

УДК 621.311.69: 621.314.2.024

НЕПРЕРЫВНАЯ ЛИНЕЙНАЯ МОДЕЛЬ ИМПУЛЬСНОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ ПОСТОЯННОГО ТОКА

Асп. АБДУЛ МАЖИД АЛЬ-ХАТИБ, канд. техн. наук, проф. ПЕТРЕНКО Ю. Н.

Белорусский национальный технический университет

Область применения устройств преобразовательной техники непрерывно расширяется. В последние годы по известным причинам повысился интерес к использованию нетрадиционных источников [1, 2] электроэнергии – топливных элементов и солнечных батарей (СБ). В системах электропитания, использующих эти источники, необходима установка промежуточных силовых преобразователей мощности (СПМ). Применение последних вызвано следующими причинами: 1) необходимостью преобразования параметров энергии постоянного тока с учетом требований потребителя либо для непосредственного использования, либо для получения в последующем однофазного или трехфазного напряжения переменного тока; 2) обеспечением режима максимальной выходной мощности СБ [3].

Рассеивающие (параметрические) системы электропитания с целью стабилизации выходного напряжения здесь не рассматриваются из-за их низкого КПД. Таким образом, определяется ключевой режим работы СПМ. На практике нашли применение [4] следующие типы преобразователей (рис. 1): понижающий (а), повышающий (б) и инвертирующий (в). Получение непрерывных линейных моделей рассматриваемых СПМ является актуальной задачей, несмотря на значительное число публикаций [4, 5].

Существуют два подхода при исследовании импульсных СПМ [5]: 1) СПМ рассматривается как дискретная система; 2) СПМ приводится к непрерывной системе. Поскольку СПМ – изначально нелинейный объект, при обоих подходах используется линеаризация, позволяющая получить достаточно точные результаты.

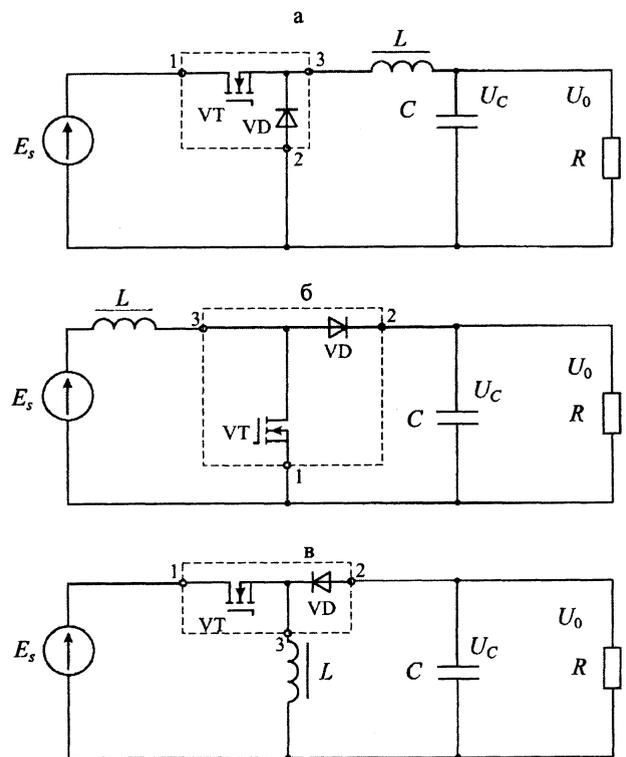


Рис. 1. Схемы классических СПМ

Поставим задачу получить модель СПМ, удобную для его анализа и синтеза системы управления.

Основным компонентом представленных СПМ является ключ, работающий в режиме широтно-импульсной модуляции. Для обобщения приведенных схем и облегчения дальнейшего анализа представим ключ в виде трехполюсника, имеющего полюса 1, 2 и 3 (рис. 2а).

Полюса 1 и 2 соответственно присоединяются к активному и пассивному переключающим элементам; полюс 3 – общий. Активный VT и пассивный VD ключи (рис. 1) работают

как однополюсный ключ двойной проводимости. В течение интервала времени D_1T_S активный ключ включен, пассивный – разомкнут (выключен) и активный зажим подключен к общему. В течение интервала D_2T_S активный ключ разомкнут, пассивный включен. T_S – период коммутации и D_2 – скважность выключенного состояния активного ключа; $D_2 = 1 - D_1$ для непрерывного режима работы.

