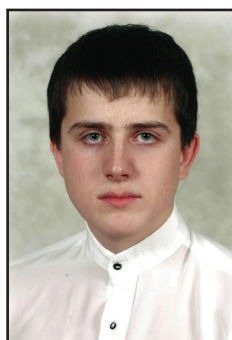


Учет ограничений по продольной динамике при регулировании пускового режима электропоездов



Валерий ФЕОКТИСТОВ
Valery P. FEOKTISTOV

Алексей НЕВИНСКИЙ
Aleksei V. NEVINSKY



Дмитрий НАЗАРОВ
Dmitry V. NAZAROV

Феоктистов Валерий Павлович – доктор технических наук, профессор Московского государственного университета путей сообщения (МИИТ), Москва, Россия.
Невинский Алексей Владимирович – кандидат технических наук, ведущий специалист ООО «Бомбардье Транспортейшн (Рус)», Москва, Россия.
Назаров Дмитрий Валерьевич – аспирант МИИТ, Москва, Россия.

Accounting for Limitations of Longitudinal Dynamics in Regulation of Electric Train Startup Mode

(текст статьи на англ. яз. – English text of the article – p. 98)

Применение плавного бесконтактного регулирования для электропоездов требует управления тяговым приводом с учетом ограничений по продольной динамике, то есть по интенсивности нарастания силы тяги ускорения поезда при его трогании. Эта задача решается в системе управления с помощью задающего элемента, реализующего ограничения по интенсивности нарастания ускорения. Приведена блок-схема, обеспечивающая реализацию этого критерия на цифровых элементах.

Ключевые слова: железная дорога, продольная динамика, пусковой режим, электропоезд, тяговый электропривод.

При автоматизации тяговых электроприводов пассажирского подвижного состава необходимо учитывать критерий по воздействию ускорения и замедления поезда на пассажиров. Это особенно важно для мотор-вагонных электропоездов пригородного сообщения и поездов метро, поскольку здесь сложилась четкая тенденция к снижению тары вагонов и повышению мощности тяговых электродвигателей. В эксплуатации наблюдается также увеличение заполнения вагонов пассажирами, но одновременно повышается неравномерность заполнения по длине состава, что может быть учтено весовыми датчиками (авторегим), установленными на каждой тележке.

Существенный момент в регулировании электропоездов – обеспечение синхронного управления моторными вагонами. Это происходит при минимуме продольных усилий F_A в автосцепке поезда, что соответствует критерию

