

УДК 62-83.52

А.Е.КОЗЯРУК, Т.О.РОССО

### ПРИНЦИПЫ ПОСТРОЕНИЯ И АЛГОРИТМЫ МИКРОПРОЦЕССОРНЫХ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОПРИВОДАМИ

Системы управления электроприводами - сложные многофункциональные и многопараметрические - характеризуются применением нескольких (по числу параметров или выполняемых функций) локальных систем регулирования и управления. Регуляторы и узлы систем управления реализуются с использованием аналоговой и дискретной микроэлектронной базы малой степени интеграции и дискретных радиоэлектронных компонент.

Создание микроЭВМ, по своим характеристикам и объему перерабатываемой информации соответствующих миниЭВМ, а по стоимости не превышающих стоимости блоков аналого-цифровых регуляторов, позволяет перейти к комплексному решению задач управления, регулирования, контроля и сигнализации с помощью единой однопроцессорной или многопроцессорной микроЭВМ. Такое решение позволяет повысить эффективность и качество управления за счет возможности реализации сложного оптимального алгоритма, учитывающего необходимые взаимосвязи между отдельными контурами регулирования и управления [3]. Кроме того, одной из важнейших частей эффекта применения микроЭВМ в системах управления электроприводами является возможность использования однотипных аппаратных средств для различных задач управления при реализации алгоритмов программными средствами. Это позволяет сократить номенклатуру часто не свойственного заводам-изготовителям комплектных электроприводов производства электронных изделий и комплектовать щиты управления покупными микропроцессорными или специальными функциональными модулями.

Рассмотрим особенности задачи управления электроприводом, обуславливающие наибольшую приемлемость цифровых систем управления на базе микроЭВМ.

САУ электроприводов отличается: функциональным изменением структуры САУ с целью выполнения различных по назначению функций одновременно или с разнесением по времени; режимным изменением структуры в рамках выполнения одной функции; иерархичностью системы управления в рамках выполнения одной функции и в части взаимосвязи САУ электропривода с САУ высшей степени иерархии.

Для САУ электропривода по функциональному признаку можно выделить четыре подсистемы: управления и блокировок; регулирования; контроля, сигнализации и защиты; диагностики.

Для электропривода характерно пять уровней иерархии:

- уровень общего управления, на котором оператор выбирает режим работы электропривода, система контролирует выполнение начальных условий;
- уровень группового управления, на котором производится включение обслуживающих элементов, участвующих в работе систем;
- уровень избирания топологии, на котором производится управление переключателями набора силовой схемы;
- уровень индивидуального управления, на котором система контролирует готовность первичной сети и включает соответствующие автоматические выключатели;
- уровень воздействия, на котором производится включение выключателей соответствующих систем возбуждения, контроль действия по набору схемы электропривода на соответствие заданному и, как результат, осуществляется индикация готовности схемы к работе, что дает разрешение оператору на работу в режиме обслуживания.

Подсистема регулирования характеризуется режимами, обеспечивающими требуемые динамические и статические характеристики. Подсистемы управления, защиты, сигнализации реализуют пороговые и логические алгоритмы. Возможность реализации их на микроЭВМ определяется, в первую очередь, возможностью ввода и логической обработки информации, что не предъявляет особых требований к быстродействию микроЭВМ. Требования к быстродействию аппаратных средств определяются сложностью синтезированных алгоритмов подсистемы регулирования и требованиями к динамическим характеристикам электроприводов по регулируемым координатам.

На рис.1 приведена общая структура САУ, отражающая свойства ее переносности.