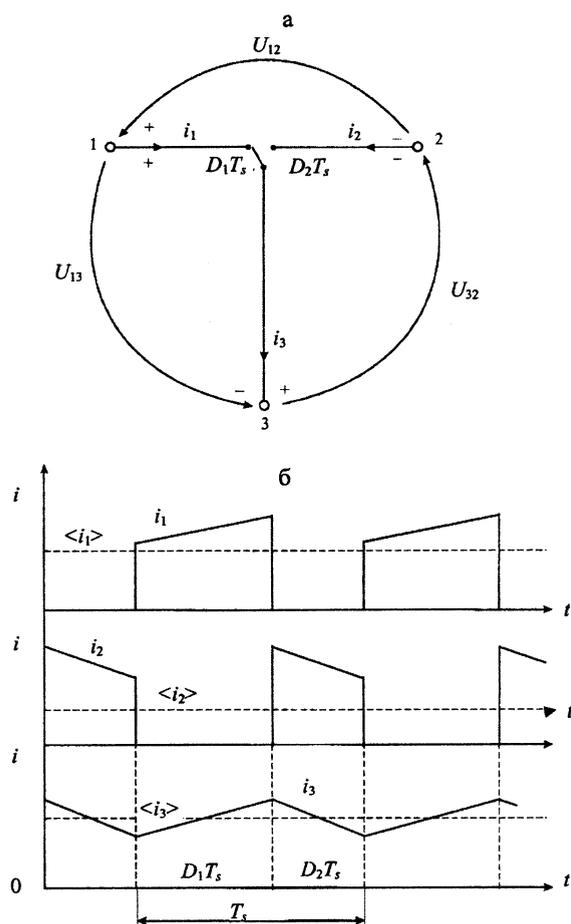


Рис. 2. Осредненные значения переменных состояний ключа как трехполюсника (а) и форма его сигналов (б)

Запишем соотношения для мгновенных значений токов согласно рис. 2а, где цифрами 1, 2 и 3 обозначены полюса ШИМ-ключа: активный (1), пассивный (2) и общий (3):

$$i_1(t) = \begin{cases} i_3(t), & 0 < t \leq D_1T_S; \\ 0, & D_1T_S < t \leq T_S; \end{cases} \quad (1)$$

$$i_2(t) = \begin{cases} 0, & 0 < t \leq D_1T_S; \\ i_3(t), & D_1T_S < t \leq T_S. \end{cases} \quad (2)$$

Подобные выражения могут быть написаны для напряжений:

$$u_{23}(t) = \begin{cases} u_{12}, & 0 < t \leq D_1T_S; \\ 0, & D_1T_S < t \leq T_S; \end{cases} \quad (3)$$

$$u_{13}(t) = \begin{cases} 0, & 0 < t \leq D_1T_S; \\ u_{12}, & D_1T_S < t \leq T_S. \end{cases} \quad (4)$$

Осредненные значения переменных состояний поясняются с помощью рис. 2а, а формы переменных состояний приведены на рис. 2б, где $\langle i_1 \rangle$, $\langle i_2 \rangle$, $\langle i_3 \rangle$, $\langle u_{12} \rangle$, $\langle u_{13} \rangle$ и $\langle u_{23} \rangle$ – средние значения величин. Мгновенные значения переменных состояний обозначены i_1 , i_2 , i_3 , u_{12} , u_{13} и u_{23} соответственно.

Из рис. 2а следует, что ШИМ-ключ в полной мере сосредотачивает нелинейность схемы, которую можно рассматривать в виде трехполюсника обособленно от остальной части преобразователя, для которого и необходимо найти адекватные модели.

Введем понятие осредненного состояния ШИМ-ключа, чтобы проанализировать осредненное состояние транзисторного преобразователя. При этом имеется в виду, что мгновенные значения переменных заменяются их средними значениями в течение цикла T_S , которые обозначаются знаком $\langle \rangle$. Соотношения для средних значений токов найдем из (1) и (2):

$$\langle i_1 \rangle = D_1 \langle i_3 \rangle; \quad (5)$$

$$\langle i_2 \rangle = D_2 \langle i_3 \rangle. \quad (6)$$

Соответственно для напряжений из (3) и (4) запишем:

$$\langle u_{32} \rangle = D_1 \langle u_{12} \rangle; \quad (7)$$

$$\langle u_{13} \rangle = D_2 \langle u_{12} \rangle. \quad (8)$$

Уравнения (5)...(8) позволяют представить осредненную модель для ШИМ-ключа (рис. 3а). В дальнейшем для сокращения записи знак $\langle \rangle$ опускаем.