$$F_{Amax} \rightarrow \min(0 < t < t_{\Pi}) \quad (1)$$

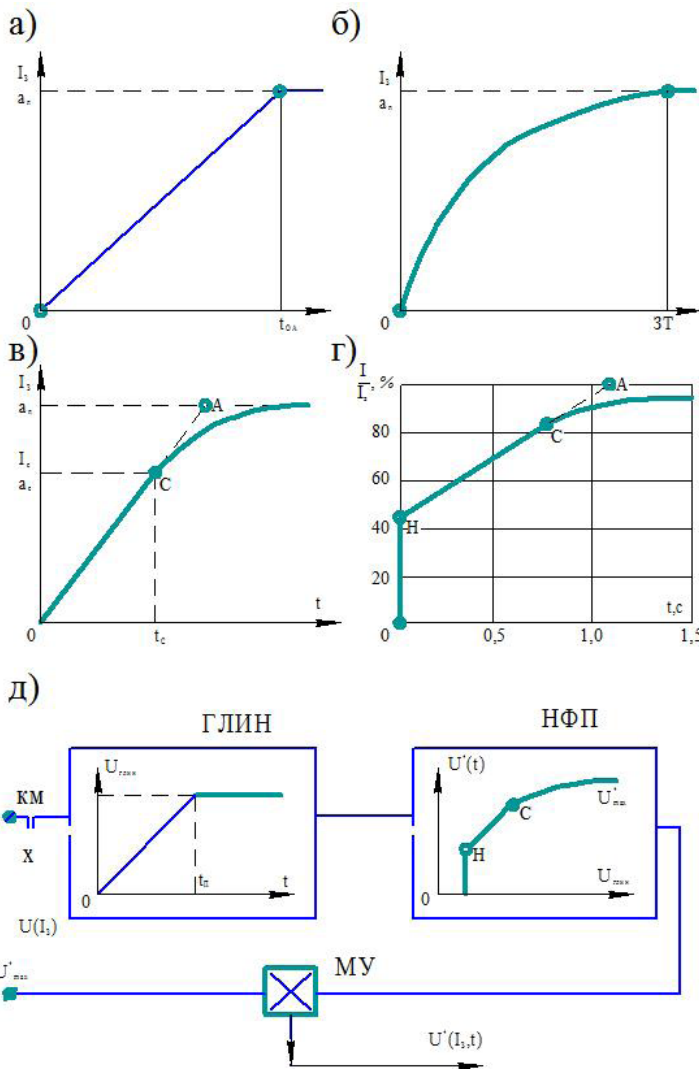


Рис. 1. Кривые заданного переходного процесса регулирования тока: а, б, в – линейный, экспоненциальный и комбинированный законы изменения тока; г – кривая изменения тока для электропоезда ЭДб; д – устройство для генерации заданной кривой изменения тока.

где t_n – длительность переходного процесса.

Можно ввести также интегральный критерий

$$\int_0^{t_n} F_A(t) dt \rightarrow \min.$$

Причем в случае идеальной синхронизации оба критерия принимают нулевое значение.

При ступенчатом регулировании [1] идеальная синхронизация невозможна. При плавном регулировании можно так отладить систему синхронного управления моторными вагонами, чтобы каждый из этих критериев стремился к нулю. Рассмотрим это на примере мотор-вагонного поезда, у которого вагоны из-за различного заполнения их пассажирами имеют разные массы M_1, M_2, \dots, M_N . Тогда при

помощи авторежимных устройств можно задать для каждого моторного вагона индивидуальные уставки пускового или тормозного тока $I_{31}, I_{32}, \dots, I_{3N}$, пропорционально вагонной массе. Если каждый вагон движется не в составе поезда, а самостоятельно, получим для него продольные ускорения

$$a_i = \frac{F_{3i} - W_i}{M_i(1 + \gamma)}, \quad (2)$$

где F_{3i} – сила тяги, соответствующая току I_{3i} ; W_i – сопротивление движению; γ – коэффициент инерции вращающихся масс.

Поскольку для электропоездов $F_{3i} \gg W_i$ и $F_{3i} \cong I_{3i}$, то на основе (2) получим равенство ускорений вагонов

$$a_1 = a_2 = \dots = a_n, \quad (3)$$





что эквивалентно условию минимизации, т. е. равенства нулю обоих введенных выше критериев, которые в данном случае оказываются непротиворечивыми. Из (3) следует, что, поскольку вагоны поезда, не сцепленные между собой, движутся с одинаковыми продольными ускорениями, то и в составе поезда будет обеспечен такой же режим, то есть при одинаковом их ускорении усилия в автосцепках будут равны нулю.

Минимизация введенных критериев обеспечена в квазистационарном режиме постоянства токов двигателей при $I_1 = I_{31}; I_2 = I_{32}; \dots; I_n = I_{3n}$, что необходимо обеспечить и в переходных режимах изменения сил тяги и торможения, наиболее характерным из которых является режим включения тяговых двигателей при трогании поезда с последующим переходом к установившемуся режиму $I_i = I_{3i}$ [2]. Анализ систем показывает, что здесь возможны три типа кривых переходов к заданному значению тока (рис. 1а), с экспоненциальным нарастанием тока (рис. 1б), линейным нарастанием и сглаживанием перехода к квазиустановившемуся режиму по экспоненте (рис. 1в).

