

## Лекция 8

1. Назначение и области применения системы автоведения. Принципы оптимального управления ЭПС.

2. Алгоритмы и программы автоматического управления ЭПС.

3. Точность движения поездов при автоведении.

1

Автоматическое управление поездами позволяет увеличить пропускную способность наиболее загруженных участков, так как при этом повышается точность выполнения графика движения и улучшается использование тяговых свойств локомотивов; при автоматическом управлении машинист может уделять большее внимание обеспечению безопасности движения поезда.

Обычно автоматическое управление поездом осуществляют три взаимосвязанные системы: **система безопасности движения**, обеспечивающая установленные межпоездные интервалы и допустимые скорости движения, **система тягово-тормозной автоматики**, регулирующая силы тяги и торможения с целью наиболее полного использования мощности локомотива и сцепления колес с рельсами; **система автоведения** (автомашинист), регулирующая с заданной точностью время хода поезда в соответствии с графиком движения при экономном расходе электроэнергии и полном использовании пропускной способности. Система автоведения должна выполнять свои функции под контролем систем безопасности движения и тягово-тормозной автоматики.

В качестве системы безопасности движения на отечественном ЭПС преимущественно применяют автоматическую локомотивную сигнализацию непрерывного типа с контролем скорости (АЛСН).

Системы тягово-тормозной автоматики предусматривают автоматическое регулирование силы тяги при пуске и тормозной силы при остановке пригородных электропоездов и поездов метрополитена. Все шире устройства автоматики применяют и для электровозов.

Наиболее благоприятны условия внедрения систем автоведения на метрополитене. Этому способствует единообразие режимов движения поездов на коротких перегонах, постоянство метеорологических условий, отсутствие на пути людей, животных и др. С другой стороны, несмотря на небольшую протяженность такие системы должны обеспечивать высокую точность управления.

Условия работы пригородных поездов также достаточно благоприятны для автоведения, хотя и не так стабильны как на метрополитене. Осуществить применение систем автоведения на электровозах значительно сложнее. Здесь режимы ведения поездов необходимо дифференцировать в зависимости от веса и длины поезда, которые изменяются в широких пределах. При длинносоставных поездах надо учитывать влияние переломов профиля. Поэтому система автоматического управления должна охватывать наиболее часто повторяющиеся и легко формализуемые операции, выполнение которых заметно влияет на время хода поезда по участку и на расход энергии. К ним относятся:

- регулирование скорости поезда;
- торможение на спусках;
- торможение перед входными сигналами.

Условия работы пассажирских электровозов более благоприятны для внедрения автоматизации: более стабильный вес поезда, его небольшая длина, меньшая склонность к буксованию, применение электропневматических тормозов.

Принципы оптимального управления ЭПС. Состояние поезда как объекта управления в каждый момент времени характеризуется, как известно из курса «теория электрической тяги», скоростью  $v$ , пройденным путем  $S$  и затраченным временем  $t$ . Совокупность величин  $v$ ,  $S$ ,  $t$  можно назвать координатами движения поезда.

Наибольшие допустимые значения координат движения поезда или их производных по времени (скорость, ускорение, темп изменения ускорения) называют ограничениями. **Ограничения** можно разделить на **безусловные**, зависящие только от основных характеристик поезда и потому неизменные для рассматриваемого поезда, и **условные**, связанные с конкретными условиями движения. К ним можно отнести:

- ограничения скорости по условиям безопасности движения;
- ограничение пускового ускорения и тормозного замедления по сцеплению;
- ограничение нарастания ускорения и замедления по условиям комфорта.

Обеспечение необходимых значений координат движения поезда назовём целью управления.

Цель управления поездом можно сформулировать в виде трёх условий:

$$S = S_3; v = v_{3к}; t = T_3,$$

где  $S_3$  – заданный путь (длина перегона);  $T_3$  – заданное время хода по перегону;  $v_{3к}$  – заданная скорость в конце перегона.

Поставленная цель управления поездом можно достигнута несколькими способами, отличающимися разными фазовыми траекториями (кривыми движения) и расходом энергии на тягу.

Обычно задачи оптимального управления решают или вариационным методом (Л.Эйлера), или по принципу максимума (Л. С. Понтрягина), или же методом динамического программирования (Р. Беллмана). Во всех этих случаях определяют фазовые траектории, соответствующие экстремальному значению критерия оптимальности. Непосредственное применение этих методов для решения поставленной задачи даёт фазовую траекторию с частыми переключениями режимов работы локомотива.

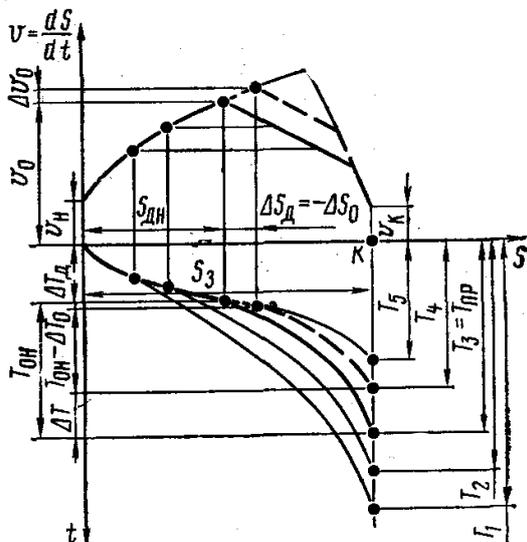


Рис. 10.1

Если отклонения от оптимальной кривой движения поезда невелики, они не приводят к существенному увеличению расхода энергии. Поэтому целесообразно ограничиться выбором квазиоптимальной кривой, при которой возможно обеспечить небольшое количество переключений с одного на другой режим работы локомотива. При этом расход энергии близок к теоретически минимальному. Кривая движения поезда на перегоне постоянного профиля состоит из четырёх участков: разгона с наибольшим допустимым ускорением, движения с постоянной скоростью, выбега и торможения с заданным замедлением (см. рис. 10.1). Такая форма диаграммы справедлива и тогда, когда начальная и конечная скорости не равны нулю, т.е. при проследовании станции без остановки.

