

НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ УКРАИНЫ

"КИЕВСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ"

На правах рукописи

ШАБО Камил

(Сирия)

СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ МНОГОДВИГАТЕЛЬНЫМ ЭЛЕКТРОПРИВОДОМ  
С ГИБКИМ ТЯГОВЫМ ОРГАНОМ И ОБЩЕЙ ЗАДАЩЕЙ МОДЕЛЮ

Специальность 05.09.03 – "Электротехнические комплексы и системы,  
включая их управление и регулирование"

АВТОРЕЗЮМЕ

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Киев – 1996

Аб. 35.854

Работа выполнена на кафедре автоматизации горной промышленности Национального технического университета Украины "Киевский политехнический институт"

Научный руководитель - доктор технических наук, профессор В.М.Чермалых

Официальные оппоненты - доктор технических наук, профессор В.Н.Исаков  
кандидат технических наук, доцент Н.В.Печеник

Ведущая организация - Научно-исследовательский институт горной механики им. М.М.Федорова

ЛНБ України ім.В.Стефаника



00751589 (Z)

Защита диссертации состоится "11" ноября 1996 г. в 15<sup>00</sup> часов на заседании специализованного совета К 01.02.04 в Национальном техническом университете Украины "Киевский политехнический институт" по адресу:

252056, г.Киев, пр.Победы, 37, КПИ (корп. 2д, ауд. 403)

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке института

Автореферат разослан "4" сентября 1996 г.

Ученый секретарь  
специализованного совета  
канд.техн.наук, доцент

В.В.Прокопенко

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. В технической политике государства важное место занимают задачи совершенствования оборудования и технологии промышленного производства. Существенную роль в их успешном решении отводится автоматизированному электроприводу, который способствует дальнейшему совершенствованию традиционных и всемерному развитию перспективных технологий в различных отраслях промышленности. Успехи микропроцессорной техники, развитие теории цифрового управления позволили приступить к выпуску комплектных электроприводов с микропроцессорными системами управления. Поэтому становится актуальной задача разработки методов и построения структур систем управления, оптимизирующих по определенным критериям режимы работы электроприводов:

Для того, чтобы удовлетворить изменяющимся требованиям механической нагрузки, необходимы регулируемые электроприводы. До настоящего времени это в основном приводы постоянного тока, имеющие ряд существенных недостатков. Прогресс в области полупроводниковой техники, как в силовой электронике, так и в микроэлектронике, открыл возможности для разработки регулируемых электроприводов переменного тока, имеющих большую мощность, более компактную конструкцию, лучшие КПД и динамические характеристики. Преимущества переменного тока в наибольшей степени проявляются в электроприводах, работающих по схеме вентильного двигателя, с управлением по положению. Системы управления такими электроприводами практически не отличаются от приводов постоянного тока.

Наиболее сложными электромеханическими системами являются многодвигательные технологически взаимосвязанные электроприводы, широко применяемые на предприятиях ряда отраслей промышленности (металлургической, горнодобывающей, строительной, полиграфической

ЛНБ им. В. В. Стефановича

и др.) в виде транспортных установок, в которых электродвигатели механически связаны между собой или через обрабатываемое изделие (станы холодной прокатки), или через общий гибкий тяговый орган, которому передаются движущие моменты за счет сил трения (ленточные конвейеры, многоприводные подъемные установки со шкивами трения, подвесные канатные дороги). Во втором случае к системе управления предъявляются требования поддержания оптимального соотношения между набегавшими и сбегающими ветвями тягового органа. Регулирование может осуществляться через эквивалентные параметры: "вращающий момент", "ток" и "ЭДС" двигателей.

Система управления многодвигательным электроприводом является многосвязной, в которой воспроизведение заданных величин управляемых переменных реализуется как с помощью замкнутых контуров регулирования, так и использованием прямых каналов комбинированного управления. Так как в зависимости от технологических требований количество прямых каналов может быть различным, целесообразно на базе микроконтроллеров построить задающую модель (ЗМ) с выходными сигналами, изменяющимися пропорционально желаемым диаграммам управляемых переменных (скорости, тока, момента). Кроме того, применение ЗМ позволяет оптимизировать систему по динамическим нагрузкам.

Таким образом, изложенное показывает актуальность вопросов совершенствования системы управления многодвигательным электроприводом с гибким тяговым органом на основе современных технических средств.

Цель диссертации - разработка реализуемых при помощи микро-ЭВМ алгоритмов синтеза системы управления многодвигательным электроприводом с общей задающей моделью и блоками оптимального распределения нагрузки между отдельными двигателями, позволяющей доступ-

ными техническими средствами обеспечить требуемые режимы работы при минимальном потреблении электроэнергии.

Для достижения цели необходимо решить следующие задачи:

- на основе анализа возможных систем управления основными типами электроприводов с гибким тяговым органом определить структуру универсальной системы управления электроприводом, обеспечивающей при заданном режиме работы системы оптимальное распределение нагрузки между двигателями;
- для оптимизации системы управления электроприводом решить задачу реализации регулируемого ограничения производной тока с помощью ЭМ без специального регулятора;
- разработать структуру многосвязной системы оптимального распределения сигнала суммарного заданного вращающего момента (тока) между отдельными двигателями, последовательно соединенными фрикционной связью с общим тяговым органом;
- обосновать правдоподобность представления упруго-вязких звеньев с распределенными параметрами математической моделью второго порядка и на ее основе составить структурную и алгоритмическую схемы электропривода с упругими звеньями;
- модернизировать ЭМ второго порядка для возможности формирования управляющего сигнала, пропорционального двухступенчатой диаграмме заданного суммарного тока двигателей, обеспечивающей оптимизацию системы электропривода по динамическим нагрузкам.

