А. В. Башарин

Управление электроприводами

Москва
«Книга по Требованию»

УДК 53
ББК 22.3
А11

А. В. Башарин
А11 Управление электроприводами / А. В. Башарин – М.: Книга по Требованию, 2024. – 392 с.

ISBN 978-5-458-28933-7

Рассмотрены принципы построения автоматических систем управления электроприводами Дано математическое описание двигателей, преобразователей к других типовых узлов как элементов АСУ Рассмотрены типовые системы стабилизации скорости, программные и следящие системы управления электроприводом, а также системы регулирования тока, момента и других параметров. Изложены методы расчета в освещены вопросы машинного проектирования систем управления электроприводов

ISBN 978-5-458-28933-7

© Издание на русском языке, оформление
«YOYO Media», 2024
© Издание на русском языке, оцифровка,
«Книга по Требованию», 2024

Эта книга является репринтом оригинала, который мы создали специально для Вас, используя запатентованные технологии производства репринтных книг и печати по требованию.

Сначала мы отсканировали каждую страницу оригинала этой редкой книги на профессиональном оборудовании. Затем с помощью специально разработанных программ мы произвели очистку изображения от пятен, клякс, перегибов и попытались отбелить и выровнять каждую страницу книги. К сожалению, некоторые страницы нельзя вернуть в изначальное состояние, и если их было трудно читать в оригинале, то даже при цифровой реставрации их невозможно улучшить.

Разумеется, автоматизированная программная обработка репринтных книг – не самое лучшее решение для восстановления текста в его первозданном виде, однако, наша цель – вернуть читателю точную копию книги, которой может быть несколько веков.

Поэтому мы предупреждаем о возможных погрешностях восстановленного репринтного издания. В издании могут отсутствовать одна или несколько страниц текста, могут встретиться невыводимые пятна и кляксы, надписи на полях или подчеркивания в тексте, нечитаемые фрагменты текста или загибы страниц. Покупать или не покупать подобные издания – решать Вам, мы же делаем все возможное, чтобы редкие и ценные книги, еще недавно утраченные и несправедливо забытые, вновь стали доступными для всех читателей.

Серия Книжный Ренессанс
www.samizday.ru/reprint

ГЛАВА ПЕРВАЯ

ПРИНЦИПЫ ПОСТРОЕНИЯ АВТОМАТИЧЕСКИХ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОПРИВОДАМИ

1-1. ЗАДАЧИ И ПРИНЦИПЫ УПРАВЛЕНИЯ КООРДИНАТАМИ ЭЛЕКТРОПРИВОДА

1-1-1. ОСНОВНЫЕ ЦЕЛИ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОПРИВОДАМИ. КЛАССИФИКАЦИЯ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ

Технический прогресс в самых различных отраслях промышленности связан с непрерывно усложняющейся технологией производства, с повышением требований к точности изготовления изделий и их качеству при все более сложном процессе их обработки. Вместе с тем растет объем производства, что выдвигает требование повышения производительности машин за счет увеличения как их мощности, так и скорости обработки изделий. Поскольку подавляющее большинство производственных машин оснащается электрическими приводами, возрастание требований к этим машинам ведет к ужесточению требований к электроприводу, на который возлагается задача осуществления сложных перемещений рабочих органов механизма. В процессе реализации этих перемещений возникает необходимость разгона, торможения, реверса электропривода, поддержания постоянства регулируемой величины (координаты), изменения ее по определенному закону и т. д. Механизм может быть оборудован несколькими электроприводами, каждый со своими собственными системами управления. Может возникнуть необходимость согласованного управления электроприводами нескольких механизмов, каждый из которых имеет свою систему управления.

