Записки Ленинградского горного института.
Т. 128. СПб, 1991

УДК 621.314.26:621.313.333

А.П.ЕМЕЛЬЯНОВ, З.Б.СЛЕПЦОВА,
И.М.СТОЛЯРОВ

СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОПРИВОДОМ ТПЧ-АД С МИКРОЭВМ

При организации управления приводом тиристорный преобразователь частоты - асинхронный двигатель (ТПЧ-АД) с достаточно высоким быстродействием, широким диапазоном регулирования скорости и хорошими экономическими показателями необходимо на основе информации о координатах состояния АД формировать управляющие воздействия по каналам частоты и напряжения ТПЧ в соответствии с определенными алгоритмами. Для этой цели в ряде случаев целесообразно воспользоваться микроЭВМ, так как она может программно реализовать широкий набор алгоритмов и обеспечить управление также по технологическим параметрам установки, которую обслуживает привод.

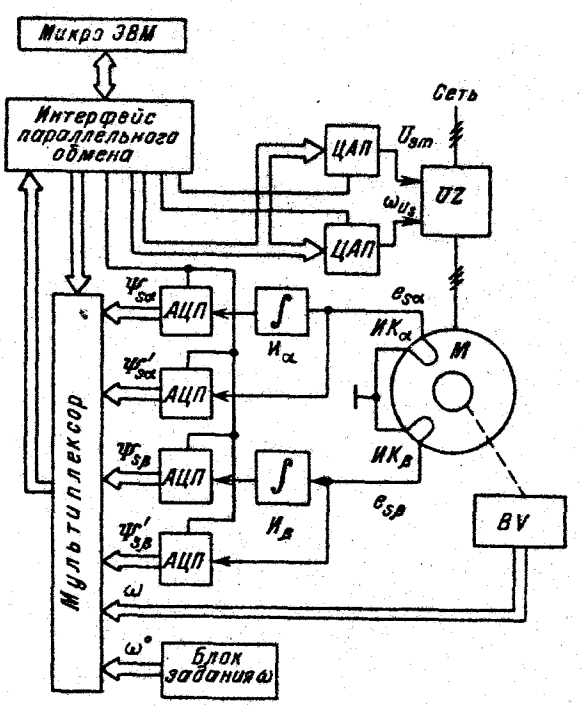


Рис.1. Структурная схема привода ТПЧ-АД с микропроцессорным управлением и полным набором АЦП

МикроЭВМ должна удовлетворять следующим требованиям: быстродействие не менее $200 \cdot 10^3$ оп/с, наибольшее количество программно доступных регистров; программная совместимость с ЭВМ, располагающими развитой операционной системой; наличие команд умножения, деления, сдвига двойного слова; длина слова не менее 16 разрядов; простота сопряжения с внешними устройствами; небольшая стоимость.

Из отечественных микроЭВМ для частотно-регулируемых приводов наиболее пригодны одноплатные микроЭВМ типов Мс 1201.2, Мс 1201.1 и модульная микроЭВМ „Электроника 60М". Эти микроЭВМ программно совместимы с миниЭВМ СМ3, СМ4, что позволяет создавать и отлаживать

на них управляющие программы, пригодные для загрузки в микроЭВМ. Особенность интерфейса „Общая шина" позволяет обращаться к регистрам внешних устройств с такой же скоростью, как к ячейкам памяти.

На кафедре электрических машин и автоматизированного привода ЛГИ разработана аналого-цифровая система управления электроприводом ТПЧ-АД (рис.1) [2]. Схема содержит ТПЧ *UZ*, управляемый по каналам напряжения и частоты, асинхронный короткозамкнутый двигатель *M*, микроЭВМ, мультиплексор, интерфейс параллельного обмена ИПО, набор АЦП и ЦАП, несложные специализированные внешние устройства предварительной обработки информации – аналоговые интеграторы с компенсацией дрейфа нуля $И_\alpha$, $И_\beta$ [3] и преобразователь скорость-код *BV*, обеспечивающий точность измерения угловой скорости двигателя не хуже 0,2 % во всем диапазоне регулирования. В АД встроены датчики ЭДС, выполненные в виде измерительных проводников или катушек $ИК_\alpha$, $ИК_\beta$, сигналы с которых пропорциональны производным потокосцеплений по ортогональным осям статора α, β.

