

# Исследование работы математической модели эффективного повышающего преобразователя постоянного тока в среде PSIM

Ноэль Нтавухоракоме<sup>1</sup>, А. М. Белов<sup>2</sup>

Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета

«ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)

Санкт-Петербург, Россия

<sup>1</sup>noentaw1@mail.ru, <sup>2</sup>samibel@yandex.ru

**Аннотация.** В статье рассмотрен повышающий преобразователь постоянного тока (ПП) контроллера солнечного заряда с управлением отслеживания точки максимальной мощности MPPT (maximum power point tracking). Описан процесс его работы, рассчитаны основные параметры преобразователя, такие как рабочий цикл, величина индуктивности, максимальный ток, значения емкостей входного и выходного конденсатора и выбраны для него диод и МОП-транзистор. Испытан проектируемый преобразователь на солнечной батарее SP75 и были получены результаты моделирования, проведенного в пакете программного обеспечения Powersim (PSIM).

**Ключевые слова:** проектирование; повышающий преобразователь; математическое моделирование; солнечная электроэнергия

## I. ВВЕДЕНИЕ

Фотоэлектрическая энергия, полученная в результате преобразования солнечной энергии, страдает от проблемы оптимизации из-за нелинейных электрических характеристик (ток-напряжение) фотоэлектрических элементов, эти характеристики в основном зависят от климатических условий, излучения и температуры. Фотоэлектрическая система состоит из источника энергии (фотоэлектрический генератор ФЭГ), силового интерфейса (статические преобразователи DC-DC и DC-AC с системой управления) и нагрузки. Для обеспечения максимальной доступной мощности модуля требуется постоянная адаптация нагрузки с ФЭГ. Эта адаптация может быть выполнена путем применения преобразователя постоянного тока, управляемого механизмом слежения «точки максимальной мощности» (MPPT) [1]. Часто используются статические преобразователи DC-DC, типа «понижающий», «повышающий» или «понижающий – повышающий» и в литературе часто встречаются следующие методы максимизации мощности: инкрементная проводимость (Inc.-cond), возмущать и наблюдать (perturb and observe-p&o), нечеткая логика и другие [1, 2]. Каждый из этих методов имеет свои преимущества и недостатки с точки зрения простоты, эффективности и надежности.

## II. ОТСЛЕЖИВАНИЕ ТОЧКИ МАКСИМАЛЬНОЙ МОЩНОСТИ

На рис. 1 показана типичная ВАХ солнечной батареи (СБ) для заданной освещенности и температуры, подключенной к резистивной нагрузке  $R_s$ . Из этого следует, что:

СБ работает на максимальной мощности ( $P_{max}$ ), когда:

$U_{\phi} = U_{Oпт}$ ,  $I_{\phi} = I_{Oпт}$  где  $U_{\phi}$ ,  $I_{\phi}$  – напряжение и ток СБ (фотоэлектрический генератор – ФЭГ).

$P_{\phi} = U_{\phi} \cdot I_{\phi} = P_{max} = U_{Oпт} \cdot I_{Oпт}$ . Оптимальные условия работы солнечных батарей характеризуются напряжением  $U_{Oпт}$  и током  $I_{Oпт}$  при данном освещении. Максимальная мощность, которую можно извлечь из СБ составляет произведением  $U_{Oпт}$  и  $I_{Oпт}$ , они составляют точку максимальной мощности (ТММ) для данных значений излучения и температуры ( $U_{Oпт}$ ,  $I_{Oпт}$ ). Эта точка характеризуется оптимальным внутренним сопротивлением ФЭГ  $R_s$ , значение которого равно:

$R_s = R_{Oпт} = \frac{U_{\phi}}{I_{Oпт}}$ . На рис. 1 наблюдаются рабочие точки

$P_1$ ,  $P_2$  и ТММ при  $R_s < R_{Oпт}$ ,  $R_s = R_{Oпт}$  и  $R_s > R_{Oпт}$  соответственно.