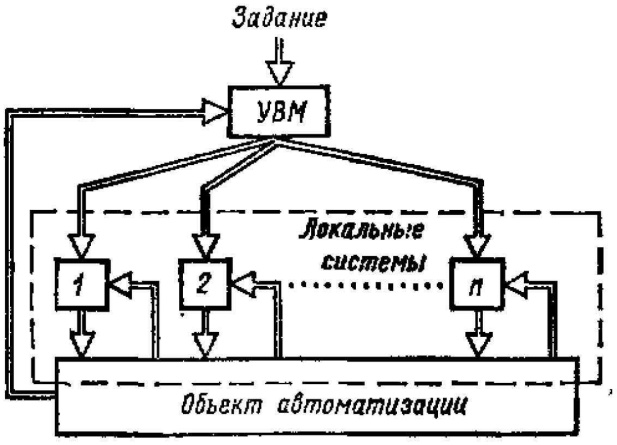

Рис. 1-1

Эти системы (*1*, *2*,...), выполненные как аналоговые, цифровые или как их комбинация, входят в качестве локальных систем в общую иерархическую структуру автоматической системы управления технологическим процессом (АСУ ТП) с помощью управляющей вычислительной машины (УВМ) (рис. 1-1). Задачей УВМ является управление технологическим процессом и, в соответствии с предъявляемыми требованиями, выдача управляющих воздей-

ствий на локальные системы управления электроприводом. В свою очередь сами локальные системы могут включать в себя мини- или микро-ЭВМ, с помощью которых обеспечивается требуемый алгоритм управления.

Системы управления электроприводами могут быть подразделены на *системы с разомкнутой* и *замкнутой цепью воздействий*. В системе с разомкнутой цепью воздействий (разомкнутая система) отсутствует обратная связь, вследствие чего при возникновении отклонения выходной переменной от предписанного ей значения, вызванного тем или иным возмущающим воздействием, сигнал управления на входе системы остается неизменным. Примером может служить двигатель *М*, питающийся от преобразователя *П* и приводящий в движение механизм, который включает в себя исполнительный орган (*ИО*) и кинематическую связь (*КС*) (рис. 1-2, *а*). Выходной переменной является обычно скорость или перемещение *ИО* механизма, что при жесткой связи между двигателем и механизмом соответствует скорости или углу поворота ротора двигателя. Не исключается, однако, возможность контроля других переменных системы, например якорного или статорного тока, напряжения или частоты преобразователя, тока возбуждения двигателя и т. п. Преобразователь *П* представляет собой источник питания с регулируемым выходом. Для электропривода постоянного тока — это преобразователь переменного тока в постоянный с регулируемым выходным напряжением, для привода переменного тока — преобразователь частоты, в котором наряду с частотой может изменяться и напряжение. Изображенные на рис. 1-2, *а* преобразователь, двигатель и механизм составляют силовую часть электромеханической системы, основным назначением которой является преобразование электрической энергии в механическую. На преобразователь, двигатель и механизм действуют возмущения в виде изменений напряжения питающей сети, изменений момента нагрузки и т. п. Эти возмущения приводят к отклонению выходной координаты от предписанного ей значения, причем значение этого отклонения в статике и характер его в динамике при данном возмущении определяются параметрами преобразователя, двигателя и механизма.

В системе с замкнутой цепью воздействий (замкнутая система) управление, действующее на силовую часть, изменяется при отклонении истинных значений выходных переменных от предписанных, что достигается путем введения обратных связей с выхода системы на ее входы (рис. 1-2, *б*). Выходные переменные силовой части системы и механизма *Мх* измеряются и преобразуются в пропорциональные им электрические сигналы с помощью измерительно-преобразовательного устройства (*ИПУ*). В его состав могут входить тахогенераторы, измерители положения или тока, цифроаналоговые или аналого-цифровые преобразователи и т. д. Сравнение истинных значений управляемых переменных с соответствующими предписанными значениями производится на входах регулятора *Р*. Регуля-

тор и *ИПУ* образуют управляющую часть системы, назначением которой, таким образом, является получение и обработка информации о координатах силовой части и выработка на основе этой информации управляющих сигналов, воздействующих на силовую часть с целью обеспечения желаемого характера изменения координат системы.