Каждый аналоговый сигнал преобразуется отдельным АЦП, а сигналы задания скорости ω^0 и потокосцепления Φ^0_{sm} поступают в цифровой форме. Для организации сигналов заданий в аналоговой форме потребуются дополнительно еще два АЦП. Уменьшить количество АЦП можно, применив аналоговый коммутатор К, как показано на рис.2. В этом случае происходит перераспределение адресов между мультиплексором и аналоговым коммутатором, но усложняется схема дешифрирования адресов. Следует отметить, что при применении отдельного преобразователя на каждый аналоговый сигнал общее время преобразования равно времени преобразования одного АЦП. Это не накладывает особых требований на быстродействие АЦП. Время преобразования современных приборов в зависимости от разрядности и класса быстродействия лежит в пределах 0,33–333 мкс.

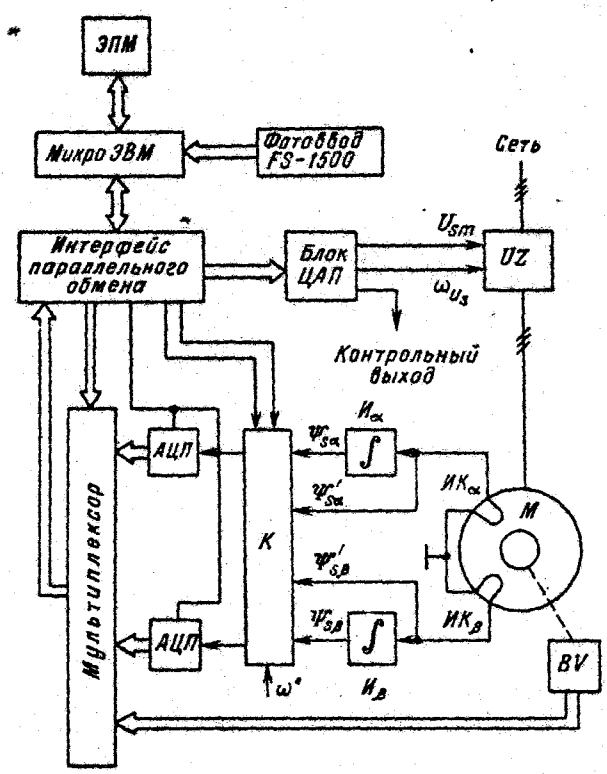


Рис.2. Структурная схема испытательного стенда для отладки управляющих программ приводов ТПЧ-АД (вариант с уменьшенным набором АЦП)

Время преобразования при измерении мгновенных значений потокосцеплений $T \leq$ 100 мкс. В случае применения одного АЦП с аналоговым коммутатором время преобразования $T = kT_{пр}$, где k – количество преобразователей; $T_{пр}$ – время преобразования одного АЦП. Задержка, вносимая в программу,

$$T_з = \begin{cases} k(T_{пр} - T_к) & \text{при } T_{пр} > T_к, \\ 0 & \text{при } T_{пр} \leq T_к, \end{cases}$$

где $T_к$ – время выполнения команд между очередным запуском АЦП и концом преобразования.

Время выполнения команд может колебаться в довольно широких пределах и зависит от алгоритма вычислений, порядка выбора операндов и быстродействия микроЭВМ. Минимальное время между обращением к данным, находящимся в регистрах АЦП, и запускающим импульсом в системе с микроЭВМ типа „Электроника 60М" составляет с учетом адресации 16 мкс. Такая система требует быстродействующего преобразователя с $T_{пр} \leq$ 16 мкс. При двух АЦП, работающих поочередно (рис.2), это время можно удвоить. При этом

$$T_з = \begin{cases} k(T_{пр}/2 - T_к) & \text{при } T_{пр}/2 > T_к, \\ 0 & \text{при } T_{пр}/2 \leq T_к. \end{cases}$$

Предпочтение следует отдать системе с установкой преобразователя на каждый аналоговый сигнал. В настоящее время имеются АЦП в интегральном исполнении, имеющие малые габариты и стоимость. Преобразователи АЦП и ЦАП, использованные в данной системе, характеризуются временем преобразования: для АЦП – 10 мкс, для ЦАП – 8 мкс.

