

АВТОМАТИЗАЦИЯ УПРАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИМ ПОДВИЖНЫМ СОСТАВОМ

И. П. ИСАЕВ, В. П. ФЕОКТИСТОВ, Ю. Ю. ЧУВЕРИН

Кафедра "Электрическая тяга" Московского института инженеров
железнодорожного транспорта

Поступило: 29 сентября 1988. г.

Представлено: проф. др. Т. Зобори

Abstract

In this paper, the expedience of automation of perspective electric locomotives and trains according to the principle of the present speed-restriction and current-carrying-capacity of traction motors is explained. The technical realisation of this principle is rendered possible by means of a two-contour system of minor regulation with functional element by current task, by dimension of speed.

The method of calculating the system is grounded by line of simplification assumptions, the necessity of restriction of offset strengthening of functional element to avoid vibration of tractive effort is explained. Information is provided on the practical utilization of this system of electric train $\text{эп}12$ on the railways of the USSR.

1. Постановка задачи

Эксплуатируемые на железнодорожном транспорте электрово-
зы и электропоезда имеют системы ступенчатого регулирования.
Управление ими осуществляется машинистом путем задания пози-
ции работы силовой схемы, для чего служит позиционный контро-
лер машиниста. Недостаток этого способа регулирования связан с
тем, что при работе электроподвижного состава в условиях огра-
ничений по току тяговых двигателей, силе тяге или по скорости ма-
шинист должен вручную стабилизировать регулируемую величину
на уровне, близком к ограничению. Это приводит к частым пере-
ключениям контролера и отвлекает внимание машиниста от наблю-
дения за сигналами и состоянием пути.

Указанный недостаток может быть устранен при плавном ре-
гулировании тяговых двигателей. Соответствующие возможности
имеются на перспективном электроподвижном составе – переменного
тока с управляемыми выпрямителями и постоянного тока с им-
пульсными преобразователями [1]. В дальнейшем силовой полупро-

водниковый преобразователь для плавного регулирования напряжения на тяговых двигателях будем называть исполнительным элементом (ИЭ). На железных дорогах СССР эксплуатируются электропоезда постоянного тока 3 кВ типа ЭР12 с импульсными преобразователями и электропоезда переменного тока 25 кВ 50 Гц типа ЭР29 с управляемыми выпрямителями, а также электровозы переменного тока ВЛ80Р и ВЛ85 с плавным регулированием в режимах тяги и рекуперативного торможения.

Таким образом, имеется техническая база для развития систем автоматизации. Цель исследования состоит в том, чтобы обосновать принципы и структуры системы автоматического управления для перспективных электровозов и электропоездов, исходя при этом из удобства работы машиниста и максимального использования мощности силового оборудования.

2. Принципы автоматизации электроподвижного состава

Оптимальный режим движения поезда обычно связан с предельно допустимым использованием мощности тяговых двигателей в рамках заданных ограничений [2]. Для электроподвижного состава характерны 2 основных вида ограничений – по току I тяговых двигателей и по скорости движения V . Поэтому функции автоматической системы в цикле движения поезда сводятся к реализации следующих операций (рис. 1.а): ОА – постепенное увеличение тока тяговых двигателей до предельного значения I_3 , определяемого обычно условиями сцепления колес с рельсами; АВ – поддержание тока на уровне предельного значения I_3 ; ВС – работа на естественной характеристике тяговых двигателей при максимальном напряжении, причем на этом этапе система автоматики не используется; СД – этап ограничения тока тяговых двигателей с целью стабилизации скорости поезда на заданном уровне V_3 , так что точка Д соответствует режиму динамического равновесия, когда сила тяги $F(I_D)$ равна сумме сил сопротивления движению $W(V_3)$.

Машинист воздействует на указанный процесс регулирования путем задания ограничений по току I_3 и по скорости V_3 , исходя при этом из конкретных условий движения. Органы управления на пульте машиниста должны содержать контролер, проградуированный в единицах скорости V_3 , и задатчик предельного пускового тока I_3 .

