

**К ВОПРОСУ ПОВЫШЕНИЯ БЫСТРОДЕЙСТВИЯ  
И УЛУЧШЕНИЮ КАЧЕСТВА РЕГУЛИРОВАНИЯ В СИСТЕМАХ  
МУС-Д С ППУ**

**В. А. СЕВАСТЬЯНОВ**

(Рекомендовано научным семинаром кафедры ЭПП Томского  
политехнического института)

Надежность в работе, статическая и динамическая точность регулирования определяют качество современного автоматизированного электропривода тяжелых металлорежущих станков. В значительной степени выполнение этих требований зависит от показателей преобразователя и исполнительного электродвигателя САР. В приводах МУС-Д с ППУ заслуживает внимание вопрос исследования повышения быстродействия. Определенное сочетание полупроводниковых диодов и триодов с обмотками управления МУ, связанное с усложнением схемы ввиду раздельного управления дросселями и снижения коэффициента усиления по мощности, привело к созданию нового типа быстродействующих магнитных усилителей (БМУ) — полупроводниково-магнитных коммутаторов, отличающихся стабильностью коэффициента усиления и частотных характеристик [2].

Проведенные исследования показали, что применение промежуточных полупроводниковых усилителей (ППУ) в комплекте с обычными магнитными усилителями самонасыщения (МУС), при определенных условиях, дает возможность получения той же оптимальной динамической характеристики как и в БМУ при более простом схемном решении в многофазном МУС, и позволяет использовать серийные ППУ.

Три основные причины инерционности МУС, определяют его быстродействие [1]: возникновение короткозамкнутых контуров в электрических цепях; полупериодное запаздывание и инерционность, обусловленная связью между изменением потоков в сердечниках схемы МУС через общую цепь управления. Эта связь приводит к увеличению изменения потока управляемого дросселя за счет ЭДС, наведенной на обмотке управления другого, находящегося в состоянии «опроса» — рабочим напряжением, т. е. за счет изменения потока в другом сердечнике. При этом выходное напряжение будет определяться не только значением сигнала управления в этот управляющий полупериод, но также зависеть от величины управляющего сигнала в предыдущий полупериод. В результате возникает инерционность, которая представляется обычно звеном первого порядка с постоянной времени  $T_{му}$ .



величины выходной мощности ППУ, частоты ШИМ, схемных решений и др., проделано следующее. Первоначально выходной каскад ППУ был поставлен в условия работы:

$$E_k = 20 \text{ в}; I_{oy} = 0,3 \text{ а}; R_d = 50 \text{ ом}; f_k = 100 \text{ гц.}$$

Параметры совмещенной обмотки управления-смещения при этом были приняты:

$$W_{oy} = 200 \text{ вит}; R_{oy} = 15 \text{ ом}; P_{\text{мак}} = E_k I_{oy} = 20 \cdot 0,3 = 6 \text{ вт}$$

Силовая цепь серийного МУС типа УМ. ЗП—32.45.31,  $P_n = 4,5 \text{ кВт}$ ,  $U_n = 340 \text{ в}$ ,  $K_{\text{дин}} = 13 \cdot 10^3 \text{ сек.}^{-1}$ , была собрана по схеме с вынесенной к. о. с. Тогда ожидаемая постоянная времени может быть подсчитана, с достаточной степенью точности, по известной формуле:

$$T_{\text{му}} = \frac{K_{\text{мр}}}{K_{\text{дин}}} = \frac{750}{13 \cdot 10^3} = 0,058 \text{ сек.}$$

где коэффициент усиления МУС по мощности определяется отношением

$$K_{\text{мр}} = \frac{P_n}{P_{\text{мак}}} = \frac{4,5 \cdot 10^3}{6} = 750,$$

а динамический коэффициент усиления  $K_{\text{дин}}$  МУС взят по каталогу. Для оценки правильности выбора величины коммутирующей частоты  $f_k = 100 \text{ гц}$  взят случай непредельного скачка сигнала управления, когда скважность импульсов управления  $\gamma$  изменялась от 0 до 0,7. При этом ток нагрузки регулировался от  $I_{\text{хх}} = 0,6 \text{ а}$  до  $I_{\text{уст}} = 18 \text{ а}$ .