Система управления (рис.1) работает следующим образом. Асинхронный короткозамкнутый двигатель M питается от ТПЧ, управляемого по каналам задания амплитуды U_{sm} и частоты напряжения статора ω_{us}. При этом сигналы с датчиков ЭДС $ИК_\alpha$, $ИК_\beta$ пропорциональны производным потокосцеплений по осям α и β – $\psi'_{s\alpha}$ и $\psi'_{s\beta}$, а сигналы на выходах интеграторов $И_\alpha$, $И_\beta$ пропорциональны составляющим вектора потокосцепления статора по этим осям – $\psi_{s\alpha}$, $\psi_{s\beta}$. Все эти сигналы преобразуются набором АЦП в двоичный код. По сигналу, вырабатываемому программно, все АЦП запускаются одновременно. Во время работы преобразователей продолжается выполнение основной программы. К моменту съема данных с преобразователей их работа давно закончится и в регистрах будут находиться коды мгновенных значений аналоговых сигналов. Цифровые выходы АЦП соединены с мультиплексором, который объединяет все потоки входных для микроЭВМ данных. Программно, под воздействием адреса, код выбранного канала поступает через ИПО в процессор. В микроЭВМ вычисляются необходимые для реализации алгоритмов управления величины, организуются регуляторы. Вычисленные управляющие воздействия через ИПО поступают в набор ЦАП и в аналоговой форме управляют работой ТПЧ привода. ИПО реализует только программный режим работы, а именно, дешифрирует поступающие от микроЭВМ адреса и разделяет вводимые и выводимые данные канала

„Общая шина". Стандартный МПО, выпускающийся специально для микроЭВМ „Электроника 60М", для такого использования не пригоден. Мультиплексор и МПО собственной разработки. Такое построение системы управления позволяет отказаться от обработки сигналов прерываний, исключить время работы АЦП из времени вычислений и применить широко распространенные АЦП и ЦАП.

В системе управления приводом реализуются разработанные ранее алгоритмы управления каналами амплитуды и частоты напряжения ТПЧ [I, 4]. Предварительно вычисляются модуль вектора потокосцепления статора $\phi_{sm}=\sqrt{\phi_{s\alpha}^2+\phi_{s\beta}^2}$ и частота вращения вектора потокосцепления статора $\omega_{\psi_s}=(\phi_{s\alpha}\phi'_{s\beta}-\phi_{s\beta}\phi'_{s\alpha})/\phi_{sm}^2$, а также рассогласование $\phi_{sm}^0-\phi_{sm}$, где ϕ_{sm}^0 – заданное значение модуля потокосцепления статора, находящееся в одной из ячеек памяти и соответствующее номинальному потокосцеплению двигателя. Система управления построена со стабилизацией потокосцепления статора и реализует алгоритм управления напряжением

$$U_{sm}=D(z)\left[\omega_{\psi_s}(\phi_{sm}^0-\phi_{sm})\right],$$

где U_{sm} – управляющее воздействие по каналу напряжения ТПЧ; $D(z)$ – цифровая корректирующая функция, представляет собой набор коэффициентов, рассчитанных заранее и помещенных в постоянную память ЭВМ, которые умножаются на соответствующие значения, вычисленные на текущем шаге и на предыдущих.

Так как система нелинейная, то каждой области значений угловой скорости ротора соответствует свой набор коэффициентов. Значение скорости вращения ротора снимается с цифрового датчика скорости BV, который включает в себя фотоимпульсный датчик, представляющий собой диск с прорезями, с одной стороны которого установлены светоизлучающие диоды, а с другой – фотодиоды. Период следования импульсов заполняется генератором, который стабилизирован кварцевым резонатором. Так как измеряется период, то программно определяется скорость вращения ротора $\omega=k/T_u$, где k – масштабный коэффициент; T_u – число импульсов, пропорциональное периоду. По вычисленной скорости определяется адрес первого и всех остальных коэффициентов для данной области. Вычисленное значение U_{sm} записывается в регистр ЦАП и в виде аналогового сигнала поступает на вход ТПЧ.

Далее вычисляется задание по каналу частоты в соответствии с алгоритмом

$$\omega_{u_s k}=\omega_k^0+k_1(p)(\omega_k^0-\omega_k)+k_2(p)(\omega_{\psi_s(k-1)}-\omega_{u_s(k-1)}),$$

где $k_1(p)$ – передаточная функция цифрового ПИ-регулятора отработки рассогласования скорости; $k_2(p)$ – передаточная функция цифрового ПИ-регулятора фазового угла вектора напряжения относительно вектора потокосцепления; ω_k^0 – заданное значение скорости ротора на k-м интервале; ω_k – мгновенное значение скорости ротора на k-м интервале; $\omega_{\psi_s(k-1)}$ – значение скорости вектора потокосцепления статора на $(k-1)$-м интервале; $\omega_{u_s(k-1)}$ – значение скорости вектора напряжения на $(k-1)$-м интервале.

