

A. V. Livshits, V. S. Ratushnyak
Irkutsk State Transport University, Irkutsk

V. S. Ratushnyak
Krasnoyarsk Institute of Railway Transport

METHOD OF DETERMINING THE PARAMETERS OF THE DEVICE FOR THE PREVENTION OF ICE FORMATION ON POWER LINES

In Russia, China, Canada and some European countries, the problem of icing wires of power lines in the cold season is relevant. The traditional solution is the thermal method, but its low energy efficiency, laboriousness, risk of damage to the wires contribute to the development of alternative ways to combat icing. Shock-vibration methods are considered the most energy-efficient solution for removing ice from wires. The article proposes a methodology for determining the parameters of the shock principle of action to prevent icing by removing droplets of water before they freeze. Removing water drops is based on creating inertia by «shaking» the wire with a small amplitude relative to the diameter of the wire and sufficient acceleration. Such an effect on the wire is exerted by the inductor system of the device, the elements of which are repelled from each other under the influence of electromagnetic forces arising from the discharge of the energy storage device. The technique is a phased process. Based on an analysis of the parameters of the span and wire, as well as decisions made about the place, the method of mounting the device and its principle of operation, a search is made for the optimal parameters of the impact. Then the calculation of the electrical and mass-dimensional parameters. The article presents the calculation of the installation for a model power transmission span on a reduced scale. The data obtained as a result of calculations by the method can be used to develop a working device.

Overhead transmission lines, icing prevention, inductive electromechanical energy converter, electromechanical method, shock-shaking method, method for determining parameters

УДК 621.3.07

А. С. Анучин, Е. О. Столяров, Д. М. Шпак, Д. К. Сурнин
Национальный исследовательский университет «МЭИ»

Г. Л. Демидова
Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет
информационных технологий механики и оптики

Р. Ахмед
Ноттингемский университет» (Великобритания)

Система подчиненного регулирования с параллельной коррекцией по напряжению выхода понижающего преобразователя постоянного тока

Понижающие преобразователи повсеместно используются в промышленности и на транспорте, а также в системах с возобновляемыми источниками энергии. Однако большинство исследований способов управления такими преобразователями посвящены маломощным системам, работающим в режиме прерывистого тока, или способам, использующим сложный математический аппарат, чувствительный к изменению параметров, не учитывая при этом ограничения тока и внешние возмущения. В данной статье представлен способ подчиненного регулирования понижающего преобразователя постоянного тока, идея которого была взята из теории управления электроприводов и реализована в источнике питания собственных нужд, используемого в вагонах подвижного состава метрополитена. Получены результаты моделирования работы преобразователя с предложенной системой управления с учетом различных возмущений и неточностей датчиков.

Понижающий преобразователь, подчиненное регулирование, непрерывный ток, регулятор тока, регулятор напряжения, положительная обратная связь

Понижающие преобразователи постоянного тока используются для питания светодиодов, в заряжающих устройствах, источниках питания различных типов и др. В настоящее время суще-

ствует множество способов управления понижающими преобразователями, однако все они обладают определенными недостатками. В большинстве из них используются довольно сложные подходы, тогда как эти преобразователи с точки зрения управления описываются уравнениями, подобными уравнениям двигателя постоянного тока [1]–[3]. Многие подходы не берут в расчет ограничение тока [4]–[6]. Некоторые разработаны для режима прерывистого тока, что является лишь частным случаем для относительно маломощных устройств [7]–[9].

Данное исследование было проведено для источника питания собственных нужд поездов московского метро. Топология преобразователя (рис. 1) [10] учитывает несколько специфичных для подобного применения особенностей. Во-первых, входное напряжение изменяется в широких пределах и может меняться достаточно быстро, когда вагон преодолевает неперекрываемый токораздел (участок, где заканчивается сегмент контактного рельса, питаемый от одной тяговой подстанции, и начинается следующий сегмент) или когда поезд начинает рекуперативное торможение. Во-вторых, преобразователь постоянного тока обычно работает в непрерывном проводящем режиме, необходимом, когда входное напряжение близко к выходному. В-третьих, преобразователь обладает мощностью 24 кВт и крайне малым сопротивлением дросселя. Вместе выходной конденсатор и дроссель образуют слабо демпфированный колебательный контур.

При анализе данной топологии было замечено, что по принципу действия понижающий преобразователь постоянного тока похож на двигатель постоянного тока. Дроссель подобен якорю двигателя, выходное напряжение эквивалентно противо-ЭДС машины, а емкость выходного конденсатора – механическому моменту инерции. Таким образом, для понижающего преобразователя можно использовать систему подчиненного регулирования координат для управления выходным напряжением с возможностью ограничивать выходной ток, как это обычно делается в электродвигателях.