На коротких перегонах в условиях пригородного движения и метрополитена режим движения с постоянной скоростью отсутствует, а на длинных перегонах – это один из основных режимов движения поезда. Снижение заданного времени хода приводит к сокращению длины

участка движения с постоянной скоростью (кривые для времени  $T_1$  и  $T_2$  на рис. 10.1). Если время хода мало ( $T_3$  и  $T_4$ ), то этот участок отсутствует. При минимальном возможном времени  $T_5$  диаграмма движения содержит только два участка: разгон с максимально возможным ускорением и торможение с заданным замедлением.

Повышение скорости поезда  $v_n$  в начале и  $v_k$  в конце перегона приводит соответственно к уменьшению длин участков разгона или торможения. Перегон, имеющий  $n$  различных элементов профиля, можно рассматривать как  $n$  перегонов постоянного профиля с ненулевой скоростью в точках изменения профиля.

Для автоматической реализации квазиоптимального управления необходимы автоматические системы пускового, тормозного регулирования и поддержания постоянной скорости. Эти системы относятся к внутренней тягово-тормозной автоматике ЭПС.

2

**Процесс управления поездом заключается в преобразовании информации о цели управления и координатах движения поезда в информацию о необходимых управляющих воздействиях.**

Систему формальных правил, по которым производится это преобразование, называют алгоритмом управления поездом. Информацию о цели управления можно представить в виде заданных значений координат движения  $S_3$ ,  $v_3$ ,  $T_3$ , или в виде зависимостей между ними, которые называют программой управления поездом.

По характеру преобразования информации в процессе управления различают следующие виды алгоритмов: **алгоритмы без обратной связи** (разомкнутые), предполагающие контроль только одной координаты движения поезда – команда управления подается, когда контролируемая величина превышает заданное значение; **алгоритмы со ступенчатой корректировкой**, предусматривающие изменение заданного значения основной координаты движения  $g_1$ , на некоторую заданную постоянную величину  $\Delta g_1$  если корректирующая координата  $y_2$  отклонится от заданного значения  $g_2$  в контрольной точке на величину большую установленной  $\Delta g_2$ :

$$y_1 \geq g_1 \text{ при } |y_2 - g_2| < |\Delta g_2|;$$

$$y_1 \geq g_1 \pm \Delta g_1 \text{ при } y_2 - g_2 \geq \pm \Delta g_2$$

(на рис. 10.2а заштрихованная область); **алгоритмы с пропорциональной корректировкой**, предполагающие контроль также двух или трех координат движения поезда, одна из которых основная, а остальные – корректирующие (см. рис. 10.2б); **нелинейные алгоритмы**, предусматривающие определение заданного значения основной координаты по уравнению движения поезда в зависимости от текущих значений  $v$ ,  $S$ ,  $t$ ; **алгоритмы с настройкой**, имеющие несколько программ, каждая из которых выражает заданное значение основной координаты в зависимости от других координат. Выбор какой-либо программы определяется изменением параметров поезда, главным образом его массы и сопротивления движению. Программы для таких алгоритмов обычно составляют так, чтобы оптимизировать управление поездом при

определенных его параметрах. Реализация этих алгоритмов требует сложного оборудования и их следует применять только при значительных изменениях параметров поезда.

**Алгоритмы управления ЭПС в режиме тяги.** Системы автоматического пуска наиболее широко распространены на электропоездах, где ограничение по сцеплению обычно лежит за пределами допустимых токов двигателей. На грузовых электровозах пусковой ток ограничен условиями сцепления и систему автоматического пуска надо дополнять системой автоматической стабилизации сцепления.

Отправление поезда с остановочного пункта производится либо автоматически в функции времени, либо вручную по команде машиниста. Перед подъемами или на длинных перегонах необходим повторный разгон, если дальнейшее следование на выбеге может чрезмерно снизить скорость поезда. Перед подъемами эта команда подается в функции пути, а на длинных перегонах с однородным профилем – в функции скорости.

**Переход на выбег с контролем одной координаты.** В этом случае возможны три варианта простейших алгоритмов:

$$v > v_{0н} = const; S \geq S_{дн} = const; t \geq T_{дн} = const. \quad (10.1)$$

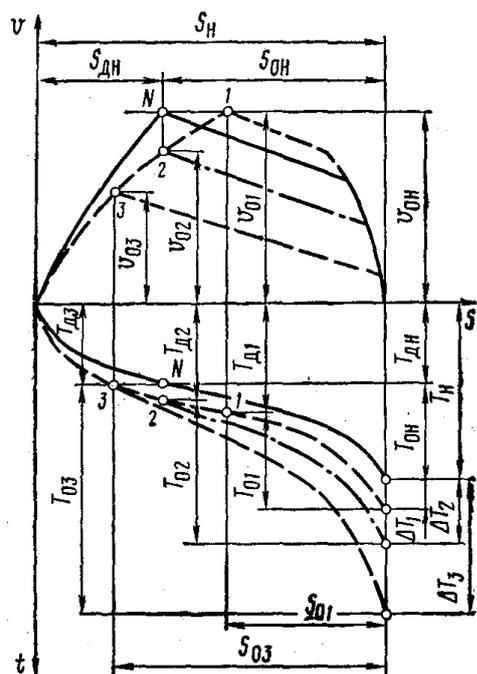


Рис. 10.3

На диаграмме рис. 10.3 точка  $N$  соответствует моменту отключения тяговых двигателей при номинальных параметрах. Назовем ее точкой номинального перехода на выбег. Она характеризуется номинальными Координатами  $v_{0н}$ ,  $S_{дн}$  и  $T_{дн}$ . Время хода по перегону  $T_n$ , состоит из времени движения до отключения тяговых двигателей  $T_{дн}$  (путь  $S_{дн}$ ), а также времени выбега и торможения  $T_{он}$  (путь  $S_{он}$ ). Предположим, что в результате изменения параметров поезда его тяговые свойства ухудшились и изменились кривые движения (штриховые линии на рис. 10.3). При алгоритме, предусматривающем контроль скорости, переход на выбег произойдет в точке 1, а если контролируется путь или время – соответственно в точках 2 и 3. Следовательно, изменятся составляющие времени хода по перегону. При алгоритме перехода на выбег  $S_d > const$  обе эти составляющие возрастают ( $T_{д2} > T_{дн}$  и  $T_{о2} > T_{он}$ ) в результате снижения скорости начала выбега  $v_{02} < v_{0н}$ . В случае  $T_{33} \geq const$  первая составляющая не изменится ( $T_{33} = T_{дн}$ ), но значительно возрастёт вторая ( $T_{03} > T_{он}$ ) вследствие снижения скорости начала выбега  $v_{03} < v_{02} < v_{0н}$ , и одновременного увеличения длин путей выбега и торможения  $S_{03} > S_{он}$ . Поэтому поезд опоздает еще больше, чем при  $S_d \geq const$ , т.е.  $\Delta T_3 > \Delta T_2$ . При алгоритме  $v_0 \geq const$  обе составляющие времени хода изменятся в

