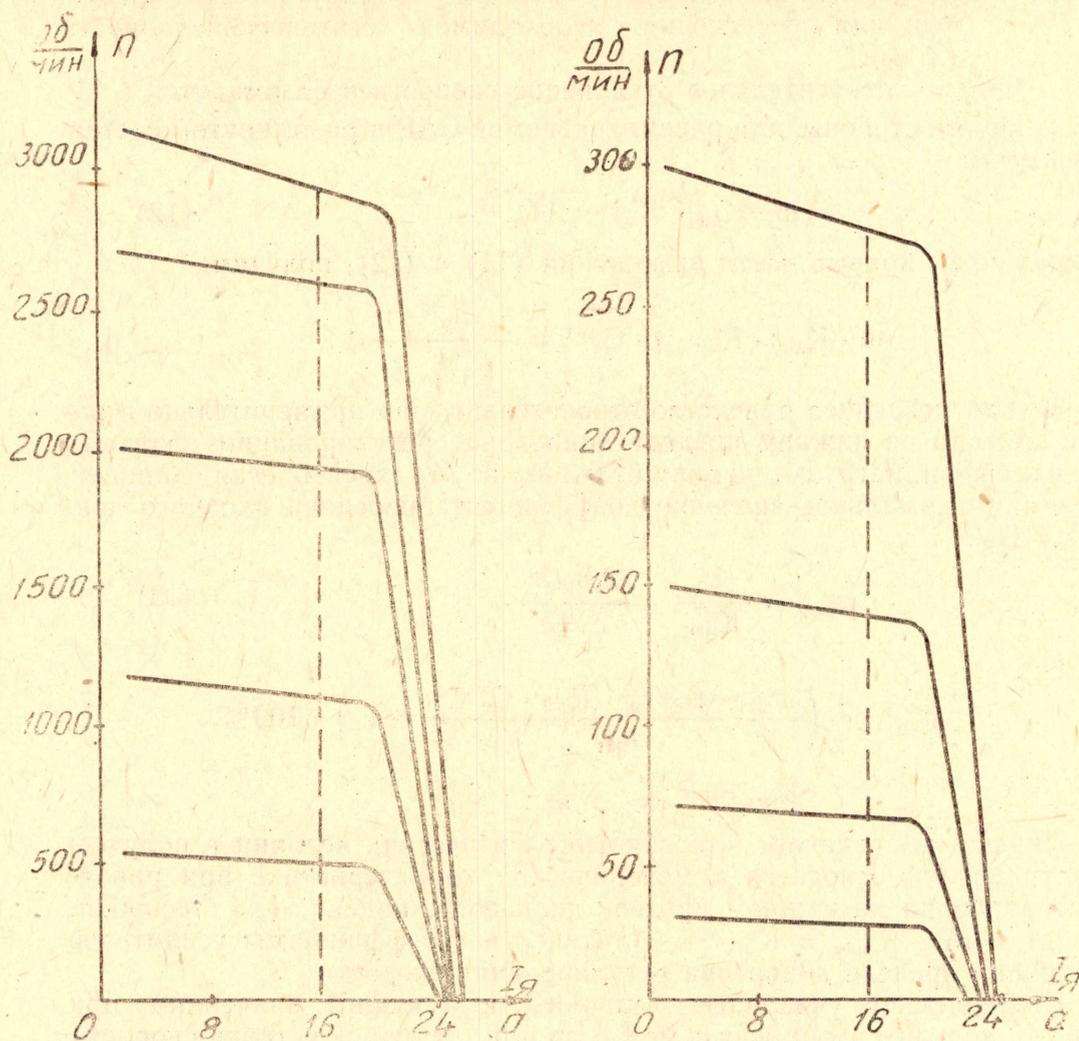


Рис. 3.

обеспечивает примерное постоянство статической ошибки в функции уставки скорости, при этом жесткость механических характеристик в соответствии с настройкой составляет $7 \div 8\%$, при изменении тока I_a нагрузки от 2 до 16а, а токоограничение обеспечивает ток упора, который не выходит за пределы допустимого и в соответствии с уставкой находится в пределах 24а.