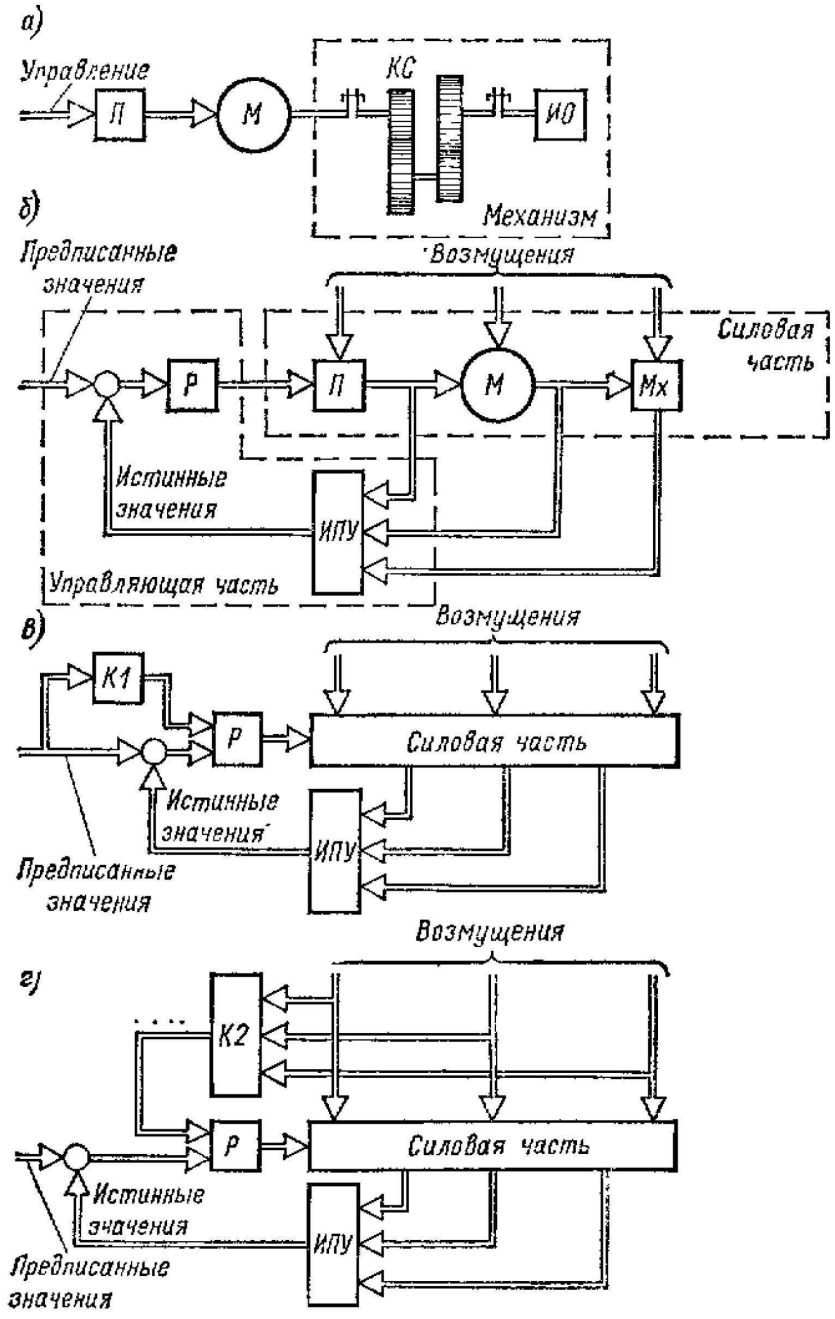

Рис. 1-2

Если классифицировать замкнутые системы по принципу построения, то описанные выше системы относятся к системам с регулированием по отклонению, так как на входах *Р* существуют сигналы управления, пропорциональные отклонениям истинных значений

переменных от предписанных. Эти отклонения представляют собой ошибку системы.

Уменьшение или полное устранение ошибки после завершения переходного процесса при управлении может быть достигнуто введением на вход *Р* дополнительного сигнала, который должен компенсировать сигнал ошибки. Такие системы называют *системами с комбинированным управлением* или *комбинированными* [6]. При отсутствии возмущений и при стабильных параметрах силовой части электропривода по компенсационному каналу *К1* (рис. 1-2, *в*) на вход регулятора *Р* поступает сигнал, обеспечивающий на его выходе такое выходное напряжение, при котором значение выходной переменной точно равно предписанному значению. Однако поскольку компенсационный сигнал не зависит от возмущений, последние будут отрабатываться комбинированной системой так же, как обычной системой с регулированием по отклонению.