Линейное изменение тока характеризуется постоянством производной $\frac{di}{dt}$ и,

следовательно, $\frac{dF}{dt}$, что эквивалентно

постоянству интенсивности нарастания ускорения. Минимально допустимое время перехода к заданному току равно

$$\Delta t_{0A} \cong \frac{F}{Mh} = \frac{a_n}{h}, \quad (4)$$

где a_n – пусковое ускорение поезда (обычно $0,8-1,2 \text{ м/с}^2$);

h – предельно допустимое значение интенсивности изменения ускорения, причем имеем

$$h \leq (0,5 \div 0,7) \text{ м/с}^3. \quad (5)$$

Недостаток линейного закона состоит в резком переходе к квазистационарному режиму в точке А, где $\frac{dh}{dt} = \infty$.

В то же время в ряде работ по продольной динамике предлагается нормировать и вторую производную от ускорения,

ограничив ее предельным значением:

$$\dot{h} = \frac{dh}{dt} \leq (1 \div 1,5) \text{ м/с}^4. \quad (6)$$

Это возможно при экспоненциальном нарастании тока

$$I(t) = I_3(1 - e^{-\frac{t}{T}}). \quad (7)$$

При этом постоянную времени T экспоненты можно определить из условия

$$T \geq \frac{I_3}{M_h} \cdot \frac{dF}{dI_0}. \quad (8)$$

Хотя переход к квазистационарному режиму выполняется плавно, недостаток экспоненциального закона проявляется в слишком большой длительности переходного процесса, которая при прочих равных условиях примерно в 3 раза больше, чем при линейном законе. Недостаток может устранить применение комбинированного закона (рис. 1в), который на начальном этапе переходного процесса будет линейным, а на заключительном – экспоненциальным. Для определения координаты точки сопряжения t_c и постоянной экспоненты воспользуемся условием (5) и (6), в результате чего получим систему уравнений, решение которой дает

$$\left(\begin{array}{l} a_c = a_n - \frac{h^2}{h} \\ T = \frac{h}{h} \end{array} \right). \quad (9)$$

Таким образом, переходную кривую по рис. 1в с параметрами по выражению (9) следует использовать как заданную кривую переходного процесса, реализуемого системой авторегулирования моторного вагона. При ее реализации с помощью силового исполнительного элемента – автономного инвертора или импульсного преобразователя встречаемся с трудностью регулирования тока в начальный момент, поскольку обычно силовые преобразователи имеют ограничения по нижнему диапазону регулирования напряжения (около 4%).

Однако в регулировании силы тяги с нуля нет необходимости, ибо при трогании электропоезда с импульсным регулированием может быть допущен на-

чальный скачок силы тяги и ускорения, примерно соответствующий маневровой позиции электропоезда с контакторно-реостатным регулированием.

Поэтому можно допустить начальный скачок ускорения

$$a_0 = (0,2 \div 0,25) \text{ м/с}^2, \quad (10)$$

которому отвечает начальная сила тяги моторного вагона

$$F_0 = M(1+\gamma)a_0 + W_0 \approx M(1+\gamma)a_0. \quad (11)$$

С учетом этого заданная кривая переходного процесса приобретает вид по рис. 1г, а ее параметры могут быть вычислены по формулам

$$\left(\begin{array}{l} T = \frac{h}{h'} \\ I_c = I_3 - \frac{hTM(1+\gamma)}{\frac{dF}{dI}} \\ t_c = \frac{\frac{dF}{dI}(I_3 - I_0) - hTM(1+\gamma)}{h'TM(1+\gamma)} \end{array} \right). \quad (12)$$

На рис. 1г показана эта кривая, рассчитанная для электропоезда ЭД6.

