

В. В. БИРЮКОВ

АВТОМАТИЗИРОВАННЫЙ ТЯГОВЫЙ ЭЛЕКТРОПРИВОД



УДК 62-83-52:621.333(075.8)

Б 649

Рецензенты:

д-р техн. наук, профессор *Н.И. Щуров*

д-р техн. наук, профессор *В.Н. Аносов*

д-р техн. наук, доцент *О.В. Нос*

Бирюков В.В.

Б 649 Автоматизированный тяговый электропривод: учебник / В.В. Бирюков. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2019. – 323 с. – (Серия «Учебники НГТУ»).

ISBN 978-5-7782-3993-7

Рассматриваются особенности подвижного состава электрического транспорта как объекта автоматического управления при различных уровнях автоматизации. Приведены основы автоматического регулирования и управления, в том числе с применением телемеханики. Рассмотрены основные элементы систем, применяемые при построении автоматизированного тягового привода.

Книга предназначена для студентов магистерского уровня, обучающихся по направлению «Энергетика и электротехника» в качестве учебника по дисциплине «Автоматизированный тяговый электропривод».

УДК 62-83-52:621.333(075.8)

ISBN 978-5-7782-3993-7

© Бирюков В.В., 2019

© Новосибирский государственный
технический университет, 2019

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие	9
Введение	12
Глава 1. Системы автоматического управления.....	17
1.1. Классификация систем автоматического управления.....	17
1.2. Системы автоматического управления ЭПС.....	23
1.3. Управление движением поезда при различных уровнях автоматизации.....	25
1.4. Особенности условий автоматического регулирования и управления ЭПС	30
Глава 2. Функциональные схемы систем автоматического регулирования	33
2.1. Функциональные схемы и элементы САР ЭПС	33
2.1.1. Объекты регулирования САР	36
2.1.2. Исполнительные элементы САР	49
2.1.3. Управляющие элементы САР.....	64
2.2. Принципы регулирования, применяемые в САР ЭПС.....	68
2.3. Типовые функциональные схемы САР ЭПС	74
2.4. Функциональные схемы САР, применяемые на отечественном ЭПС	88
2.4.1. САР скорости ЭПС с релейно-контакторной системой управления.....	88
2.4.2. САР ЭПС с тиристорными преобразователями.....	89
2.4.3. САР угла запаса инвертора.....	93
2.4.4. Многоконтурные САР ЭПС с тяговыми двигателями независимого возбуждения.....	98
2.4.5. Адаптивные САР электропоездов.....	100



Глава 3. Структурные схемы САР	103
3.1. Структурные схемы и передаточные функции тягового электродвигателя как линеаризованного объекта регулирования	103
3.2. Структурные схемы, передаточные функции и уравнения разомкнутых и замкнутых САР.....	115
3.2.1. Передаточная функция замкнутой САР в разомкнутом состоянии	116
3.2.2. Передаточная функция замкнутой САР	118
3.2.3. Уравнение выходной координаты САР.....	124
3.3. Точность работы САР в установившемся режиме	126
3.3.1. Нулевая установившаяся ошибка по положению (по координате)	129
3.3.2. Нулевая установившаяся ошибка по скорости	130
Глава 4. Структурные схемы, передаточные функции и уравнения переходных процессов в САР ЭПС	133
4.1. Принципы построения структурных схем САР.....	133
4.2. Введение в схемы САР обратных связей	140
4.3. Нелинейные уравнения переходных процессов в контурах тока ЭПС	142
4.3.1. Система автоматической стабилизации тока возбуждения....	142
4.3.2. Система автоматического регулирования угла запаса выпрямительно-инверторного преобразователя.....	145
4.4. Уравнения контура регулирования скорости ЭПС.....	148
4.4.1. Регулирование скорости ЭПС с тиристорными преобразователями	148
4.4.2. Регулирование скорости ЭПС с резисторно-контакторным управлением.....	152
4.5. Нелинейные САР тягового двигателя и ЭПС	157
4.5.1. Тяговый двигатель, как нелинейный объект регулирования ...	161
4.5.2. Нелинейные системы автоматического регулирования ЭПС	165
4.5.3. Методы исследования и расчёта нелинейных систем.....	167
Глава 5. Синтез систем автоматического регулирования	179
5.1. Принципы коррекции САР	179
5.2. Влияние последовательных и параллельных корректирующих звеньев на качество процесса регулирования.....	182



5.3. Влияние параллельно-встречно включённых корректирующих звеньев на качество процесса регулирования	189
5.4. Особенности синтеза САР ЭПС	193
5.5. Синтез САР ЭПС с нелинейными звеньями	209
Глава 6. Устойчивость и качество регулирования	213
6.1. Понятие об устойчивости и критериях устойчивости.....	213
6.1.1. Критерий устойчивости Михайлова	216
6.1.2. Критерий устойчивости Найквиста	219
6.1.3. Устойчивость различных звеньев	224
6.2. Качество регулирования	233
Глава 7. Системы автоматического управления электроподвижным составом.....	241
7.1. Назначение и области применения систем автоведения.....	241
7.2. Принципы оптимального управления ЭПС	242
7.3. Алгоритмы и программы автоматического управления электроподвижным составом.....	245
7.3.1. Алгоритмы управления ЭПС в режиме тяги.....	246
7.3.2. Алгоритмы управления ЭПС при торможении	250
7.4. Точность движения поездов при автоведении	255
7.4.1. Причины неточного движения поездов.....	255
7.4.2. Выбор алгоритма перехода на выбег	258
7.4.3. Причины неточной остановки поездов.....	261
7.5. Автономные системы автоведения электропоездов, пассажирских и грузовых поездов	266
7.5.1. Одноконтурные системы автоматического управления пассажирскими поездами	266
7.5.2. Двухконтурная система автоматического управления пассажирскими поездами.....	270
Глава 8. Практическая реализация систем автоматического управления электроподвижным составом	273
8.1. Алгоритмы управления движением поездов на линии метрополитена	274
8.2. Система автоведения поездов метрополитена Санкт-Петербурга	276
8.3. Система автоведения поездов Московского метрополитена.....	281



8.4. Автономные системы автоведения и системы автоведения электровозов и электропоездов	286
Глава 9. Системы телемеханического управления ЭПС	295
9.1. Классификация систем телемеханического управления.....	295
9.2. Система телеуправления ЭПС	301
9.3. Системы диспетчерского автоматического телеуправления локомотивами	305
Заключение	309
Библиографический список	310
Приложения.....	311

ГЛАВА 1

СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ

1.1. КЛАССИФИКАЦИЯ СИСТЕМ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ

Классификация систем автоматического управления по некоторым основным признакам представлена на рис. 1.1.