С целью уменьшения, а в идеальном случае — исключения ошибки при возмущении, может быть построена *система с регулированием по возмущению*, или *инвариантная система* [26]. Принцип построения такой системы поясняет рис. 1-2, *г*. На регулятор через устройство компенсации *К2*, обеспечивающее измерение возмущений и придание определенных динамических свойств компенсационным каналам, подаются сигналы, зависящие от возмущающих воздействий. Теоретически при правильном выборе передаточных функций компенсационных каналов и точном измерении воздействий можно говорить о полной инвариантности системы к возмущениям, т. е. о полной компенсации влияния возмущений на силовую часть за счет воздействия со стороны регулятора.

Автоматические системы управления электроприводами (АСУ ЭП) могут иметь различные виды управления: 1) стабилизирующее управление, имеющее целью поддержание постоянства управляемой координаты; 2) программное управление, т. е. управление с целью изменения управляемой координаты по закону, определенному заранее и заданному программой; 3) следящее управление, т. е. управление с целью изменения управляемой координаты по заранее неизвестному закону.

Приведенная классификация относится, в первую очередь, не к принципу построения системы, а к характеру изменения предписанного значения. Задача замкнутой системы сводится к обеспечению возможно более точного соответствия истинного значения управляемой координаты предписанному. Однако АСУ ЭП, предназначенные для реализации различных видов управления, имеют и свои особенности, что позволяет их делить на системы стабилизации, системы программного управления и следящие системы.

Системы стабилизации чаще всего являются системами стабилизации скорости. Имеют распространение и системы стабилизации других параметров технологических процессов, например натяжения при перемотке различных полосовых материалов. Хотя формально эти системы тоже относятся к стабилизирующим, структура

и принцип действия их существенно отличаются от структуры и принципа действия систем стабилизации скорости, что дает основание рассматривать их отдельно.

Следящие АСУ ЭП представляют собой системы регулирования положения *ИО*. Типичным примером следящей системы может служить система управления антенной установкой, назначением которой является наблюдение за летящим объектом, характер движения которого заранее неизвестен.

Программные АСУ ЭП обычно тоже управляют положением *ИО*, которое должно изменяться по заданной программе. Различие в принципах построения систем программного управления в значительной степени определяется различием формы задания программы. Наибольшее распространение в настоящее время имеют числовые системы программного управления, где программоносителем могут быть магнитные ленты или диски, перфокарты или перфоленты. Однако программа может быть задана и иначе: например, в копировальных металлорежущих станках программа задается в виде модели изделия. Задача АСУ ЭП в этом случае сводится к тому, чтобы реализовать движение режущего инструмента, обеспечивающее повторение в изделии формы модели.

Осуществление целей управления может затрудняться изменением в процессе работы системы ее параметров или внешних условий. В этом случае стоит задача построения системы, которая будет приспосабливаться к изменяющимся условиям работы, т. е. адаптивной системы. В адаптивной системе производится перенастройка параметров или структуры регуляторов таким образом, чтобы обеспечить оптимальные условия работы замкнутой системы во всем диапазоне изменений параметров. По способу организации процесса адаптации системы могут выполняться как *поисковые* и *беспоисковые*, т. е. с автоматическим поиском оптимальных условий работы и без него. Кроме того, по уровню адаптации системы разделяются на *самонастраивающиеся*, в которых на основе динамических характеристик объектов или системы и информации о параметрах внешних воздействий, получаемой в процессе работы, осуществляется изменение параметров регуляторов, и *самоорганизующиеся*, в которых на основе текущей информации о состоянии объекта происходит формирование алгоритма управления и изменение не только параметров регуляторов, но и их структуры.

1-1-2. ОБЩИЙ ПОДХОД К ПРОЕКТИРОВАНИЮ АСУ ЭП

Проектирование АСУ ЭП является составной частью общей задачи проектирования электромеханической системы. В начале проектирования на базе анализа технологического процесса определяется целевая функция, т. е. требования к системе, и в соответствии с этим составляется техническое задание на проектирование. В задание входят требования к статическим и динамическим свой-

ствам электрического привода, оговариваются его конструктивные и эксплуатационные особенности, формы управления, технико-экономические показатели и др.