соответствии с изменением пути разгона  $S_{д1} > S_{дн}$ . Эти составляющие имеют противоположные по знаку приращения и результирующее опоздание поезда  $\Delta T_1$  окажется наименьшим из всех рассмотренных алгоритмов:  $\Delta T_1 < \Delta T_2 < \Delta T_3$ .

**Переход на выбег с контролем трех координат.** Наиболее точно точку перехода на выбег можно выбрать на основании тяговых расчётов, но это требует громоздких вычислений. Так как отклонения точки фактического перехода на выбег от номинальной точки обычно невелико, то алгоритмы перехода на выбег можно существенно упростить, заменив квадратичную зависимость основного сопротивления движению на выбеге линейной и разложив уравнение движения поезда в ряд Тейлора по приращениям времени выбега и торможения  $\Delta T_0$ , пути выбега и торможения  $\Delta S_0$  и скорости начала выбега  $\Delta v_0$  (см. рис. 10.1). При этом можно получить следующую линейную зависимость, которая определяет положение точки фактического перехода на выбег относительно номинальной

$$\Delta T_0 = \kappa_S \Delta S_0 - \kappa_v \Delta v_0.$$

В этой и последующих зависимостях следует учитывать знак приращений. Коэффициенты  $\kappa_S$  и  $\kappa_v$  представляют собой частные производные от времени выбега и торможения  $T_0$  соответственно по длине выбега и торможения  $S_0$ , а также по скорости начала выбега  $v_0$ :

$$\kappa_S \approx T_{вн} / S_{вн}; \kappa_v = T_{вн}^2 / S_{вн}.$$

Выдержать время прибытия на следующий остановочный пункт, установленное графиком, можно, выполнив условие

$$\Delta T_0 + \Delta \tau_0 + \Delta T_d \leq 0,$$

где  $\Delta \tau_0$  – опоздание поезда в точке номинального перехода на выбег;  $\Delta T_d$  – дополнительное время работы двигателей.

После выполнения преобразований общее для алгоритма перехода на выбег с контролем трёх координат и пропорциональной корректировкой уравнение имеет вид:

$$\kappa_S \Delta S_0 - \kappa_V \Delta v_0 + \Delta \tau_0 + \Delta T_d \leq 0. \quad (10.2)$$

Заменив  $\Delta S_0 = S_{дн} - S_d$ ;  $\Delta v_0 = v_0 - v_{0н}$ ;  $\Delta T_d = T_d - T_{дн}$  получим

$$\kappa_S S_d + \kappa_V v_0 - \Delta \tau_0 - T_d \geq \kappa_S S_{дн} + \kappa_V v_{0н} - T_{дн}.$$

Для реализации этого алгоритма, помимо контроля опоздания поезда в точке номинального перехода на выбег необходимо измерять все три координаты движения и использовать три постоянные:  $\kappa_S$ ,  $\kappa_V$ , а также правую часть последнего выражения. Из трёх координат движения поезда любая может быть основной, а две другие – корректирующими.

**Переход на выбег с контролем двух координат.** Предположив, что за время  $\Delta T_d$  (см. рис. 10.1) поезд имеет постоянное ускорение  $a_{0н}$  можно написать

$$\Delta T_d = \Delta v_0 / a_{0н} \text{ и } \Delta S_0 = -v_{0н} \Delta T_d. \quad (10.3)$$

Используя эти соотношения и неравенство (10.2), выявим зависимость приращения корректирующей координаты от опоздания  $\Delta \tau_0$ . Выразив в неравенстве (10.2)  $\Delta T_d$  и  $\Delta S_0$  через  $\Delta v_0$  получим выражение для корректировки по скорости

$$\Delta v_0 \geq a_{0н} \Delta \tau_0 / (\kappa_S v_{0н} + \kappa_V a_{0н} - 1). \quad (10.4)$$

На основании выражений (10.2) и (10.3) можно установить закон корректировки по времени

$$\Delta T_d \geq \Delta \tau_0 / (\kappa_S v_{0н} + \kappa_V a_{0н} - 1) \quad (10.5)$$

и по пути

$$\Delta S_0 \geq -v_{0н} \Delta \tau_0 / (\kappa_S v_{0н} + \kappa_V a_{0н} - 1). \quad (10.6)$$

Алгоритм перехода на выбег с контролем двух координат определяется двумя неравенствами: (10.1) для контроля основной координаты и одним из (10.4)...(10.5) для корректировки. Возможны девять вариантов алгоритма перехода на выбег с контролем двух координат. Каждый из этих алгоритмов требует контроля двух координат движения поезда, а каждый перегон должен, характеризоваться двумя постоянными: заданным значением основной координаты и передаточным коэффициентом корректирующего устройства.

**Алгоритмы управления ЭПС при торможении.** Цель управления поездом в режиме торможения состоит в том, чтобы к моменту прибытия поезда в точку  $k$  (см. рис. 10.1) снизить его скорость до заданного значения  $v_{зк}$ . Такое торможение называется прицельным, Оно осуществляется системой автоматического регулирования скорости (рис. 10.4), в которой заданная скорость переменная величина, зависящая от расстояния  $S_T$  между головой поезда и точкой  $k$ . Эта скорость определяется соотношением

$$S_T = v_3 T_{п} + (v_3^2 - v_{зк}^2) / (2a_{тр}), \quad (10.7)$$

где  $T_{п}$  – время срабатывания тормозов;  $a_{тр}$  – расчётное замедление поезда.