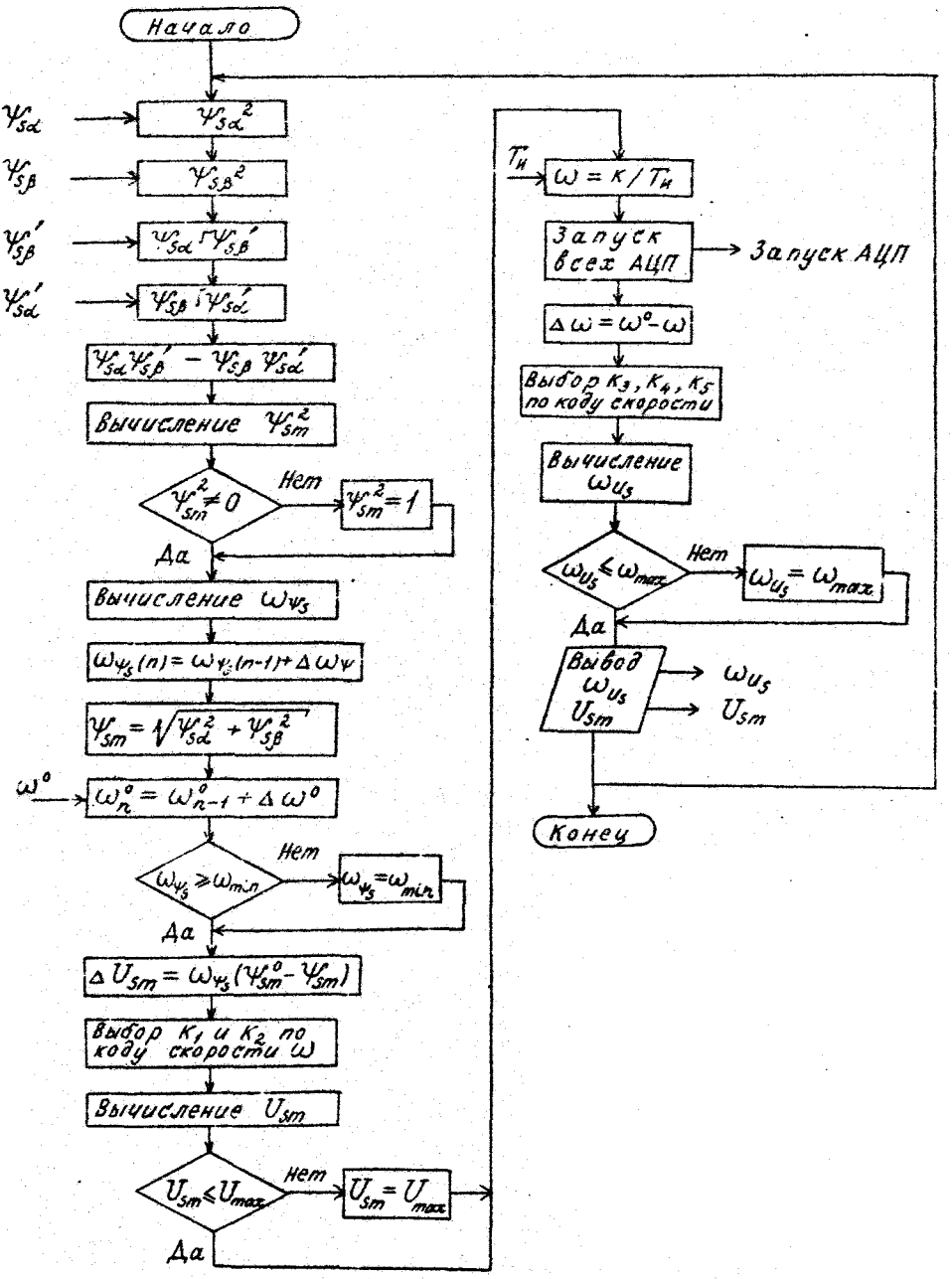


Рис.3. Блок-схема управляющей программы

Вычисленное значение ω_{u_s} записывается в регистр ЦАП и в виде аналогового сигнала поступает в ТПЧ. Дискретный характер работы преобразователя приводит к разрывному характеру функции $\omega_{\psi_s}(t)$, и для формирования задания по каналу напряжения и каналу частоты вводится цифровая фильтрация при вычислении ω_{ψ_s}, которая основана на ограничении приращения ω_{ψ_s} между текущим значением и предыдущим, причем это ограничение является функцией от ω_{u_s}.