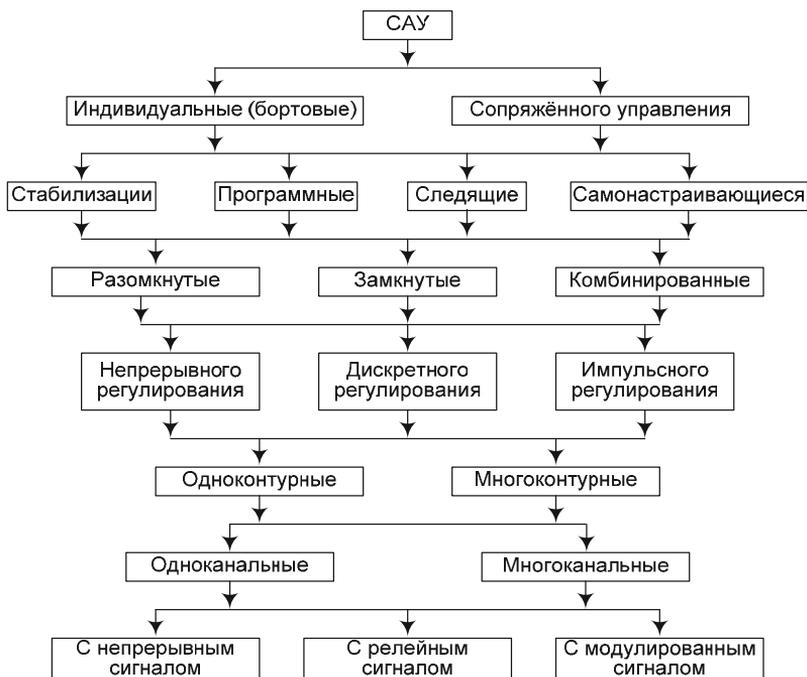


Рис. 1.1

Один из важнейших признаков – однородность управляемых объектов в системе. Если в САУ можно включить объект лишь



одного вида (например локомотив), то такую систему называют **индивидуальной** (автономной), а для транспортных объектов – **бортовой**.

Системы **сопряжённого управления** применяют для совместного управления разнородными объектами, например, движением локомотивов и работой железнодорожных станций по приёму и отправлению поездов.

Назначение систем автоматики может быть различным.

Системы автоматической стабилизации предназначены для поддержания какого-то регулируемого показателя на постоянном уровне $y_1(t) = \text{const}$, т. е. должны компенсировать воздействие возмущений на регулируемую систему.

Более сложными являются **системы программного управления**, которые обеспечивают изменение регулируемой величины по заранее заданной программе в зависимости от времени t , пройденного пути l и т. п.; их функциональные схемы непременно содержат программируемый элемент.

Особую область применения имеют **следающие системы**, которые обеспечивают исключение (нейтрализацию) какого-либо случайного воздействия на процесс, протекающий в системе. На ЭПС они применяются, например, в системах задания или указания номера позиции группового переключателя.

Более совершенны **самонастраивающиеся**, или адаптивные, системы, способные автоматически приспособляться к условиям работы и оптимизировать процессы.

В зависимости от принципа действия различают системы автоматики, работающие по разомкнутому, замкнутому или комбинированному циклу. Наибольшее распространение получили две последние разновидности автоматических систем.

По способу воздействия на объект регулирования системы автоматики подразделяют на три группы. К первой относят системы **плавного** (непрерывного) регулирования. При этом регулирующее воздействие изменяется во времени плавно и непрерывно (рис. 1.2, а).

Возможно также периодическое воздействие САР на объект регулирования, при котором возникают отклонения реальных параметров от средней зависимости $\mu_{\text{ср}}(t)$. При **ступенчатом** регули-



ровании (рис. 1.2, б) предполагается, что за достаточно большой промежуток времени T среднее значение $\mu_{cp}(t) = \mu_a(t)$ и отклонения $\Delta(t)$ от регулируемого показателя $\mu_{cp}(t)$ взаимно компенсируются, т. е. $\int_0^T \Delta(t) dt = 0$.

$$\int_0^T \Delta(t) dt = 0.$$

Всё более широко применяют **импульсное** регулирование, при котором управляющее воздействие изменяется чередующимися импульсами и паузами (рис. 1.2, в), а его мгновенные значения $\mu(t)$ изменяются прерывисто в пределах $0 \leq \mu(t) \leq \mu_6$ (здесь μ_6 – наибольшее значение управляющего воздействия). Соответственно $\mu(t) \approx \mu_{cp}(t) = \mu_6 \tau / t_n$. Рис. 1.2, в поясняет лишь один из способов такого регулирования, а именно, широтно-импульсный (см. курс. «Тиристорно-импульсные системы управления электрическим транспортом»).