Методы исследований. Используются методы решения дифференциальных уравнений на основе преобразования Карсона-Хевисайда, теории электропривода, а также численно-аналитические методы расчета нелинейных систем. Основные теоретические выводы подтверждены моделированием процессов на ЦВМ. Система управления с микроконтроллером реализована и исследована на электроприводе постоянного

тока в лабораторных условиях.

Научная новизна диссертации заключается в разработке:

- структуры и алгоритма функционирования многодвигательного электропривода с общей задающей моделью;
- модифицированной задающей модели второго порядка, построенной по принципу нелинейного фильтра и позволяющей реализовать управляющие сигналы, соответствующие двухступенчатому изменению вращающих моментов отдельных двигателей в периоды пуска и торможения;
- методики определения характеристик оптимального распределения нагрузки между отдельными двигателями при знакопеременной нагрузке;
- структуры и алгоритмов цифрового моделирования работы тиристорного электропривода в области прерывистых токов.

Практическая ценность. Разработанные структуры ЭМ и системы управления многодвигательным электроприводом ориентированы на применение серийных элементов аналоговой и цифровой техники (нелинейные элементы типа "ограничение", интеграторы, блоки перемножения) и микропроцессорных комплектов. Поэтому реализация рекомендаций относится к разряду инженерных задач. Наибольшую практическую ценность представляет система управления многодвигательным электроприводом с блоком оптимального распределения нагрузки с учетом области прерывистых токов.

Реализация результатов работы. Полученные в диссертации структурные схемы и алгоритмы работы как системы управления, так и ее отдельных блоков использованы в НИИГМ им.М.М.Федорова при выборе типа неуравновешенной подъемной установки для сверхглубоких шахт с двух и трехдвигательным приводом. Такие системы имеют установленную мощность привода на 20-30 % превышающую мощность статически уравновешенных подъемных установок, но расход электроэнергии



В работе дан детальный анализ методов математического моделирования таких систем и приведен обзор выполненных многочисленных исследований и разработок в области создания регулируемого электропривода переменного тока. Особое внимание уделено обоснованию целесообразности технологического регулирования скорости конвейерной установки, что при многодвигательном электроприводе налагает жесткие требования к оптимальному распределению нагрузки между отдельными двигателями не только в установившемся, но и в переходных режимах.

В качестве примера системы с разветвленными упругими трансмиссиями рассмотрена многоприводная подъемная установка с движущими шкивами трения. Приведены методы оптимизации режимов работы таких систем по быстродействию, минимуму потерь энергии, динамическим нагрузкам. Последний критерий особенно актуален при малой жесткости упругих звеньев, приводящей к появлению слабодемпфируемых механических колебаний низкой частоты.

В заключении главы приведены основные факторы, определяющие выбор типа электропривода в многосвязных системах управления рассматриваемых типов.

Вторая глава посвящена вопросам оптимизации многосвязных систем электропривода с подчиненными контурами регулирования координат с ЭМ. Приведена методика формирования входных воздействий на регуляторы, оптимизирующих электромеханическую систему по режиму управления. Разработаны алгоритмы моделирования оптимальных процессов при заданных ограничениях на производные скорости по времени для случая представления зависимостей между управляемыми переменными в фазовых координатах. Дан анализ трехконтурной системы подчиненного регулирования с регулятором производной тока. Показана сложность настройки такой системы и предложена система, обеспе-

чивающая ограничение производной тока с помощью ЭМ без специального регулятора в контуре тока. Использование ЭМ возможно как в автономном, так и в неавтономном режимах. Поскольку в системах электропривода с упругими звеньями внутренняя обратная связь по ЭДС двигателя играет важную роль с точки зрения демпфирования механических колебаний, то предложено при моделировании электромеханических систем такого типа, а также выборе регуляторов подчиненных контуров тока и скорости учитывать эту внутреннюю связь двигателя. В этом случае не только повышается адекватность модели реальному объекту, но и улучшаются динамические показатели системы (перерегулирование и время затухания колебаний уменьшаются примерно в два раза). В предлагаемой системе подчиненного регулирования контролируются те же переменные (положение, скорость, ток), что и в типовой системе. Поэтому для ее реализации достаточно серийно выпускаемых элементов унифицированной блочной системы регуляторов.

В третьей главе рассмотрены вопросы структурного моделирования и исследования многодвигательного электропривода с общей задающей моделью. Характерной особенностью исследуемых в диссертации электроприводов является обеспечение минимального проскальзывания тягового органа. Наличие проскальзывания повышает износ оборудования и потребление электроэнергии, а также может привести к аварийным ситуациям. Наиболее сложной получается система управления многодвигательным электроприводом, работающим в реверсивном циклическом режиме с изменяющейся нагрузкой. Любые другие системы являются ее частными случаями.