Подчиненное регулирование координат для понижающего преобразователя постоянного тока. Математическое описание понижающего преобразователя постоянного тока. Понижающий преобразователь постоянного тока содержит два ключа или ключ и диод, формируя полумост. Конфигурация, показанная на рис. 1, содержит два ключа для реализации двунаправленного потока мощности. Данные ключи управляются с помощью широтно-импульсной модуляции (ШИМ) в комплиментарном режиме, когда некоторая скважность γ применяется к верхнему ключу, а $(1 - \gamma)$ – к нижнему. Для простоты восприятия полумост можно представить как инерционное звено первого порядка. Такая модель с достаточной степенью точности учитывает задержку измерений и задержку расчета системы управления, равную половине периода ШИМ. Напряжение u , формируемое полумостом (рис. 2, функциональная схема системы подчиненного

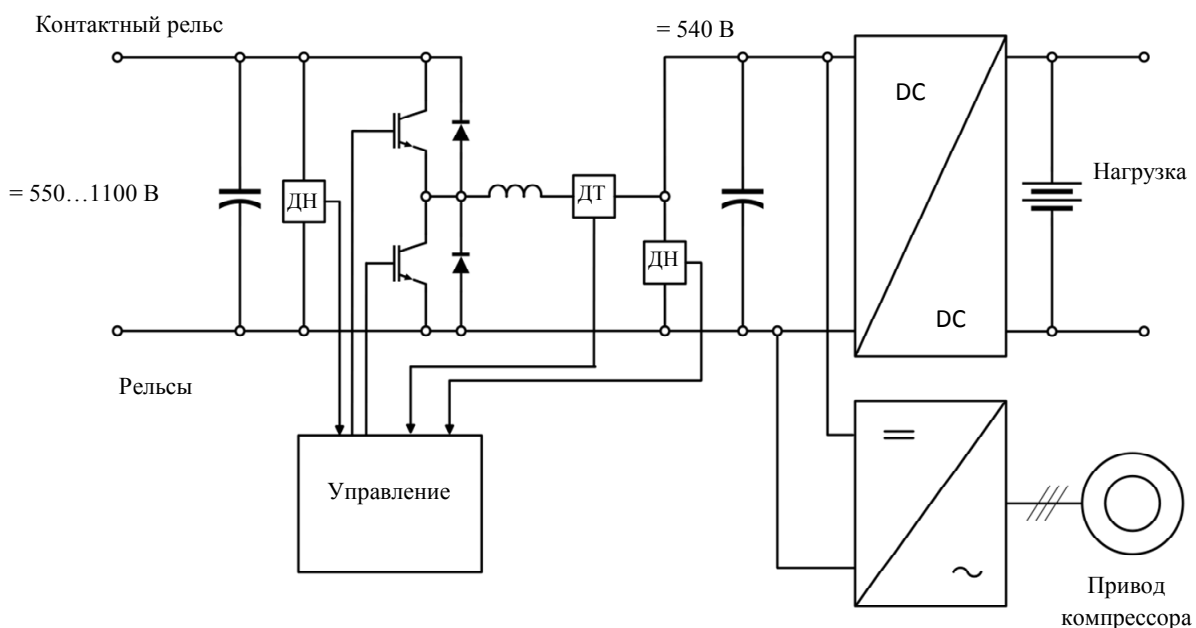


Рис. 1

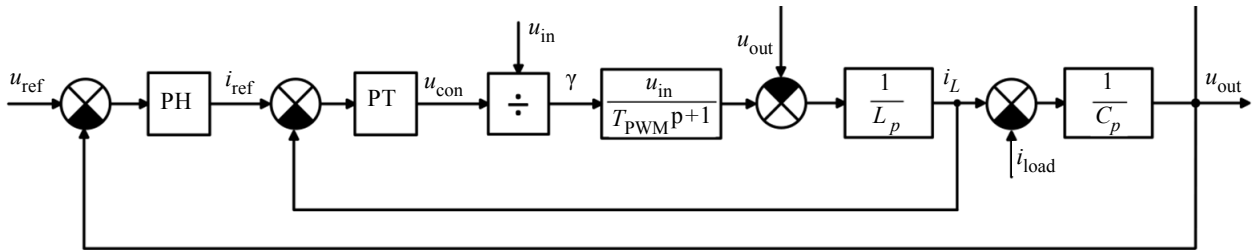


Рис. 2

регулирования), прикладывается к дросселю с одной стороны, а с другой – выходное напряжение u_{out} . Дроссель обладает крайне малым сопротивлением и может быть представлен как интегратор. Вместе дроссель и выходной конденсатор образуют колебательное звено, чья способность к самодемпфированию сильно зависит от сопротивления дросселя и характеристик нагрузки, которая представлена как ток нагрузки i_L . Необходимо учитывать, что для того чтобы получить наибольший КПД, разработчики преобразователей стараются сделать сопротивление дросселя настолько малым, насколько это возможно. Следовательно, демпфирование переходных процессов преобразователя должно обеспечиваться системой управления.

