

УПРАВЛЕНИЕ ИМПУЛЬСНЫМ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕМ НА СКОЛЬЗЯЩИХ РЕЖИМАХ В БАЗИСЕ ЭНЕРГИЙ

Ю.В. Скурятин, А.И. Фомин
Донбасский государственный технический университет,
пр. Ленина 16, Алчевск, 94204, Украина.
E-mail: yuriy-skuryatin@yandex.ru

Предложено управление на скользящих режимах импульсным преобразователем понижающего типа с нелинейными поверхностями скольжения. Приведено математическое обоснование эффективности работы преобразователя в режиме стабилизации выходного напряжения. Представлены результаты моделирования работы преобразователя в переходных и установившихся режимах, подтверждающие стабилизацию выходного напряжения, инвариантность к возмущениям, повышение быстродействия, свойства адаптации поверхности скольжения к изменениям параметров нагрузки и задания. Библ. 1, рис. 5.

Ключевые слова: импульсный преобразователь, скользящий режим, накопленная энергия.

Введение. Широкое распространение в технике получили импульсные преобразователи постоянного напряжения (ИППН) понижающего типа, топология которых используется в широком классе преобразовательных устройств – вентилях преобразователя переменного тока. Современные преобразовательные системы представляют собой довольно сложные объекты управления, характеризующиеся работой в условиях неопределенностей как со стороны источника электропитания, так и со стороны нагрузки. Свойства таких систем во многом определяются выбранным методом управления.

Одним из перспективных методов управления является разрывное управление на скользящих режимах, возможности которого были впервые продемонстрированы в системах с переменной структурой С.В. Емельяновым и В.И. Уткиным. Системы, в которых преднамеренно вводится скользящий режим, обладают рядом привлекательных свойств: низкой чувствительностью к внешним возмущениям, изменению параметров объекта управления, возможностью создавать оптимальные траектории движений в переходных режимах и др. [1], благодаря чему они и получили распространение на многие области техники, включая преобразовательную технику.

В качестве поверхностей разрыва для управления понижающим ИППН, который представляет собой объект второго порядка, получила распространение линейная комбинация ошибки напряжения на конденсаторе фильтра и ее первой производной. Недостатком такой системы является ее неэффективная работа на нагрузку, параметры которой изменяются в широких пределах и непредсказуемым образом. Действительно, обеспечение предельного быстродействия в номинальном режиме может привести к срыву скольжения в режимах, близких к холостому ходу. А обеспечение устойчивого скольжения во всем диапазоне изменения параметров нагрузки приведет к уменьшению быстродействия. Таким образом, в подобных системах является актуальной задача получения управления, обладающего свойствами адаптации поверхности скольжения к изменениям параметров нагрузки.

Цель работы – синтез управления импульсным преобразователем на скользящих режимах, которое обеспечивает устойчивое скольжение без потери быстродействия при различного рода возмущениях.

Решение задачи. Силовая часть понижающего ИППН (рис. 1, а) содержит вентили S1, S2, выходной LC-фильтр и нагрузку. Приняты допущения – пассивные элементы цепи линейны, их параметры не зависят от времени и известны с высокой точностью, вентили идеальные. Математическое описание системы, схема замещения которой показана на рис. 1, б, имеет вид

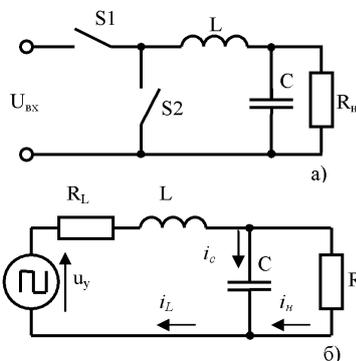


Рис. 1

$$\left. \begin{aligned} L \frac{di_L}{dt} + i_L \cdot R_L + u_c &= u_y \\ i_L - i_c - i_n &= 0 \\ u_c &= i_n \cdot R_n \\ i_c &= C \frac{du_c}{dt} \end{aligned} \right\}. \quad (1)$$

В реактивных элементах системы происходит накопление энергии

$$W_L = LI_L^2 / 2; \quad W_C = CU_C^2 / 2.$$

Полная энергия, накопленная в системе, с учетом знаковых функций, отражающих направление преобразования энергии в реактивном элементе,

$$W_{LC} = \text{sign}(I_L) \cdot W_L + \text{sign}(U_C) \cdot W_C = \text{sign}(I_L) \frac{L \cdot I_L^2}{2} + \text{sign}(U_C) \frac{C \cdot U_C^2}{2}$$

является однозначной характеристикой состояния системы, что является предпосылкой к использованию для управления в качестве переменной состояния. Поэтому в качестве поверхности разрыва примем функцию

$$S = W_{LC3} - W_{LC} = \eta_w = 0, \quad (2)$$

где $W_{LC3} = LI_{L3}^2/2 + CU_{C3}^2/2$ – заданное значение накопленной энергии, соответствующее заданным выходным параметрам системы, η_w – ошибка обработки заданного значения накопленной энергии.