Принцип автоматизации заключается, следовательно, сначала в стабилизации тока двигателей на этапе АВ и затем в стабилизации скорости поезда на этапе СД [3,4]. Важным с точки зре-

ния построения системы является также этап ОА, в течение которого должен быть реализован переходный процесс нарастания тока и, следовательно, силы тяги и ускорения поезда. Опытные замеры на электропоезде ЭР12 показали, что этот процесс целесообразно реализовать по комбинированному закону (рис. 1.6), включающему этап 0-1 скачкообразного нарастания тока после включения тяговых двигателей, этап 1-2 линейного нарастания тока и этап 2-А с переходом к $I = I_3$ по экспоненциальному закону.

Значение I_1 выбирают из условия комфортности пассажиров, чтобы соответствующее ему ускорение не превышало $a_1 = 0.25 \div 0.30$ м/с². Этап 1-2 связан с ограничением по интенсивности нарастания ускорения электропоезда [5]

$$\left[h = \frac{da}{dt} = \frac{dV^2}{dt^2} \right] \leq 0.6 \div 0.7 \text{ м/с}^3, \quad (1)$$

так что

$$\frac{dI}{dt_{1-2}} \leq \frac{mh_{\max}}{\frac{dF}{dI}}, \quad (2)$$

где $\frac{dF}{dI}$ – производная от электротяговой характеристики $F(I)$, определяемая по паспортным данным тягового двигателя.

На этапе 2-А переход к заданному значению тока I_3 осуществляется по экспоненте

$$I = (I_3 - I_2) \left(1 - e^{-\frac{t-t_2}{T}} \right) + I_2, \quad (3)$$

где I_2, t_2 – координаты точки сопряжения прямой 1-2 и экспоненты 2-А; T – постоянная времени экспоненты.

Для задания экспоненты 2-А необходимо знать два параметра: T и I_2 (или t_2 , поскольку $I_2 = I_1 + t_2 \frac{mh}{dI}$), для чего наложим на (3) два ограниченных условия:

– ограничение по второй производной от ускорения поезда

$$\left[h^* = \frac{dh}{dt} = \frac{1}{m} \cdot \frac{d^2I}{dt^2} \cdot \frac{dF}{dI} \right] < 1 \quad \text{м/с}^4 \quad (4)$$

– условие сопряжения, т.е. равенства производных, прямой 1-2 и экспоненты 2-А в точке 2, т.е.

$$\frac{mh_{\max}}{dF/dI} = (I_3 - I_2)/T. \quad (5)$$

Совместно решая (4) и (5), получим параметры экспоненты

$$I_2 = I_3 - h \sqrt{\frac{m}{\frac{dF}{dI} \cdot h^*}} \quad (6)$$

$$T = \sqrt{\frac{1}{mh^*} \frac{dF}{dI}} \quad (7)$$

Таким образом, полностью определены особенности регулирования для всех фаз движения поезда с электрической тягой.

3. Техническая реализация системы

Системы регулирования, обеспечивающие одновременное ограничение двух и более величин, в электроприводах принято выполнять как многоконтурные системы подчиненного регулирования [6]. В данном случае необходима 2-контурная система (рис. 2), во внутреннем контуре которой осуществляется ограничение тока, а во внешнем – скорости. Внутренний контур K_1 выполнен как пропорционально-интегральный регулятор с интегрирующим звеном ИЗ, выходной сигнал которого k воздействует на блок управления БУ силового преобразователя, который является исполнительным элементом. Количество параллельно работающих внутренних контуров K_1 равно числу независимо регулируемых групп тяговых двигателей в электропоезде.

На входе внутреннего контура K_1 установлен элемент задержки Эз, реализующий переходный процесс нарастания тока по рис. 1,б. Таким образом, внутренний контур осуществляет ограничения по току и по ускорению.

Внешний контур K_2 содержит функциональный элемент ФЭ, осуществляющий вычисление заданного тока I_3 в функции рассогласования по скорости ΔV , причем ФЭ представляет собой линейный усилитель с ограничением выходной величины на уровне I_M . Уровень ограничения задается машинистом при помощи задатчика максимального тока ЗМТ. Задание скорости осуществляется машинистом при помощи задатчика ЭС.

На электропоезде ЭР12 данная система реализована на интегральных микросхемах серии КР155. В перспективе реализация системы целесообразна на базе типовых микропроцессоров, особенно в случае расширения выполняемых функций.