Система управления с подчиненным регулированием координат. В электроприводе для решения описанной проблемы обычно используется подчиненное регулирование координат. Внутренний контур регулирует ток в якоре, а внешний контур – скорость двигателя. В случае понижающего преобразователя внутренний контур регулирует ток дросселя, а внешний – выходное напряжение.

Рассмотрим разомкнутую желаемую передаточную функцию для контура тока:

$$W_{1р.ж}(p) = \frac{1}{2T_{\mu} p(T_{\mu} p + 1)}, \quad (1)$$

где T_{μ} – минимальная постоянная времени, которая может быть выбрана равной периоду ШИМ T_{PWM} .

Передаточная функция регулятора тока (РТ) может быть получена как

$$W_{РТ}(p) = \frac{W_{1р.ж}(p)}{W_{ОРТ}(p)} = \frac{(T_{PWM} p + 1)L p}{2T_{\mu} p(T_{\mu} p + 1)} = \frac{L}{2T_{\mu}}, \quad (2)$$

где $W_{ОРТ}(p)$ – передаточная функция для преобразователя от точки задания напряжения u_{con} до

точки, где получен ток дросселя i_L , в соответствии с рис. 2; L – индуктивность дросселя.

Влияние выходного напряжения на передаточную функцию данной части преобразователя не учитывается.

Полученная передаточная функция (2) регулятора представляет собой пропорциональный регулятор, который обладает статизмом по отношению к возмущающему воздействию выходного напряжения на контур тока. С ростом выходного напряжения пропорциональный регулятор тока будет не в состоянии поддерживать заданное значение тока. Таким образом, необходимо компенсировать влияние выходного напряжения. В теории управления электроприводом подобная компенсация известна как компенсация противо-ЭДС в двигателях постоянного тока или как компенсация эффекта перекрестных связей в двигателях переменного тока. На рис. 3 показана схема системы управления с такой компенсацией, которая имеет положительную обратную связь по выходному напряжению.

Работа этой положительной обратной связи может быть объяснена следующим образом. Если входное напряжение на полумосте то же, что и выходное напряжение, то ток дросселя не изменяется. Это равновесное состояние позволяет пропорциональному регулятору тока работать без внешних возмущений. Еще одна проблема, свойственная пропорциональному регулятору, – это наличие статической ошибки. Она может быть решена введением интегральной составляющей в регулятор тока – однако интегральный коэффициент пропорционален сопротивлению дросселя, которое близко к нулю.

И, наконец, отсутствие интегральной составляющей в регуляторе тока не позволяет регулировать ток или наличие ошибки в измерении входного и/или выходного напряжения. У любого датчика есть свои погрешности усиления и смещения. Например, если измеренное выходное напряжение больше реального, тогда для нулевого задания тока задание напряжения u_{con} полу-