На рис. 3а приведена схема модели с использованием управляемых источников тока и напряжения согласно (5), (7). Очевидно, что

уравнения (6) и (8) также удовлетворяются. Таким образом, модель ШИМ-ключа описывается (5)...(8). Это означает, что один элемент должен соответствовать (5) или (6), а второй – (7) или (8). Этим объясняется назначение управляемого источника тока $i_{ит}$ и управляемого источника напряжения $u_{ин}$. Других путей построения модели не существует. Если использовать в модели два источника напряжения, то токи останутся неопределенными. Это же было бы справедливо относительно модели с двумя источниками тока, т. е. напряжения не будут определены.

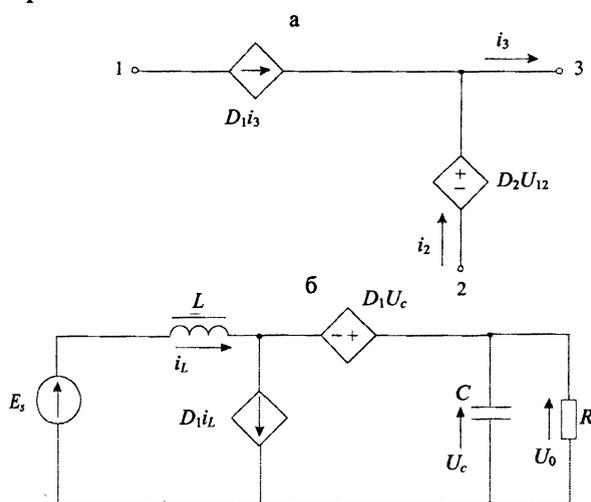


Рис. 3. Осредненная модель ШИМ-ключа (а) и эквивалентная схема преобразователя СПМ на его основе (б)

В качестве иллюстрации возможностей изложенного подхода воспользуемся схемой СПМ повышающего типа (рис. 16), в которой ШИМ-ключ (трехполюсник) заменим моделью согласно рис. 3а.

Из рис. 16 следует:

$$u_{12} = -u_c; \tag{9}$$

$$i_3 = -i_L. \tag{10}$$

В итоге получаем схему (рис. 3б), которая является эквивалентной для средних величин переменных СПМ (рис. 16).

Коммутация ключей и сопутствующие этому процессу пульсации как бы выведены за пределы модели. В то же самое время модель является нелинейной благодаря перемножению скажности и переменных.

Запишем уравнения переменных состояния для схемы рис. 3:

$$L \frac{di_L}{dt} = E_s - u_c(1 - D_1); \tag{11}$$

$$C \frac{du_c}{dt} = (1 - D_1)i_L - \frac{u_c}{R}.$$

Таким образом, использование модели ШИМ-ключа позволяет достаточно легко получить уравнения преобразования. Такие же уравнения можно получить с помощью хорошо разработанного метода осреднения переменных [4], который предусматривает осреднение переменных на интервалах проводимости D_1T_s с переменными на интервалах D_2T_s , что в итоге позволяет получить осредненные уравнения состояния. Рассмотрим применение предложенного подхода для схемы, содержащей резисторы R_c и R_L . Применяя модель ШИМ-ключа для приведенной схемы, можно представить ее эквивалентную модель (рис. 4), где управляемый источник тока представлен элементом $i_{ит}$, а источник напряжения – элементом $u_{ин}$. Уравнения для этих управляемых источников имеют вид:

$$i_{ит} = D_1 i_L; \tag{12}$$

$$u_{ин} = D_1 u_0.$$

Из схемы рис. 4 запишем уравнения переменных состояния:

$$L \frac{di_L}{dt} = - \left(R_L + (1 - D_1)^2 \frac{R R_c}{R + R_c} \right) i_L - (1 - D_1) \frac{R}{R + R_c} u_c + E_s; \tag{13}$$

$$C \frac{du_c}{dt} = (1 - D_1) \frac{R}{R + R_c} i_L - \frac{u_c}{R + R_c}. \tag{14}$$

Полученные уравнения переменных состояния, описывающие схему рис. 3б, а также (13) и (14) согласуются с аналогичными, приведенными в [4], полученными на основе метода осредненных величин, что подтверждает корректность предложенного подхода. Уравнения, приведенные в [4], отличаются от (13), (14) наличием множителя $(1 - D_1)^2$ и совпадают с полученными при $R_c = 0$.