За оптимальный режим работы многодвигательной установки такого типа принимают режим, который обеспечивает равенство запасов тяговых возможностей, что требует управлять вращающимися моментами отдельных двигателей в зависимости от суммарной нагрузки.

Тяговые возможности при трех приводных барабанах определяются углами  $\alpha_{10}$ ,  $\alpha_{20}$ ,  $\alpha_{30}$  обхвата приводных барабанов тяговым органом. Если эти углы связаны соотношениями  $\alpha_{10} = K_1 \alpha_{20}$ ,  $\alpha_{10} = K_2 \alpha_{30}$ , то общее максимально возможное тяговое усилие  $F_0$ , развиваемое всеми двигателями, углы рабочего проскальзывания  $\alpha_1$ ,  $\alpha_2$ ,  $\alpha_3$  и соотношения тяговых усилий отдельных двигателей  $F_1/F_0$ ,  $F_2/F_0$ ,  $F_3/F_0$  определяют из выражений:

$$\left. \begin{aligned} F_0 &= S_{\text{сб}} \left[ e^{\mu \alpha_1 (1 + 1/K_1 + 1/K_2)} - 1 \right]; \\ \alpha_1 &= \frac{K_1 K_2}{\mu (K_1 + K_2 + K_1 K_2)} \ln S_0; \\ \alpha_2 &= \alpha_1 / K_1; \quad \alpha_3 = \alpha_1 / K_2; \\ F_1/F_2 &= (S_0^{(K_1 K_2 + K_2)/\alpha_0} - S_0^{K_2/\alpha_0}) / (S_0^{K_2/\alpha_0} - 1); \\ F_1/F_2 &= (S_0 - S_0^{K_1/\alpha_0}) / (S_0^{K_1/\alpha_0} - 1); \\ F_2/F_3 &= (S_0^{(K_1 K_2 + K_2)/\alpha_0} - S_0^{K_1/\alpha_0}) / (S_0^{K_1/\alpha_0} - 1). \end{aligned} \right\} \quad (I)$$

где  $\mu$  - коэффициент сцепления тягового органа с футеровкой барабанов;  $K_0 = K_1 + K_2 + K_1 K_2$ ;  $S_0 = S_{\text{НО}}/S_{\text{сб}}$ .

При одинаковых углах обхвата ( $\alpha_1 = \alpha_2 = \alpha_3$ ) оптимальное отношение тяговых усилий любых соседних барабанов

$$F_i/F_{i+1} = S_0^{1/n},$$

где  $n$  - число приводных барабанов.

Отсчет приводных барабанов ведется от набегающей ветви с усилением  $S_{\text{НО}}$ . При работе в оптимальном режиме отношения  $F_1$ ,  $F_2$ ,  $F_3$  к  $F_0$  определяются из выражений:

$$\left. \begin{aligned} f_1 &= F_1/F_0 = (S_0 - S_0^{(a_0 - K_1 K_2)/a_0}) / (S_0 - 1); \\ f_2 &= F_2/F_0 = (S_0^{(a_0 - K_1 K_2)/a_0} - S_0^{K_1/a_0}) / (S_0 - 1); \\ f_3 &= F_3/F_0 = (S_0^{K_1/a_0} - 1) / (S_0 - 1). \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

Оптимальный режим будет обеспечен, если в любой момент времени отношения (2) будут соблюдаться. Для построения системы управления необходимо определять  $F_0$  и пропорционально  $F_1/F_0$  распределять движущие моменты. Практически  $F_0$  можно определять по положению концевых грузов (подъемные установки) или в функции времени с помощью весоизмерительных устройств (конвейерные установки). Универсальным, но менее точным методом является определение нагрузки  $F_0$  по общему току двигателей.

Если в реверсивном электроприводе нагрузка меняется от  $+F_{0.\max}$  до  $-F_{0.\max}$ , то относительные движущие усилия должны изменяться согласно графикам, приведенным на рис. I. Если аппроксимировать графики прямыми, показанными штриховыми линиями, то относительные нагрузки будут определяться из выражений:

$$\left. \begin{aligned} f_1 &= 0,33 + 0,21f_0; \\ f_2 &= 0,33; \\ f_3 &= 0,33 - 0,21f_0. \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

где  $f_0 = F_0/|F_{0.\max}|$ ,  $F_{0.\max}$  — максимальная допустимая нагрузка.

В результате такого представления зависимостей усилий  $F_1$ ,  $F_2$ ,  $F_3$  от общего тягового усилия  $F_0$  существенно упрощается структура блока формирования статической нагрузки (БФСН), который представляет собой вычислительное устройство, определяющее величину  $f_0$ .

Согласно формулам (3) при любом значении коэффициента  $f_0$

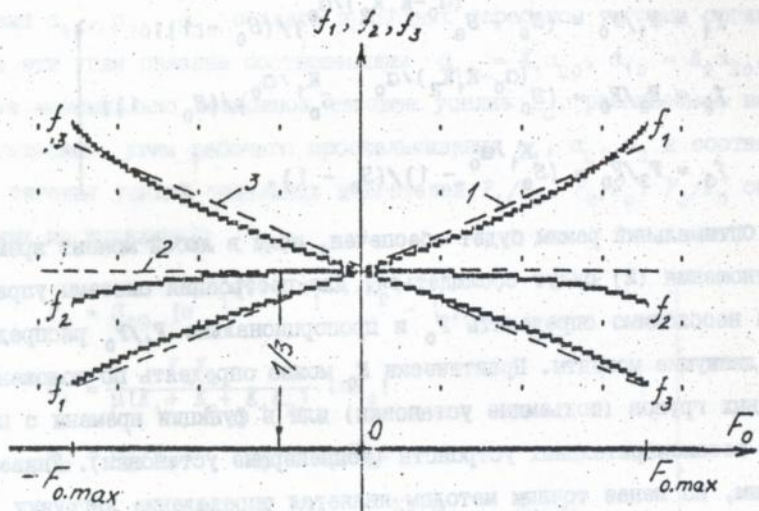


Рис. 1.