Из осциллограммы рис. 2а следует, что постоянная времени переходного процесса при увеличении тока нагрузки составляет 0,25 сек., вместо ожидаемой 0,058 сек., а при уменьшении 0,1 сек. При этом токи рабочей цепи и цепи управления содержат резко выраженную 100 гц составляющую. Аналогично при предельном скачке сигнала управления (при изменении  $\gamma$  от 0 до 1) и прочих равных условиях были получены следующие величины постоянных времени: при увеличении тока нагрузки 0,05 сек., при спаде по-прежнему 0,1 сек. (осциллограмма рис. 2 б). Следовательно, работа ППУ класса Д на частоте ШИМ  $f_k = 100 \text{ гц}$  вызывает нежелательную модуляцию выходного напряжения МУС и затягивает время переходного процесса, действуя как эквивалентная помеха (помеха снижает быстродействие). Величина же постоянной времени переходного процесса при уменьшении тока нагрузки до  $I_{\text{хх}}$  остается примерно той же и определяется инерционностью контуров, замыкающихся при переходном процессе в силовой цепи, что характерно для схемы с вынесенной к. о. с. МУС.

Верхний предел  $f_k$  ограничен увеличением тепловых потерь в ПТ, при работе его в режиме переключения, а также сравнительной сложностью схем источников повышенной частоты. Поэтому, с учетом дискретного характера работы МУС, с точки зрения быстродействия, целесообразно остановиться на частоте ШИМ ППУ 300 гц и схеме с мостовой к. о. с.

Для проверки правильности вышеуказанных предложений и выявления возможности перевода МУС в режим БМУ выходной ПТ (рис. 1) был поставлен в режим работы при следующих условиях:

$$E_k = 20 \text{ в}; I_{oy} = 3 \text{ а}; R_{oy} = 6,5 \text{ ом}; f_k = 300 \text{ гц.}$$