Из выражения можно получить зависимость  $v_3(S_T)$ , которая называется *программой управления поездом при торможении* или сокращению *тормозной программой*.

Вследствие нелинейности тормозных характеристик, а также наличия случайных изменений массы поезда, параметров его тормозной системы и сопротивления движению, фактическое замедление  $a_T$  отличается от расчетного  $a_{тр}$ . Для компенсации влияния этих отклонений предусматривается чередование нескольких (обычно двух)

градаций тормозного замедления  $a_{т1}$  и  $a_{т2}$ , которым соответствуют тормозные программы  $v_{31}(S_T)$  и  $v_{32}(S_T)$ . В системе прицельного торможения эти программы реализуются функциональными преобразователями  $\Phi П 1$  и  $\Phi П 2$ .

Исполнительный элемент  $ИЭ$  преобразует сигнал рассогласования фактической  $v$  и заданной  $v_3$  скорости в сигнал управления тормозами поезда, который прямо или косвенно определяет значение тормозного замедления поезда  $a_T$ .

Команда на торможение с замедлением  $a_{т1}$  выдается, когда разность фактической скорости поезда  $v$  и заданной  $v_{31}$  превышает порог чувствительности исполнительного элемента  $\Delta v_T^n$ , т.е. когда

$$v - v_{31} \geq \Delta v_T^n. \quad (10.8)$$

Тормозное замедление поезда снижается до значения  $a_{т2}$  после того, как в процессе торможения скорость поезда становится меньше  $v_{32}$  на величину  $\Delta v_T^n$ , т.е. когда

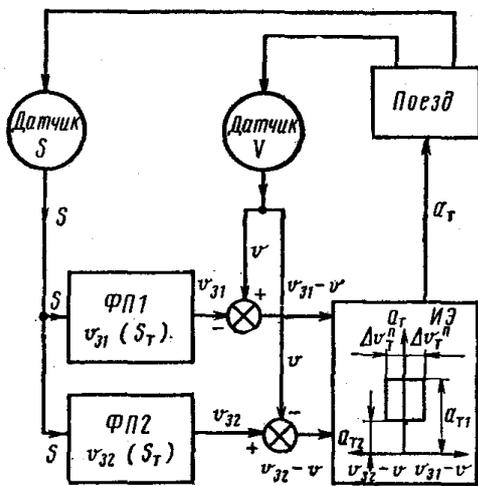


Рис. 10.4

$$v_{32} - v \geq \Delta v_T^n. \quad (10.9)$$

Поезд движется с замедлением  $a_{T2}$  до тех пор, пока снова не будет выполнено условие (10.8). Процесс торможения, объединяющий два смежных интервала времени, для которых выполняются условия (10.8) и (10.9), будем называть **циклом регулирования тормозного замедления** или **циклом торможения**. Циклы торможения повторяются, пока поезд не достигнет заданной скорости  $v_{3k}$  в точке  $k$ .

Таким образом, система прицельного торможения представляет собой релейную автоматическую систему, работающую в режиме автоколебаний. Неравенства (10.8) и (10.9) являются алгоритмом работы этой системы.

В зависимости от ее конкретного исполнения величины  $a_{T1}$ ,  $a_{T2}$ ,  $\Delta v_T^n$  могут быть либо постоянными, либо функциями  $v$ ,  $v_3$  или  $S$ .

Система прицельного торможения с параллельными программами предусматривает изменение тормозного замедления поезда от  $a_{T1}$  до  $a_{T2}$  и обратно в пределах всего тормозного пути  $S_T$ . Каждому значению  $S_T$  соответствуют два значения заданной скорости:  $v_{31}$  и  $v_{32}$ , как это показано на рис. 10.5. Если изображающая точка находится выше кривой  $v_{31}(S)$  или ниже кривой  $v_{32}(S)$ , это соответствует торможению поезда с замедлением соответственно  $a_{T1}$  или  $a_{T2}$ . Когда изображающая точка переходит в область между кривыми  $v_{31}(S)$  и  $v_{32}(S)$ , то величина тормозного замедления не изменяется.

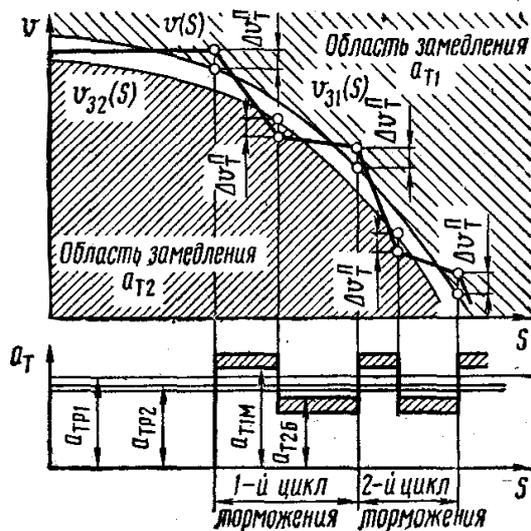


Рис. 10.5

**Система прицельного торможения с параллельными программами** будет работать в автоколебательном режиме, если расчетные тормозные замедления  $a_{T1}$  и  $a_{T2}$  удовлетворяют условиям

$$a_{T1M} > a_{Tp1} > a_{T26} \quad \text{и} \quad a_{T1M} > a_{Tp2} > a_{T26},$$

где  $a_{T1M}$  и  $a_{T26}$  – соответственно наименьшее значение  $a_{Tp1}$  и наибольшее значение  $a_{Tp2}$ , возможные при воздействии на поезд случайных факторов.

Отсюда следует, что  $a_{Tp1}$  и  $a_{Tp2}$  могут быть приняты одинаковыми. Существенное уменьшение объема исходной информации и упрощение функциональной схемы достигается в случае, когда

$$v_{31}(S_T) - v_{32}(S_T) = \Delta v_3 = \text{const}.$$

При этом функциональная схема содержит только один функциональный преобразователь ФП1. Вторая тормозная программа реализуется исполнительным элементом с характеристикой, показанной на рис. 10.6. Параллельные программы применены в системах прицельного торможения электропоезда ЭР200, Парижского метрополитена и в других системах.