Проектирование обычно начинается с формирования силовой части АСУ ЭП, когда определяется род тока, напряжение, частота, система электроснабжения, тип преобразователя. Выбираются электродвигатели, устройства их сочленения с *ИО* механизма. Разрабатывается математическая модель электропривода как объекта управления с учетом особенностей электродвигателя и механизма. Далее определяется структура АСУ ЭП, осуществляется ее синтез и анализ.

В настоящее время при проектировании АСУ ЭП основной тенденцией является унификация элементов систем и проектировщик должен стремиться использовать типовые структуры систем, серийно изготовляемые аппараты, функциональные блоки, регуляторы. Отечественной промышленностью изготовляются силовые преобразователи различных типов, аналоговые и дискретные элементы унифицированной блочной системы регуляторов, микро- и мини-УВМ, аппараты управления и др. Имеется также ряд типовых унифицированных комплектных систем управления электроприводами, осуществляющих определенные функции управления с использованием различных типовых технических средств.

Разрабатываемая АСУ ЭП должна быть оптимизирована. При этом может выполняться: 1) *параметрическая оптимизация*, когда при заданной структуре и функциональных воздействиях на систему требуется определить такие значения ее параметров, при которых наилучшим образом удовлетворяются заданные показатели качества; 2) *структурная оптимизация*, когда проектировщик должен найти техническое решение, при котором используется минимальное число простейших и легко физически реализуемых элементов системы; 3) *функциональная оптимизация*, при которой необходимо определить и законы управления, а по ним — структуру и численные значения параметров системы. Чаще всего проектировщику приходится решать задачи всех трех направлений одновременно.

Наиболее широко распространенным принципом проектирования АСУ ЭП является проектирование по прототипу, заключающееся в том, что на основании технического задания выбирается типовая система управления и без существенного изменения ее структуры определяются значения параметров ее управляющей части. При модульном принципе проектировщик компонует общую систему управления электроприводом, удовлетворяющую заданным критериям качества и техническим условиям, из типовых блоков (модулей). Это в ряде случаев не исключает необходимости разработки способов коррекции системы, когда при известном математическом описании системы определяется структура и параметры дополнительных корректирующих устройств, обеспечивающих ее заданные качественные показатели в статических и динамических режимах.

Наконец, наиболее общим принципом проектирования при поиске новых решений является непосредственный синтез систем управления. Сущность его заключается в том, что проектировщик по известной модели объекта управления и заданной целевой функции специальными методами синтеза определяет структуру, характеристики, численные значения параметров системы и виды сторонних функциональных воздействий.

Свобода действий проектировщика обычно ограничена. Чаще всего встречаются параметрические ограничения, связанные с тем, что при выборе какого-либо элемента системы проектировщик вынужден считаться с заданным диапазоном возможных изменений его параметров. Примером могут служить ограничения, связанные с конечностью коэффициентов усиления, наличием постоянных времени и т. п. Не менее часто приходится иметь дело с функциональными ограничениями, обусловленными тем, что предельные значения выходных переменных элементов системы ограниченны. Примером могут служить насыщение магнитной системы электрической машины, ограничение выходного напряжения операционного усилителя и т. п. Приходится также учитывать энергетические возможности ряда элементов, т. е. ограничения по потребляемой или выделяемой энергии, а также по запасу энергии. С одной стороны, энергетические ограничения характеризуют значение потребляемой или отдаваемой мощности элементов, с другой — их эксплуатационную надежность и работоспособность. Наконец, следует иметь в виду и информационные ограничения, заключающиеся в том, что не все переменные процесса, интересующие проектировщика, могут быть измерены или наблюдаемы.

Упомянутые выше основные ограничения в зависимости от характера поставленной задачи определяют также и выбор рационального метода исследования. При проектировании приходится решать как линейные, так и нелинейные задачи, использовать ручные и машинные методы проектирования, расчета и исследований, выбирать наиболее приемлемые для решаемой задачи алгоритмы синтеза и анализа системы.