Особенностью микроЭВМ „Электроника 60М" является то, что в ней нет специальных команд ввода и вывода. Адресация к внешним устройствам такая же, как к ячейкам памяти. Таким образом, благодаря предложенному соединению АЦП и ЦАП с микроЭВМ, все операнды, находящиеся в регистрах внешних устройств, непосредственно участвуют в вычислениях.

Порядок вычислений в соответствии с указанным алгоритмом (рис.3) следующий:

I. Съем кодов с АЦП составляющих потокосцепления и ЭДС статора и вычисление

$$\psi_{s\alpha}\psi'_{s\beta};\ \psi^2_{s\alpha};\ \psi_{s\beta}\psi'_{s\alpha};\ \psi_{s\alpha}\psi'_{s\beta}-\psi_{s\beta}\psi'_{s\alpha};\ \psi^2_{s\beta};\ \psi^2_{sm}=\psi^2_{s\alpha}+\psi^2_{s\beta},$$

где $\psi'_{s\alpha}$, $\psi'_{s\beta}$ - сигналы измерительных проводников; $\psi_{s\alpha}$, $\psi_{s\beta}$ - сигналы с интеграторов.

2. Вычисление $\psi_{sm}=\sqrt{\psi^2_{s\alpha}+\psi^2_{s\beta}}$ итеративным методом по алгоритму

$$\psi^2_{sm}/\psi_{sm(n-1)}=\psi_{sm\,пр};\qquad \frac{\psi_{sm\,пр}+\psi_{sm(n-1)}}{2}=\psi_{sm(n)}=\psi_{sm},$$

где $\psi_{sm(n-1)}$ - значение модуля потокосцепления статора на предыдущем шаге вычислений; $\psi_{sm\,пр}$ - первое приближение.

Так как частота прерываний много больше частоты изменения потока, то вполне достаточно одного приближения.

3. Вычисляется скорость вектора потокосцепления статора

$$\omega_{\psi_s}=\frac{\psi_{s\alpha}\psi'_{s\beta}-\psi_{s\beta}\psi'_{s\alpha}}{\psi^2_{sm}}.$$

4. Осуществляется фильтрация ω_{ψ_s}, основанная на ограничении приращения $\Delta\omega_\psi$:

$$\omega_{\psi(n)}-\omega_{\psi(n-1)}=\Delta\omega;\qquad \omega_{\psi(n)}=\omega_{\psi(n-1)}+\Delta\omega,$$

где

$$\Delta\omega=\begin{cases}\Delta\omega, & \text{если}\quad \Delta\omega<\varepsilon,\\ -\Delta\omega, & \text{если}\quad -\Delta\omega>-\varepsilon,\\ \varepsilon, & \text{если}\quad \Delta\omega>\varepsilon,\\ -\varepsilon & \text{если}\quad -\Delta\omega<-\varepsilon.\end{cases}$$

5. Код задания скорости снимается с АЦП и организуется задатчик интенсивности

$$\omega_{0(n)} = \omega_{0(n)} + \Delta\omega ,$$

где

$$\Delta\omega = \begin{cases} \Delta\omega, & \text{если} \quad (\omega_{0(n)} - \omega_{0(n-1)}) > 0, \\ \Delta\omega, & \text{если} \quad (\omega_{0(n)} - \omega_{0(n-1)}) < 0, \\ 0, & \text{если} \quad (\omega_{0(n)} - \omega_{0(n-1)}) = 0, \end{cases}$$

$\Delta\omega$ – фиксированное число, определяющее темп нарастания (спадания);
ω_0 – задание скорости.

6. Вычисляется рассогласование по потоку $\Delta\psi_{sm} = \psi^0_{sm} - \psi_{sm}$, где ψ^0_{sm} – задание потокосцепления статора, фиксированное число.

7. Вычисляется $\omega_{\psi_s}(\psi^0_{sm} - \psi_{sm}) = X_{(n)}$.