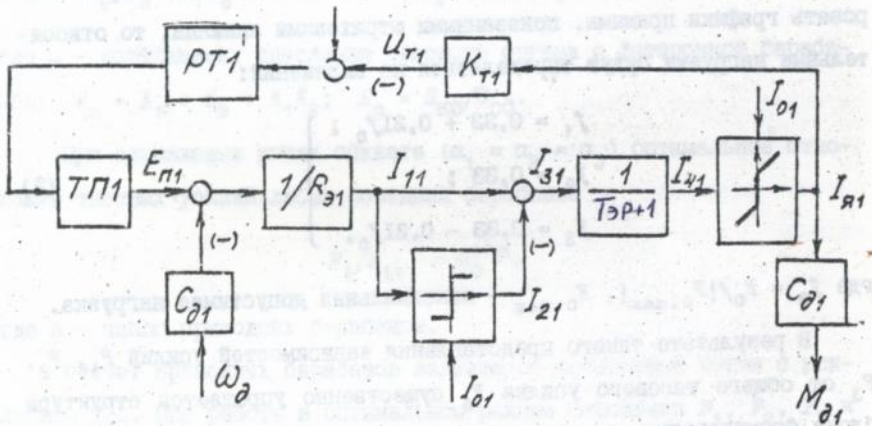


Рис. 2

сумма коэффициентов  $f_1$ ,  $f_2$  и  $f_3$  равна единице, т.е. всегда привод передает требуемый суммарный момент  $M_d$ .

Поскольку все современные системы электроприводов включают тиристорные преобразователи со специальными устройствами, переводящими работу системы в релейный режим в области прерывистых токов, то для моделирования привода с переменными нагрузками разработана модель контура тока одного двигателя, имитирующая реальные процессы при малых нагрузках (рис.2). На рисунке  $R_{T1}$ ,  $T_{П1}$ ,  $R_{B1}$ ,  $C_{D1}$ ,  $T_B$  - соответственно, регулятор тока, тиристорный преобразователь, сопротивление якорной цепи, коэффициент пропорциональности двигателя, электромагнитная постоянная времени;  $I_{O1}$  - ток, соответствующий границе области прерывистых токов. Нелинейные элементы воспроизводят действие устройства, переводящего двигатель из нормального режима в релейный при  $|I_{я}| < I_{O1}$ .

Структурная схема управления трехдвигательным электроприводом с осью ЗМ второго порядка, БЭСН и блоком распределения сигналов заданного тока (БРЗТ), приведена на рис.3 (рассматривается статически неуравновешенная подъемная установка с тремя ведущими шкивами трения):  $U_{П.м}$  - сигнал заданного перемещения;  $U_{П}$ ,  $U_C$ ,  $U_A$  - сигналы, пропорциональные текущим значениям перемещения, скорости, ускорения;  $РП$ ,  $РС$ ,  $РТ$  - регуляторы положения, скорости, тока;  $БП$  - блоки перемножения, определяющие оптимальную величину заданного тока каждого двигателя по выходным сигналам БРЗТ, функционирующего согласно зависимостям (2) или (3);  $H_{П}$  и  $KQ$  - высота подъема и полезная нагрузка с учетом вредных сопротивлений;  $T_{ПД1}$ ,  $T_{ПД2}$ ,  $T_{ПД3}$  - тиристорные преобразователи с контурами токов (см.рис.2) отдельных двигателей.

Полученные структурные и алгоритмические схемы позволили составить описание состояния системы многодвигательного электропри-