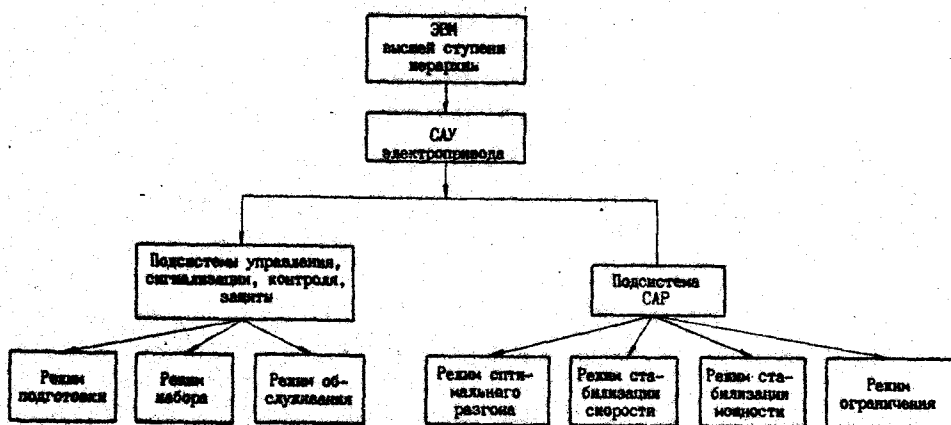


Рис.1. Общая структура САУ электропривода

При выборе способов построения и разработке алгоритмов управления электроприводами наблюдаются две тенденции. Первая, получившая наибольшее распространение, заключается в использовании новых аппаратных средств при сохранении хорошо зарекомендовавших себя в аналоговых САУ структур и алгоритмов управления. Вторая заключается в разработке новых принципов, структур и алгоритмов, в максимальной степени ориентированных на использование особенностей новых аппаратных средств, в частности, алгоритмов многорежимного управления.

Возможности и особенности использования первого подхода иллюстрируются примерами реализации систем прямого микропроцессорного управления тиристорными электроприводами постоянного тока [4]. Здесь структура системы управления полностью повторяет структуру систем с последовательной коррекцией. Синтез алгоритма управления производится с использованием методов теории линейных импульсных систем, исходя из критерия получения динамических характеристик привода с заданной точностью по определенным критериям не хуже динамических характеристик с использованием аналоговой системы управления. Синтезированные алгоритмы определяют требования к быстродействию вычислительного устройства.

Если для электроприводов постоянного тока рассмотренный принцип построения микропроцессорных систем управления получил уже достаточное развитие и реализацию, то для электроприводов переменного тока в отечественной практике проводятся только исследовательские работы. Одним из основных преимуществ микропроцессорных систем является возможность реализации сложных, близких к оптимальным, алгоритмов управления. Как известно [1], в области частотно-управляемых электроприводов переменного тока наилучшие статические и динамические характеристики электропривода обеспечивают системы векторного управления. До настоящего времени в отечественной практике реализация систем векторного управления осуществлялась на аналоговых аппаратных средствах [2].

Рассмотрим возможности и особенности реализации систем векторного управления на примере частотно-регулируемого синхронного электропривода (рис.2), структура и алгоритмы управления которым на аналоговых элементах описаны в работе [7]. Здесь также используется первый подход в части структуры и алгоритмов управления. Быстродействие микроЭВМ для рассматриваемой схемы электропривода [7] определяется выбранным типом преобразователя частоты. В данном случае используется преобразователь частоты с непосредственной связью, питающийся от сети промышленной частоты.

С учетом числа фаз преобразователя и необходимости управления тиристорами на каждом полупериоде питающей частоты требуемое быстродействие определяется длительностью интервала управляемости  $T^0 = 1/f_c 2m = 3,3$  мс. Такой же интервал управляемости предусматривается для систем электропривода постоянного тока [4].

Основной особенностью микропроцессорной системы векторного управления является многократное повторение операции умножения в одном цикле

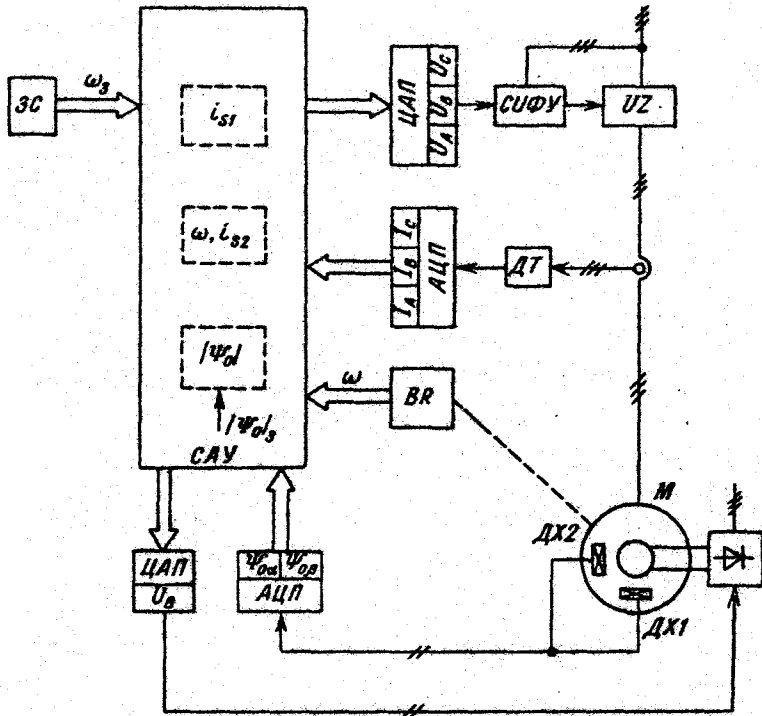


Рис.2. Структурная схема синхронного электропривода с векторным управлением от микроЭВМ