Если значение нагрузки выше или ниже значения, соответствующего оптимальным условиям  $R_{Oпт}$ , тогда, генерируемая мощность генератором всегда ниже, чем значение оптимального значения  $P_{max}$ . Поэтому необходимо специальное регулирование, которое обеспечивается специальным регулятором под названием: MPPT контроллер для того, чтобы СБ работала в оптимальных условиях.

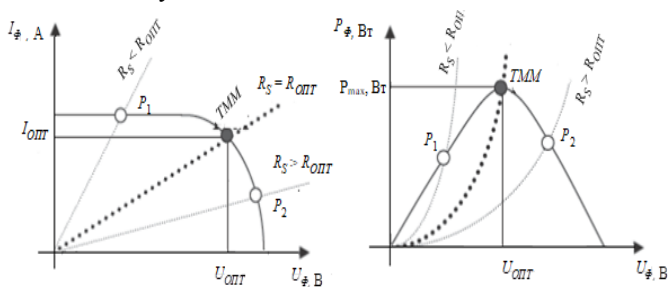


Рис. 1. P–V и ВАХ ФЭГа подключенного к резистивной нагрузке

### III. ПРОЦЕСС РАБОТЫ ПОВЫШАЮЩЕГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ

Преобразователь есть повышающего типа (ПП), когда выходное напряжение (на клеммах аккумулятора) выше, чем на входе (на клеммах солнечной панели) [4–5]. Показана на рис. 2 а его принципиальная схема.

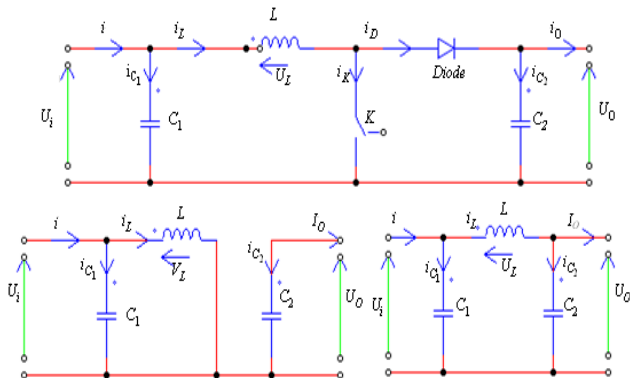


Рис. 2. Эквивалентные схемы повышающего преобразователя

Для того чтобы синтезировать функции ПП в установившемся режиме, эквивалентные схемы в каждом положении ключа К показаны на рис. 2: б) К замкнут, в) К разомкнут. С этими двумя эквивалентными цепями [2 рабочих фаз: б) и в)] можно получить две системы уравнений по закону Кирхгофа. Для первого периода  $\alpha T_s$ :

$$\begin{cases} i_{C_1}(t) = C_1 \frac{dU_i(t)}{dt} = i_i(t) - i_L(t) \\ i_{C_2}(t) = C_2 \frac{dU_o(t)}{dt} = -i_o(t) \\ U_L(t) = L \frac{di_L}{dt} = -U_i(t) \end{cases} \quad (1)$$

Для второго периода  $(1-\alpha)T_s$ :

$$\begin{cases} i_{C_1}(t) = C_1 \frac{dU_i(t)}{dt} = i_i(t) - i_L(t) \\ i_{C_2}(t) = C_2 \frac{dU_o(t)}{dt} = i_L(t) - i_o(t) \\ U_L(t) = L \frac{di_L}{dt} = U_i(t) - U_o(t) \end{cases} \quad (2)$$

Обычно из следующего выражения получается динамическое представление, действительное для всего периода  $T_s$ :

$$\left\langle \frac{dx}{dt} \right\rangle T_s = \frac{dx}{dt \alpha T_s} \alpha T_s + \frac{dx}{dt (1-\alpha) T_s} (1-\alpha) T_s \quad (3)$$

где  $\left\langle \frac{dx}{dt} \right\rangle$  – среднее значение производной от  $x$  за период

$T_s$ , это соотношение действительно, если  $\frac{dx}{dt \alpha T_s}$  и

$\frac{dx}{dt (1-\alpha) T_s}$  являются постоянными с интервалами  $\alpha T_s$  и