4. Расчет системы автоматики

Внутренний контур системы, т.е. контур регулирования тока, рассчитывают методами, которые широко известны для расчета электроприводов с двигателями постоянного тока [6]. Поэтому практический интерес представляет расчет внешнего контура в режиме перехода к квазистационарному режиму, т.е. на этапе СД (рис. 1,а). Поскольку регулирование во внутреннем контуре осуществляется в соответствии с переходной характеристикой рис. 1,б, которая близка к экспоненте, то вещь внутренний контур вместе с ИЭ и тяговыми двигателями можно заменить при расчете линейным инерционным элементом с постоянной времени $T_{\text{н}}$ (рис. 1,б). В результате получается эквивалентная расчетная схема (рис. 3,а) с линейным инерционным элементом ЛИЭ, обладающим характеристикой

$$\frac{dI}{dt} = \frac{(I_3 - I_{\Phi})}{T_{\text{э}}}, \quad (8)$$

причем поскольку на этапе СД элемент для задания тока $\Phi\text{Э}$ работает на линейной части характеристики с коэффициентом усиления $K = I_3/\Delta V$, то подставив $I_3 = K(V_3 - V)$ в (8), получим выражение

$$\frac{dI}{dt} = \frac{K(V_3 - V) - I_{\text{кф}}}{T_{\text{э}}}, \quad (9)$$

связывающее все регулируемые величины.

Это выражение нужно рассматривать совместно с уравнением движения поезда

$$\frac{dV}{dt} = f - W, \quad (10)$$

где f — удельная сила тяги, W — удельное сопротивление движению.

Поскольку интервал СД соответствует небольшому изменению скорости (3-6 км/ч), то вполне возможно функции $f(I)$ и $W(V)$ линеаризировать, представив их в виде

$$f(I) = f_0 + \alpha I \quad (11)$$

$$W(V) = W(V_3) + \beta \Delta V, \quad (12)$$

где α и β — постоянные коэффициенты, что позволяет записать (10) как

$$\frac{dV}{dt} = [f_0 - W(V_3)] + \alpha I - \beta \Delta V. \quad (13)$$

Рассматривая уравнения (9) и (13) совместно как систему дифференциальных уравнений относительно I и V , исключим из них V . В результате получаем неоднородное дифференциальное уравнение второго порядка

$$\frac{d^2 I}{dt^2} + \frac{dI}{dt} + I = \alpha - \beta, \quad (14)$$

общее решение которого имеет вид

$$I = C_1 e^{P_1 t} + C_2 e^{P_2 t} + A, \quad (15)$$

где $C_{1,2}$ – независимые произвольные постоянные;

A – частное решение (14);

$P_{1,2}$ – корни характеристического уравнения, которые равны

$$P_{1,2} = -\left(\frac{1}{T_\Theta + \beta}\right) \pm \sqrt{\left(\frac{1}{T_\Theta + \beta}\right)^2 - \frac{1}{T_\Theta}(K\alpha + \beta)}. \quad (16)$$

Частное решение A неоднородного уравнения (14) есть постоянная

$$A = \frac{K[W(V_3) - f_0]}{K\alpha + \beta}, \quad (17)$$

равная значению тока установившегося режима $I_\infty(V_3)$.

Постоянные $C_{1,2}$ определяются из начального условия, соответствующего точке C , когда

$$t_0 = 0; \quad I = I_c; \quad \frac{dI}{dt} = 0 \quad (18)$$

причем наиболее неблагоприятный случай имеет место, когда $I_c = I_3$, т.е. если режим стабилизации скорости начинается до выхода на естественную характеристику (этап ВС отсутствует). На базе указанного начального условия получаем

$$C_1 = -P_2 \frac{I_m - A}{P_1 - P_2}; \quad C_2 = P_1 \frac{I_m - A}{P_1 - P_2}, \quad (19)$$

что дает возможность окончательно записать решение уравнения (14) в виде

$$I = \frac{I_m - A}{P_1 - P_2} (P_1 e^{P_2 t} - P_2 e^{P_1 t}) + A. \quad (20)$$