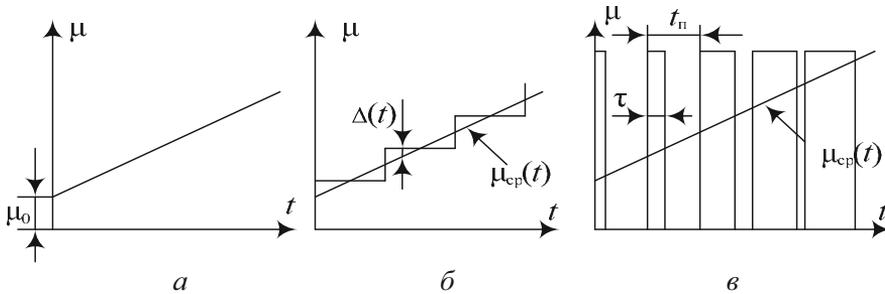


Рис. 1.2

В зависимости от количества контуров регулирования рассмотренные САР могут быть одно- и многоконтурными. **Одноконтурные** САР имеют один контур регулирования одной регулируемой величины (рис. 1.3, а), а **многоконтурные** – несколько контуров регулирования соответствующих регулируемых величин. Например, система регулирования с двумя независимыми контурами (рис. 1.3, б) на ЭПС может выполнять регулирование токов якоря и возбуждения тягового двигателя независимого возбуждения (объект регулирования – ОР). В таких САР реализуют селективную (избирательную) связь между контурами, которая устанавливает очередность их работы. Многоконтурная САР может иметь

подчинённые контуры (рис. 1.3, в), например, внешний основной, и внутренний – вспомогательный.

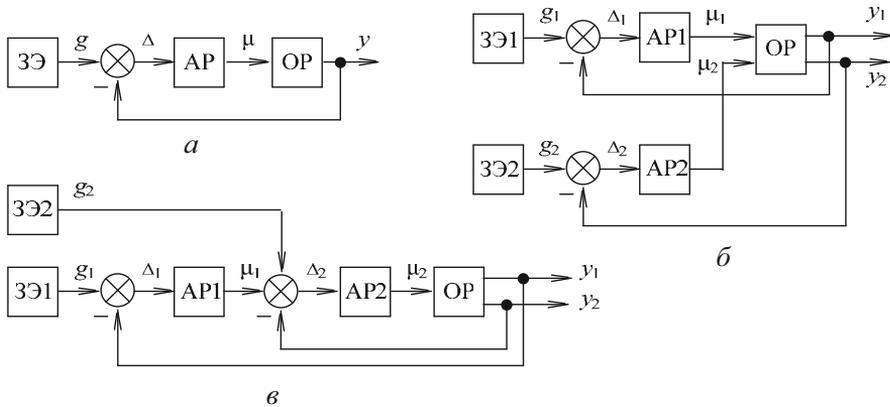


Рис. 1.3

По такой схеме выполняют САР ЭПС с тяговыми двигателями последовательного возбуждения, у которых внешний контур регулирует скорость, а внутренний – ток якоря. При большом количестве контуров применяют помимо рассмотренных системы, включающие как независимые, так и подчинённые контуры регулирования.

В зависимости от количества каналов регулирования САР подразделяют на **одно-** и **многоканальные**. При этом под каналом регулирования понимают цепь воздействия на один объект регулирования. При наличии нескольких цепей воздействия и (или) нескольких объектов САР будет многоканальной. На ЭПС всегда имеется несколько тяговых двигателей, и на каждый из них можно воздействовать, изменяя напряжение на зажимах двигателя и пусковое сопротивление R или ток возбуждения i_b . Поэтому САР ЭПС всегда будут многоканальными.

Распорядительные сигналы систем управления имеют малую мощность и легко искажаются различными возмущениями – помехами. Характер вводимой рабочей информации в значительной степени определяет помехоустойчивость системы, т. е. её неподверженность воздействию помех (особенно электромагнитных). Поэтому существенное значение имеет разделение систем по характеру вводимой информации. По этому признаку различают системы



с непрерывным вводом сигналов рабочей информации (рис. 1.4, а) и дискретным.

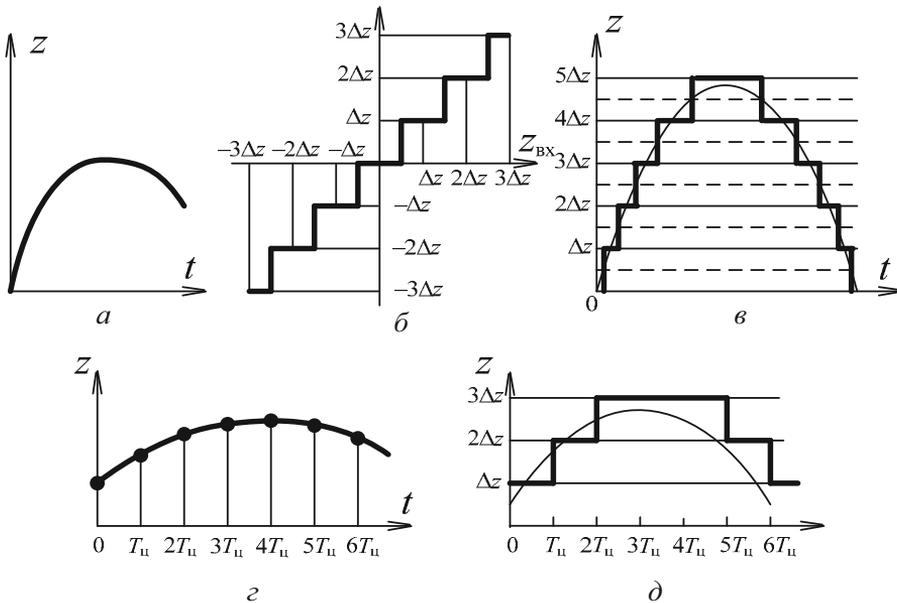


Рис. 1.4

Для релейного сигнала характерно то, что он имеет два уровня, соответствующих двум значениям вводимой информации. Модуляцией называют наложение информационного сигнала на сигнал-переносчик. Информационный сигнал называют модулирующей функцией. При гармоническом переносчике результирующий сигнал будет непрерывный. Если переносчиком является последовательность импульсов, различают амплитудно-, частотно- и фазоимпульсную модуляцию. При этом информационный сигнал изменяет амплитуду, частоту, длительность или положение импульса относительно тактовых отметок.