В переходном режиме скольжение изображающей точки по поверхности разрыва (2) обеспечит стабилизацию накопленной энергии на заданном уровне и, как следствие, аperiodичность переходного процесса.

В установившемся режиме среднее значение тока конденсатора за период модуляционной составляющей равно нулю, следовательно, $I_L = I_H$ и $I_{L3} = I_{H3}$. Тогда (2) можно преобразовать к виду

$$S = \frac{L \cdot I_{H3}^2}{2} + \frac{C \cdot U_{C3}^2}{2} - \frac{L \cdot I_H^2}{2} - \frac{C \cdot U_C^2}{2} = 0. \quad (3)$$

После подстановки в (3) $I_{H3} = U_{C3}/R_H$, $I_H = U_C/R_H$ получим $(U_{C3}^2 - U_C^2)(LR_H^2 + C) = 0$, откуда ошибка напряжения на конденсаторе фильтра $\eta_{Uc} = (U_{C3} - U_C) = 0$, что соответствует цели управления в случае задачи стабилизации напряжения.

Используя цифровое моделирование, рассмотрим свойства системы, реализующей управление (2). При

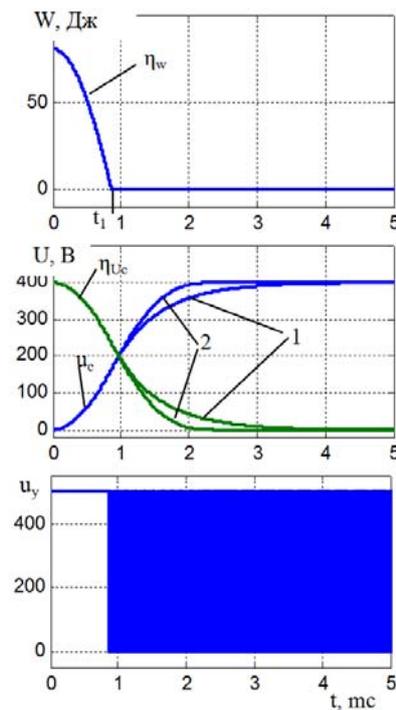


Рис. 2

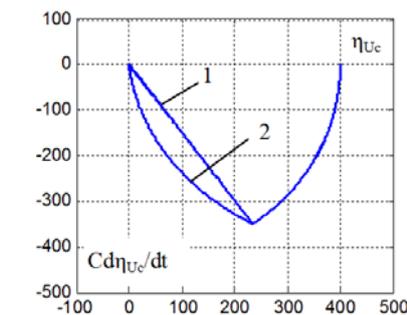


Рис. 3

включении преобразователя формируется управление, уменьшающее ошибку накопленной энергии (рис. 2). В момент времени t_1 ошибка накопленной энергии равна нулю, что соответствует попаданию изображающей точки пространства ошибки накопленной энергии и ее первой производной на поверхность скольжения (2). Дальнейшее движение происходит в скользящем режиме со стабилизацией энергии, накопленной в реактивных элементах фильтра (рис. 2). При этом движение изображающей точки в пространстве ошибки напряжения и ее первой производной происходит по нелинейной траектории (прямая 2, рис. 3), искривленной по отношению к линейной (прямая 1, рис. 3), в сторону больших значений производной ошибки напряжения на конденсаторе, что соответствует повышению быстродействия. Изображающая точка попадает в начало пространства фазовых координат (рис. 3), что соответствует нулевой ошибке в обработке заданного значения напряжения на конденсаторе. Время отработки задания по сравнению с движением по линейной поверхности уменьшено в 2 раза (рис. 3, кривая 1 соответствует движению по линейной поверхности разрыва, кривая 2 – по нелинейной).

Возмущения со стороны источника питания не оказывают влияния на траекторию движения в скользящем режиме (рис. 4).

Уменьшение сопротивления, вызвавшее скачок тока нагрузки на 20 А (50% от предыдущего значения) привело к отклонению выходного напряжения менее, чем на 2 В (0.5% заданного значения напряжения), что

свидетельствует о высоких стабилизирующих свойствах системы в динамике. Реакция системы на изменение сопротивление нагрузки практически мгновенная, причем отработка осуществляется с максимальным использованием имеющегося ресурса управления (рис. 4), что соответствует предельно возможным динамическим показателям в отработке возмущающих воздействий. В установившемся режиме ошибка напряжения на конденсаторе равна нулю.