Это выражение позволяет вычислять кривую тока на этапе СД, т.е. при переходе к заданному значению скорости. В качестве примера на *рис. 3.6* показаны варианты переходного процесса для разных значений коэффициента K в ФЭ, откуда видно, что при определенных условиях переходный процесс перестает быть монотонным. Для тяговых электроприводов это недопустимо; поэтому условие монотонности переходного процесса может быть сформулировано как условие положительности подкоренного выражения в (16), что дает ограничение на параметр внешнего контура в системе

$$K < \frac{T_{\Theta} \left(\frac{1}{T_{\Theta} + \beta} \right)^2 - \beta}{\alpha} \quad (21)$$

Внутренний контур в рассматриваемой системе представляет собой астатический регулятор, а внешний – статический. Поэтому во внутреннем контуре в установившемся режиме рассогласование равно нулю, а во внешнем приходится иметь дело со статической ошибкой

$$\Delta V_{\infty} = \frac{W(V_3) - f_0}{K\alpha = \beta}.$$

В качестве примера на *рис. 3.в* показаны результаты расчета статической ошибки для электропоезда ЭР12 на различных уклонах. Эти данные подтверждены при испытаниях поезда.

5. Практическое использование и развитие системы

В первую очередь внедрение рассматриваемых систем автоматики целесообразно на мотор-вагонных электропоездах (пригородное сообщение, метро, трамвай) и на электровозах для пассажирских поездов. В последнем случае существенно облегчается для машиниста режим ведения поезда – количество переключений контролера сокращается в 4-8 раз. Поскольку скорость движения пассажирских поездов имеет тенденцию к росту, то для времени, когда поезд движется в условиях ограничения, тоже растет. Поэтому система стабилизации скорости должна быть предусмотрена на всех электровозах для пассажирских поездов.

Электропоезда пригородного сообщения и метро обращаются на участках с короткими перегонами. Однако, современные электропоезда имеют высокое пусковое ускорение – поэтому примерно на половине перегонов приходится ограничивать их скорость. Кроме того, в пригородном сообщении на железных дорогах СССР по-