В цифровых системах управления аналоговый информационный сигнал преобразуется в цифровую форму. Технические средства, реализующие это преобразование, называют аналого-цифровым преобразователем (АЦП). По иной терминологии АЦП реализует кодово-импульсную модуляцию сигнала. При этом выполняется квантование информационного сигнала и его временная дискретизация.



Преобразование аналогового (непрерывного) сигнала, имеющего бесконечное множество значений, в сигнал с конечным множеством значений называют квантованием по уровню. Очевидно, что операция квантования связана с округлением непрерывной величины. Идеальная операция квантования описывается статической характеристикой нелинейного элемента (НЭ) (рис. 1.4, б), на вход которого подается аналоговый сигнал, а на выходе получается квантованный сигнал (рис. 1.4, в).

Процесс преобразования аналогового сигнала нелинейным элементом показан на рис. 1.4, в. Очевидно, что операция квантования в соответствии с приведённым определением нелинейна.

Преобразование сигнала, описываемого функцией непрерывного аргумента (времени), в сигнал, представляемый функцией дискретного аргумента, называют временной дискретизацией (рис. 1.4, а). Результат дискретизации представляется как $z_{д}[nT_{ц}]$, где $n = 0, 1, 2, \dots$; $T_{ц}$ – цикл временной дискретизации.

В цифровых системах управления квантование по уровню и времени дискретизации выполняется аналого-цифровым преобразователем одновременно (точки на рис. 1.4, д).

С целью получения сигнала на выходе цифроаналогового преобразователя (ЦАП), определённого во все моменты времени, необходимо функцию дискретного аргумента $z_{дк}[nT_{ц}]$ преобразовать в функцию непрерывного аргумента, т. е. тем или иным способом выполнить аппроксимацию $z_{дк}[nT_{ц}]$. Эту процедуру называют восстановлением.

Системы автоведения, как частный случай систем автоматического управления, удобно классифицировать по следующим признакам, отражающим и принцип построения системы автоматического управления поездами, и её функциональные возможности: **уровень централизации, тип поездов.**

По уровню централизации САУ ЭПС подразделяются на **централизованные** и **автономные**. Централизованные САУ ЭПС получают информацию о параметрах движения всех поездов линии (для метрополитена) или направления (для магистральных железных дорог) и управляют каждым поездом в соответствии с полученной информацией и плановым графиком движения. Такие САУ ЭПС, как правило, имеют иерархическую структуру. Распределение



функций управления между уровнями иерархии может быть различным в зависимости от используемых технических средств и экономических показателей. Автономные САУ ЭПС, называемые также автомашинистами, осуществляют управление в соответствии с заданной программой движения только одного поезда.

В централизованных системах автоведения взаимодействие поездов определяется алгоритмом работы центрального поста управления, возмущающими воздействиями, вызывающими отклонение поездов от заданной программы движения, системами интервального управления, обеспечивающими безопасность движения поездов. В автономных системах автоведения влияние поездов друг на друга определяется системой интервального управления одного поезда. Компенсируются возмущения системой автоматического управления каждым отдельным поездом без учёта расположения остальных поездов на линии в соответствии с законом управления, наличием ресурса, а также ограничениями, накладываемыми системами обеспечения безопасности движения.

Централизованная система обладает большими возможностями, так как наличие информации о положении всех поездов на линии позволяет более гибко компенсировать имеющиеся возмущения.

1.2. СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ ЭПС

Электроподвижной состав представляет собой сложную систему, состоящую из нескольких подсистем. Автоматическое регулирование режимов их работы – неременное условие для автоматического управления ЭПС на достаточно высоком уровне. Классификация САУ (существующих и перспективных) показана на рис. 1.5. По мере совершенствования ЭПС возможно появление и других САУ.

К основным функциям САУ ЭПС относятся:

- управление процессами пуска, торможения и реверсирования;
- поддержание постоянства (стабилизация) заданной величины (скорости, тока, мощности) в статических и динамических режимах работы;
- слежение за вводимыми в систему произвольно изменяющимися входными сигналами (следающее управление);

- обработка заданной программы (программное управление);
- выбор целесообразных режимов работы электроприводов (адаптивное управление).

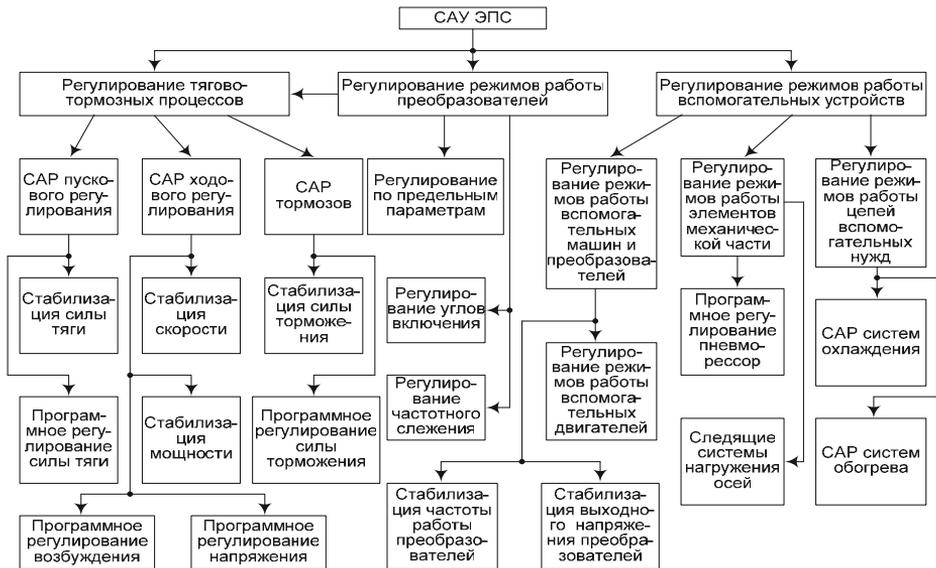


Рис. 1.5

Кроме основных функций САУ выполняет ряд вспомогательных:

- защиту тяговых электродвигателей и остального электрооборудования от токов короткого замыкания, кратковременных и длительных перегрузок, перенапряжений, пониженных напряжений;
- блокировку возникновения ненормальных и аварийных режимов работы при ошибочных действиях персонала;
- сигнализацию о состоянии САУ, а также о возникновении неисправности как отдельных элементов и узлов, так и системы в целом.