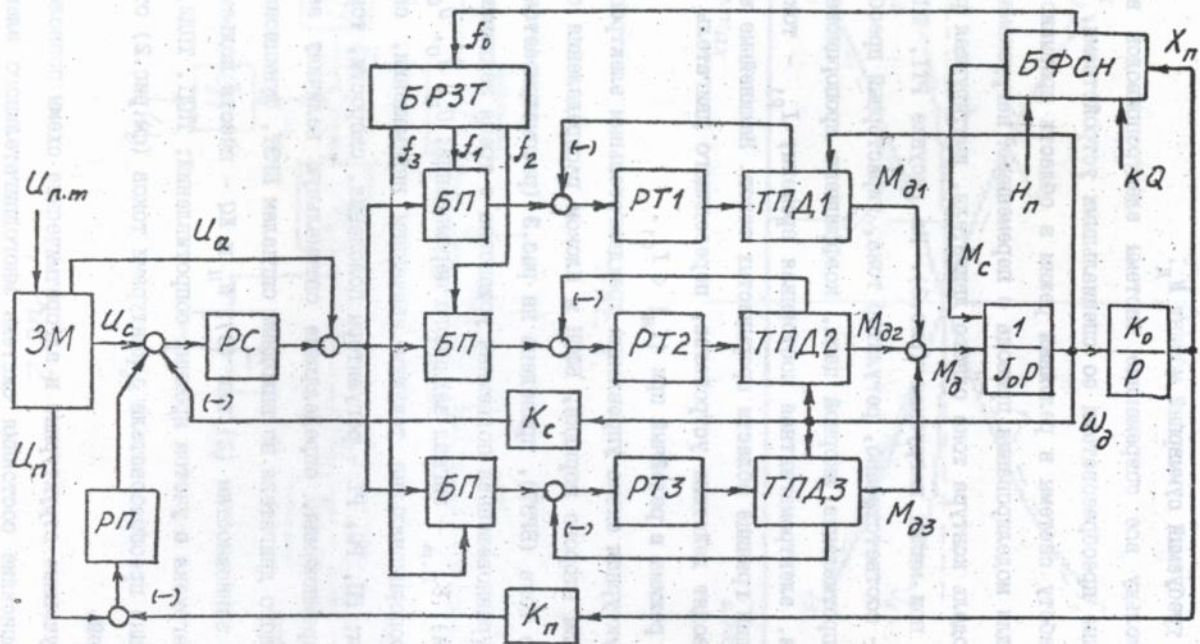


рис. 3.

вода для компьютерного моделирования по отдельным подсистемам.

Задающая модель второго порядка

$$E_1 = U_{\Pi.м} - U_{\Pi} - U_{\text{пер}}; \quad U_{\text{пер}} = K_{\alpha} U_{\text{с}}^2 \sin \theta \omega U_{\text{с}}; \quad K_{\alpha} = 0,5 K_2 / (K_1 U_{1м});$$

$$E_2 = \begin{cases} U_{\text{с.м}} - U_{\text{с}} & \text{при } E_1 \geq 0; \\ -U_{\text{с.м}} - U_{\text{с}} & \text{при } E_1 < 0. \end{cases} \quad U_{\alpha} = \begin{cases} U_{\alpha.м} & \text{при } E_2 \geq 0; \\ -U_{\alpha.м} & \text{при } E_2 < 0. \end{cases}$$

$$U_{\text{с}} = U_{\text{с}}(0) + U_{\alpha} K_1 T; \quad U_{\Pi} = U_{\Pi}(0) + U_{\text{с}}(0) K_2 T + U_{\alpha}(0) K_1 K_2 T^2 / 2.$$

Блок формирования статической нагрузки

$$F_0 = (H_{\Pi} - 2X_{\Pi}) q_T + KQ; \quad F_{0.макс} = KQ + H_{\Pi} q_T; \quad f_0 = F_0 / |F_{0.макс}|;$$

$$f_1 = 0,33 + 0,21 f_0; \quad f_2 = 0,33; \quad f_3 = 0,33 - 0,21 f_0.$$

Регуляторы положения и скорости

$$E_3 = U_{\Pi} - K_{\Pi} X_{\Pi}; \quad U_1 = U_1(0) + E_3 T / T_{U3}; \quad U_2 = U_3 T_{03} / T_{U3} + U_1;$$

$$U_4 = U_{\text{с}} + U_2 - \nu K_{\text{с}}; \quad U_3 = K_{\text{р.с}} E_4; \quad U_{\text{з.т}} = U_3 + U_{\alpha}; \quad E_5 =$$

$$= U_{\text{з.т}} f_1 - K_{\text{т1}} I_{\text{я1}}; \quad E_6 = U_{\text{з.т}} f_2 - K_{\text{т2}} I_{\text{я2}}; \quad E_7 = U_{\text{з.т}} f_3 - K_{\text{т3}} I_{\text{я3}}.$$

Регуляторы тока и тиристорные преобразователи

$$U_4 = U_4(0) + E_5 T / T_{U1}; \quad U_5 = E_5 T_{01} / T_{U1} + U_4; \quad U_6 = U_6(0) + E_6 T / T_{U2};$$

$$U_7 = E_6 T_{02} / T_{U2} + U_6; \quad U_8 = U_8(0) + E_7 T / T_{U1}; \quad U_9 = E_7 T_{01} / T_{U1} + U_8;$$

$$E_{\Pi 1} = U_5 K_{\Pi 1} [1 - \exp(-T / T_{\Pi 1})] + E_{\Pi 1}(0) \exp(-T / T_{\Pi 1});$$

$$E_{\Pi 2} = U_7 K_{\Pi 2} [1 - \exp(-T / T_{\Pi 2})] + E_{\Pi 2}(0) \exp(-T / T_{\Pi 2});$$

$$E_{\Pi 3} = U_9 K_{\Pi 3} [1 - \exp(-T / T_{\Pi 3})] + E_{\Pi 3}(0) \exp(-T / T_{\Pi 3});$$