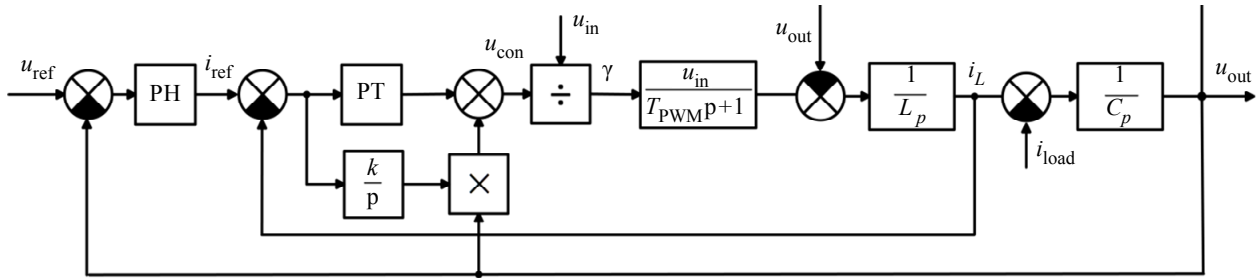


Рис. 3

ченное от положительной обратной связи, будет больше, чем выходное напряжение u_{out} . Тем самым, произойдет перекомпенсация и ток в дросселе начнет расти. Для решения этой проблемы используется коррекция положительной обратной связи. Ее сигнал проходит через множитель, вторым входом которого служит интегратор на входе. Этот интегратор изначально инициализирован значением «1» и изменяет свое значение в зависимости от ошибки по току. Если ошибка по току имеет некую постоянную составляющую, интегратор постепенно подстраивает положительную обратную связь, пока ошибка не станет равной нулю. Коэффициент интегратора подбирался экспериментально, чтобы система достаточно быстро обрабатывала переходные процессы и при этом оставалась устойчивой. Представленная система решает несколько проблем, включая погрешности в датчиках напряжения, влияние мертвого времени, падения напряжения на сопротивлении дросселя и т. д.

Контур тока, настроенный в соответствии с желаемой передаточной функцией $W_{1р.ж}(p)$, имеет собственную передаточную функцию для замкнутой с единичной обратной связью системы, которая может быть упрощена следующим образом, приняв, что $T_{\mu}^2 \approx 0$:

$$W_{к.т}(p) = \frac{1}{2T_{\mu} p (T_{\mu} p + 1) + 1} = \frac{1}{2T_{\mu}^2 p^2 + 2T_{\mu} p + 1} \approx \frac{1}{2T_{\mu} p + 1}$$

Передаточная функция объекта регулирования для регулятора напряжения состоит из передаточной функции регулятора тока и выходного конденсатора, который представлен интегратором:

$$W_{ОРН}(p) = \frac{1}{(2T_{\mu} p + 1) C p}$$

Регулятор напряжения, в свою очередь, использует желаемую переходную функцию с вдвое большими постоянными времени, чем в (1):

$$W_{РН}(p) = \frac{W_{2р.ж}(p)}{W_{ОРН}(p)} = \frac{(2T_{\mu} p + 1) C p}{4T_{\mu} (2T_{\mu} p + 1)} = \frac{C}{4T_{\mu}}$$

где $W_{2р.ж}(p)$ – желаемая передаточная функция с удвоенными постоянными времени по сравнению с $W_{1р.ж}(p)$; C – емкость выходного конденсатора.

Модель системы. Модель системы управления понижающего преобразователя представлена на рис. 4, а. Некоторые ее части были объединены в подсистемы для упрощения восприятия. На рис. 4, б показана модель полумоста (подсистема «Half-bridge»), которая работает со скважностью в качестве задания. Подсистема содержит экстраполятор нулевого порядка для хранения задания без изменения в течение периода ШИМ. Используется центрированная ШИМ, значение таймера которой сравнивается с заданной скважностью для формирования импульсов управления, которые затем умножаются на значение входного напряжения. Выходное напряжение проходит через блок «LC» (рис. 4, в). Этот блок содержит модель LC-фильтра на выходе понижающего преобразователя. Входными сигналами этого блока являются напряжение и ток нагрузки, форма которого задается в блоке «Load profile». Выходные сигналы представлены как выходное напряжение «Vout» и ток дросселя «I». Последняя используемая подсистема представляет собой блоки датчиков напряжения и тока (подсистемы «Vin Sensor», «Vout Sensor» и «Current Sensor»), которые имеют одинаковую структуру, представленную на рис. 4, г. Подсистемы датчиков содержат блок задержки на половину периода ШИМ и коэффициент усиления. Задержка измерения используется для имитации задержки измерения и расчета алгоритмов системы управления в микроконтроллере, который обычно считывает данные с датчиков в середине периода ШИМ, вычисляет управляющее