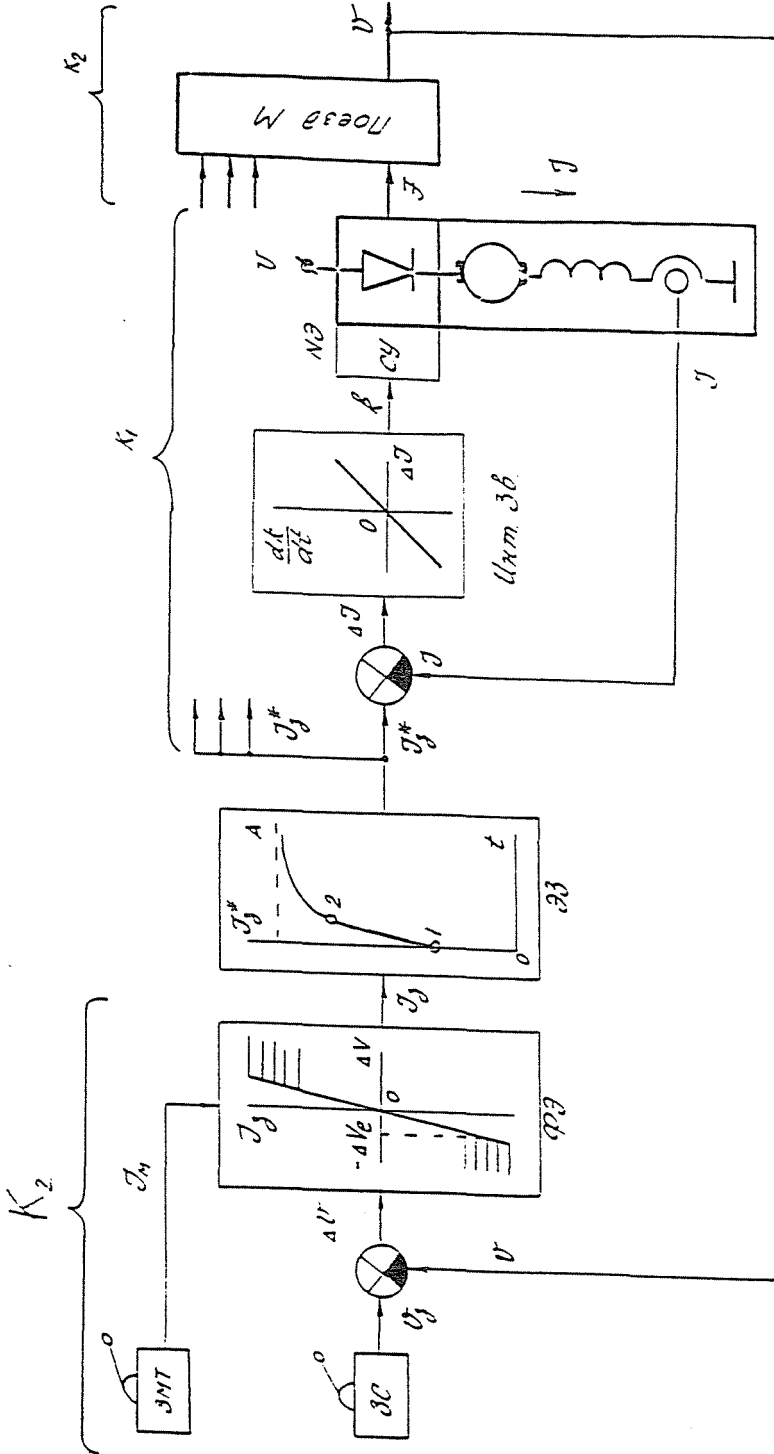


Рис. 2.

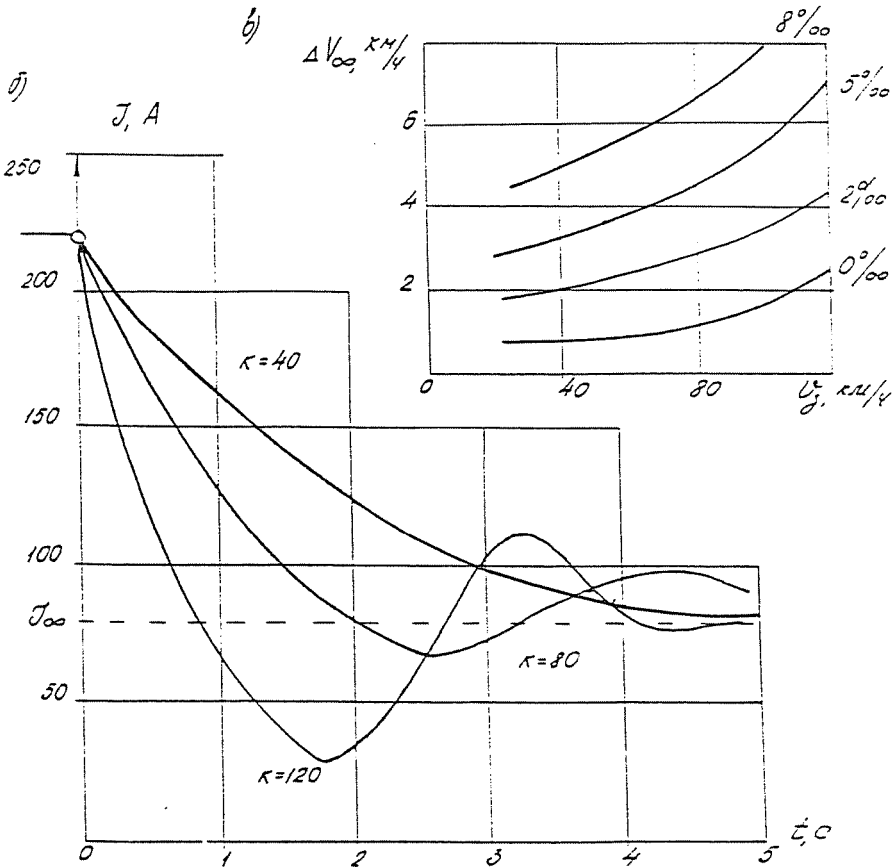
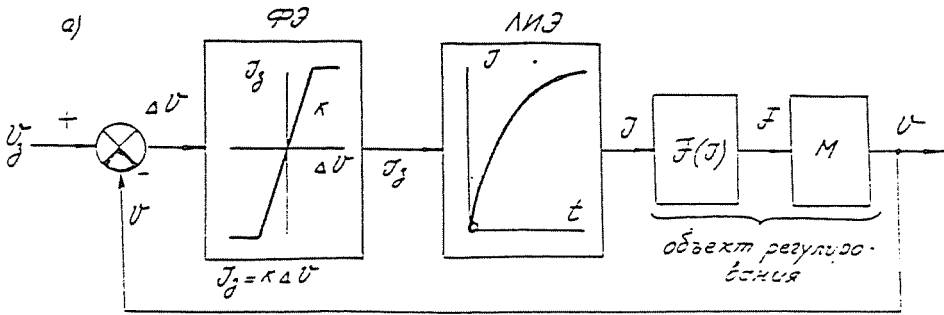