На рис. 4 приведены осциллограммы $n=f(t)$ и $I_a=f(t)$, снятые для скоростей 15, 30 и 3000 об/мин.:

а) для случая пуска без нагрузки; б) для приема и сброса нагрузки, при работе двигателя на скоростях 15 и 30 об/мин.; в) для переключения с одной скорости на другую.

$$\text{Здесь: } +\sigma\% = \frac{n_{\text{мак}} - n_{\text{н}}}{n_{\text{н}}} \cdot 100\% ; \quad -\sigma\% = \frac{n_{\text{мин}} - n_{\text{н}}}{n_{\text{н}}} \cdot 100\%$$

—соответственно, положительное и отрицательное перерегулирование,

$\Delta\%$ — статическая точность, U_y — входной сигнал,
 M_c — статический момент.

Из осциллограмм видно, что наибольшая просадка скорости, время переходного процесса, величина перерегулирования и относительная неравномерность скорости вращения, вызываемая оборотной и зубцовой пульсациями момента, наблюдаются на нижнем пределе диапазона ($D=200:1$) при $n=15$ об/мин., что характерно для глубоко регулируе-

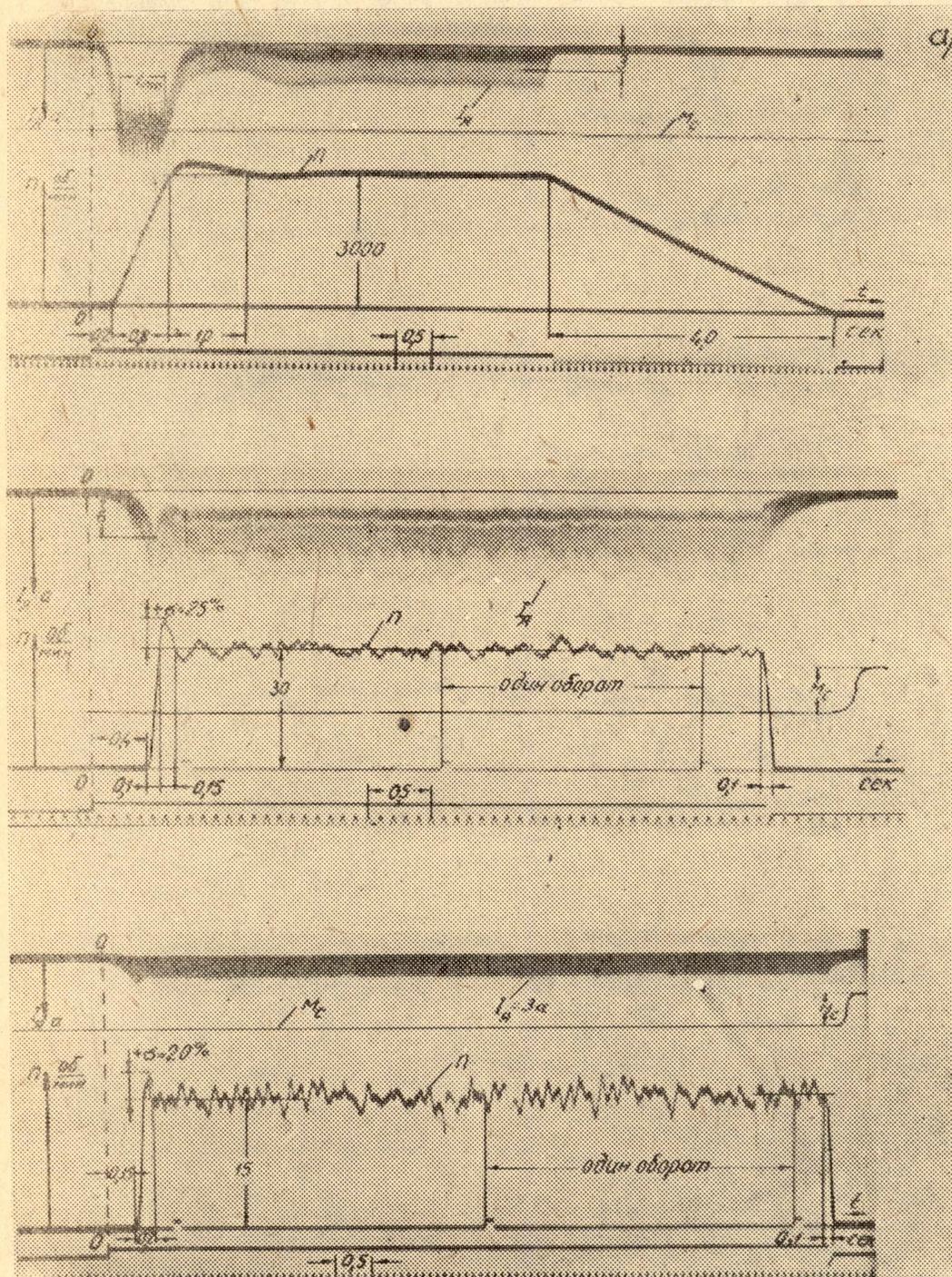


Рис. 4а.