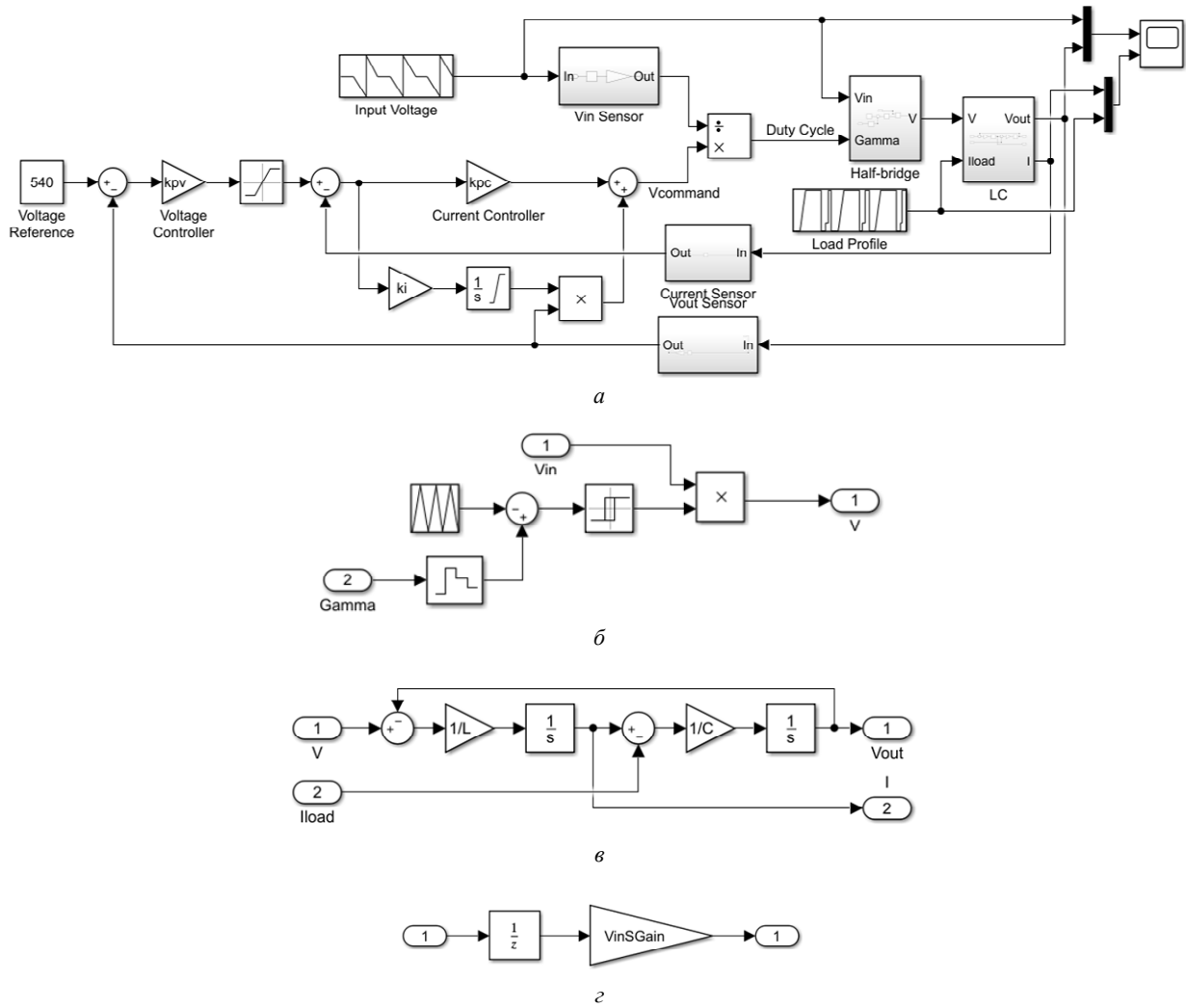


Рис. 4

воздействие и обновляет уставки ШИМ до начала нового периода. Эта задержка используется для центрированной ШИМ, так как пульсирующий ток проходит через свое среднее значение в середине и начале периода ШИМ. Вместе с ШИМ-модулятором (рис. 4, б) эта задержка формирует общее время отклика системы, которое учитывается нестройкой заменой полумоста на инерционное звено, как показано на рис. 2. Коэффициент усиления датчика может использоваться для изучения поведения системы управления в случае неточных измерений. Его изменение помогает увидеть поведение системы в случае недо- или перекомпенсации влияния выходного напряжения.

Система управления содержит контур напряжения с пропорциональным регулятором. Она получает задание и обратную связь и выдает задание тока, ограниченное максимально возможным значением от блока ограничения. Задание тока проходит через пропорциональный регуля-

тор тока. Ошибка на входе регулятора используется для настройки компенсации выходного напряжения. Наконец, задание напряжения делится на входное напряжение для расчета скважности управления понижающего преобразователя постоянного тока.