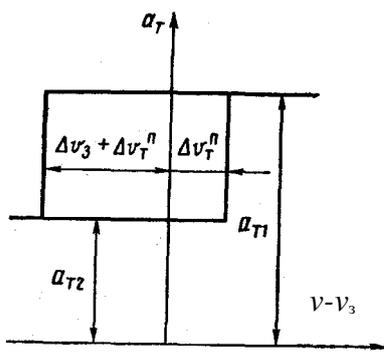


Рис. 10.6

**В системе прицельного торможения с последовательными программами** тормозной путь разделён на несколько участков, на каждом из которых может быть подана команда торможения только с одной определённой градацией замедления (рис. 10.7). Расчетные тормозные замедления  $a_{T1}$  и  $a_{T2}$  для

построения тормозных программ  $v_{31}(S)$  и  $v_{32}(S)$  должны отвечать следующим условиям:

$$a_{Tp1} \geq a_{T16} \quad \text{и} \quad a_{Tp2} \leq a_{T2M}.$$

Практически расчетное замедление  $a_{Tp2}$  можно принять равным нулю. Системы прицельного торможения с последовательными программами применены на метрополитенах Москвы, Ленинграда, Нью-Йорка.

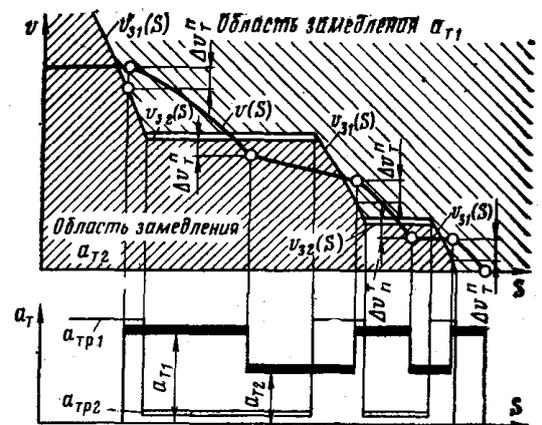


Рис. 10.7

3

**Причины неточного движения поездов.** Большинство параметров, определяющих скорость и время хода поезда по перегону – величины случайные, которые можно описать с помощью законов распределения или их числовых характеристик. Так, для случайной величины  $X$  числовыми

характеристиками являются математическое ожидание  $m_X$ , среднее квадратичное отклонение  $\sigma_X$ , коэффициент вариации  $V_X = \sigma_X / m_X$ . Обычно эти характеристики определяют на основе статистической обработки опытных данных.

Напряжение на токоприемнике  $U_c$  подчиняется закону распределения, близкому к нормальному. При этом чаще всего  $V_U = 0,06 \dots 0,07$ . В условиях децентрализованного питания контактной сети  $V_U = 0,03$ .

Масса поезда  $M$  зависит от его составности и характера груза или от населенности пассажирских вагонов. Коэффициент вариации массы можно принимать для грузовых поездов  $V_M = 0,15 \dots 0,40$ , для пригородных электропоездов  $V_M = 0,04 \dots 0,07$ , для поездов метрополитена  $V_M = 0,06 \dots 0,075$ .

Основное сопротивление движению поезда распределено по нормальному закону: для пассажирских и порожних вагонов  $\sigma_W = 0,8 \dots 0,85$  Н/кН, а для гружёных грузовых вагонов  $\sigma_W = 0,35 \dots 0,4$  Н/кН.

**Расчёт точности движения поездов.** Любую координату движения поезда  $y$  можно рассматривать как функцию параметров поезда  $U_c, M, W$ , т.е., как функцию нескольких независимых случайных величин. Для координаты движения поезда

$$m_y = y(m_U, m_M, m_W); \text{ и } \sigma_y = \sqrt{\sigma_U^2 \left( \frac{\partial y}{\partial U} \right)_{U=m_U}^2 + \sigma_M^2 \left( \frac{\partial y}{\partial M} \right)_{M=m_M}^2 + \sigma_W^2 \left( \frac{\partial y}{\partial W} \right)_{W=m_W}^2}.$$

Эти соотношения точны только при линейной зависимости  $y(U, M, W)$ . Если нелинейность выражена сильно, необходимо вводить поправки.

Время хода поезда по перегону также величина случайная, имеющая, как известно, три составляющие

$$T = T_d + T_b + T_t,$$

где  $T_d$  – время разгона (ускорения);  $T_b$  – время выбега;  $T_t$  – время торможения.

Вариация напряжения  $U$  влияет только на величину  $T$  и на начальные координаты выбега, а вариация массы поезда – на времена разгона  $T_d$  и выбега  $T_b$ , а также на начальные координаты выбега. Вариация сопротивления движению влияет преимущественно на время  $T_b$ . Среднее квадратичное отклонение времени торможения обычно невелико и его можно не учитывать. Обобщая сказанное, можно написать

$$\sigma_T = \sqrt{(\sigma_{T_d}' \pm \sigma_{T_b}^H)'^2 + (\sigma_{T_d}'' - \sigma_{T_b}'' \pm \sigma_{T_b}^H)''^2 + (\sigma_{T_b}''')^2},$$

где  $\sigma_{T_d}'$  и  $\sigma_{T_b}''$  – составляющие среднего квадратичного отклонения времени разгона, вызванные изменением соответственно напряжения на токоприемнике и массы поезда;  $\sigma_{T_b}''$  и  $\sigma_{T_b}'''$  – то же времени выбега, вызванные изменением соответственно массы поезда и удельного основного сопротивления движению;  $\sigma_{T_b}^H$  и  $\sigma_{T_b}^H$  – то же времени выбега, вызванные изменением начальных координат выбега вследствие изменения соответственно напряжения и массы поезда (знак « $\rightarrow$ » – при переходе на выбег по скорости, а знак « $\leftarrow$ » – по пути или времени).

Составляющие средних квадратичных отклонений, значения которых не превышают 30% результирующего, можно не учитывать, так как это обеспечивает результирующую погрешность не более 5%.

Рассмотрим показатели точности алгоритма перехода на выбег с контролем скорости. Величинам, характеризующим точность алгоритмов перехода на выбег  $v_0 = const$ ;  $S_d = const$  и  $T_d = const$  присвоены соответственно индексы 1, 2 и 3.