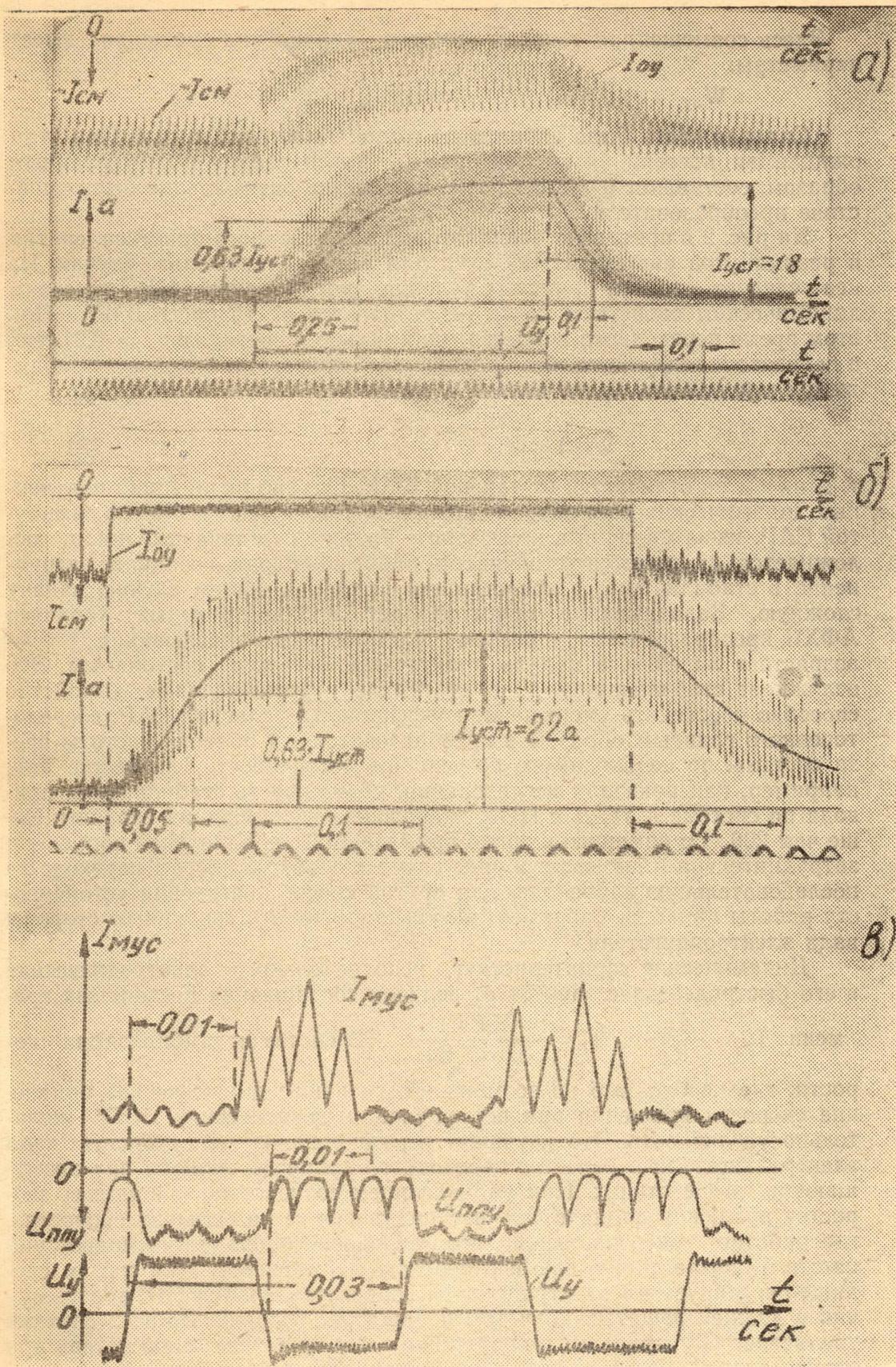


Рис. 2. Осциллограммы переходного процесса в преобразователе ППУ-МУС:  
а — для схемы с вынесенной к. о. с. при  $f_k = 100$  гц;  $\gamma = 0 \div 0,7$ ;  $P_{\max} = 6$  вт,  
б — то же для  $\gamma = 0 \div 1$ ,  
в — для схемы  $\gamma$  мостовой к. о. с. при  $f_k = 300$  гц;  $\gamma = 0 \div 0,7$ ;  $P_{\max} = 60$  вт.

Здесь совмещенная токовая обмотка управления-смещения имеет параметры:

$$W_{oy} = 20_{\text{вит}}; R_{oy} = 0,2 \text{ ом}; P_{\text{мак}} = 20 \cdot 3 = 60_{\text{вт}}.$$

Силовая часть была собрана по схеме с мостовой к. о. с. При этом ожидаемая постоянная времени МУС, подсчитанная вышеуказанным образом, составляет 0,006 сек., т. е. ожидается оптимальное быстродействие преобразователя.

На рис. 2 в приведена осциллограмма переходного процесса, снятая в разомкнутой системе ППУ-МУС, для рассматриваемого случая. Из нее следует, что при принятых условиях режим работы МУС по своим динамическим свойствам почти не отличается от такового БМУ. При этом время переходного процесса минимально и составляет  $\tau = 0,01$  сек., а передаточная функция, без большой погрешности, в линейном приближении может быть представлена в виде:

$$W(p) = K_{\text{ми}} e^{-p\tau}, \quad (2)$$

т. е. ничем не отличается от таковой БМУ. Однако реализация полученных динамических параметров преобразователя ППУ—МУС в замкнутой САР, из-за наличия в нем звена с постоянным запаздыванием, осложняется: ухудшается устойчивость работы привода, возникает затруднение в стабилизации и представляет собой, в общем случае, задачу сложную. Запаздывание обуславливает неблагоприятный характер АФХЧ преобразователя; с ростом частоты угол запаздывания  $\varphi = \omega\tau$  возрастает линейно, а модуль практически остается постоянным. Это осложняет стабилизацию, т. к. не всякое корректирующее устройство способно обеспечить уменьшение коэффициента усиления САР, сосредоточенного главным образом в преобразователе, в области частоты среза системы до необходимого по условию устойчивости значения. Так, например, как показали исследования, возможность стабилизации привода по системе МУС-Д с ППУ диапазона регулирования скорости выше чем 200 : 1 с помощью широко применяемой параллельной коррекции затруднительна и вызывает в ряде случаев необходимость в переходе на последовательную коррекцию или другой способ повышения устойчивости работы привода, например, улучшением демпфирования со стороны вала электродвигателя.

Динамические характеристики исполнительного электродвигателя и его быстродействие зависит от величин соотношения постоянных вре-

$$\text{мени } T_{\text{я}} = \frac{L_{\text{я}}}{R_{\text{я}}} \text{ и } T_{\text{м}} = \frac{GD^2 R_{\text{я}}}{375 C_{\text{е}} C_{\text{м}}}. \quad \text{В системах стабилизации ско-}$$

рости, где необходимо по возможности меньшее динамическое изменение скорости вращения при возмущающих воздействиях,  $GD^2$  желательно увеличивать. Это улучшает демпфирование со стороны вала электродвигателя и качество переходного процесса привода при возмущающих воздействиях. При управляющем воздействии на малых скоростях вращения влияние  $GD^2$  незначительно, а на больших скоростях, где работает токоограничение, его увеличение приводит к пропорциональному возрастанию времени переходного процесса. Для систем следаще-регулируемого электропривода вопрос увеличения  $GD^2$  противоречив и должен решаться с учетом конкретных условий. Во всех случаях увеличение  $GD^2$  приводит к пропорциональному возрастанию потерь при переходном процессе и ухудшению быстродействия привода.

Применительно к машинам новой серии П следует отметить, что ввиду выполнения двигателей 1 и 3 габаритов двухполюсными индук-

тивность их обмотки якоря сравнительно велика, а большие значения отношений диаметра якоря к его длине привели к увеличенным значениям электромеханических постоянных времени  $T_m$ . Отсутствие конструктивного исполнения машин серии П со встроенными тахогенераторами вызывает необходимость их сочленения с валом двигателя в производственных условиях и к появлению, в связи с этим, обратной пульсации напряжения тахогенератора, ухудшающей динамику привода.

При работе на нижнем пределе диапазона, т. е. в основном рабочем режиме глубокорегулируемого электропривода, на работу исполнительного электродвигателя сказываются также второстепенные факторы, учетом которых при проектировании приводов обычно незаслуженно пренебрегают. Это периодические составляющие момента нагрузки, вызванные механическими неточностями кинематической цепи, наличием участков сухого трения или неоднородностями обрабатываемого материала, плохим качеством сочленения тахогенератора с двигателем и их магнитной асимметрией. Ввиду большого коэффициента усиления замкнутой САР, даже незначительное возмущение сильно сказывается на ее поведении, создавая видимость неустойчивой работы привода. Изменение скорости исполнительного электродвигателя также имеет периодический характер с частотами кратными таковым возмущения. При этом амплитуда и фаза колебаний определяется частотными свойствами замкнутой САР. При неблагоприятных условиях совпадения частот возмущения и среза САР возможны резонансные явления.