Результаты моделирования. Параметры модели представлены в табл. 1. Входное напря-

Таблица 1

Параметр	Значение	Единица измерения
Изменение входного напряжения	550...1100	В
Задание выходного напряжения	540	В
Номинальный ток нагрузки	45	А
Индуктивность дросселя	1	мГн
Емкость выходного конденсатора	3300	мкФ
Частота ШИМ	5	кГц

жение изменяется во времени. Оно удерживается на уровне 750 В в течение 100 мс, затем уменьшается до 550 В за 100 мс, затем быстро растет до 950 В за 2 мс (как в случаях, когда поезд перемещается с одного контактного рельса на другой) и, наконец, уменьшается до 750 В за 100 мс. Нагрузка меняется в следующем порядке. Сначала она равна нулю, с 50 до 95 мс она вырастает до номинального значения, остается постоянной до 220 мс, затем падает до нуля, вырастает до 10 А к 250 мс и до номинала в 45 А к 270 мс.

Первый опыт был проведен с точными измерениями входного и выходного напряжений. Результаты представлены на рис. 5. Можно увидеть быстрый переходный процесс в контуре тока, который занимает примерно 5 периодов ШИМ. В течение переходного процесса ток ограничен на допустимом уровне. Поведение всей системы

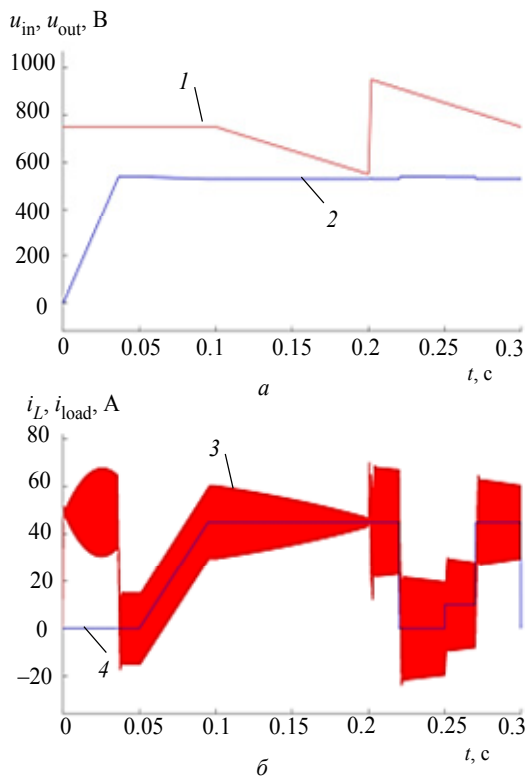


Рис. 5

стабильно и колебания отсутствуют. Затем был изменен коэффициент усиления датчика входного напряжения и установлена ошибка измерения в 5%. Работа системы представлена на рис. 6. Рис. 6, в иллюстрирует поведение коэффициента компенсации выходного напряжения. Он отслеживает ошибку усиления датчика, поэтому переходный процесс в данной системе близок к переходному процессу в системе с точными параметрами. Однако в выходном напряжении присутствует статическая ошибка, вызванная нагрузкой. В последнем эксперименте в регулятор напряжения была добавлена дополнительная интегральная составляющая, которая помогла убрать эту ошибку (рис. 7, в). На рис. 5–7 введены следующие обозначения: 1 – входное напряжение (u_{in}); 2 – выходное напряжение (u_{out}); 3 – ток в индуктивности (i_L); 4 – ток в нагрузке (i_{load}).