Для ЭПС в качестве основных можно рассматривать два вида регулирования: пусковое (тормозное), а также регулирование режимов работы вне пуска и торможения, которое можно назвать ходовым. Такое разделение условно, но оно позволяет достаточно полно и правильно оценить регулировочные свойства локомотивов различных типов.



Ходовое регулирование относится к тяговым процессам, не ограниченным по продолжительности. Поэтому необходимо, чтобы оно проходило без значительных потерь энергии в любом промежуточном режиме без недопустимых перегрузок отдельных элементов оборудования (например, без повышенных пульсаций тока).

Пусковое регулирование выполняют сравнительно кратковременно, и поэтому при нём можно допускать некоторые потери энергии (например, в пусковых резисторах), форсированные режимы работы отдельных элементов оборудования. Так как пусковой (тормозной) режим – это обычно режим перегрузки, то при его оценке важно установить, насколько рационально он осуществляется.

Регулировочные свойства вспомогательных машин зависят от пределов возможного изменения их частоты вращения, возбуждения, напряжения, частоты тока и других показателей.

Преобразовательные установки локомотивов весьма разнообразны, и их регулировочные свойства обычно приходится выявлять в каждом конкретном случае. На современном ЭПС всё большее распространение получают преобразователи на полупроводниковых управляемых вентилях, обладающих широкими пределами регулирования режимов работы и относительной безынерционностью.

1.3. УПРАВЛЕНИЕ ДВИЖЕНИЕМ ПОЕЗДА ПРИ РАЗЛИЧНЫХ УРОВНЯХ АВТОМАТИЗАЦИИ

Характер управления ЭПС и движение поезда зависят от уровня их автоматизации. Автоматизация не влияет существенно на исполнительные операции управления, но заметно влияет на распорядительные.

Рассмотрим процесс неавтоматического управления поездом на примере локомотива (рис 1.6). Для упрощения здесь исключено управление вспомогательными устройствами, а управление движением представлено как управление тяговыми двигателями (ТД) и пневматическими тормозами (ПТ).

Исполнительные операции машиниста (М) заключаются в его управляющих воздействиях $g_{УВД}$ и $g_{УВТ}$ соответственно на устройства управления тяговыми двигателями УУД и тормозом УУТ. Устройства УУД воздействуют на работу тяговых двигателей, изменяя напряжение на их зажимах U_k или коэффициент β регу-



лирования возбуждения. В свою очередь двигатели ТД развиваемой силой тяги $F(I)$ действуют на поезд (П), изменяя его скорость v . Устройство оказывает воздействие на ПТ, изменяя давление p в тормозных цилиндрах, от которого зависит тормозная сила $B(p)$, действующая на поезд.

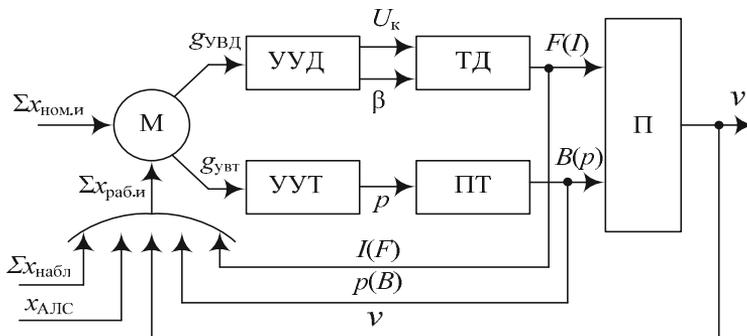


Рис. 1.6

В процессе управления локомотивом и поездом машинист прежде всего выполняет распорядительные операции. Он получает и обрабатывает информацию о состоянии локомотива и поезда, а также о внешних условиях, влияющих на процесс движения. Исходя из этой информации, он определяет те воздействия $g_{\text{увд}}$ и $g_{\text{увт}}$, которые надо оказывать для достижения цели управления – выполнения графика движения.

В состав информации входит начальная, характеризующая цель управления (расписание, график движения и др.), а также основные условия работы (вес и состав поезда, ограничения скорости и др.). Управлять поездом невозможно без систематического получения рабочей информации о действительном процессе движения поезда $\Sigma x_{\text{набл}}$, $x_{\text{АЛС}}$, работе локомотива и изменениях условий движения. Рабочая информация поступает, как видно из рис. 1.6, по цепи обратной связи в виде сигналов от объекта управления к оператору – машинисту. Без обратной связи оператору неизвестны результаты управляющих воздействий и управление практически невозможно.

Чтобы выбрать управляющие воздействия, машинист анализирует полученную рабочую информацию, сопоставляя её с начальной и учитывая возмущения, действующие на поезд. *Возмущения* –



неконтролируемые (неуправляемые) воздействия, изменяющие условия работы, которые могут быть весьма разнообразными. Машинист встречается прежде всего с закономерными возмущениями, к которым относят детерминированные, возникающие обычно однократно в рассматриваемом процессе управления, например, отклонение веса поезда от установленной весовой нормы. Наиболее часто возникают случайные возмущения (помехи) – неконтролируемые изменения условий работы (движения поезда), имеющие случайный, нерегулярный характер. К ним относятся, например, изменения напряжения U_c на токоприемнике, коэффициента сцепления ψ , погодные изменения сопротивления движению w и ряд других. Машинист по возможности учитывает эти возмущения, стараясь нейтрализовать их влияние на процесс движения поезда. Алгоритм управления, вырабатываемый машинистом, тем правильнее, чем больший объем рабочей информации он сумеет воспринять и переработать.