Возможность пуска обеспечивается начальным заданием ω_{ψ_s}, занесенным в ячейку, отведенную для ω_{ψ_s}, постоянного числа.

8. Организуется ПИ-регулятор:

$$(X_{(n-1)} + X_{(n)})/2 = X_{(n)}; \quad (X_{(n)} - X_{(n-1)}) = \Delta X_{(n)}; \quad k_{1j}\Delta X_n ,$$

где k_{1j} – сменный коэффициент пропорциональной части; j – адрес, связанный с ω;

$$k_{2j} X_{(n)} ,$$

k_{2j} – сменный коэффициент интегральной части;

$$\Delta y_{(n)} = k_{1j}\Delta X_{(n)} + k_{2j} X_{(n)};$$

$$y_{(n)} = y_{(n-1)} + \Delta y_{(n)} .$$

9. Вычисленное значение подается через ЦАП и канал напряжения ТПЧ.

10. Для управления каналом частоты вычисляется $k/n = \omega$, где k – масштабный коэффициент (постоянное число, зависящее от разрядности преобразователя скорость-код); n – код с преобразователя скорость-код ; ω – скорость вала.

11. Вычисляется $\Delta\omega = \omega_0 - \omega$ (ω_0 – заданное значение скорости вращения) и задается команда на запуск всех АЦП.

12. Организуется ПИ-регулятор по алгоритму, аналогичному алгоритму регулятора канала напряжения:

$$\omega_{u_s(n)} = k_3(\Delta\omega_{(n)} - \Delta\omega_{(n-1)}) + k_4\left(\frac{\Delta\omega_{(n-1)} + \Delta\omega_{(n)}}{2}\right) + k_5(\omega_{\psi_s} - \omega_{u_s(n-1)}) + \omega_0 .$$

Полученный результат вводится через ЦАП в канал управления частотой ТПЧ. Далее цикл повторяется. Время выполнения одного цикла программы составляет 2,5 мс.

Для отладки управляющих программ и исследования микропроцессорных систем управления электроприводом ТПЧ-АД был собран испытательный стенд

на базе микроЭВМ «Электроника 60М» с асинхронным двигателем А5I/4 (4,5 кВт, 220/380 В, I440 об/мин) и ТПЧ-40. Структурная схема стенда представлена на рис.2, однако в нем предусмотрен также вариант системы управления с полным набором АПП.

Система управления имеет фотосчитывающее устройство ввода абсолютных программ и пульт связи с оператором, в качестве которого используется ЭПМ „*KONSUL* 260". Абсолютные программы получают на миниЭВМ типа СМ-3, СМ-4, которые оснащены развитой операционной системой, в том числе и широко распространенной многопользовательской системой ОСРВ. Эта система имеет все необходимые средства для отладки и получения готовых программ.