Из схемы рис. 4 запишем уравнения для управляемых источников тока и напряжения:

$$i_{нт} = D_1 i_L; \quad (15)$$

$$u_{ин} = D_1 \frac{R}{R + R_c} u_c. \quad (16)$$

Разработанный подход применим также для получения моделей СПМ иных типов (рис. 1). Ограничением предложенного подхода является непрерывность тока нагрузки.

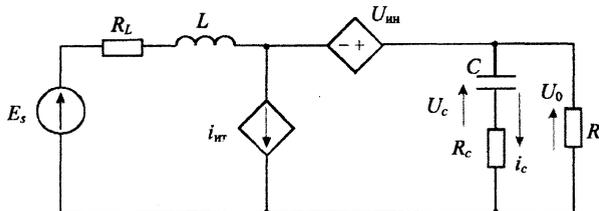


Рис. 4. Модель СПМ с учетом сопротивлений дросселя и конденсатора

Полученные модели использованы при синтезе замкнутых систем управления СПМ и исследовании [6] их динамики.

ВЫВОД

Математическое описание ШИМ-ключа в осредненных значениях переменных позволяет получить линейную модель импульсных преобразователей постоянного тока.

ЛИТЕРАТУРА

1. Русан В. И., Короткевич М. А. Комплексное использование возобновляемых источников энергии. – Мн.: Институт энергетики АПК НАН Беларуси, 2004. – 68 с.
2. Русан В. И., Фуад Х. А. Комбинированное использование возобновляемых источников энергии // Аграрная энергетика в XXI веке: Материалы междунар. науч.-техн. конф. – Мн., 2001. – С. 56–57.
3. Абдул Мажид Аль-Хатиб, Эль-Саббаг Маруан И., Петренко Ю. Н. Микропроцессорная система обеспечения максимальной выходной мощности солнечной батареи // Моделирование интеллектуальных процессов проектирования, производства и управления: Сб. науч. тр. / Под ред. В. И. Махнача, Е. В. Владимирова. – Мн.: ОИПИ НАН Беларуси, 2003. – С. 234–239.
4. Четти П. Проектирование ключевых источников электропитания. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 240 с.
5. Мелешин В. И. Получение непрерывной линейной модели силовой части импульсного преобразователя как начальный этап проектирования его динамических свойств // Электричество. – 2002. – № 10. – С. 39–43.
6. Абдул Мажид Аль-Хатиб, Куликов М. А., Петренко Ю. Н. Математическое моделирование силовых интерфейсных модулей солнечных батарей // Современные технологии последилового образования: Проблемы и перспективы: Материалы Республ. науч.-метод. конф. (Минск, 25–26 марта 2004 г.) / Под ред. М. М. Болбаса, Л. К. Волошина, Э. Я. Ивашина и др. – Мн.: УП «Технопринт», 2004. – С. 117–119.

УДК 536.248

ИНТЕНСИФИКАЦИЯ ПРОЦЕССОВ ИСПАРЕНИЯ И КОНДЕНСАЦИИ В ТЕПЛООБМЕННЫХ АППАРАТАХ

Докт. техн. наук, проф. **ВАСИЛЬЕВ Л. Л., КУЛАКОВ А. Г.**

Институт тепло- и массообмена имени А. В. Лыкова НАН Беларуси

Для организации высокоэффективной теплопередачи на значительное расстояние, создания эффективных и компактных теплообменных устройств для теплоэнергетики, холодильной техники, химической промышленности, систем обеспечения теплового режима (СОТР) успешно используются испарительно-конденсационные устройства: испарители, конденсаторы, тепловые трубы. В условиях существующей в настоящее время тенденции оптимизации массогабаритных характеристик, увеличения интенсивности теплообмена и повышения удельных плотностей тепловыделения актуальной задачей становится поиск путей интенсификации процессов испарения и конденсации.

Предложено конструктивное решение для интенсификации теплообмена в испарительных теплообменниках, которая обеспечивается применением схемы с «перевернутым мениском» (рис. 1), использованием капиллярно-пористых структур (КПС) с высокой теплопроводностью и проницаемостью, обеспечением хорошего контакта КПС с теплообменной стенкой и напорной схемой организации подачи теплоносителя и подтверждена проведенными экспериментальными исследованиями интенсивности теплообмена. Полученная экспериментальная зависимость аппроксимирована следующей функцией: $\alpha = 1027,4q^{0,9537}$, где α – коэффициент теплоотдачи; q – плотность теплового потока.