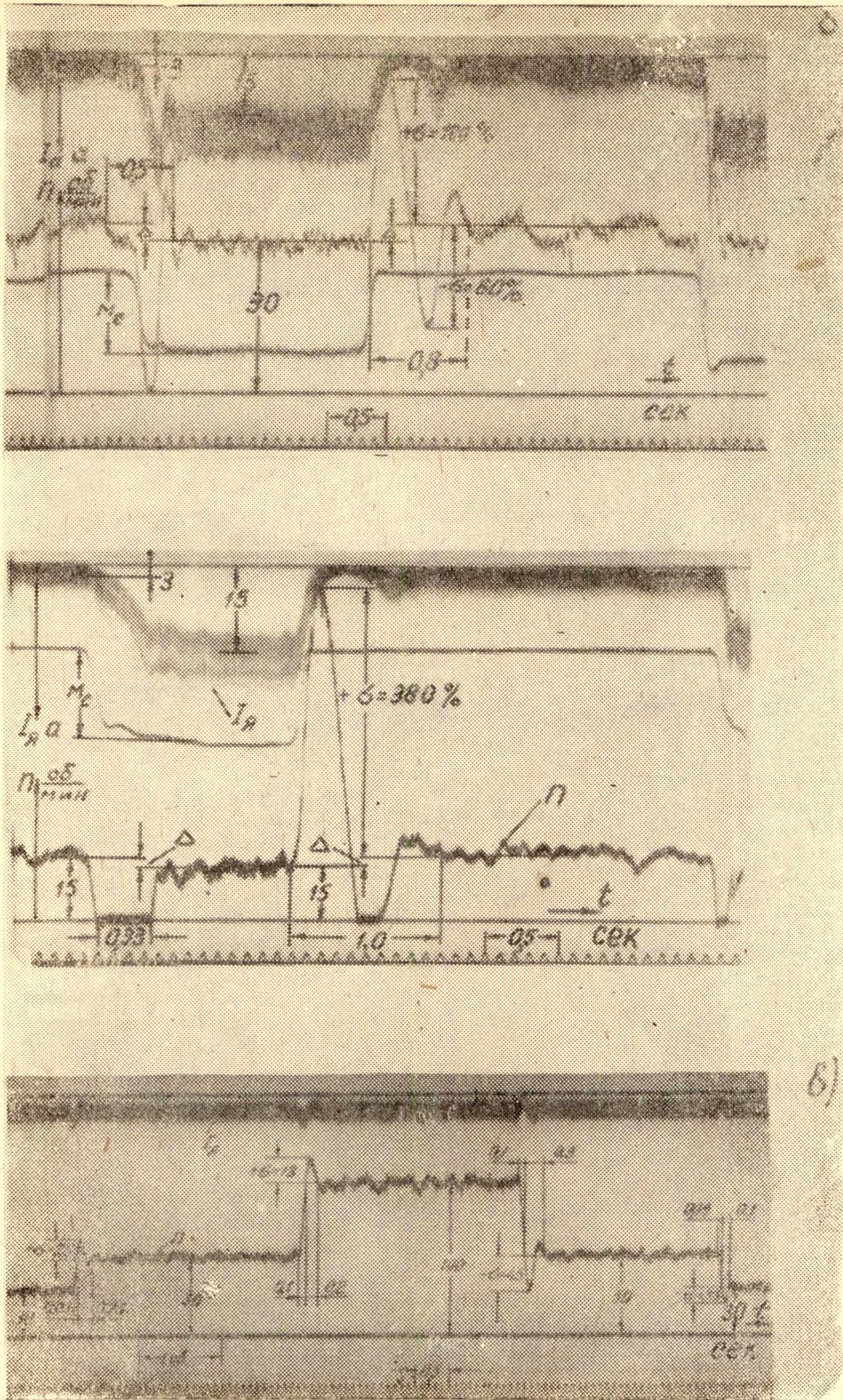


Рис. 46, в

мых приводов с магнитными усилителями. Однако, как показали эксперименты при обработке металла, это не выходит за рамки требований, предъявляемых к механизмам подачи суппортов тяжелых карусельных станков, для которых разработан рассматриваемый привод, так как по условиям технологического процесса ожидаемое возмущение по нагрузке задается в пределах $(15 \pm 25)\%$ от номинального момента. Поэтому в целом можно считать полученные показатели вполне удовлетворительными. Работа токоограничения видна на осциллограмме пуска двигателя на скорость $n=3000$ об/мин. ($t_{то} = 0,6$ сек.). Стабилизация привода надежно обеспечивается по всему диапазону. Статическая ошибка в соответствии с настройкой $\Delta\% = 7 \pm 8\%$.

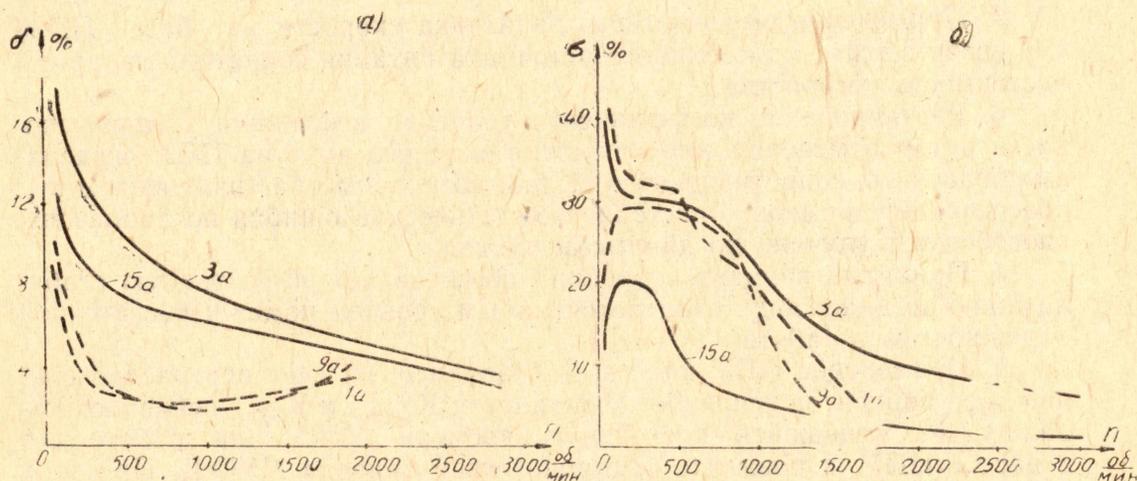


Рис. 5.

На рис. 5а и б приведены полученные в результате обработки осциллограмм зависимости $\sigma = f(n)$ перерегулирования САР в переходных процессах по управляющему воздействию и кривые $\delta = f(n)$ показателя неравномерности скорости вращения исполнительного электродвигателя по диапазону:

$$\delta\% = \frac{P_{\max} - P_{\min}}{P_{\max} + P_{\min}} \cdot 100\%$$

Для сравнения на этом же рисунке (пунктиром) приведены аналогичные зависимости, характерные для известной системы ЭМУ-Д [3] с промежуточным электронным усилителем и исполнительным двигателем серии ПН.

Разработанный электропривод по системе МУС-Д с ППУ несколько превосходит упомянутую систему ЭМУ-Д с двигателем ПН по качеству переходного процесса при пуске привода, но уступает ей по величине неравномерности скорости вращения. Неравномерность можно уменьшить при замене двигателя серии П на ПБСТ, рассчитанного на эксплуатацию в условиях машиностроительного производства. Применение ППУ класса Д позволило уменьшить постоянную $T_{му}$ за счет перераспределения коэффициентов усиления $K_{ппур}$ и $K_{пур}$ по мощности основного канала САР, а уменьшение просадки скорости достигается применением нелинейной коррекции, что подробно освещено в других статьях авторов и [9].