Точное выполнение основной цели управления (соблюдение графика движения, т. е. заданного времени хода по перегонам T_3) требует проведения сложных вычислительных операций для определения количественных соотношений показателей процесса. Эта операция может быть сформулирована как

$$T_3 = \int_0^L \frac{dl}{v(t)},$$

где L – длина перегона; dl – элементарный отрезок пути; $v(l)$ – скорость движения, соответствующая dl .

Машинист не может выполнить такую математическую операцию, и потому время T лишь приближенно равно T_3 :

$$T_3 \cong T = \sum_{i=1}^n l_i / v_{i\text{cp}} = \sum_{i=1}^n t_i,$$

где t_i – время прохождения отдельных характерных отрезков перегона протяженностью каждый l_i и общим числом n ; $v_{i\text{cp}}$ – средняя скорость на отрезках перегона.



Значения t_i и $v_{i\text{ср}}$ – это начальная информация $\sum x_{\text{ном},i}$, получаемая машинистом из опыта предыдущих поездок, технологической карты и т. п. Алгоритм управления машинист вырабатывает на основе не математических, а более простых логических операций, которые заключаются в качественной оценке соответствия или несоответствия рабочей информации начальной: машинист сопоставляет преимущественно значения t_i и $v_{i\text{ср}}$.

Даже при таком упрощении распорядительные операции, выполняемые машинистом в случае неавтоматического управления, оказываются очень сложными. Он должен не только воспринять и переработать большой объём информации, но и выработать сложный алгоритм управления, содержащий большое количество операций, каждая из которых относится к определённой ступени управления (позиции контроллера).

Особенно сложна работа машиниста в тех случаях, когда необходимо точно поддерживать какой-либо показатель управляемого процесса, (например, пусковой ток) в заданных пределах, т. е. регулировать этот процесс. При определённых условиях (например, регулировании пуска электропоезда) машинист вообще не в состоянии справиться с этим и на помощь ему приходят системы автоматического регулирования – САР.

Так, система автоматического пускового регулирования САР-ПД (рис. 1.7), которой оборудованы все электропоезда, при пуске сопоставляет заданное значение тока I_3 , определяющее ожидаемую силу тяги F_a , с действительным $I(F)$. Для этого в САР-ПД предусмотрена цепь обратной связи, по которой поступают сигналы о значении тока $I(F)$. Операцию сравнения можно сформулировать как $I_3 - I = \Delta I$.

При определённом значении ΔI система оказывает управляющее воздействие на УУД, регулируя работу двигателей. После завершения пуска дальнейшей работой двигателей машинист управляет непосредственно.

Системы автоматического управления состоят из нескольких систем автоматического регулирования (рис. 1.8), например САР-Д – для регулирования работы двигателей, САР-Т – тормоза и ряда других, объединённых общей системой САУ, которая согласовывает их действия. Начальную информацию вводят в соответствующие



САР и САУ. В САУ вводят также рабочую информацию, включая и $x_{АЛС}$. САУ вырабатывает исходные команды $g_{и.к.д}$ для САР-Д и для $g_{и.к.т}$ САР-Т, а также для других САР.

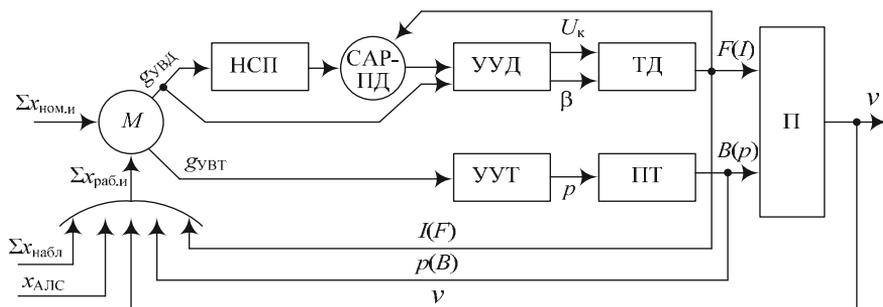


Рис. 1.7

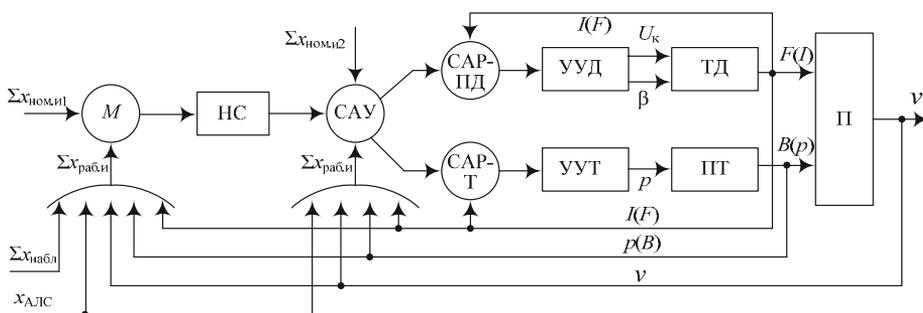


Рис. 1.8

Машинист может контролировать работу САУ, исходя из рабочей информации, особенно из непосредственных наблюдений $\Sigma x_{набл}$. Машинист может также оказывать некоторое ограничивающее воздействие на работу САУ с помощью устройств настройки (НС).

Для ЭПС особенно перспективны системы с расположением устройств САУ не на локомотивах, а на центральном посту управления, откуда можно осуществлять автоматическое управление несколькими локомотивами. В этом случае каждый локомотив оборудован системами САР и устройствами для двусторонней телесвязи с центральным постом управления.



1.4. ОСОБЕННОСТИ УСЛОВИЙ АВТОМАТИЧЕСКОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ И УПРАВЛЕНИЯ ЭПС

На работу систем автоматического управления ЭПС существенно влияют следующие факторы.