Качество сочленения пристроенного тахогенератора с двигателем определяет степень неравномерности его скорости вращения. На участке средних скоростей, при достаточно жестком соединении валов в этом сочленении, наличие эксцентриситета вызывает появление в выходном напряжении тахогенератора переменной составляющей обратной частоты

$$f_{об} = \frac{n}{60} \text{ гц.}$$

Дополнительная асимметрия, связанная с механическим биением подшипников двигателя или тахогенератора, либо биением магнитопро-

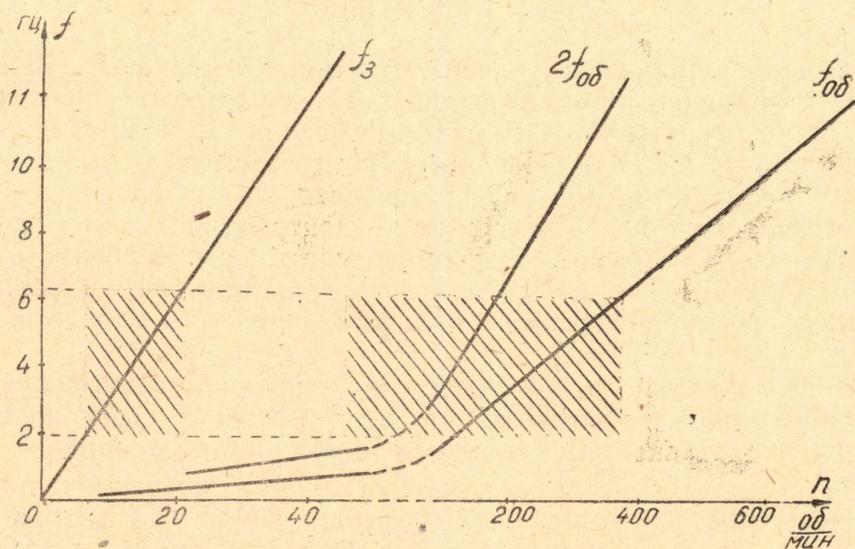


Рис. 3. График зависимости частоты вынужденных колебаний скорости регулируемого электропривода (двигатель П-32).

вода тахогенератора, приводит к еще одной составляющей с двойной по отношению к оборотной частоте (осциллограмма рис. 4 а). Частоты оборотных колебаний пропорциональны скорости вращения электродвигателя и отрабатываются САР в форме вынужденных колебаний в той зоне скоростей, в которой  $f_{об}$  или  $2f_{об}$  находятся в полосе пропускания САР [3].

На рис. 3 приведены графики, рассчитанные для двигателя П-32 зависимости  $f(n)$  частоты вынужденных колебаний  $f$  электропривода в функции скорости вращения  $n$  электродвигателя. При полосе пропускания САР порядка  $2 \div 6$  гц зона скоростей, связанных с оборотными колебаниями (выделена штриховкой), составляет  $50 \div 400$  об./мин. При повышении скорости вращения электродвигателя частоты оборотных пульсаций тахогенератора быстро увеличиваются и электропривод практически не отрабатывает эти колебания. Однако, если в системе электропривода имеется промежуточный усилитель с преобразованием сигнала на несущей частоте (50 гц) или усилитель класса Д с источником постоянной частоты внутренней коммутации ( $50 \div 100$  гц), возможно возникновение низкочастотных колебаний. Частота биений появляющихся на скоростях вращения близких к 1500 и 3000 об./мин. равна разности частот возмущений и коммутации ППУ.

По условиям допустимой тепловой нагрузки, рассчитываемой для длительного режима работы на низких скоростях вращения, величина тока в обмотке возбуждения принимается несколько меньше номинальной. При работе с ослабленным полем на верхних скоростях возникает известный эффект размагничивания и искажения рабочих характеристик двигателя [4]. Искаженная механическая характеристика не обладает определенным статизмом и в соответствии с этим меняется устойчивость работы электродвигателя.