Якорные цепи двигателей (рис.2)

$$I_{11} = (E_{\Pi 1} - C_{\text{д1}} \nu) / R_{\text{я1}};$$

$$I_{12} = (E_{12} - C_{д2}V)/R_{в2};$$

$$I_{31} = I_{11} - I_{21};$$

$$I_{13} = (E_{13} - C_{д3}V)/R_{в3};$$

$$I_{32} = I_{12} - I_{22};$$

$$I_{21} = \begin{cases} I_{01} & \text{при } I_{11} \geq 0; \\ -I_{01} & \text{при } I_{11} < 0; \end{cases}$$

$$I_{33} = I_{13} - I_{23};$$

$$I_{22} = \begin{cases} I_{02} & \text{при } I_{12} \geq 0; \\ -I_{02} & \text{при } I_{12} < 0; \end{cases}$$

$$I_{23} = \begin{cases} I_{03} & \text{при } I_{13} \geq 0; \\ -I_{03} & \text{при } I_{13} < 0; \end{cases}$$

$$I_{41} = I_{31} [1 - \exp(-T/T_{в1})] + I_{41}(0) \exp(-T/T_{в1});$$

$$I_{42} = I_{32} [1 - \exp(-T/T_{в2})] + I_{42}(0) \exp(-T/T_{в2});$$

$$I_{43} = I_{33} [1 - \exp(-T/T_{в3})] + I_{43}(0) \exp(-T/T_{в3});$$

$$I_{я1} = \begin{cases} I_{01} + I_{41} & \text{при } I_{41} \geq 0; \\ -I_{01} + I_{41} & \text{при } I_{41} < 0. \end{cases}$$

$$I_{я2} = \begin{cases} I_{02} + I_{42} & \text{при } I_{42} \geq 0; \\ -I_{02} + I_{42} & \text{при } I_{42} < 0. \end{cases}$$

$$I_{я3} = \begin{cases} I_{03} + I_{43} & \text{при } I_{43} \geq 0; \\ -I_{03} + I_{43} & \text{при } I_{43} < 0. \end{cases}$$

### Механическая система

$$M_{д1} = C_{д1} I_{я1}; \quad M_{д2} = C_{д2} I_{я2}; \quad M_{д3} = C_{д3} I_{я3};$$

$$M_{с} = F_0 R_{ш} / r_{ред}; \quad M_{д} = M_{д1} + M_{д2} + M_{д3};$$

$$V = V(0) + (M_{д} - M_{с})T/J_0;$$

$$X_{п} = X_{п}(0) + V(0)T + 0,5(M_{д} - M_{с})T^2/J_0.$$

Особенностью приведенных выше математических зависимостей многодвигательного электропривода является то, что распределение нагрузки между двигателями осуществляется по полному статическому усилию, определяемому по положению конечных грузов. Учитывая, что полная нагрузка (статическая и динамическая) определяет суммарную

величину тока якорных цепей, можно коэффициенты  $f_1$ ,  $f_2$ ,  $f_3$  находить через полный ток с учетом знака. Таким образом,

$$f_1 = 0,33 + 0,21t_0; \quad f_2 = 0,33; \quad f_3 = 0,33 - 0,21t_0,$$

где  $i_0 = I_{я.0}/I_{я.мах}$ ,  $I_{я.0}$  - суммарный измеренный ток якорных цепей;  $I_{я.мах}$  - максимальный расчетный ток привода с учетом динамической составляющей.

Выполненные исследования на ЭВМ полностью подтвердили возможность оптимального распределения общего движущего момента  $M_D$  между отдельными двигателями. Важным достоинством предложенной системы управления является применение ЭМ, выходной сигнал  $U_\Omega$  которой, пропорциональный динамической составляющей тока, подается на БП. Это обеспечивает оптимальное распределение динамической составляющей момента.

В четвертой главе изложены результаты исследований по снижению динамических нагрузок в упругих звеньях с помощью ЭМ. Для возможности использования структурной схемы системы управления трехдвигательным электроприводом, приведенной на рис.3, где механическая часть системы представлена передаточной функцией  $1/(J_0 p)$ , эта часть схемы заменена упругой системой, структурная схема которой приведена на рис.4. Здесь  $i_{ред}$  - передаточное число редуктора;  $R_{ш}$  - радиус ведущих шкивов;  $J_1$  - суммарный приведенный момент инерции двигателей и жестко соединенных с ними звеньев;  $K_0$  - коэффициент передачи датчика положения;  $W_{1y}(p)$ ,  $W_{2y}(p)$  - передаточные функции упругого звена по отношению к динамическим усилиям в верхнем ( $F_{1y}$ ) и нижнем ( $F_{2y}$ ) сечениях тягового органа.

Для снижения до минимума амплитуды механических колебаний использован метод двухступенчатого приложения (снятия) движущих моментов в периоды пуска (торможения).

Такой режим достигается применением ЭМ второго порядка с ло-

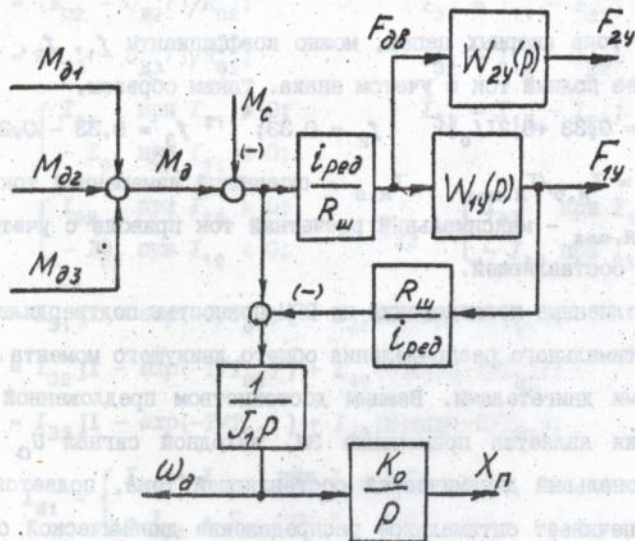


Рис. 4.