При использовании кривых рассмотренного типа в любой момент переходного процесса сохраняется пропорциональность значений силы тяги отдельных моторных вагонов их массам, вследствие чего и в переходных режимах достигается выполнение условий синхронизации. То есть, в переходных режимах регулирования синхронизация управления вагонами обеспечивается путем выбора одинаковых длительностей процесса перехода к квазистационарному режиму. Из условия одинаковости времен переходных процессов у всех вагонов поезда следует, что определение параметров кривой по рис. 1г следует проводить так:

– заранее в процессе проектирования системы рассчитывается кривая переходного процесса для номинального значения массы вагона;

– при каждом включении тяговых двигателей в соответствии с фактической массой вагона, косвенно измеряемой по показаниям весовых датчиков в центральном рессорном подвешива-

нии, пропорционально изменяют параметры I_a , I_c и t_{nc} .

Счетно-решающее устройство для генерации этой кривой показано на рис. 1д. Оно содержит генератор линейного изменяющегося в функции времени напряжения (ГЛИН), на управляющий ход которого поступает сигнал запуска от контакта контроллера машиниста КМ, замкнутого на всех позициях, кроме нулевой. Выходной сигнал ГЛИН поступает на нелинейный функциональный преобразователь НФП, моделирующий кривую по рис. 1г. Выходная величина НФП, то есть $u^*(t)$, перемножается в множительном устройстве с величиной $u(I_3)/U_{\max}^*$, пропорциональной заданному пусковому (тормозному току) I_3 , причем U_{\max} – предельное значение выходного напряжения НФП, то есть $u^*(t)$ при $t \rightarrow \infty$. Выходная величина множительного устройства пропорциональна при этом относительно кривой по рис. 1г с учетом массы вагона.

Выводы. Рассмотренное устройство по рис. 1д рекомендуется использовать в составе задающего элемента в системе автоматического регулирования тягового электропривода [4]. Оно может быть выполнено на микросхемах аналогового типа, но сейчас целесообразней цифровой принцип реализации [5, 6], в том числе программным способом на бортовом микропроцессоре.

ЛИТЕРАТУРА

1. Плакс А. В. Система управления ЭПС. – М.: УМЦ ЖДТ, 2005. – 360 с.
2. Автоматизация электрического подвижного состава / Под ред. А. Н. Савоськина. – М.: Транспорт, 1991. – 311 с.
3. Horvath K. Über die Bedeutung des Ruckes und zeitlichen Änderung der Beschleunigung der Schienenfahrzeuge. – Periodica Politechnica. Technical University Budapest, 1973, V. 1, № 1, pp. 23–27.
4. Феоктистов В. П. Системы регулирования режимов работы электропоездов постоянного тока с импульсными преобразователями / Дис... док. техн. наук. – М.: МИИТ, 1982. – 355 с.
5. Катан Б. М., Сташин В. В. Основы проектирования микропроцессорных систем автоматики. – М.: Энергоатомиздат, 1987. – 304 с.
6. Ефремов И. С. Калиниченко А. Я., Феоктистов В. П. Цифровые системы управления ЭПС с тиристорными импульсными регуляторами. – М.: Транспорт, 1988. – 253 с.

Координаты авторов: Феоктистов В. П. – +7 (495) 684-2457, Невинский А. В. – +7 (495) 775-18-30, Назаров Д. В. – dmitry.nazarov.1988@mail.ru.

Статья поступила в редакцию 28.11.2014, принята к публикации 02.03.2015.



ACCOUNTING FOR LIMITATIONS OF LONGITUDINAL DYNAMICS IN REGULATION OF ELECTRIC TRAIN STARTUP MODE

Feoktistov, Valery P., Moscow State University of Railway Engineering (MIIT), Moscow, Russia.
Nevinsky, Aleksei V., Bombardier Transportation (RUS), Moscow, Russia.
Nazarov, Dmitry V., Moscow State University of Railway Engineering (MIIT), Moscow, Russia.

