

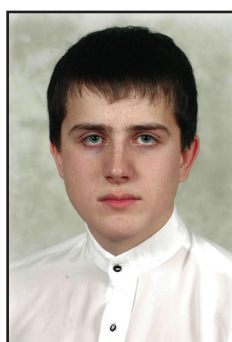


Учет ограничений по продольной динамике при регулировании пускового режима электропоездов



Валерий ФЕОКТИСТОВ
Valery P. FEOKTISTOV

Алексей НЕВИНСКИЙ
Alekssei 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

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

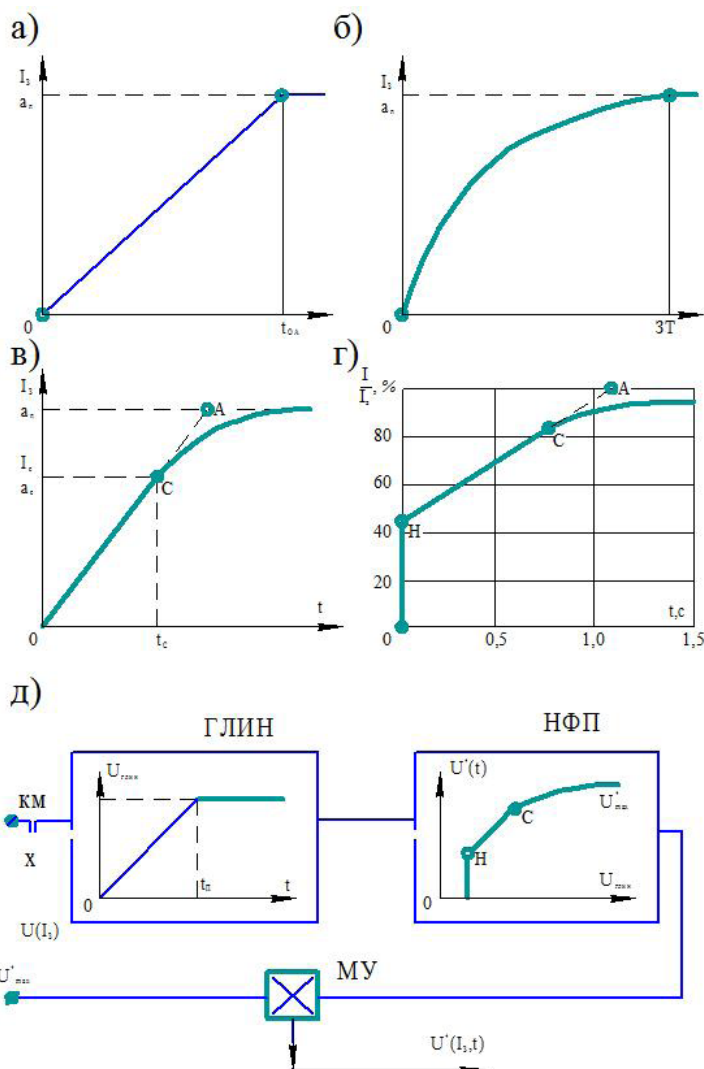


Рис. 1. Кривые заданного переходного процесса регулирования тока: а, б, в – линейный, экспоненциальный и комбинированный законы изменения тока; г – кривая изменения тока для электропоезда ЭД6; д – устройство для генерации заданной кривой изменения тока.

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 установки 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 $F_{3i} \approx I_{3i}$, 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 м/с²);

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

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

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.