Высокий уровень возмущений, воздействующих на ЭПС и особенно на системы автоматики. К таким детерминированным возмущениям относятся, например, изменения нагрузки.

На объект регулирования и устройства автоматики существенно влияет также нестабильность напряжения. Напряжение U на токоприёмнике локомотива может отклоняться от номинального в пределах $\pm 20\%$ от $U_{с.ном}$, а напряжение в цепях управления – в пределах до $0,6U_{ном}$, где $U_{ном}$ – номинальное значение этого напряжения.

К возмущениям относится и нестабильность температур. Неравномерность температурных полей, например, в высоковольтной камере локомотива может достигать $70\dots 80\text{ }^{\circ}\text{C}$, а колебания температуры отдельных элементов автоматики $125\dots 140\text{ }^{\circ}\text{C}$. Это заметно влияет на все элементы автоматики. Так, сопротивление катушек реле из медного провода в нагретом состоянии увеличивается в $1,6\dots 1,7$ раза по сравнению с их сопротивлением в холодном состоянии.

На электромеханические элементы автоматики и такие пассивные элементы, как места спайки, особенно неблагоприятно воздействуют вибрации и динамические импульсы, дополняющие статические нагрузки.

На ЭПС значительны электромагнитные помехи, особенно в тех случаях, когда применяют тиристорные преобразователи. При этом очень велики значения di/dt , а дроссели и конденсаторы, входящие в силовую схему, представляют собой мощные генераторы радиопомех в широком диапазоне частот. Эти помехи могут наводить напряжения до 600 мВ на 1 м проводника, что заставляет применять специальные меры защиты: повышать мощность всех сигналов, использовать экранирование и др.

Разнообразие принципов оптимизации режимов тяги и торможения ЭПС. Например, наиболее полное использование



мощности оборудования. Для электрооборудования это можно сформулировать в общем виде как

$$\tau_{\max}(T) \rightarrow k_{3\tau} \tau_{\text{доп}},$$

где $\tau_{\max}(T)$ – максимальное превышение температуры элемента над температурой окружающей среды в пределах рассматриваемого цикла работы T ; $\tau_{\text{доп}}$ – допустимое превышение температуры для данного вида оборудования; $k_{3\tau} < 1$ – коэффициент запаса по превышению температуры.

Опыт освоения различных систем показывает, что обычные элементы автоматики и методы монтажа, применяемые в промышленности, не обеспечивают достаточной надёжности их на ЭПС. Здесь необходимо использовать устройства автоматики с повышенными характеристиками.

Принцип минимального расхода энергии при выполнении заданного графика движения. При этом должно выполняться условие

$$A_{\min} \leftarrow A = (1/T) \int_0^{T_{\Pi}} U_c idt \cong (U_c / T_{\Pi}) \int_0^{T_{\Pi}} idt; \quad T_{\Pi} = T_{\text{п.з}},$$

где A и A_{\min} – соответственно выполненный и минимальный расход энергии; $T_{\text{п.з}}$ и T_{Π} – соответственно заданное и действительное время хода по перегону.

Этот принцип применяют наиболее часто.

Принцип реализации максимальной пропускной способности участка (наибольшей скорости). Он может быть сформулирован как

$$T_{\text{п.мин}} \leftarrow T_{\Pi} = \int_0^L \frac{dl}{v},$$

где $T_{\text{п.мин}}$ – минимальное время движения на перегоне; L – длина перегона.

Один из вариантов этого принципа – регулирование заданной постоянной ходовой скорости v_x :

$$v_i \rightarrow v_x = k_{3v} v_{\max} = \text{const},$$

где $v_{\text{макс}}$ – максимальная допустимая скорость (конструкционная скорость подвижного состава); $k_{3v} < 1$ – коэффициент запаса по скорости.

Этот принцип используют на линиях с ограниченной пропускной способностью и при движении высокоскоростных поездов.

Принцип полного использования эксплуатационных ограничений. Он предусматривает выбор режимов работы на границе допустимых предельных значений (ограничений) показателей процессов в условиях эксплуатации.

К ним относятся ограничения по перегрузочной способности различных элементов оборудования, например тяговых двигателей (прямая 1 на рис. 1.9), по сцеплению (кривая 2), по потенциальной устойчивости – коммутации (кривая 3) и по предельной скорости $v_{\text{макс}}$ (прямая 4).

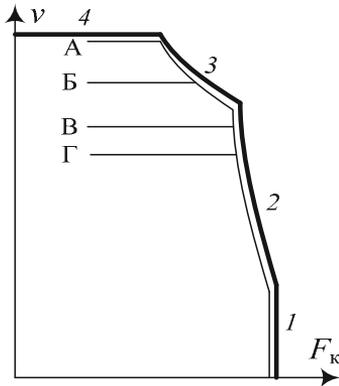


Рис. 1.9

Работе локомотива при использовании этого принципа оптимизации соответствует на рис. 1.9 тонкая линия А. Такая оптимизация приводит к форсированному использованию локомотива и поэтому не всегда приемлема.

форсированному использованию локомотива и поэтому не всегда приемлема.

Комбинированный принцип оптимизации. Он заключается в совмещении нескольких принципов, отмеченных ранее. Например, принцип постоянства скорости и принцип минимального расхода энергии могут быть совмещены с принципом использования ограничений в различные моменты движения. Работе локомотива при совмещении принципа постоянства скорости с принципом использования ограничений соответствуют тонкие линии Б, В, Г (рис. 1.9). По-видимому, комбинированные принципы оптимизации наиболее универсальны и приемлемы в общих случаях.

Синхронизация работы САР ЭПС. Она необходима при работе ЭПС по системе многих единиц. Отсутствие синхронизации может вызывать недопустимые перегрузки элементов оборудования отдельных локомотивов и другие неблагоприятные явления.