ABSTRACT

Application of non-contact soft regulation for electric train requires control of traction drive taking into account the restrictions on longitudinal dynamics, i.e. the intensity of increase in traction of train's acceleration

when it starts moving. This task is solved in a control system using a master element that implements restrictions on the intensity of acceleration growth. A block diagram is shown that provides the implementation of this criterion on digital elements.

Keywords: railway, longitudinal dynamics, startup mode, electric train, traction drive.

Background. In automation of traction drives of passenger electric rolling stock it is necessary to consider a criterion for the effects of acceleration and deceleration of the train on passengers. This is especially important for motor-car electric commuter trains and subway trains, as here a clear trend to decrease dead weight of cars and to increase the power of traction motors has been formed. Under operation mode it is possible to observe an increase in cars' filling with passengers, but at the same time there is an increase in uneven filling along the length of a train, which can be taken into account by weight sensors (auto mode) mounted on each bogie.

Objective. The objective of the authors is to investigate limitations of longitudinal dynamics, applicable to regulation of electric train startup mode.

Methods. The authors use comparative method, analysis, diagram construction, evaluation approach.

Results. The essential point in the regulation of electric trains is provision of synchronous operation of motor cars. This occurs in case of minimum longitudinal forces F_A in an automatic coupler of a train, which corresponds to the criterion

$$F_{Amax} \rightarrow \min(0 < t < t_p) \quad (1)$$

where t_p is duration of transition process.

It is possible to introduce an integral criterion

$$\int_0^{t_p} F_A(t) dt \rightarrow \min.$$

And in case of perfect synchronization both criteria become zero.

At step regulation [1] perfect synchronization is impossible. In modulating control, it is possible to debug a system of synchronous control of motor cars in such a way that each of these criteria tends to zero. Let's consider it using as an example motor-wagon train, the cars of which because of different filling with passengers have different masses M_1, M_2, \dots, M_N . Then using auto mode devices it is possible to set for each car individual settings of starting or braking current $I_{31}, I_{32}, \dots, I_{3N}$, proportional to the mass of the car. If each car is not moving in the train, but on its own, we get longitudinal acceleration for it

$$a_i = \frac{F_{3i} - W_i}{M_i(1 + \gamma)}, \quad (2)$$

where F_{3i} is traction force, corresponding to the current I_{3i} ; W_i is resistance to motion; γ is inertia coefficient of rotating masses.

As for electric trains $F_{3i} \gg W_i$ and $F_{3i} \equiv I_{3i}$, then on the basis of (2) we get an equation of cars' acceleration

$$a_1 = a_2 = \dots = a_N, \quad (3)$$

that is equivalent to the minimization, i.e. both criteria introduced above, which in this case are consistent, are equal to zero. From (3) it follows that, since cars, not coupled with each other, move with the same longitudinal accelerations, then in the train the same mode will be provided, i.e. with the same acceleration forces in their automatic couplers will be zero.

Minimization of introduced criteria is provided in the quasi-stationary mode of constant current in the motor when

$$I_1 = I_{31}, I_2 = I_{32}, \dots, I_n = I_{3n}$$

which should be ensured also in transient modes of changes in traction and braking forces, most characteristic of which is the switch-on mode of traction motors when a train starts moving with a subsequent transition to the steady mode $I_i = I_{3i}$ [2]. System analysis shows that there are three types of transition curves to the specified value of the current (Pic. 1a), with an exponential current rise (Pic. 1b), linear rise and smoothing the transition to the quasi-steady mode exponentially (Pic. 1c).