Рис. 3.

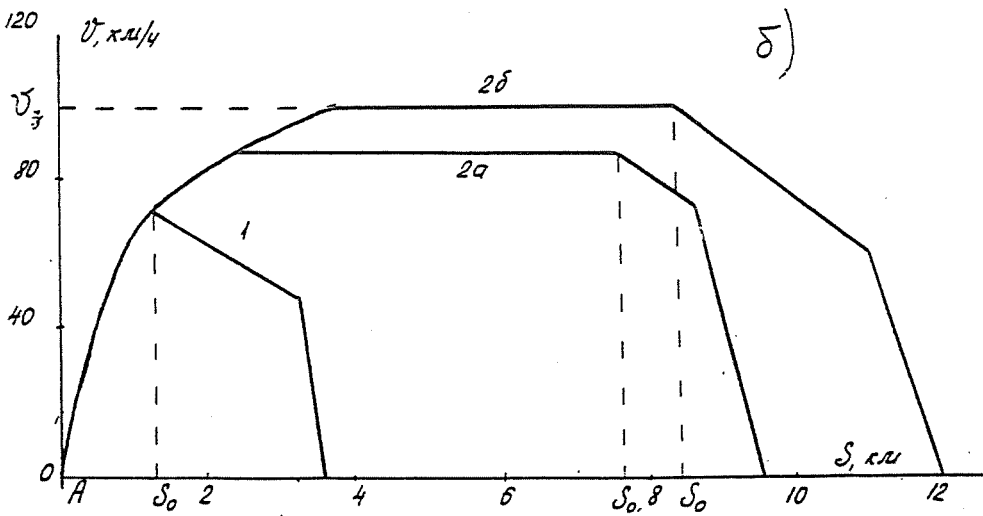
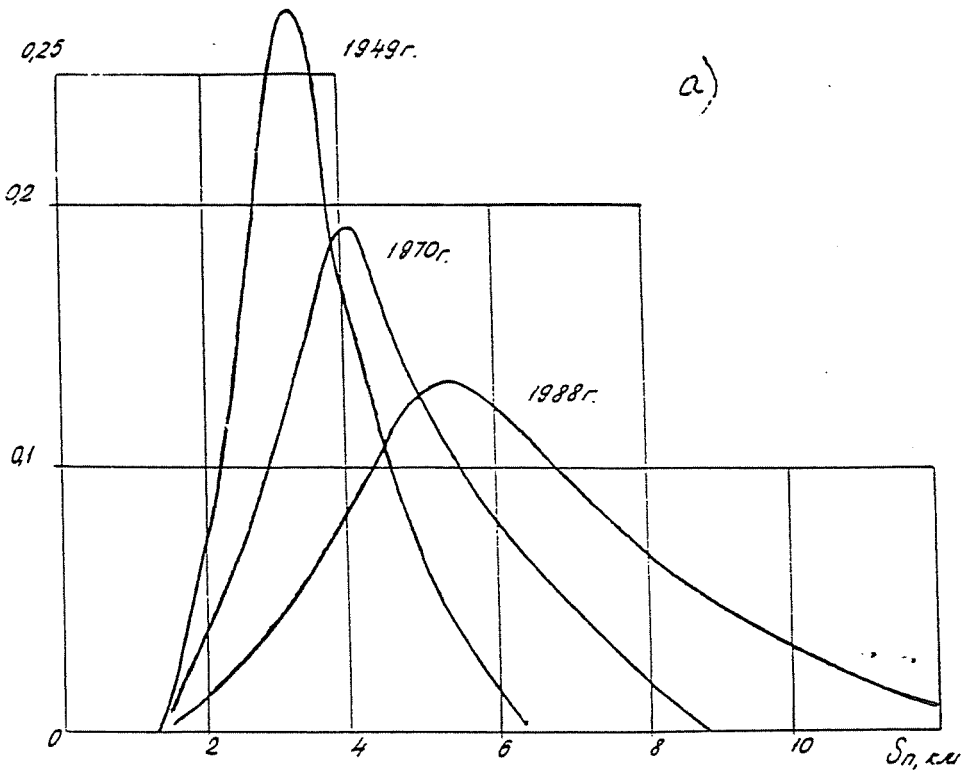


Рис. 4.