1-2. МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ АСУ ЭП

1-2-1. МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ НЕЛИНЕЙНЫХ АСУ ЭП И ИХ ЛИНЕАРИЗАЦИЯ

Для того чтобы исследовать автоматическую систему управления, и в частности АСУ ЭП, необходимо располагать ее математическим описанием, т е системой дифференциальных уравнений, характеризующих зависимости координат системы от внешних воздействий и друг от друга. В частном случае, когда производные по времени от координат равны нулю, эти уравнения обращаются в алгебраические, описывающие статику системы

Наиболее распространенными способами математического описания, используемыми при проектировании и исследовании АСУ ЭП, являются· дифференциальные уравнения, записываемые в той или иной форме, структурные схемы, являющиеся графической интерпретацией дифференциальных уравнений; мат-

ричные структурные схемы, находящие в настоящее время наибольшее распространение при описании линеаризованных систем. Описание системы в виде дифференциальных уравнений в нормальной форме Коши позволяет представить структурную схему системы в виде ряда связанных между собой элементарных интегрирующих звеньев [3]. В нелинейной системе коэффициенты дифференциальных уравнений непостоянны и могут быть либо функциями времени, что в системах электропривода встречается сравнительно редко, либо, как это бывает чаще, представлять собой функции переменных (координат) системы. На элементарное звено могут воздействовать также функции произведения внешних входных воздействий или переменных системы. С учетом сказанного для элементарного k-го звена можно записать

$$A_k \dot{x}_k = \Sigma F(x_i) + \Sigma F(x_f \times x_q),$$

где A_k — инерционный коэффициент, который характеризует элементарное звено и в общем случае может быть переменным; $\dot{x}_k$ — производная от переменной на выходе рассматриваемого k-го звена; $\Sigma F(x_i)$ — сумма воздействий, линейно или нелинейно зависящих от внешних воздействий или переменных системы, в том числе и от переменной x_k; $\Sigma F(x_f \times x_q)$ — сумма воздействий, зависящих от произведения внешних воздействий или переменных.

Ограничив для конкретности число входов и полагая, что

$$\Sigma F(x_i) = F(x_l) - F(x_k) = x_m - x_{\text{о.с}}; \quad \Sigma F(x_f \times x_q) = x_r x_s$$

(где x_l, x_r, x_s — некоторые входные воздействия или переменные системы; $F(x_l)$ — входной сигнал, нелинейно зависящий от x_l; $F(x_k)$ — сигнал нелинейной обратной связи, охватывающий рассматриваемое элементарное звено), а также считая, что, как это бывает обычно, $A_k = \text{const}$, структурную схему элементарного звена можно представить в виде рис. 1-3, *а*. На ней статические характеристики нелинейных связей $F(x_l)$ и $F(x_k)$ представлены графически. В установившемся режиме результирующий входной сигнал на интеграторе равен нулю, т. е. $x_\Sigma = x_{\text{о.с}}$.

Координаты x_l, x_k, x_r, x_s, $x_{\text{о.с}}$ представляют собой физические величины, например напряжение, ток, скорость и т. п. Это удобно, так как значения, фигурирующие в математическом описании, равны значениям реальных физических величин. Однако при рассмотрении сложных автоматических систем большое число размерных коэффициентов часто делает структурную схему громоздкой, затрудняет ее понимание. В тех случаях, когда основной задачей является комплексное исследование сложной системы, структурную схему можно упростить за счет перехода к относительным величинам, т. е. применить нормирование.

Под величиной в *относительных единицах* (о. е.) понимают отношение некоторой величины x к ее базовому значению $X_б$, за которое принимают обычно значение в наиболее характерном установившемся режиме. Если в рассматриваемой схеме за базовое значение x_k принять $X_{k\,б}$, то базовым значением сигнала обратной связи $X_{\text{о.с.б}}$ надо выбрать значение, соответствующее $X_{k\,б}$, по характеристике обратной связи. Это же значение целесообразно выбрать базовым для входных величин $x_m = F(x_l)$ и $x_n = x_r x_s$. Тогда $X_{l\,б}$ определится по статической характеристике связи, как показано на рис. 1-3, *а*, а определение базовых значений $X_{r\,б}$ и $X_{s\,б}$ должно быть произведено из равенства $X_{r\,б} X_{s\,б} = X_{\text{о.с.б}}$, причем одно из базовых значений может быть выбрано произвольно. Структурная схема в о. е. будет иметь вид рис. 1-3, *б*. Характеристики нелинейных связей в о. е. получены из исходных путем деления значений, отложенных по осям координат, на соответствующие базовые значения.