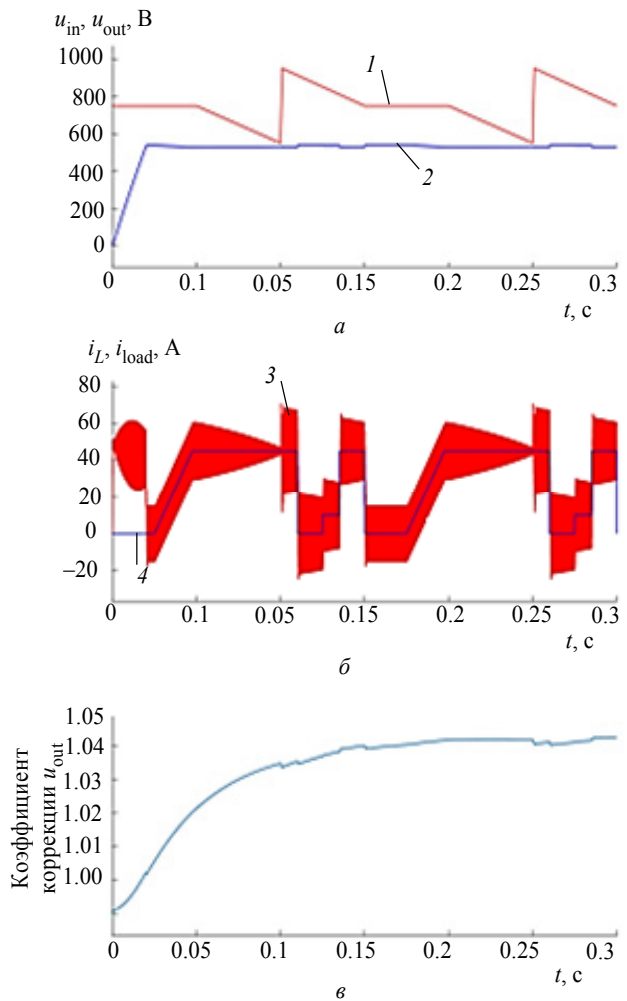


Рис. 6

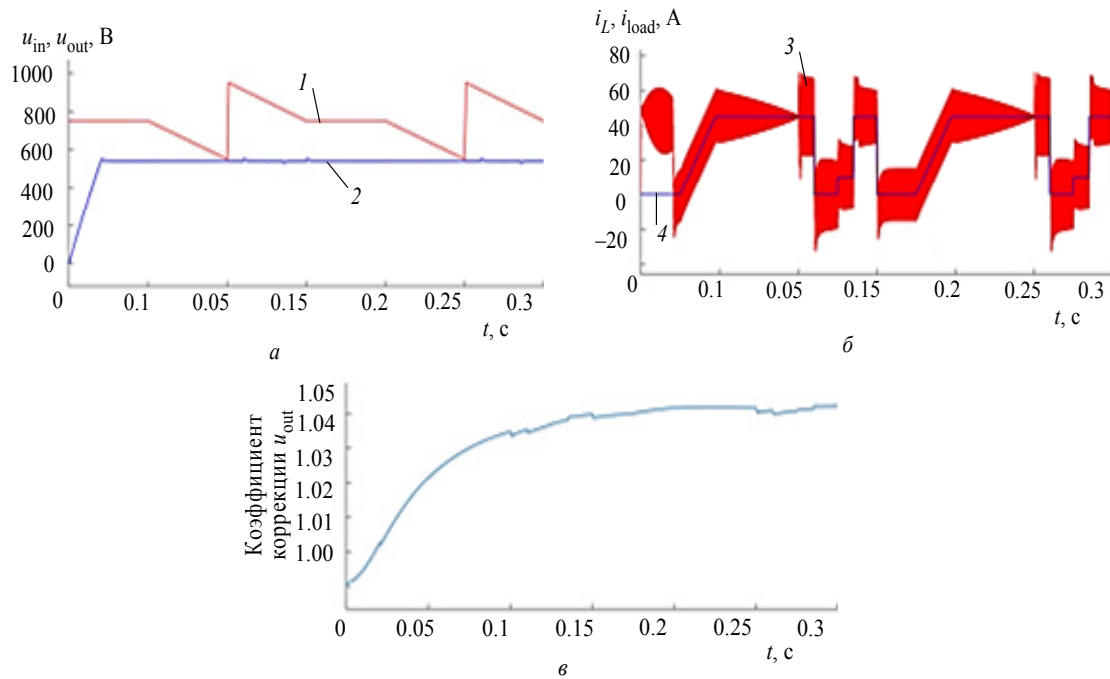


Рис. 7

Выводы:

1. Использование подчиненного регулирования с параллельной коррекцией по напряжению выхода понижающего преобразователя обеспечило хорошую стабильность выходного напряжения, и для его настройки необходим минимум системных параметров.

2. В процессе работы системы управления ток дросселя ограничен на желаемом уровне, что помо-

гает избежать насыщения дросселя и срабатывания максимально-токовой защиты силовых ключей.

3. Представленное решение работает также и в рекуперативном режиме, поскольку контролируются верхний и нижний ключи полумоста.

4. Экспериментальные результаты и работа в режиме прерывистого тока не рассматриваются в настоящей статье – их рассмотрение планируется в будущем.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Analysis and control of a buck DC-DC converter operating with constant power load in sea and undersea vehicles / C. H. Rivetta, A. Emadi, G. A. Williamson, R. Jayabalan, B. Fahimi // IEEE Transactions on Industry Applications. 2006. Vol. 42, № 2. P. 559–572.

2. A simple control approach for buck converters with current-constrained technique / T. Guo, Z. Wang, X. Wang, S. Li, Q. Li // IEEE Transactions on Control Systems Technology. 2019. Vol. 27, № 1. P. 418–425.

3. Unified control of a buck converter for wide-load-range applications / C. H. Van der Broeck, R. W. De Doncker, S. A. Richter, J. V. Bloh // IEEE Transactions on Industry Applications. 2015. Vol. 51, № 5. P. 4061–4071.