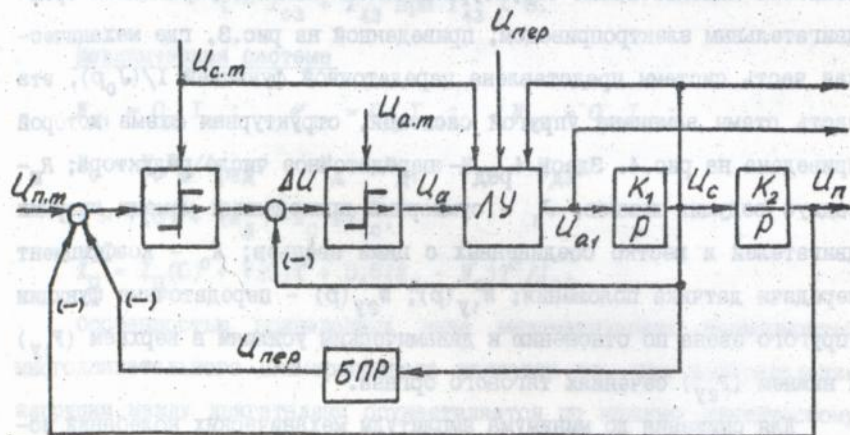


Рис. 5.

гическим устройством (ЛУ) и блоком переключения режима (БПР), благодаря чему сигнал ускорения  $U_{a1}$  будет увеличиваться (уменьшаться) в две ступени (рис.5). На этой схеме  $U_{п.м}$ ,  $U_{с.м}$ ,  $U_{a.м}$  - сигналы, пропорциональные, соответственно, заданному перемещению, максимальной ограничиваемой скорости и максимальному ускорению, а сигналы  $U_{п}$ ,  $U_{с}$  и  $U_{a1}$ , пропорциональные текущим значениям этих переменных, подаются на соответствующие регуляторы (см.рис.3).

Логическое устройство в период разгона функционирует согласно алгоритму

$$U_{a1} = \begin{cases} 0,5 U_a & \text{при } U_{c1} > U_c > U_{с.м} - U_{c1}; \\ U_a & \text{при } U_{c1} \leq U_c \leq U_{с.м} - U_{c1}. \end{cases}$$

где  $U_{c1} = 0,5 U_{a.м} K_1 t_1$  - сигнал, пропорциональный граничной скорости  $V_1$ ;  $t_1$  - время, равное или кратное половине периода собственных колебаний системы;

$$U_a = \begin{cases} U_{a.м} & \text{при } \Delta U \geq 0; \\ -U_{a.м} & \text{при } \Delta U < 0. \end{cases}$$

Переключающий сигнал  $U_{пер}$  формируется в БПР в зависимости от значения  $U_c$  и ограничиваемых величин:

$$U_{пер} = \begin{cases} U_{m2} - K_2 (U_{с.м}^2 - U_c^2) / (K_1 U_{a.м}) & \text{при } U_c > U_{с.м} - U_{c1}; \\ U_{m2} & \text{при } U_{с.м} - U_{c1} \geq U_c \geq U_{c1}; \\ K_2 U_c^2 / (K_1 U_{a.м}) & \text{при } U_c < U_{c1}, \end{cases}$$

где  $U_{m2} = 0,5 K_2 U_{с.м} (U_{с.м} + 2U_{c1}) / (K_1 U_{a.м})$ .

По приведенным зависимостям, а также полученным в предыдущих главах алгоритмам моделирования звеньев системы, представленной на рис.3, составлены программы и исследованы на ЭВМ диаграммы скорости, ускорения и динамических усилий в период разгона системы. Установлено, что наименьшие колебания получаются при  $t_1$ , равном

половине периода собственных колебаний системы. Рассмотрены варианты формирования полной нагрузки по положению рабочего органа и по суммарному току двигателей.

### ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. Многодвигательные электроприводы представляют собой сложную электромеханическую систему и должны рассматриваться как много-связные системы. Особенно жесткие требования предъявляются к многодвигательным электроприводам с передачей усилий от двигателей к общему тяговому органу за счет сил трения как в отношении оптимального распределения передаваемой мощности между отдельными двигателями, так и снижения динамических нагрузок.

2. Установлено, что в настоящее время несмотря на большое разнообразие регулируемых электроприводов постоянного и переменного тока все они содержат в качестве основных контуров регулирования внутренний контур регулирования тока и внешний - регулирования частоты вращения. С целью повышения стабильности функционирования систем управления с ограничениями производных скорости по времени предложено в многодвигательных электроприводах использовать общую задающую модель, которая наряду с формированием оптимальных управляющих воздействий с помощью прямых передач обеспечивает требуемые ограничения тока и производной тока по времени.

3. В системах управления многодвигательным электроприводом с упругими звеньями и подчиненными контурами регулирования координат при выборе регуляторов и моделировании систем управления необходимо учитывать внутренние обратные связи по ЭДС отдельных двигателей. Эти связи играют важную роль в определении переходных процессов.