Постоянный коэффициент

$$T_{kб} = A_k X_{kб} / X_{\text{о.с.б}},$$

имеющий размерность времени и зависящий от выбора базовых значений величин на входе и выходе элементарного звена, называется *базовой постоянной времени* [9].

Базовая постоянная времени может быть определена так называемым *интегральным методом*. В соответствии со структурной схемой в о. е. можно записать

$$T_{k6}\dot{\bar{x}}_k = \bar{x}_{\Sigma} - \bar{x}_{o.c}.$$

Если рассматривать переходный процесс, в котором выходная переменная изменяется от 0 до 1 (в абсолютных единицах — от нуля до базового значения), то в результате интегрирования этого выражения получается

$$T_{k6}\int_0^1 d\bar{x}_k = \int_0^{\infty} (\bar{x}_{\Sigma} - \bar{x}_{o.c})\,dt,$$

откуда

$$T_{k6} = \int_0^{\infty} (\bar{x}_{\Sigma} - \bar{x}_{o.c})\,dt.$$

Если $\bar{x}_{\Sigma}$ и $\bar{x}_{o.c}$ представляют собой электрические напряжения или являются физическими величинами, которые могут быть преобразованы в напряжения, то с помощью интегратора легко реализуется схема для определения T_{k6} по измеренным входному сигналу и сигналу обратной связи.

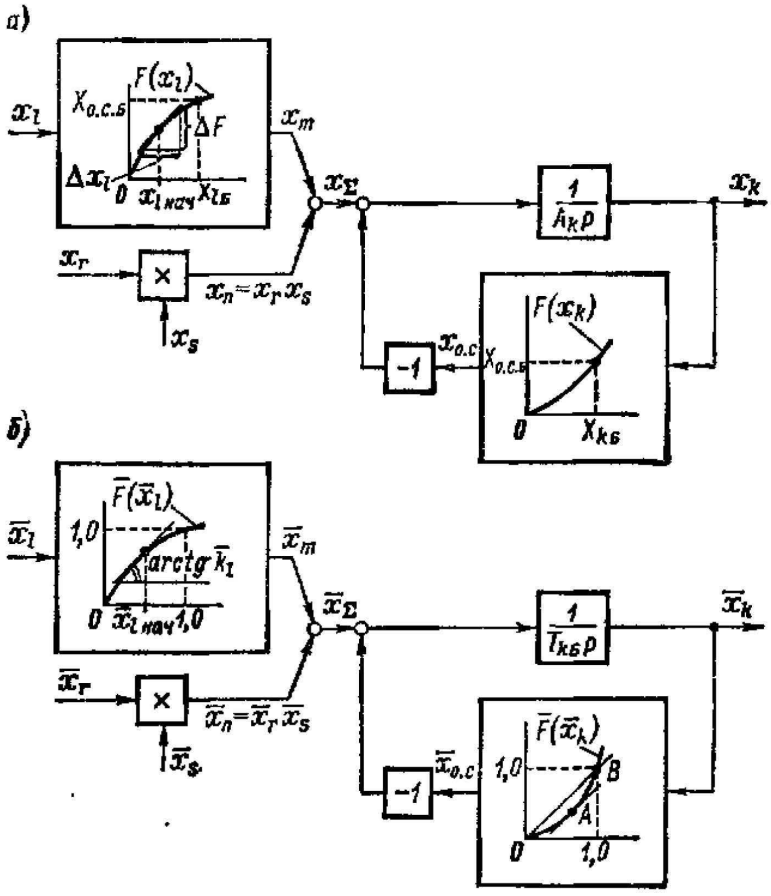

Рис. 1-3

Многие системы, в частности системы стабилизации, работают при некотором определенном для данного режима значении регулируемой координаты. Это позволяет произвести линеаризацию системы известным из теории автоматического управления способом, когда переходят к приращениям координат, используют коэффициенты передачи элементов, определенные в рабочей точке, и заменяют произведения приращений переменных их суммой. Так, в схеме рис. 1-3, *б* коор-