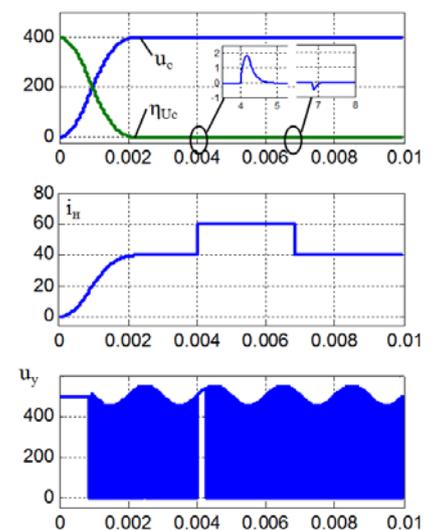


Рис. 4

При изменении задания или параметров нагрузки происходит автоматическая настройка поверхностей скольжения (рис. 5). Каждому заданию и значению сопротивления нагрузки соответствует определенная траектория движения в скользящем режиме. В результате обеспечивается устойчивое скольжение при изменении параметров нагрузки или задания в широких пределах без потери быстродействия.

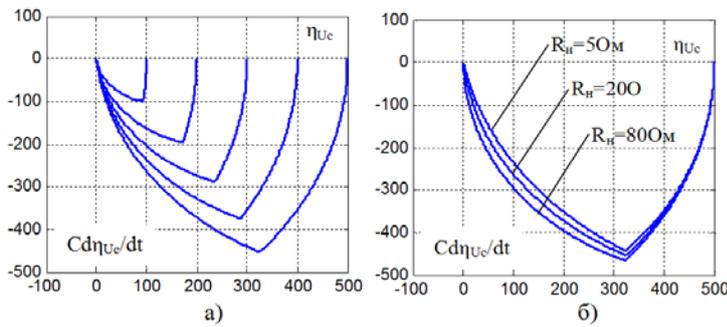


Рис. 5

Выводы. Предложенное управление импульсным преобразователем обеспечивает стабилизацию выходного напряжения, инвариантность к возмущениям со стороны первичного источника электропитания, аperiodический характер переходных процессов при изменении нагрузки и задания в широких пределах, повышение быстродействия в переходных режимах за счет нелинейности поверхности скольжения и ее адаптации к изменениям параметров нагрузки и задания.

Выводы. Предложенное управление импульсным преобразователем обеспечивает стабилизацию выходного напряжения, инвариантность к возмущениям со стороны первичного источника электропитания, аperiodический характер переходных процессов при изменении нагрузки и задания в широких пределах, повышение быстродействия в переходных режимах за счет нелинейности поверхности скольжения и ее адаптации к изменениям параметров нагрузки и задания.

верхности скольжения и ее адаптации к изменениям параметров нагрузки и задания.

1. Уткин В.И. Скользящие режимы и их применение в системах с переменной структурой. – М.: Наука, 1974. – 272 с.

УДК 621.314

КЕРУВАННЯ ІМПУЛЬСНИМ ПЕРЕТВОРЮВАЧЕМ НА КОВЗНИХ РЕЖИМАХ У БАЗИСІ ЕНЕРГІЙ

Ю.В. Скурятін, А.І. Фомін

Донбаський державний технічний університет,

пр. Леніна, 16, Алчевськ, 94204, Україна.

E-mail: yuriy-skuryatin@yandex.ru

Запропоновано керування на ковзних режимах імпульсним перетворювачем знижувального типу з нелінійними поверхнями ковзання. Наведено математичне обґрунтування ефективності роботи перетворювача в режимі стабілізації вихідної напруги. Представлені результати моделювання роботи перетворювача в перехідних та ustalених режимах підтверджують стабілізацію вихідної напруги, інваріантність до збурень, підвищення швидкодії, властивості адаптації поверхні ковзання до зміни параметрів навантаження і завдання.

Бібл. 1, рис. 5.

Ключові слова: імпульсний перетворювач, ковзний режим, накопичена енергія.

SLIDING MODE CONTROL OF DC/DC BUCK CONVERTER IN THE BASIS OF ENERGY

Yu.V. Skuriatin, A.I. Fomin,

Donbas State Technical University,

Lenin ave., 16, Alchevsk, 94204, Ukraine.

E-mail: yuriy-skuryatin@yandex.ru

Sliding mode control of DC/DC buck converter with nonlinear sliding surface is proposed. The converter operation efficiency in output voltage stabilization mode is mathematically confirmed. The simulation results of converter operation in transient and steady-state modes are represented. They confirm output voltage stabilization, invariance to disturbances, increase of performance, adaptation of sliding surface to the changes of load and reference.

Reference 1, figures 5.

Key words: DC/DC buck converter, sliding mode, accumulated energy.

1. Utkin V.I. Sliding modes and their application in variable structure systems. – Moskva: Nauka, 1974. – 272 p. (Rus)

Надійшла 17.02.2014