лучает распространение зонный график движения, когда отдельные поезда часть платформ проходят без остановки. При этом длина перегона существенно возрастает. В качестве примера на *рис. 4. а* показано изменение распределения длин перегонов S_p на одном из направлений Московского узла за период 1949–88 гг. Если при коротких перегонах (до 4–5 км) оптимальным является режим движения с фазами разгона, выбега и торможения (кривая 1 на *рис. 4.б*, то при более длинных перегонах в оптимальном режиме появляется фаза движения с постоянной скоростью (кривая 2 на *рис. 4.б*) – даже при отсутствии ограничений.

Такой режим практически может быть реализован при наличии систем стабилизации скорости. При этом для каждого перегона заранее рассчитывают и записывают в режимную карту для машиниста значение скорости V_3 и координату S_0 отключения тяговых двигателей и перехода на выбег.

Дальнейшее развитие рассмотренного принципа автоматизации связано с переходом к системе типа “автомашинист”, в которой параметры V_3 и S_0 определяются автоматически в бортовом вычислительном устройстве на основе заранее заданного времени t_b прибытия на станцию Б. Способы решения этой задачи относятся к области оптимизации режима движения, но реализация оптимального режима сводится к реализации ограничений по току и скорости, т.е. ограничивается функциями рассмотренной системы.

Важное усовершенствование системы связано также с возможностью автоматического задания по току I_3 . Эта задача решена на новых электропоездах в СССР путем применения приборов, измеряющих нагрузку от кузова на тележки вагона, что позволяет учесть наполнение вагона пассажирами. Более полное решение задачи получается при учете конкретных условий сцепления колеса с рельсами, что возможно при контроле величины упругого скольжения.

8. Выводы

Развитие систем автоматизации электровозов и электропоездов определяется регулировочными способностями тяговых электроприводов. Применение электроприводов с тиристорными преобразователями обеспечивает плавное экономичное регулирование двигателей и делает целесообразным автоматизацию управления поездом по принципу задания ограничений по току и скорости. При этом существенно облегчается работа машиниста и обеспечивается воз-

возможность дальнейшего развития систем автоматики путем перехода к системе автоведения типа "автомашинист". Эта задача решается путем наложения на предложенную систему дополнительного контура регулирования по времени.

Литература

1. ГИМЕНЕВ, В. И., ТРАНТМАН, Л. М.: Подвижной состав электрифицированных железных дорог. М.: *Транспорт*, 1980.
2. ФЕОКТИСТОВ, В. Р.: Расчет режимов электропривода, регулируемого микропроцессором. *Известия АН СССР, серия "Энергетика и транспорт"*, 1981, No. 3.
3. ФЕОКТИСТОВ, В. Р.: Совместный расчет электромагнитных и механических процессов в системах авторегулирования электроподвижного состава. *Электромеханика*, 1982, No. 1.
4. ФЕОКТИСТОВ, В. Р. et al.: Динамические процессы при автоматической стабилизации скорости мотор-вагонных поездов со ступенчатым регулированием. *Известия АН Латвийской ССР, серия физических и технических наук*, 1988, No. 1.
5. HORVÁTH, K.: Über die Bedeutung des Ruches und der zeitlichen Änderung der Beschleunigung der Schienenfahrzeuge. *Periodica Politechnica TV Budapest*, 1973, Vol. 1, No. 1.
6. БАСАРИН, А. В., НОВИКОВ, В. А., СОКОЛОВСКИ, Г. Г.: Управление электроприводами. Л.: *Энергоиздат*, 1982.

Адрес:

Московский институт инженеров
железнодорожного транспорта,
Москва