Linear current change is characterized by constancy of derivative $\frac{di}{dt}$, and hence, $\frac{dF}{dt}$, which

is equivalent to constancy of intensity of acceleration rise. The minimum allowable time of transition to the given current is equal to

$$\Delta t_{0A} \cong \frac{F}{Mh} = \frac{a_s}{h}, \quad (4)$$

where a_s is startup acceleration of a train (usually 0,8-1,2 m/s²);

h is maximum permissible value of intensity of acceleration change, and

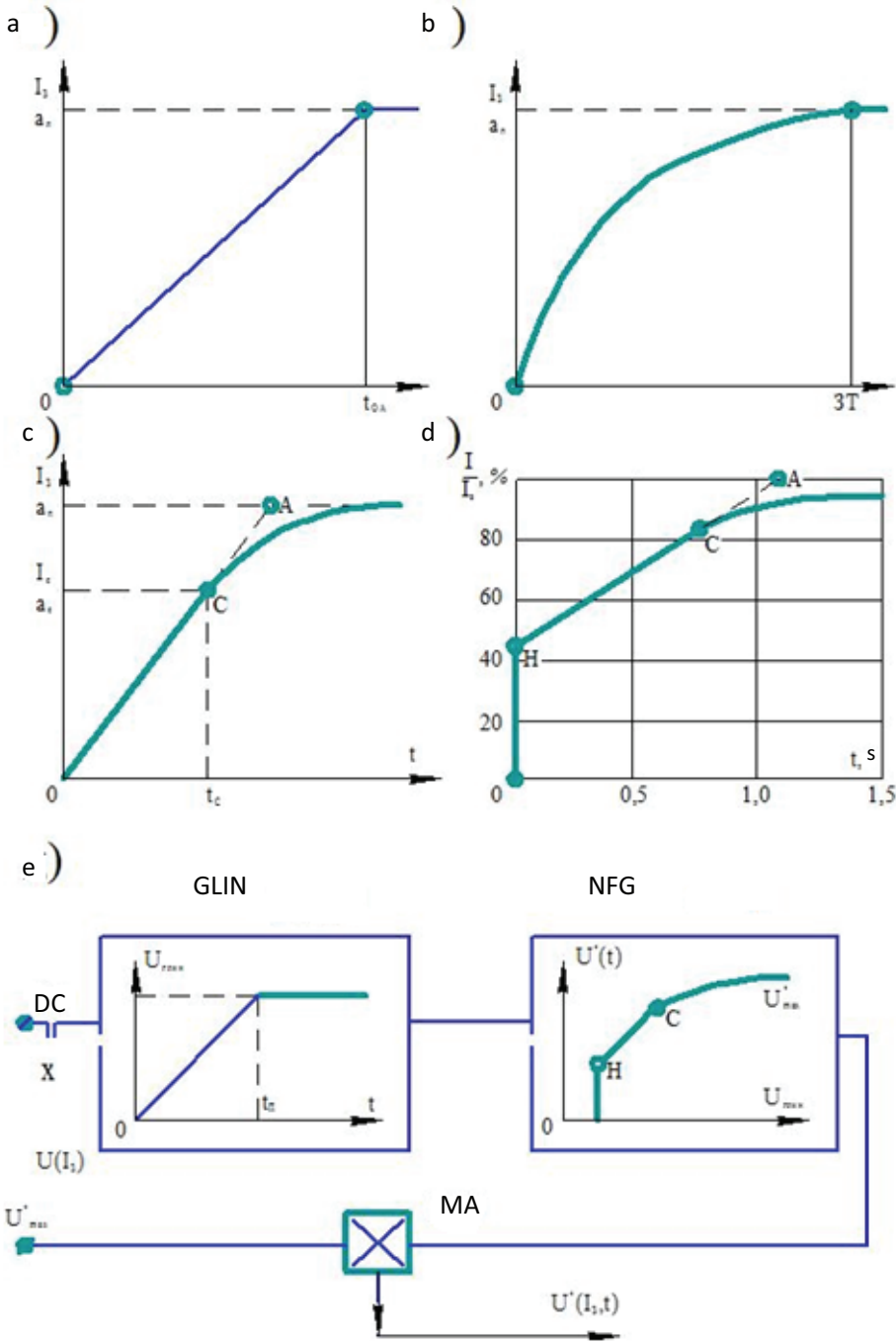
$$h \leq (0,5 \div 0,7) \text{ m/s}^3. \quad (5)$$