ГЛАВА 2

ФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ СХЕМЫ СИСТЕМ АВТОМАТИЧЕСКОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ

2.1. ФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ СХЕМЫ И ЭЛЕМЕНТЫ САР ЭПС

На функциональной схеме системы автоматики графически показаны её конструктивно обособленные элементы.

Несмотря на разнообразие систем автоматики, применяемых в различных областях техники, их функциональные схемы можно свести к ограниченному количеству типов. Это объясняется общностью законов управления для большинства таких систем. Следовательно, функциональные схемы различных систем можно построить из ограниченного набора типовых элементов.

Элементы различают по принципам действия (электромеханические, электромашинные, электромагнитные, пневматические, электронные полупроводниковые и т. п.), по исполнению (общепромышленные, тяговые и т. п.), по конструкции, а также по функциональному назначению.

В зависимости от назначения различают следующие элементы:

- *задающий* элемент (задатчик), с помощью которого в САР вводят сигнал g , пропорциональный заданному значению регулируемой величины y ;
- *программный* элемент, обеспечивающий изменение задаваемого значения g^* регулируемой величины y по установленной программе;
- *чувствительный* элемент, предназначенный для ввода в САР сигнала z , пропорционального текущему значению регулируемой величины y , а также сигналов q_i^* , характеризующих уровень возмущений q ;

- *элемент сравнения*, с помощью которого сравнивают сигналы, пропорциональные заданному и текущему значению регулируемой величины, для выявления ошибки или рассогласования $\Delta = g - z$;

- *управляющий* элемент, который формирует управляющее воздействие x в зависимости от значения рассогласования Δ или от сигнала q_i^* , пропорционального возмущению;

- *исполнительный* элемент, регулирующий воздействие μ на объект регулирования;

- *промежуточный* элемент, выполняющий необходимое промежуточное преобразование сигнала.

Совокупность чувствительного, управляющего, исполнительного и промежуточного элемента, а также элемента сравнения представляет собой систему автоматического регулирования (САР).

Поскольку промежуточные элементы весьма разнообразны, их подразделяют дополнительно на усилительные, преобразовательные, логические и вычислительные.

Иногда управляющий элемент разделяют на регулятор, реализующий определённую зависимость $x = f(\Delta, q)$, и собственно управляющий элемент, который по сигналу x формирует алгоритм управления исполнительным элементом. Особенно наглядно такое деление при тиристорных исполнительных элементах на ЭПС. Так, например, на электровозе ВЛ85 все регуляторы входят в состав блока автоматического управления типа БАУ-250, а управляющие элементы – в состав блока управления выпрямительно-инверторным преобразователем типа БУВИП-133. При этом принцип действия управляющих элементов такой же, как и на электровозах ВЛ80^Р без автоматического управления.

Заметим, что для элемента сравнения используют, как правило, особые обозначения. Если этот элемент выполняет сравнение двух величин, то его изображают в виде окружности, разделённой на секторы с указанием знаков подходящих к нему воздействий (см. рис. 1.3).

Если при сравнении сигнал y вычитают из g , то перед сектором, в который его вводят по схеме, возле стрелки ставят знак «минус» (см. рис. 1.3). Если к элементу сравнения подходит больше трёх входных воздействий, то его изображают так, как показано на рис. 1.6.



Возможно также совмещение нескольких функций в одном и том же конструктивном устройстве. Так, в системе автоматического пуска электропоездов функции задающего и чувствительного элемента, а также элемента сравнения выполняют отдельные части реле ускорения: возвратная пружина ВП, силовая катушка w_c , якорь Я (рис. 2.1, а). Наиболее часто сложные элементы состоят из различных промежуточных. Например, для усиления выходного сигнала в элементы сравнения вводят усилители.

Сравним упрощённую схему управления автоматическим пуском электропоезда (рис. 2.1, а) и соответствующую ей функциональную схему (рис. 2.1, б). Функции исполнительного элемента (ИЭ) выполняет реостатный контроллер (РК), коммутирующий ступени пускового реостата R_{Π} или реостата ослабления возбуждения, а также изменяющий группировки тяговых двигателей $M1-Mn$, которые являются объектом регулирования (ОР). Роль задающего элемента ЗЭ1 выполняет пружина ВП реле ускорения (РУ), с помощью которой регулируется уставка наименьшего значения пускового тока I_M .

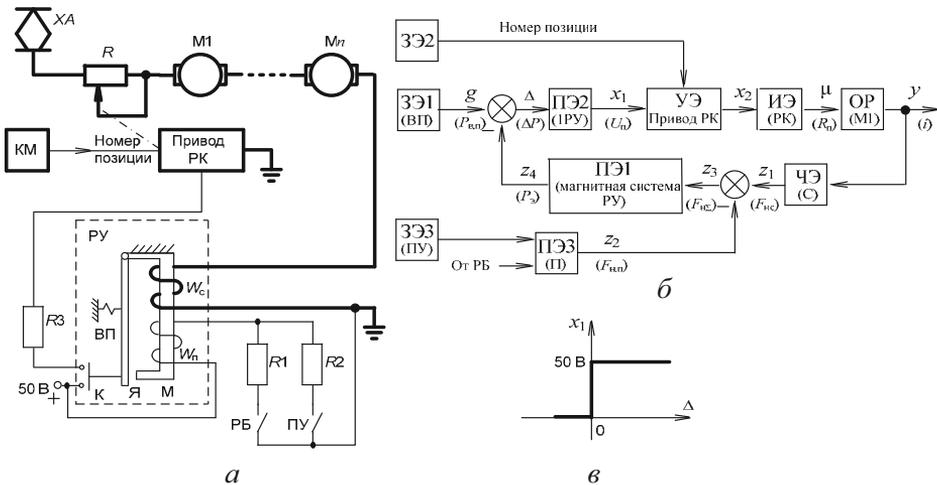


Рис. 2.1

Чувствительным элементом (ЧЭ) является силовая катушка w_c реле ускорения, элементом сравнения – якорь Я магнитопровода М,