УЗ - тиристорный преобразователь частоты с непосредственной связью; СИФУ - система импульсно-фазового управления тиристорами; М - синхронная машина; ДТ - датчики тока статора; BR - датчик скорости; ЗС - задатчик скорости; ДХ1, ДХ2 - датчики Холла

выполнения программы. Схема векторного управления синхронным электроприводом насчитывает 24 операции умножения (включая умножение на постоянный коэффициент). Учитывая эту особенность, синтез системы автоматического управления, включающей векторные преобразования, рекомендуется выполнять в следующей последовательности:

1. Произвести программную оптимизацию алгоритма вычислений, выявить наиболее длительные операции (умножение, деление, извлечение квадратного корня) и максимально использовать возможность их замены таблицами, записываемыми в ПЗУ; при умножении на постоянный коэффициент, кратный  $2^n$  или  $1/2^n$ , использовать короткую операцию арифметического сдвига; разработать многоканальный алгоритм вычислений, реализуемых САУ (для мультипроцессорной системы); предпочтительным является алгоритм с числом ветвей, равным числу управляемых координат, для рассматриваемой схемы [7] - трехканальный; максимальный эффект достигается при минимальном обмене данными между каналами и при равенстве количества операций умножения в каждой ветви алгоритма.

2. Выбрать интервал квантования по основным критериям, существенным для частотно-регулируемых электроприводов, на основании теоремы Котельникова - Шеннона с соблюдением условия

$$T_A \leq \frac{\pi}{\omega_{\max}} = \frac{1}{2f_{\max}},$$

где  $T_A$  - период квантования;  $f_{\max}$  - максимальная или граничная частота, которая должна быть воспроизведена, для ТНПЧ  $f_{\max} = 300$  Гц,  $T_A \leq 0,0016$  с; в зависимости от допустимой ошибки по соотношению [5]

$$\frac{f_A}{f_{\max}} = \frac{\pi}{\sqrt{6}|F_A|},$$

где  $f_A$  - частота квантования;  $F_A$  - допустимая ошибка.

В качестве периода квантования выбирается минимальный из полученных по данным критериям, он должен быть меньше интервала управляемости тиристорного преобразователя частоты.

3. Произвести выбор микропроцессорного устройства по следующим техническим показателям, в порядке убывания их значимости: пригодность к условиям эксплуатации электропривода; быстродействие операции умножения и возможность аппаратной оптимизации скорости ее выполнения; разрядность микропроцессорного устройства; оснащенность устройствами связи с управляемым объектом.

При разработке векторной системы управления электроприводом с применением цифровой вычислительной техники возможны три пути: использование стандартной микроЭВМ; реализация мультипроцессорной системы с помощью программируемых контроллеров; разработка гибридной схемы управления с использованием стандартных микропроцессорных наборов в сочетании с аналоговыми элементами, а также цифроаналоговыми переменчающими преобразователями.

Второй подход к разработке микропроцессорных систем на основе новых принципов, структур и алгоритмов, отличных от используемых в аналоговых САУ, обеспечивает использование всех преимуществ микропроцессорных аппаратных средств. Принципы цифрового управления многорежимными электроприводами изложены в работе [6].

Обычно САУ электропривода должна обеспечивать решение следующих задач: пуск и реверс электродвигателя с максимальным быстродействием, определяемым требованиями к динамическим характеристикам объекта; стабилизацию скорости вращения электродвигателя с целью обеспечения удовлетворительных характеристик технологического процесса; стабилизацию мощности, отбираемой от первичной сети в режиме ограничения мощности; ограничение во всех режимах по энергетическим и прочностным соображениям электрических и механических параметров электропривода допустимыми значениями (скорость вращения, ток, напряжение, темп наброса мощности, момент, мощность и т.д.).

Система управления должна предусматривать возможность перехода с одного режима управления на другой либо по команде оператора, либо автома-

тически, в соответствии с изменениями условий функционирования электропривода. При этом под режимом понимается подобласть функционирования системы, определяемая требованиями реализации частной задачи технологического процесса управления.