The disadvantage of a linear law is a sharp transition to a quasi-stationary mode at point A,

where $\frac{dh}{dt} = \infty$. At the same time in a number of

works on the longitudinal dynamics it is proposed to normalize the second derivative of acceleration, restricting its limiting value:

$$h = \frac{dh}{dt} \leq (1 \div 1,5) \text{ m/s}^4. \quad (6)$$



Pic. 1. The curves of a given transition process of current control, where a, b, c – linear, exponential and combined laws of changes in the current; d – a curve of change in current for electric train ED6; e – a device to generate a given curve of change in current.

This is possible with an exponential current rise

$$I(t) = I_3(1 - e^{-\frac{t}{T}}). \quad (7)$$

Thus the time constant T of the exponential function can be determined from a condition

$$T \geq \frac{I_3}{M_h} \cdot \frac{dF}{dI_0}. \quad (8)$$

Although the transition to a quasi-stationary mode is performed smoothly, the disadvantage of an exponential law is manifested in the very long duration of the transition process, which is *ceris paribus* approximately 3-fold greater than with the linear law. The disadvantage can be eliminated with the use of combined law (Pic. 1c), which at the initial stage of the transition process



is linear, and at the final – exponential. To determine the coordinates of the coupling point t_c and constant exponential function we will use the condition (5) and (6), resulting in a system of equations which solution gives

$$\begin{cases} a_c = a_n - \frac{h^2}{h} \\ T = \frac{h}{h} \end{cases} \quad (9)$$

Thus, the transition curve of Pic. 1c with the parameters of expression (9) should be used as a given curve of the transition process, implemented by a system of auto regulation of a motor car. With its implementation using the power actuator – autonomous inverter or pulse converter we encounter difficulty in regulation of current in the initial moment, since usually power converters are limited in the lower range of voltage control (about 4%).

However, there is no need for regulation of traction from the ground up, because when an electric train starts moving with pulse control initial step of traction force and acceleration can be admitted, roughly corresponding to the shunting position of an electric train with contactor- rheostat control.

Therefore, we can assume the initial acceleration step

$$a_0 = (0,2 \div 0,25) \text{ m/s}^2, \quad (10)$$

which corresponds to the initial traction force of a motor car

$$F_0 = M(1+\gamma)a_0 + W_0 \approx M(1+\gamma)a_0, \quad (11)$$

Taking this into account given curve of the transition process takes the form of Pic. 1d, and its parameters can be calculated by the formula

$$\begin{cases} T = \frac{h}{h} \\ I_c = I_3 - \frac{hTM(1+\gamma)}{\frac{dF}{dI}} \\ t_c = \frac{\frac{dF}{dI}(I_3 - I_0) - hTM(1+\gamma)}{hTM(1+\gamma)} \end{cases} \quad (12)$$

Pic. 1d shows this curve, calculated for the electric train ED6.

When using curves of the considered type in any moment of the transition process proportionality of traction force values of certain motor cars remains to their masses, due to which in transient conditions the implementation of synchronization is achieved. That is, in transient modes of synchronization regulation of cars' control is provided by selecting the same duration of transition to a quasi-stationary mode. From the condition of

similarity of transition processes times in all train cars, it follows that the definition of parameters of the curve according to Pic. 1d should be conducted as follows:

– in advance during designing of the system a curve of the transition process is calculated for nominal values of car's mass;

– in every switching on of traction motors in accordance with the actual weight of the car, indirectly measured by indications of weight sensors in central spring suspension, proportionally change parameters I_{a1} , I_c and t_{nc} .