дината $\bar{x}_n$ представляет собой произведение переменных $\bar{x}_r$ и $\bar{x}_s$. При линеаризации, давая приращения переменным, можно записать

$$\bar{X}_{n\,нач} + \Delta\bar{x}_n = (\bar{X}_{r\,нач} + \Delta\bar{x}_r)(\bar{X}_{s\,нач} + \Delta\bar{x}_s).$$

Произведение $\bar{X}_{r\,нач} X_{s\,нач}$ войдет в уравнение статики и будет исключено из системы уравнений в приращениях. После исключения произведения $\Delta\bar{x}_r\Delta\bar{x}_s$ как величины второго порядка малости операция умножения окажется заменной суммированием. В прямые каналы будут введены звенья с передаточными коэффициентами $\bar{X}_{s\,нач}$ и $\bar{X}_{r\,нач}$, значения которых определяются выбором режима, принятого за начальный (рис. 1-4).

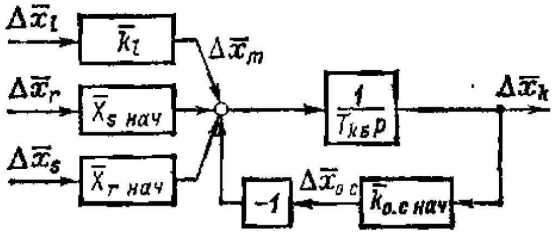

Рис. 1-4

Линеаризация гладких нелинейных характеристик связей сводится к замене нелинейной связи пропорциональным звеном с коэффициентом передачи, представляющим собой в о. е. тангенс угла наклона касательной к характеристике связи в точке, соответствующей начальному режиму, как это показано на рис. 1-3, *б* для коэффициента k_l.

В *абсолютных единицах* (а. е.) коэффициент передачи определяется как отношение приращений выходной величины к входной, определенных по касательной в рабочей точке (рис. 1-3, *а*). Коэффициенты в а. е. и о. е. связаны между собой выражением

$$k_l = \bar{k}_l X_{о.с.б}/X_{lб}.$$

Очевидно, что значения k_l и $\bar{k}_l$ зависят от того, в какой рабочей точке работает система.

При линеаризации нелинейной связи, охватывающей элементарное звено, в зависимости от рабочего режима различными оказываются и коэффициент передачи получающегося апериодического звена, и его постоянная времени. В точке *А* (рис. 1-3, *б*), где касательная к характеристике связи параллельна прямой, проходящей через начало координат и точку *В*, соответствующую базовому режиму, коэффициент обратной связи $k_{о.с.\,нач} = 1$, а постоянная времени равна $T_{k\,б}$. В другой рабочей точке $k_{о.с.нач}$ отличен от единицы и апериодическое звено, на вход которого действуют сигналы $\bar{k}_l\Delta\bar{x}_l$, $X_{s\,нач}\,\Delta x_r$, $X_{r\,нач}\,\Delta\bar{x}_s$, описывается передаточной функцией

$$\bar{W}_k(p) = \frac{1/(T_{k\,б}p)}{1 + \bar{k}_{о.с.\,нач}/(T_{k\,б}p)} = \frac{\bar{k}_k}{T_k p + 1},$$

где $\bar{k}_k = 1/\bar{k}_{о.с.нач}$; $T_k = T_{k\,б}/\bar{k}_{о.с.нач}$.

Система управления может содержать и негладкие нелинейности, например, типа ограничения зоны нечувствительности и др. При анализе такой системы иногда удается выделить режимы, в которых эти нелинейности не оказывают влияния на ее работу. Так, например, ограничение выходного напряжения регулятора не сказывается при малых значениях входного сигнала, наличие сухого трения иногда может не учитываться, если в процессе регулирования скорость двигателя не снижается до значений, близких к нулю, не во всех режимах создаются условия, при которых в результате влияния зазора двигатель и *ИО* оказываются не связанными друг с другом. В этих случаях система может рассматриваться как линеаризованная.

При исследовании режимов, в которых исключить влияние нелинейности нельзя, широко применяется метод гармонической линеаризации в совокупности с расчетами на АВМ и ЦВМ.