4. Предложено для оптимального распределения нагрузки между двига-

телями использовать ЭМ второго порядка, основной выходной сигнал которой, пропорциональный заданной скорости, подается непосредственно на все регуляторы скорости, а сигнал, пропорциональный ускорению, через блоки перемножения распределяется по определенному закону между регуляторами тока.

5. На основании анализа оптимальных соотношений мощностей отдельных двигателей разработано устройство формирования движущих моментов в зависимости от нагрузки и направления вращения двигателей, обеспечивающее одинаковые запасы против скольжения приводных барабанов относительно тягового органа.

6. Учитывая, что в электроприводах с тиристорными преобразователями имеется область прерывистых токов, то при анализе и построении реверсивных электроприводов эта область должна учитываться. В работе предложена модель функционирования контура тока как для непрерывного, так и прерывистого режимов.

7. В результате анализа электромеханической системы, содержащей упругие звенья с распределенными параметрами, обоснована целесообразность в практических расчетах использовать математическую модель второго порядка для описания таких звеньев.

8. Предложено использовать комбинированное по заданным воздействиям управление для снижения колебаний в электромеханических системах с упругими звеньями с распределенными параметрами.

9. Предложенные структуры и алгоритмы функционирования отдельных блоков и системы комбинированного управления многодвигательным электроприводом в целом реализуются с помощью серийных элементов и устройств аналоговой и цифровой техники. Использование сделанных рекомендаций повышает безопасность и долговечность многодвигательного электропривода с минимально возможным при заданном кинематическом режиме потреблением электроэнергии.

Основные положения диссертации опубликованы в следующих работах:

1. Чермалых Т.В., Мадхи Халед, Шабо Камил. Системы оптимального управления позиционным тиристорным электроприводом с многоканальной задающей моделью. - Киев, 1994.- 49 с.- (Препр./НАН Украины. Ин-т электродинамики; № 762).
2. Чермалых Т.В., Шабо Камил. Система автоматического управления технологически взаимосвязанными электроприводами // Тез. докл. 2-й Украинской конференции по автоматическому управлению. - Львов, 1995. - С.95,96.
3. Оптимизация динамических режимов асинхронного электропривода с тиристорным регулятором тока ротора / Чермалых Т.В., Шабо Камил, Аль-Юсеф Ахмад: Нац.техн.ун-т Украины "Киев.политехн.ин-т. - Киев, 1996. - 13 с. Деп. в ГИНТБ Украины, № 506 - Ук96.
4. Комбинированная система управления многодвигательным электроприводом с общей задающей моделью / Шабо Камил: Нац.техн.ун-т Украины "Киев.политехн.ин-т. - Киев, 1996. - 10 с. Деп. в ГИНТБ Украины, № 707 - Ук96.

Личный вклад автора. В работах, написанных в соавторстве, автору принадлежат: разработка структуры и алгоритмов определения параметров прямых каналов комбинированного управления (1), методика оптимального распределения общей нагрузки между двигателями (2), алгоритмические схемы реализации оптимального управления асинхронным электроприводом (3).

*Handwritten signature*

#### АНОТАЦІЯ

Шабо Каміл. Система управління багатодвигунним електроприводом з гнучким тяговим органом та загальною задавчою моделлю

Диссертація на здобуття ученого степеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.09.03. - Електротехнічні комплекси та системи, включаючи їх управління та регулювання. Національний технічний університет України "Київський політехнічний інститут", Київ, 1996. Захищаються методи побудови структури та алгоритмів роботи системи управління багатодвигунним електроприводом із задавчою моделлю (ЗМ), яка формує оптимальні управляючі впливи на регулятори. Розроблено блок розподілу загального потрібного движучого моменту між окремими двигунами за критерієм рівних тягових можливостей, що підвищує надійність системи та знижує втрати енергії на пробуксовку. Запропоновано пристрої, які дозволяють виключити низькочастотні пружні коливання в електромеханічних системах із ЗМ. Одержані структурні схеми та алгоритми орієнтовані на їх реалізацію за допомогою мікро-ЕОМ та мікроконтролерів.

#### ANNOTATION

Shabo Kamil. Control system of multi motor electric drive with flexible tractive Organ and general giving model.

Dissertation submitted for a Technical Sciences candidate's degree for speciality 05.09.13. - Electrotechnical Complexes and Systems Including Their Control and Regulation. National technical University of Ukraine "Kiev polytechnic institute", Kiev, 1996.

In this thesis (dissertation), the author is defending methods of construction of structure of System and methods of algorithms of working of System of control of multi motor electric drive with giving model, which formulates optimum controlling effect on regulators. Distribution block of aggregate needed moving moment between different motors criterion balance of flexible possibilities was developed, which increases reliability of systems and decreases lost of energy of brake.

Ключевые слова: многодвигательный электропривод, задающая модель, комбинированное управление, упругие звенья.

АВ 35.837

---

Подп. к печ. 02. 10. 96. Формат 60×84<sup>1/16</sup>.  
Бумага тип. № 1 . Способ печати офсетный. Услови. печ. л. 1,0  
Услови. кр.-отт. 1,0 . Уч.-изд. л. 1,0 .  
Тираж 100 . Зак. № 6-3473 .

---

Фирма «ВНПОЛ»  
252151, г. Киев, ул. Волянская, 60.