Computing device for the generation of this curve is shown in Pic. 1e. It contains a generator of linearly changing voltage in a function of time (GLIN), a control course of which receives a startup signal from the contact of the driver's controller driver (DC) closed at all positions except zero. The output signal of GLIN goes to the nonlinear function generator (NFG) modeling a curve according to Pic. 1d. The output value of NFG, that is $u^*(t)$ is multiplied in a multiplier with a value $u(I_3)/U_{\max}^*$ proportional to the set starting (braking current) I_3 , and U_{\max}^* is a limit value of the output voltage of NFG, i.e. $u^*(t)$ at $t \rightarrow \infty$. The output value of the multiplier is proportional relative to the curve according to Pic. 1d taking into account the weight of the car.

Conclusions. Considered device shown in Pic. 1e is recommended to be used as a part of a driving element in the system of automatic control of traction drive of an electric train [4]. It can be manufactured using electronic chips of analog type but now digital implementation principle [5, 6] is more expedient, particularly using software for on-board microprocessor.

REFERENCES

1. Plaks, A. V. The control system of ERS [Sistema upravlenija EPS]. Moscow, UMC ZhDT, 2005, 360 p.
2. Automation of electric rolling stock [Avtomatizacija elektricheskogo podvizhnogo sostava]. Ed. by Savoskin, A. N. Moscow, Transport publ., 1991, 311 p.
3. Horvath K. Über die Bedeutung des Ruckes und zeitlichen Änderung der Beschleunigung der Schienenfahrzeuge. *Periodica Politechnica*, Technical University Budapest, 1973, V. 1, № 1, pp. 23-27.
4. Feoktistov, V.P. Systems of control modes of DC electric trains with pulse converters. D. Sc. (Eng.) thesis [Sistemy regulirovanija rezhimov raboty jelektripoezdov postojannogo toka s impul'snymi preobrazovateljami / Dis... dok. tehn. nauk]. Moscow, MIIT, 1982, 355 p.
5. Katan, B.M., Stashin, V.V. Basics of designing of microprocessor automation systems [Osnovy proektirovanija mikroprocessornyh sistem avtomatiki]. Moscow, Energoatomizdat publ., 1987, 304 p.
6. Efremov, I.S., Kalinichenko, A.Ya., Feoktistov, V.P. Digital control systems of ERS with thyristor switching regulator [Cifrovye sistemy upravlenija JePS s tiristornymi impul'snymi reguljatorami]. Moscow, Transport publ., 1988, 253 p. ●

Information about the authors:

Feoktistov, Valery P. – D.Sc. (Eng.), professor of Moscow State University of Railway Engineering (MIIT), Moscow, Russia, +7 (495) 684-2452.

Nevinsky, Aleksei V. – Ph.D. (Eng.), leasing expert of Bombardier Transportation (RUS), Ltd., Moscow, Russia, +7 (495) 775-18-30.

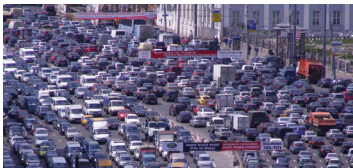
Nazarov, Dmitry V. – Ph.D. student at the department of Electric trains and locomotives of Moscow State University of Railway Engineering (MIIT), Moscow, Russia, dmitry.nazarov.1988@mail.ru

Article received 28.11.2014, accepted 02.03.2015.



ПРОПУСКНАЯ СПОСОБНОСТЬ 102

Эффекты сдвига во времени.



КОНЦЕССИИ 108

Спрос тоже бывает в зоне риска.

ЭФФЕКТИВНОСТЬ 122

ТПС: затраты и окупаемость.



БИЗНЕС-ПЛАН 130

Инструменты под стратегию развития.
И потребности клиента.

ЭКОНОМИКА • ECONOMICS

TRANSPORTATION CAPACITY 102

Effects of time shift.

CONCESSIONS 108

Demand might also enter a risk zone.

EFFICIENCY 122

Traction rolling stock: costs and payback.

BUSINESS PLANNING 130

Instruments to take into account development strategy... and customer demand.