Испытание разработанного электропривода в условиях завода УЗТС на механизме подачи суппортов карусельного станка модели 1580 показали положительные результаты.

Выводы

1. Проведенные исследования показали возможность создания надежного в работе электропривода диапазона 200:1 по системе МУС-Д с ППУ класса Д на базе стандартных МУС типа УМЗП или серийного привода ПМУ-9М-1, двигателя П-41 и тахогенератора ТМГ-30П применительно к механизму подачи суппортов тяжелых карусельных станков с удовлетворительными статическими и динамическими показателями, не уступающими по ряду таковых установленному приводу ЭМУ-Д с двигателем ПН на карусельном станке модели 1580, имея некоторые преимущества, свойственные приводам со статическими преобразователями тока.

2. Применение высокоомного задатчика скорости на базе ПП36 и, в связи с этим, маломощного источника питания сократило габариты и стоимость устройства.

3. Регулирование коэффициента усиления в функции уставки скорости путем изменения сопротивления входного контура ППУ введением добавочных сопротивлений в секции потенциометра (изменением m), обеспечивает примерное постоянство статической ошибки по диапазону, способствует улучшению динамики привода.

4. Принятый вариант коррекции обеспечивает эффективную стабилизацию по диапазону, отличается малым уровнем помех и достаточной надежностью в работе.

5. Применение ППУ класса Д позволило, за счет перераспределения коэффициентов усиления по мощностям $K_{ппур}$ и $K_{мур}$ основного канала САР, уменьшить постоянную времени МУС, при работе его в паре с ППУ, и повысить быстродействие привода МУС-Д. При этих условиях, с учетом перехода на МУС с токовой обмоткой управления и ШИМ с $f_c = 300$ гц., постоянная практически может быть сведена к нулю и, при соответствующей стабилизации, преобразователь МУС-Д по быстродействию практически ничем не будет отличаться от БМУ при более простом схемном решении.

6. Схемным решением ППУ надежно защищен от перенапряжений, возникающих в обмотках управления при коммутации силовой цепи МУС; наиболее вероятные неисправности: обрыв входной цепи, выход из строя выходного триода (типа пробой коллекторного перехода) приводит лишь к начальному нулевому выходу ППУ, запирацию МУС и остановке двигателя.

7. Применением нелинейной коррекции, при необходимости, просадка скорости и перерегулирование при сбросе нагрузки могут быть значительно уменьшены.

8. Расширение диапазона регулирования скорости, при заданной жесткости механических характеристик и соответствующих требованиям динамических показателей, можно ожидать при применении двигателя ПБСТ и более совершенного тахогенератора.

ЛИТЕРАТУРА

1. М. А. Розенблат. Магнитные усилители. Изд. «Советское радио», том II, 1960.
2. А. Я. Петровский, Я. Б. Розман. Регулируемый электропривод с магнитными усилителями. Изд. «Энергия», 1964.
3. М. Е. Верхолат. Современное состояние электропривода металлорежущих станков. Ленинград, ЛДНТП, Современный автоматизированный электропривод, вып. 4, 1963.
4. А. А. Сиротин. Автоматическое управление электроприводами. Госэнергоиздат, Москва — Ленинград, 1958.

5. М. А. Боровиков. Динамические процессы в электроприводе по системе однофазный магнитный усилитель-двигатель. Известия ВУЗ, «Электромеханика», 1965.

6. В. А. Севастьянов, А. И. Есин, Г. С. Сидоров. Анализ схемных решений привода ПМУ с применением МУ единой серии. Электрические машины и автоматизированный электропривод. Изд. Ленинградского политехнического института, 1963.

7. В. А. Севастьянов, А. П. Инешин. Об улучшении статической точности и стабилизации регулируемых электроприводов МУС-Д. Ученые записки Ульяновского государственного педагогического института. Том 20, выпуск 4, 1965.

8. В. А. Севастьянов, А. И. Есин, Г. С. Сидоров. О расширении диапазона регулирования скорости электродвигателя в приводах с магнитными усилителями. Ученые записки Ульяновского государственного педагогического института имени И. Н. Ульянова. Том 19, выпуск 2, 1964.

9. А. П. Инешин, В. А. Севастьянов. О повышении быстродействия в системах с магнитными усилителями. Ученые записки Ульяновского государственного педагогического института. Том 20, выпуск 4, 1965.