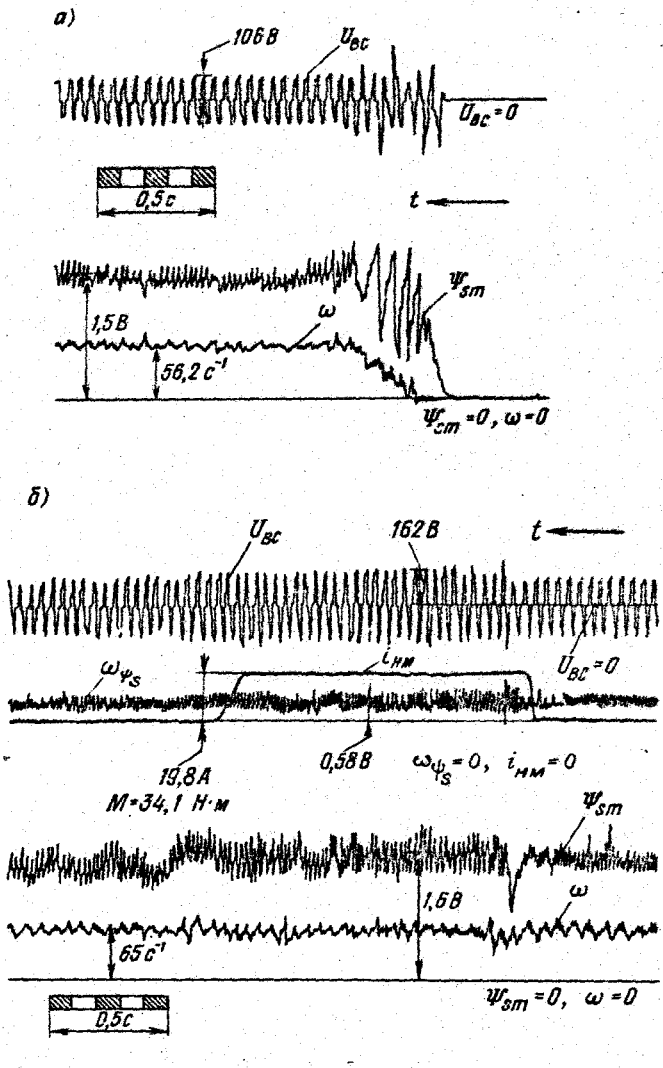


Рис.4. Переходные процессы в приводе ТПЧ-АД с управлением от микроЭВМ "Электроника 60М": а - пуск; б - наброс и сброс нагрузки

Редактор текста „*EDI*" позволяет создавать и корректировать текст исходной программы на языке ассемблер. Транслятор с макроассемблера „*BIGMAC*" позволяет получать объектный модуль в абсолютном формате и одновременно листинг программы с картой памяти. Программа „*FLX*" позволяет выводить объектный модуль в формате ДОС на перфоленточное устройство вывода, т.е. получать перфоленты, пригодные для загрузки в оперативную память микроЭВМ с помощью абсолютного загрузчика. Загру-

женная программа запускается с помощью пульта, расположенного на панели ЭВМ „Электроника 60М" и ЭВМ „*KONSUL* 260". По имеющемуся листингу программы производится ее отладка. В листинге указаны ячейки памяти, где хранятся константы и переменные, коды команд и их мнемоническое изображение.

С помощью отладочной системы в процессе непосредственного счета по программе можно производить следующие операции: запустить программу с заданного оператора; произвести пошаговое выполнение программы; остановить программу; открыть и распечатать содержимое интересующей ячейки памяти или регистра общего назначения РОН; ввести новое значение и закрыть ячейку, тем самым изменить константу или команду. Для непрерывного контроля в период отладки программы отладочная система снабжена дополнительными ЦАПами, подключенными к устройствам непрерывной регистрации информации. Отлаженные таким образом программы со всеми исправлениями вновь редактируются на мини-ЭВМ в системе ОСРВ, при этом на диске уже имеется файл с текстом программы. В результате получается отлаженный программный модуль, который может быть записан в постоянное запоминающее устройство микроЭВМ.

При экспериментальных исследованиях на испытательном стенде системы ТПЧ-АД с полным набором АЦП и управлением от микроЭВМ „Электроника 60М" были получены хорошие статические и динамические характеристики. В качестве примера на рис.4 приведены осциллограммы переходных процессов привода в следующих режимах: а – пуск привода на холостом ходу до $\omega = 0,37\omega_н$, б – скачкообразный наброс и сброс нагрузки $M = 1,1M_н$ при $\omega = 0,45\omega_н$. Статическая ошибка как по модулю потокосцепления статора, так и по скорости двигателя при управлении по двум каналам отсутствует.

Разработанная система ТПЧ-АД с микропроцессорным управлением может служить основой для реализации асинхронных электроприводов механизмов с высокими требованиями к статическим и динамическим режимам при оптимальном энергопотреблении в горно-добывающей, металлургической, химической и других отраслях промышленности. Так, например, при управлении процессом бурения поддержание требуемых технологических параметров может сочетаться с работой двигателя в режиме минимальных потерь; при управлении пластинчатыми питателями дробилок может быть обеспечен оптимальный режим работы дробилок, что будет способствовать повышению надежности и увеличению производительности их работы.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. А.с. 1252903 СССР. Устройство для управления асинхронным электродвигателем / И.М.Столяров, А.П.Емельянов, З.Б.Слепцова// Бюл. изобр. 1986. № 31.

2. Рудаков В.В., Столяров И.М., Дартау В.А. Асинхронные электроприводы с векторным управлением. Л.: Энергоатомиздат, 1987.

3. Столяров И.М., Емельянов А.П. Устройство для измерения параметров магнитного потока асинхронного двигателя // Зап. ЛГИ. 1982. Т.94.

4. Столяров И.М., Слепцова З.Б. Частотное регулирование машин переменного тока для рудничных приводов / Ленинградский горный ин-т. Л., 1983.