Практическая реализация регуляторов переменной структуры (мультиструктурных регуляторов) на аналоговых средствах затруднительна из-за резкого возрастания стоимости регулятора. Применение вычислительных машин позволяет легко переключать структуру регуляторов при изменении режима работы. Для этого не требуется аппаратного усложнения системы, а необходимо только соответствующее развитие математического обеспечения ЭВМ. Использование микроЭВМ дает возможность реализовать оптимальные алгоритмы управления, не доступные для аналоговых схем. Наконец, вычислительные машины являются наилучшей базой для построения иерархических систем управления.

Рассмотрим далее вопросы организации систем переменной структуры и выбора алгоритмов управления в отдельных режимах.

Для алгоритма переключения структуры понятие переменной структуры регулятора формализуется следующим образом. Уравнение управляемого электропривода (объект управления ОУ) в общем случае запишем в виде

$$\dot{x} = F(x, u), \quad (1)$$

где  $x \in R^n$  - вектор состояния;  $R^n$  - пространство состояний (фазовых координат);  $u$  - вектор управления;  $F(\cdot)$  - нелинейная вектор-функция.

В систему управления поступают также управляющие воздействия  $g$  с верхнего уровня управления. В соответствии с функциональным назначением электропривода, ограничениями на переменные состояния, задающими воздействиями  $g$  и требованиями к качеству процессов управления пространство  $R^n$  разбивается на области  $x_i$ . Принадлежность текущего состояния области требует включения индивидуального локального алгоритма управления. Осуществим разбиение пространства состояний на области с помощью поверхностей вида

$$a_j(x, g) = 0, \quad (2)$$

где  $j = 1, 2, \dots$

Поверхности разграничивают области малых и больших отклонений, выделяют область допустимых значений тока, мощности и т.п. Так как области  $x_j$  в общем случае выделяются несколькими поверхностями (2), то выбор локального алгоритма управления определяется одновременным выполнением условий типа  $a_j(x, g) \geq 0$ . Автоматический выбор локального алгоритма, т.е. структуры регулятора, производится управляющей ЭВМ с помощью специальной планирующей программы.

Формализуем синтез планирующей программы, для этого введем логические переменные:

$$r_j = \begin{cases} 1 & \text{при } a_j(x, g) \geq 0, \\ 0 & \text{при } a_j(x, g) < 0, \end{cases} \quad (3)$$

характеризующие расположение текущего состояния электропривода относительно поверхностей (2). Переменные  $r_i$  будем интерпретировать как буквы входного алфавита, а вектор  $r = [r_i]$  - как входное слово. Определим также выходные переменные автомата:

$$y_i = \begin{cases} 0 & \text{при } x \notin x_i, \\ 1 & \text{при } x \in x_i. \end{cases} \quad (4)$$

Вектор выхода комбинационного автомата  $y = [y_i]$  всегда имеет только одну ненулевую координату, равную единице. Номер ненулевой координаты определяет область  $x_i$ , которой принадлежит вектор состояния  $x$  в данный момент времени, а каждой такой области соответствует однозначный выбор локального алгоритма управления.

Связь входных и выходных переменных комбинационного автомата первоначально устанавливается таблицей истинности, составляемой на основании задания на разработку системы управления. В задании должны быть перечислены режимы работы электропривода, ограничения, управляющие сигналы верхней иерархической ступени. По таблице истинности составляются логические выражения связи вида

$$y_i = \eta_i(r), \quad (5)$$

где  $\eta_i(r)$ ,  $i = 1, 2, \dots$  - булевы функции; вектор-функция  $\eta(r) = [\eta_i(r)]$  называется переключательной функцией комбинационного автомата.

Функциональная схема системы управления электропривода переменной структуры изображена на рис.3. Логический блок ЛБ в этой системе вычисляет разграничивающие функции (2), реализует переключательную функцию  $\eta(r)$ . Коммутатор  $K$  в соответствии с полученными значениями вектора  $y$  выбирает алгоритм  $A(y)$  управления электроприводом. Программная реализация ЛБ на управляющей ЭВМ называется планирующей программой. Планирующая программа не всегда может быть синтезирована на основе комбинационного автомата. Выбор того или иного локального алгоритма  $A(y)$  может зависеть от режима работы, выбранного на предыдущем этапе. В этом случае синтез планирующей программы целесообразно осуществлять на основе автомата с памятью типа автомата Мура. Для этого автомата вместо таблицы истинности составляется таблица переходов, которая задает функции переходов