Внизу диапазона регулирования при очень низких скоростях вращения двигателя проявляется влияние на качество регулирования его магнитной асимметрии, вызванной пазовыми пульсациями потока возбуждения и зависимыми пульсациями вращающего момента двигателя. Частота зубцовых пульсаций скорости вращения двигателя зависит от числа пазов  $z$  якоря.

$$f_3 = \frac{zn}{60}$$

На рис. 3 приведена зависимость частоты зубцовых пульсаций от скорости вращения применительно к двухполюсному двигателю типа П-32, проявляющихся при полосе пропускания САР  $2 \div 6$  гц на участке скорости  $5 \div 25$  об./мин. Последнее подтверждается приведенной на рис. 4 б осциллограммой пуска и последующей работой на холостом ходу двигателя типа П-32 в системе электропривода, а также осциллограммой рис. 4 а. Зона зубцовых пульсаций при требуемом диапазоне  $200 : 1$  может быть сдвинута за его пределы при применении исполнительного электродвигателя с большим числом пазов, т. е. машины с  $P > 1$ .

Таким образом, низкочастотные вынужденные колебания в САР могут возникнуть практически на всем диапазоне регулирования скорости, создавая впечатление неустойчивой работы привода.

Радикальным методом улучшения качества регулирования скорости при периодических колебаниях нагрузки является построение САР с применением корректирующих связей по основному возмущению — так называемые комбинированные системы [5]. Однако это на современном этапе развития автоматики в станкостроении связано с неприемли-

мым усложнением цепей управления. В качестве практического, часто достигающего цели, способа улучшения динамики можно рекомендовать установку двигателя завышенной мощности, с большим числом пазов и большей электромеханической постоянной времени. Так, при разработке электропривода по системе МУС-Д с ППУ диапазона регулирования скорости 200:1 для механизма подачи тяжелого карусельного станка по номинальным данным удовлетворяли следующие два варианта исполнительного электродвигателя:

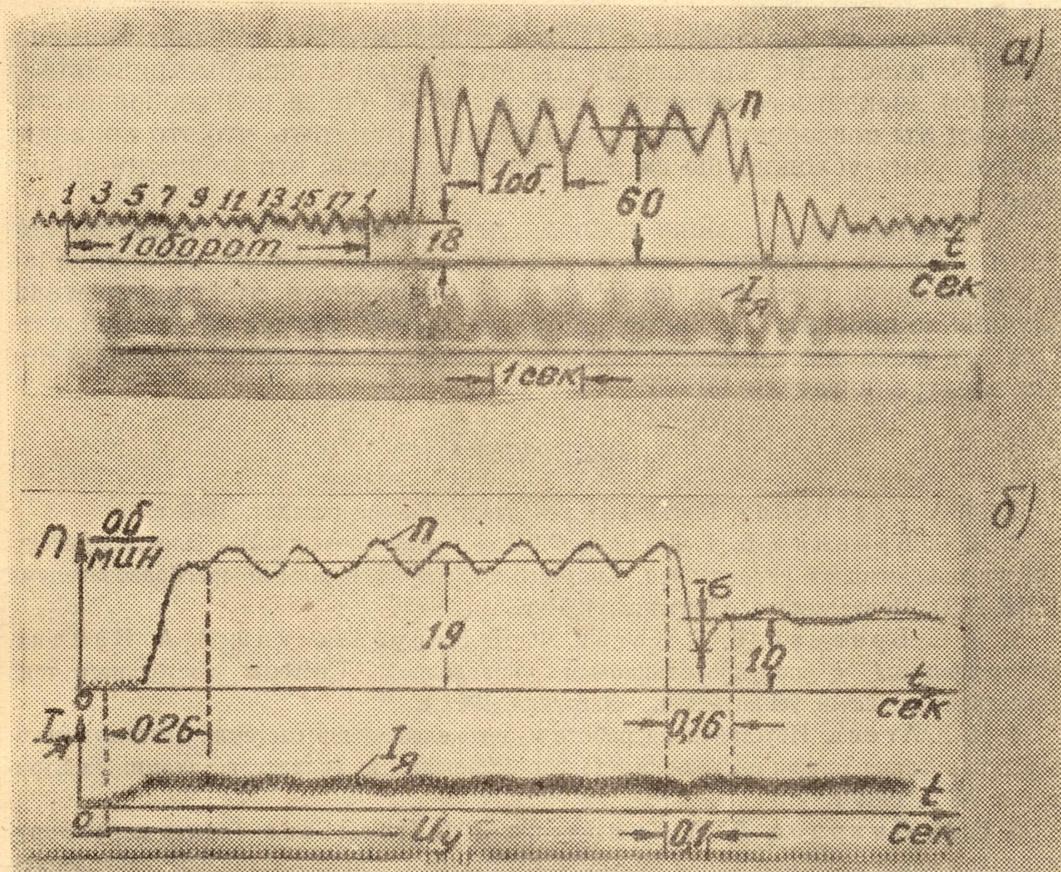


Рис. 4. Осциллограммы: а—зубцовых и оборотных пульсаций скорости вращения исполнительного электродвигателя П-32 при уставках скорости 18 и 60 об/мин.; б—пуска и работы двигателя П-32 на скорости 19 об/мин.

двигатель П-32,  $P_n = 4,5$  квт,  $n_n = 3000$  об./мин.,  $u_n = 340$  в,  $p = 1$ ,  $z = 18$ , который проходил по допустимому моменту лишь при принудительной вентиляции; двигатель П-41,  $P_n = 6$  квт,  $n_n = 3000$  об./мин.,  $u_n = 340$  в,  $p = 2$ ,  $z = 29$ , который проходил по нагреву на самовентиляции, хотя использовался по номинальному моменту лишь на половину. Испытание двигателей в замкнутой САР подтвердили, что по всему диапазону уставок скорости лучшими динамическими характеристиками обладает привод с двигателем большей мощности.

Из сказанного следует, что в лучшем случае динамические и эксплуатационные характеристики приводов широкого диапазона регулирования скорости по системе МУС-Д с ППУ можно получить применением специального электродвигателя, рассчитанного на эксплуатацию в условиях машиностроительного производства, например, ПБСТ.

## Выводы

1. В системах автоматического регулирования применение ППУ в комплекте с силовым серийным МУС, при определенных условиях их согласования, дает возможность получить статический преобразователь с той же оптимальной динамической характеристикой как и у БМУ при более простой схеме управления.

2. Полупериодное запаздывание, пренебрегать которым в замкнутой САР нельзя, ухудшает устойчивость работы привода и затрудняет условия его стабилизации.

3. Условиям согласования ППУ с силовым МУС отвечает применение ППУ класса Д с элементами ШИМ. С точки зрения быстродействия и учетом дискретного характера работы МУС более целесообразен выбор частоты повторения 300 гц, однако надо отметить, что это приводит к некоторому усложнению схемы преобразователя, что не всегда оправдано.

4. Улучшение динамики привода, неравномерности скорости вращения и качества регулирования в глубокорегулируемых электроприводах в значительной степени зависит от типа приводного электродвигателя. Улучшение показателей привода МУС-Д с ППУ класса Д, разработанного для механизма подачи тяжелых станков, ожидается при применении электродвигателя ПБСТ.

## ЛИТЕРАТУРА

1. М. А. Розенблат. Магнитные усилители. Госэнергоиздат, 1960 г.
2. Я. С. Бровман, В. Г. Каган, Ф. Д. Кочубиевский. Электроприводы с полупроводниковым управлением. Системы с электромашинными преобразователями (ПМК-Г-Д). Издательство «Энергия», 1964 г.
3. Я. С. Бровман, В. Г. Каган, Ф. Д. Кочубиевский, В. А. Найдис. Электроприводы с полупроводниковым управлением. Системы постоянного тока с электромашинными усилителями. «Энергия», 1964 г.
4. И. З. Агеев. Неустойчивая работа и автоколебания в системах автоматического регулирования машин постоянного тока с искаженными характеристиками. Электричество, № 5, 1964 г.
5. Е. М. Смирнов, Л. М. Смирнова, З. Б. Поздеева. Синтез корректирующих устройств электропривода по системе ЭМУ-Д с комбинированным управлением при гармонической нагрузке. АН СССР, изд. «Наука», 1964 г.
6. 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 г.