Для времени и пути разгона при изменении напряжения на токоприемнике:

$$\sigma_{T_d}' = \left| \frac{\partial T_d}{\partial U_c} \right| \sigma_U = (v_{0н} / a_{0н} - T_{дн}) V_U; \text{ и } \sigma_{S_d}' = \left| \frac{\partial S_d}{\partial U_c} \right| \sigma_U = (v_{0н}^2 / a_{0н} - 2S_{дн}) V_U,$$

где  $v_{0н}$  – скорость окончания разгона поезда;  $a_{0н}$  – ускорение поезда при номинальном напряжении для  $v = v_{0н}$ ;  $T_{дн}$ ,  $S_{дн}$  – время и путь разгона до скорости  $v_0$  при номинальных значениях  $U$  и  $M$ .

Удельная сила тяги и значительная часть удельного основного сопротивления движению обратно пропорциональны массе поезда. Для времени и пути разгона при изменениях массы поезда:

$$\sigma_{T_d}'' = \left| \frac{\partial T_d}{\partial M} \right| \sigma_M \approx T_{дн} V_M \text{ и } \sigma_{S_d}'' = \left| \frac{\partial S_d}{\partial M} \right| \sigma_M \approx S_{дн} V_M.$$

Погрешность времени выбега зависит от изменений массы поезда и основного сопротивления движению, а также от вариации начальных координат выбега. Среднее квадратичное отклонение времени выбега вследствие изменения массы поезда

$$\sigma_{T_b}'' = \left| \frac{\partial T_b}{\partial M} \right| \sigma_M \approx T_{вн} V_M.$$

Эта зависимость получена в предположении, что всё удельное основное сопротивление движению обратно пропорционально  $M$ , а так же без учета ряда малых слагаемых величины  $\left| \frac{\partial T_b}{\partial M} \right|$ . Среднее квадратичное отклонение времени выбега вследствие изменений сопротивления движению

$$\sigma_{T_b}'' = \left| \frac{\partial T_b}{\partial W} \right| \sigma_M = \zeta T_{вн}^2 \sigma_W / (2v_{тн}),$$

где  $\zeta$  – постоянная перевода из одной системы единиц в другую;  $T_{вн}$  – время выбега при номинальных условиях;  $v_{тн}$  – скорость начала торможения при номинальных условиях.

Формулы для расчета составляющих среднего квадратичного отклонения координат движения поезда сведены в табл. 10.1.

**Выбор алгоритма перехода на выбег.** При ручном управлении влияние случайных факторов компенсирует машинист, а степень компенсации зависит от его квалификации и опыта. В случае автоматического управления их компенсацию осуществляет система автоведения. При выборе алгоритма её работы необходимо сопоставить допустимое отклонение поезда от графика  $\Delta\tau_{доп}$  и среднее квадратичное отклонение времени хода по перегону  $\sigma_T$  при заданном уровне возмущающих воздействий.

$$\text{Время хода по перегону } T \text{ для любого поезда практически не выйдет за пределы } T_3 \pm \Delta\tau_{доп}, \text{ если} \\ \Delta\tau_{доп} \geq 3\sigma_T. \quad (10.10)$$

Таблица 10.1

Координаты движения поезда	Составляющие среднего квадратичного отклонения координат движения поезда при различных алгоритмах перехода на выбег		
	$v_0 = const$	$S_d = const$	$T_d = const$
$T_d$	$\sigma_{T_d}' = \left  \frac{\partial T_d}{\partial U_c} \right  \sigma_U = (v_{0н} / a_{0н} - T_{дн}) V_U$ <p>и</p> $\sigma_{T_d}'' = \left  \frac{\partial T_d}{\partial M} \right  \sigma_M \approx T_{дн} V_M$	$\sigma_{T_d2} = \sigma_{T_d1} - \frac{\sigma_{S_d1}}{v_{0н}}$	-
$S_d$	$\sigma_{S_d}' = \left  \frac{\partial S_d}{\partial U_c} \right  \sigma_U = (v_{0н}^2 / a_{0н} - 2S_{дн}) V_U$ <p>и</p> $\sigma_{S_d}'' = \left  \frac{\partial S_d}{\partial M} \right  \sigma_M \approx S_{дн} V_M$	-	$\sigma_{S_d3} = v_{0н} \sigma_{T_d1} - \sigma_{S_d1}$
$v_0$	-	$\sigma_{v_02} = \frac{a_{0н}}{v_{0н}} \sigma_{S_d1}$	$\sigma_{v_03} = a_{0н} \sigma_{T_d1}$
$T_b$	$\sigma_{T_b1}^H = \kappa_S \sigma_{S_d1}$	$\sigma_{T_b1}^H = \kappa_v \frac{a_{0н}}{v_{0н}} \sigma_{S_d1}$	$\sigma_{T_b3}^H = (\kappa_S v_{0н} + \kappa_v a_{сн}) \sigma_{T_d1} - \kappa_S \sigma_{S_d1}$

Неравенство (10.10) определяет допустимость применения алгоритма перехода на выбег с контролем одной координаты (зона III на рис. 10.8). Если оно не выполнено, то необходима корректировка.

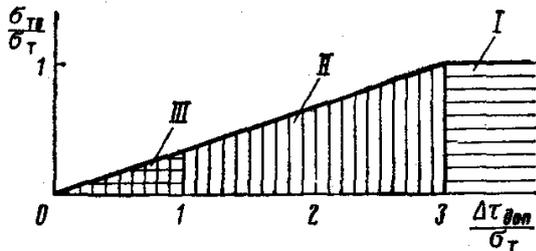


Рис. 10.8

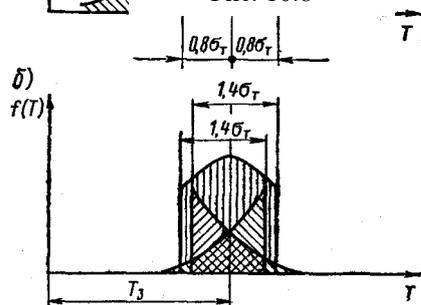


Рис. 10.9

При ступенчатой корректировке (зона II на рис. 10.8) наилучшие показатели точности получаются, если корректирующее воздействие равно  $1,4\sigma_T$  при отклонении фактического времени хода  $T$  от заданного  $T_3$  более чем на  $\pm 0,8\sigma_T$  (рис. 10.9а).