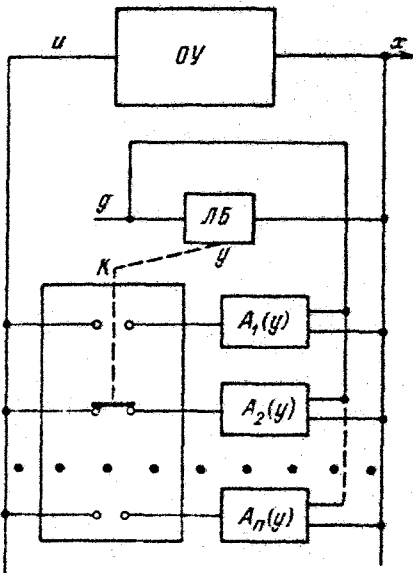


Рис.3. Функциональная схема САУ переменной структуры

$$y_i = \eta_i(r, y). \quad (6)$$

Отличие алгоритма функционирования ЭВМ для такого случая заключается в использовании для расчета вектора выхода  $y$  выражения (6). Структура регулятора определяется содержанием выполняемого алгоритма  $A(y)$ .

Все многообразие задачи управления электроприводом в различных режимах работы реализуется двумя типами алгоритмов. Первый из них, называемый линейным алгоритмом управления, относится к режимам воспроизведения управляющего входного воздействия  $g$ , второй относится к режимам обработки больших начальных рассогласований, режимам стабилизации мощности и т.п. и называется нелинейным алгоритмом управления.

Линейные алгоритмы управления, обеспечивающие воспроизведение входного воздействия  $g$ , работают при малых отклонениях  $\tilde{x}$  вектора  $x$  электропривода от вектора  $x^g$ , определяемого входным воздействием  $g$ . Поэтому такие алгоритмы синтезируются на основании модели электропривода, получающейся в результате линеаризации выражения (I) с использованием методов оптимального управления.

Нелинейные алгоритмы управления используются при обработке больших рассогласований, стабилизации мощности, стабилизации тока и в других режимах работы электропривода. Для таких режимов требуется выдерживать определенные функциональные соотношения между переменными состояния

$$\varphi(x) = 0, \quad (7)$$

причем для каждого режима нелинейная функция, стоящая в левой части уравнения, будет своей. Под влиянием возмущающих воздействий условие (7) будет нарушаться, поэтому, рассматривая дискретные моменты времени, будем иметь  $e_m = \varphi(x_m)$ . Задача управляющей ЭВМ заключается в том, чтобы ликвидировать возможные отклонения от соотношения (7). Синтез алгоритма для решения поставленной задачи заключается в следующем. Интервал квантования выбирается так же, как для линейных алгоритмов. Переходим от непрерывной нелинейной модели (I) к дискретной нелинейной модели.

В нормально функционирующей системе управления отклонение  $e_m$  мало. Положим, что для ликвидации этого отклонения используется некоторая часть управляющего воздействия, так что

$$U_m = U_m^* + \tilde{U}_m, \quad (8)$$

где  $U_m^*$  - основная часть управления, обеспечивающая условие (7), когда  $e_m = 0$ .

$$\tilde{U}_m = K_m e_m;$$

$K_m = B_m^{-1}(\alpha - A_m)$ ;  $\alpha$  - постоянное число, выбираемое из условия обеспечения требуемого качества переходного процесса при ликвидации возникающих отклонений  $e_m$ .

Задача разработки САУ сводится к составлению прикладных программ.

Рассмотрим основные характеристики и применимость микроЭВМ для задач управления электроприводами. МикроЭВМ характеризуется большим числом параметров, включающих функциональные показатели (быстродействие, количество и состав команд, разрядность представляемой информации, объем адресуемой памяти), структурные показатели (число внутренних регистров общего назначения, тип арифметико-логического устройства, организация шин и магистралей, организация ввода-вывода), показатели программного обеспечения (наличие резидентных и кросс-средств отладки программ, трудоемкость программирования, микропрограммное управление и т.д.), конструктивно-технологические и экономические показатели (тип используемой технологии БИС, потребляемая мощность, габариты, масса, условия эксплуатации, стоимость). В настоящее время не существует отработанных методов выбора типа микроЭВМ и, как правило, первостепенное значение имеют проектные соображения, опыт и интуиция разработчика.