4. Suskis P., Nikonorov D. Buck converter digital control system design and performance evaluation // IEEE 6th Workshop on Advances in Information, Electronic and Electrical Engineering (AIEEE). Lietuva, Vilnius, 2018. P. 1–4.

5. Mandal S., Mishra D. Robust control of buck converter using H-infinity control algorithm // IEEE Appl. Signal Proc. Conf. (ASPCON). Kolkata, India, 2018. P. 163–167.

6. Doliya D. Feedback and feedforward control of buck converter with parasitic // 2nd IEEE Intern. Conf. on

Recent Trends in Electronics, Information & Communication Technology (RTEICT). Bangalore, 2017. P. 471–475.

7. Analysis and comparison of voltage-mode and current-mode pulse train control buck converter / Ming Qin, Jianping Xu, Guohua Zhou, Qingbo Mu // 4th IEEE Conf. on Industrial Electronics and Applications. Xi'an, 2009. P. 2924–2928.

8. Analysis and implementation of discontinuous current modes for a buck converter with GaN device / P. Jia, Z. Huang, Y. Hao, S. Fan // 22nd Intern. Conf. on Electrical Machines and Systems (ICEMS). Harbin, China, 2019. P. 1–5.

9. Multi pulses regulation – A novel control technique for buck converter in discontinuous conduction mode / X. Jianping, Q. Ming, Jinping, Z. Guohua // IEEE 6th Intern. Power Electronics and Motion Control Conf. Wuhan, 2009. P. 491–494.

10. Active elimination of supply current harmonics in a subway motor-compressor drive / M. Yakovenko, A. Anuchin, D. Shpak, V. Ostrirov, M. Podlesny, K. Milskiy // IEEE 59th Intern. Scientific Conf. on Power and Electrical Engineering of Riga Technical University (RTUCON). Riga, Latvia, 2018. P. 1–4.

A. S. Anuchin, E. O. Stolyarov, D. M. Shpak, D. K. Surnin
National Research University «Moscow Power Engineering Institute»

G. L. Demidova
ITMO University

Rishad Ahmed
University of Nottingham

NESTED LOOP CONTROL OF A BUCK CONVERTER WITH FEEDFORWARD CORRECTION USING OUTPUT VOLTAGE SIGNAL

Buck converters are commonly used in industry, electric vehicles, and renewable energy systems. However, most papers where control algorithms for such converters are considered are devoted to low-power systems operating in intermittent current mode. They are also devoted to methods based on complex mathematical descriptions that are sensitive to changes of parameters, without taking into account current limitation and the availability of external disturbances. This paper deal with a DC buck converter cascaded control system. The idea of development control algorithm was taken from the theory of electric drives control and implemented in a power supply for auxiliary needs used in underground trains. Mathematical modelling results of the converter modes with the proposed control system taking into account various disturbances and sensors inaccuracies has been obtained.

Buck converter, nested loop control, continuous current mode, current controller, voltage controller, positive feedback

УДК 681.513.6

Ле Хонг Куанг, Путов В. В., Шелудько В. Н.
Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина)

Нелинейное робастное управление многостепенным механическим объектом с адаптивной компенсацией неизвестного возмущения

Рассматривается задача построения нелинейного робастного управления многостепенным нелинейным механическим объектом с одновременной адаптивной компенсацией неизвестного возмущения. Неизвестное возмущение полагается детерминированным и представляется как выход линейной автономной модели с неизвестными постоянными параметрами. Для решения задачи адаптивной компенсации неизвестного возмущения строится нелинейный наблюдатель возмущения, структура которого определяется видом объекта. Структура нелинейного робастного управления многостепенным механическим объектом синтезируется на основе метода обратного обхода интегратора и объединяется с алгоритмами адаптивной компенсации возмущения, построенными на основе нелинейного наблюдателя возмущения и алгоритмов адаптации с так называемой параметрической проекцией. Построенное нелинейное робастное управление с нелинейным наблюдателем и алгоритмами адаптивной компенсации возмущения исследуется с помощью программы MatLab/Simulink.

Многостепенный нелинейный механический объект с неизвестным возмущением, нелинейное робастное управление, нелинейный наблюдатель возмущения, каскадная структура, метод обратного обхода интегратора, адаптивная компенсация неизвестного возмущения, алгоритмы параметрической проекции

Задачи повышения точности адаптивных систем в условиях действия неизмеримых внешних возмущений всегда привлекали внимание исследователей, отвечая реальным потребностям по-