При такой корректировке нормальный закон распределения случайной величины  $T$  преобразуется (рис. 10.9б) и вероятность того, что время хода поезда с учетом ступенчатой корректировки не выйдет за пределы  $T_{пр} \pm \sigma_T$ , составляет 97,5%. Таким образом, применять алгоритм со ступенчатой корректировкой возможно, если

$$\Delta\tau_{доп} \geq \sigma_T. \quad (10.11)$$

При  $\Delta\tau_{\text{доп}} \leq \sigma_T$  необходимо применять алгоритмы перехода на выбег с пропорциональной корректировкой с контролем двух или трех координат (зона I на рис. 10.8).

Такие алгоритмы позволяют практически полностью компенсировать влияние случайных факторов в режиме тяги.

Погрешность таких алгоритмов определяется только влиянием случайных факторов в режиме выбега и характеризуется неравенством

$$\Delta\tau_{\text{доп}} \geq 3\sigma_{Tв}.$$

Имея в виду, что  $\sigma_{Tв} \leq \sigma_T$ , можно привести последнее неравенство к виду

$$\frac{\sigma_{Tв}}{\sigma_T} \leq \frac{1}{3} \frac{\Delta\tau_{\text{доп}}}{\sigma_T}. \quad (10.12)$$

Графическая интерпретация не равенств (10.10), (10.11) и (10.12) приведена на рис. 10.8, где каждой совокупности  $\sigma_T$ ,  $\sigma_{Tв}$  и  $\Delta\tau_{\text{доп}}$  соответствует определённая точка.

Когда уровень возмущающих факторов, оцениваемых значениями  $\sigma_T$  и  $\sigma_{Tв}$ , не позволяет реализовать требуемую величину  $\Delta\tau_{\text{доп}}$  (незаштрихованная область на рис. 10.8), необходимо уменьшить время выбега, применив режим движения с постоянной скоростью.

**Причины неточной остановки поездов.** Точность остановки поезда в результате прицельного торможения зависит от правильности выбора точки начала торможения и от стабильности тормозного замедления. Погрешность выбора начальных координат торможения определяется тем, насколько точно реальная тормозная программа совпадает с теоретической. Тормозное замедление поезда рассчитывается по известной из курса «Теория электрической тяги» выражением

$$a_T = \zeta \left( \frac{B}{M} + w_0 + i \right).$$

Здесь масса поезда  $M$  и основное сопротивление движению  $w_0$  являются случайными величинами; тормозная сила поезда  $B$  зависит от таких случайных факторов, как давление в тормозных цилиндрах и коэффициент трения тормозных колодок, характеристики тяговых двигателей и сопротивлений тормозных резисторов. При плавном регулировании тормозное замедление – случайная величина, не зависящая от времени (рис. 10.10а), а при ступенчатом (рис. 10.10б, в) оно претерпевает ряд скачкообразных изменений в

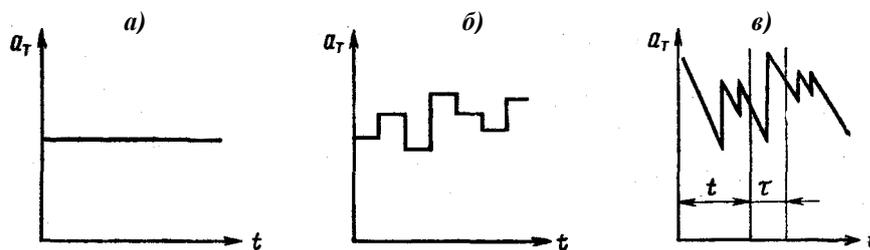


Рис. 10.10

случайные моменты времени. Поэтому тормозное замедление  $a_T$  представляет собой не просто случайную величину, а случайную зависимость  $a_T(t)$ , которая характеризуется математическим ожиданием и корреляционной функцией. В частности, для прямоугольных (см. рис. 10.10б) и пилообразных (рис. 10.10в) функций тормозного замедления, которые характерны для пневматического и электрического торможения, корреляционная функция

$$R_{a_T} = \sigma_{a_T}^2 \exp(-\rho\lambda|\tau|),$$

где  $\sigma_{a_T}$  – среднее квадратичное отклонение тормозного замедления;  $\tau$  – интервал времени между рассматриваемыми значениями случайной функции;  $\lambda$  – математическое ожидание числа ступенчатых изменений тормозного замедления в единицу времени;  $\rho$  – поправочный коэффициент:  $\rho = 1$  при синхронном изменении тормозной силы во всех вагонах поезда и  $\rho = 0,5$  при отсутствии синхронизации.

Выражение для коэффициента вариации тормозного замедления

$$V_{a_T} = \sqrt{V_B^2 + V_M^2(1 - \eta_a)^2},$$

где  $V_B$  и  $V_M$  – коэффициенты вариации тормозной силы  $B$  и массы поезда  $M$ ;  $\eta_a$  – относительная чувствительность авторежима, т.е. отношение относительного изменения пусковой силы тяги к относительному изменению массы поезда; при отсутствии авторежима  $\eta_a = 0$ , при идеальном авторежиме  $\eta_a = 1$ .

Если кривая  $a_T(t)$  имеет пилообразную форму с постоянной амплитудой колебания, то сила  $B$  подчиняется равномерному закону, при котором

$$V_B = K_{нв} / \sqrt{3},$$

где  $K_{нв}$  – коэффициент неравномерности тормозного усилия.

**Точность прицельного торможения с последовательными программами.** Влияние случайных факторов в процессе прицельного торможения обуславливает вариацию координат движения поезда в конце каждого цикла торможения.

При последовательных тормоз программах количество циклов торможения – величина постоянная и вариация скорости начала торможения в каждом цикле может быть компенсирована тормозной программой. Поэтому для определения точности остановки достаточно рассмотреть влияние случайных факторов только в последнем цикле торможения.