Прежде всего выбор микроЭВМ определяется областью применения. Основные требования к микроЭВМ, работающим в САУ электропривода: работа в реальном масштабе времени, большое число операций ввода-вывода, высокая надежность, удовлетворение эксплуатационных требований. Требуемое быстродействие микроЭВМ для задачи управления электроприводом определяется подсистемой регулирования.

В качестве управляющих микроЭВМ для электропривода рассматривались микроЭВМ семейства „Электроника 50“; СМ-1800; МСУВТ В7, а также микроЭВМ семейства „Электроника С-5“. Для реализации выбранных алгоритмов автоматизации управления быстродействия всех перечисленных микроЭВМ достаточно. Разрядность управляющей ЭВМ выбирается в результате моделирования задачи управления при использовании представления чисел с различной разрядностью.

В системе управления электроприводом с реализацией алгоритмов переменной структуры используются суммарно-разностные операторы. Для реализации этих алгоритмов достаточно таких операций, как сложение, вычитание, умножение, деление, которые входят в системы команд всех сравниваемых ЭВМ. Среди неарифметических нелинейных операторов в разработанных алгоритмах наиболее часто встречается оператор извлечения квадратного корня, который предусмотрен в системе команд МСУВТ В7, „Электроника С5-41“. При выборе микроЭВМ важнейшим вопросом является наличие отладочного комплекса с необходимым периферийным оборудованием и математическим обеспечением.

Из качественного сравнения рассматриваемых микроЭВМ по всем показателям, включая специальные условия эксплуатации и доступность использования, в качестве аппаратных средств управления электроприводами наиболее приемлемы МСУВТ В7 (В9, В10) и микроЭВМ семейства „Электроника С-5“.

Микросредства управляющей вычислительной техники (МСУВТ) серии В7 (В9, В10), ориентированные на управление электротехническими объектами, имеют в своем составе большой набор УСО (устройство связи с объектом), в том числе и УСО с гальванической развязкой вычислительного устройства и объекта, что особенно важно для задачи управления электроприводами большой мощности. МСУВТ содержат устройства связи с периферийными устройствам

(телетайп, дисплей, магнитофон) и снабжены программным обеспечением и специальным отладочным комплексом КРАМ.

Учитывая иерархическую структуру, возможность построения многомашиных и многопроцессорных комплексов, МСУВТ в наибольшей степени приемлемы для построения систем управления электроприводом с реализацией всех подсистем, в том числе и подсистемы диагностики. МикроЭВМ семейства «Электроника С-5», в частности «Электроника С5-21», а также специализированные микропроцессорные устройства на базе микропроцессорных наборов К589, К1810 и др. целесообразно использовать для решения локальных задач управления и регулирования с относительно небольшим объемом обрабатываемой информации.

### Выводы

1. Микропроцессорные системы управления электроприводами в максимальной степени соответствуют многофункциональности и многорежимности задач управления.

2. Реализация микропроцессорных систем управления может производиться по двум принципам: с использованием известных структур и алгоритмов, соответствующих аналоговым системам управления, и с использованием принципов и алгоритмов, ориентированных на максимальное использование возможностей и свойств микропроцессорных аппаратных средств.

3. Наиболее приемлемым путем создания микропроцессорных систем управления электроприводами является использование принципов микроструктурного управления.

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Дартау В.А., Козярук А.Е., Рудаков В.В. Теоретические основы построения частотных электроприводов с векторным управлением // Автоматизированный электропривод. М.: Энергия, 1980.
2. Рудаков В.В., Столяров И.М., Дартау В.А. Асинхронные электроприводы с векторным управлением. Л.: Энергоатомиздат, 1987.
3. Слежановский С.В. Непосредственное цифровое управление электроприводами // Автоматизированный электропривод, силовые полупроводниковые приборы, преобразовательная техника. М.: Энергоатомиздат, 1983.
4. Файнштейн В.Г., Файнштейн Э.Г. Микропроцессорные системы управления тиристорными электроприводами. М.: Энергоатомиздат, 1986.
5. Фритч В. Применение микропроцессоров в системах управления. М.: Мир, 1984.
6. Цифровое управление многорежимным электроприводом / Дроздов В.Н., Козярук А.Е., Мирошник И.В., Сабинин Ю.А. // Электричество. 1985. № 8.
7. Частотно-регулируемый синхронный электропривод с векторной системой подчиненного регулирования / Рудаков В.В., Дартау В.А., Россо Т.О., Козярук А.Е. // Электричество. 1988. № 4.