Для этих условий математическая модель системы прицельного торможения может быть представлена в виде двух последовательно соединенных интегрирующих звеньев; на вход её воздействует  $a_T(t)$  стационарная случайная функция (рис. 10.11). Случайная функция на выходе первого интегратора соответствует скорости поезда в режиме торможения  $v_T(t)$ , а на выходе второго – тормозному пути  $S_T(t)$ . Эти случайные функции уже не являются стационарными. Отклонение точки фактической остановки поезда от расчётной представляет собой случайную величину, распределенную по нормальному закону.

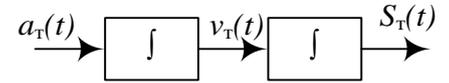


Рис. 10.11

Пользуясь правилами интегрирования случайных функций и пренебрегая малыми слагаемыми, можно найти выражение для среднего квадратичного отклонения тормозного пути

$$\sigma_{S_T} = \frac{2v_{ar}}{\rho\lambda} v_T,$$

где  $v_T$  – скорость начала последнего цикла торможения.

Из этой формулы видно, что точность прицельного торможения с последовательными программами можно повысить путем снижения скорости начала последнего цикла торможения, синхронизации изменений тормозной силы во всех вагонах поезда и увеличения числа ступеней ее регулирования.

**Точность прицельного торможения с параллельными тормозными программами.** В этом варианте количество циклов торможения величина случайная и чтобы определить точность остановки поезда, необходимо рассматривать работу замкнутой системы автоматического регулирования его скорости.

Структурная схема системы прицельного торможения, приведенная на рис. 10.12 соответствует функциональной схеме, изображенной на рис. 10.4. Формирователь программной скорости  $I$  воспроизводит уравнение (10.7). В результате линеаризации этого выражения можно получить зависимость

$$v_3 = v_{3н} - \kappa S$$

где  $v_{3н}$  – начальное значение заданной скорости;

$$\kappa = \frac{I}{\left| \frac{dS}{dv} \right|} = \frac{1}{\left( T_n + \frac{v_3}{a_{тр}} \right)}.$$

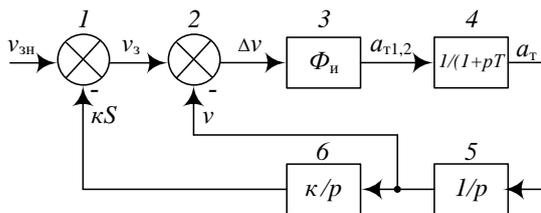


Рис. 10.12

Элемент сравнения 2 вырабатывает сигнал, равный отклонению фактической скорости поезда от заданной  $\Delta v = v - v_3$ . Исполнительный элемент 3 преобразует величину  $\Delta v$  в сигналы, пропорциональные установившимся значениям тормозных замедлений. Вид характеристики исполнительного элемента определяется способами регулирования, количеством градаций и характером изменения тормозного замедления. В большинстве случаев исполнительный элемент имеет

характеристику, показанную на рис. 10.6 и его выходной сигнал, который может принимать два значения тормозного замедления  $a_{т1}$  и  $a_{т2}$  сокращенно обозначен  $a_{т1,2}$ .

Апериодическое звено 4 преобразует длительность выходного сигнала исполнительного элемента в сигнал, пропорциональный мгновенному значению тормозного замедления  $a_т$ . Зависимость между мгновенным и установившимся значениями тормозных замедлений определяется уравнением

$$a_т = a_{т1,2} [1 - \exp(-t/T)]$$

где  $t$  – длительность выходного сигнала исполнительного элемента;  $T$  – постоянная времени тормоза.

На рис. 10.12 изображены только основные звенья структурной схемы. В зависимости от конкретного исполнения системы структурная схема может быть дополнена различными корректирующими звеньями и, в частности, обратными связями по скорости и тормозному замедлению.

Работа замкнутой системы прицельного торможения сопровождается периодическими колебаниями рассогласования скоростей  $\Delta v$ . Точность прицельного торможения зависит от амплитуды этих колебаний, а

плавность — от частоты. Амплитуда  $\Delta v_6$  и частота  $\omega$  автоколебаний в этой системе могут быть определены методом гармонической линеаризации:

$$\Delta v_6 \approx (0,5\Delta v_3 + \Delta v_3^n)(\sqrt{1 + \omega^2 T^2}) / (1 - \kappa T); \quad (10.13)$$

$$\omega \approx \frac{2(a_{T1} - a_{T2})(1 - \kappa T)}{\pi(0,5\Delta v_3 + \Delta v_3^n)}. \quad (10.14)$$

Амплитуда отклонения тормозного пути  $\Delta S_T = \Delta v_6^2 / (2a_T)$ . Подставим сюда выражения (10.13) и (10.14) и пренебрегая слагаемыми второго порядка малости, получим

$$\Delta S_T = \Delta v_3^2 / [2a_T(1 - \kappa T)]. \quad (10.15)$$

Из уравнений (10.14) и (10.15) видно, что повышение точности торможения путем уменьшения  $\Delta v_3$ ; ограничено повышением частоты тормозных воздействий  $\omega$  на поезд и снижением плавности торможения. Отклонение тормозного пути зависит также от изменения массы поезда и нестабильности характеристик тормозов.

Сравнив наибольшие отклонения тормозных путей при последовательных и параллельных программах (рис. 10.13), можно сделать следующие выводы. При параллельных программах точность остановки не зависит от скорости начала торможения, а при последовательных зависит практически линейно. В случае высоких скоростей начала торможения большую точность обеспечивают параллельные программы, а для низких — последовательные. Повышение точности прицельного торможения с параллельными программами ограничено ростом частоты тормозных воздействий на поезд и снижением плавности торможения.

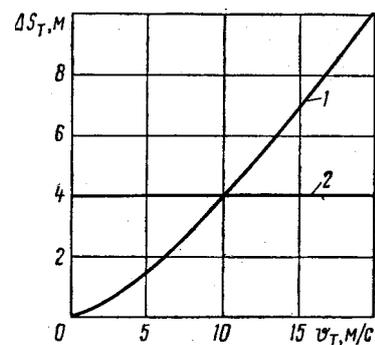


Рис. 10.13