$(1-\alpha)T_s$  соответственно. Приближенная модель ПП находится, применяя выражение (3) к системам уравнений (1) и (2):

$$\begin{cases} i_L(t) = i_i(t) - C_1 \frac{dU_{in}(t)}{dt} \\ i_o(t) = (1-\alpha)i_L - C_2 \frac{dU_o(t)}{dt} \\ U_i(t) = L \frac{di_L}{dt} = (1-\alpha)U_o \end{cases}$$

Исследования в непрерывном режиме производятся путем исключения производных динамических переменных и замены этих сигналов их средними значениями, система уравнений становится:

$$\begin{cases} i_o = (1-\alpha)i_L \\ i_i = i_L \\ U_o(t) = (1-\alpha)U_o \end{cases}$$

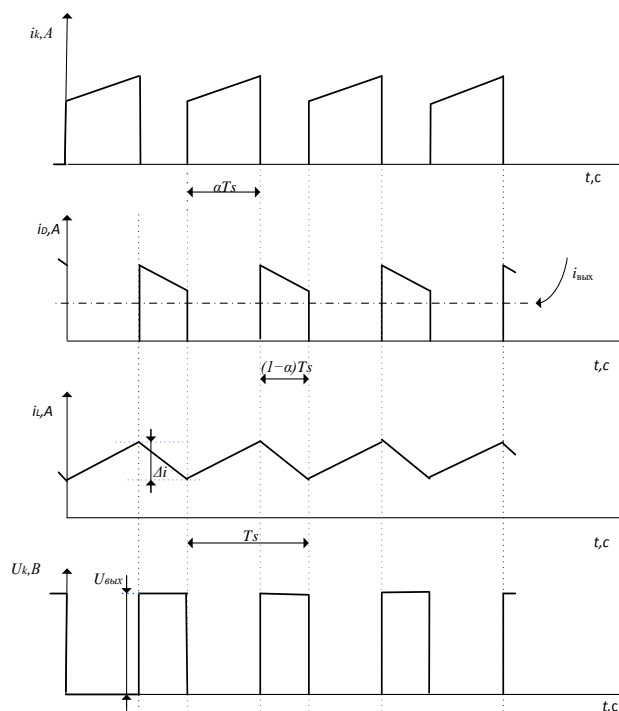


Рис. 3. Формы напряжений и токов

Отношение между выходным и входным напряжением определяет коэффициент преобразования:

$$M = \frac{U_o}{U_i} = \frac{\alpha}{1-\alpha}, \text{ преобразователь есть повышающий } \alpha:$$

рабочий цикл;  $T_s$ : период.

### IV. МОДЕЛИРОВАНИЕ И СИНТЕЗ ВСЕЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ МРРТ КОМАНДОЙ “PERTURB AND OBSERVE”

Для моделирования всей системы, состоящей из СБ, ПП (силовая часть) с его управлением (управляющая

часть) и нагрузки (аккумулятор), была использована СБ SP75 со следующими параметрами: Pmax: 75 Вт; U<sub>ОПТ</sub>: 17,5 В; I<sub>ОПТ</sub>: 4,41 А; напряжение холостого хода U<sub>ХХ</sub>: 21,7 В; ток короткого замыкания I<sub>КЗ</sub>: 4,8А; последовательное сопротивление R<sub>S</sub>: 12 мОм. Для того чтобы определить параметры и компоненты ПП соответствующих со СБ SP75 :

- ПП подает регулируемое напряжение на требуемое значение (24 В) со SP75 с остаточной пульсацией выходного напряжения, не превышающего 10 мВ, на входе, не превышающего 100 мВ.

- ПП работает в режиме непрерывной проводимости для тока нагрузки I<sub>S</sub>, изменяющегося от 0,3А до 4,8А (то есть от 6% до 100% от его максимального значения). Таким образом, максимально допустимая нагрузка (R<sub>Smax</sub>) составляет: R<sub>Smax</sub> = 100 ÷ 0.3 = 300

- Катушка.  $L = \frac{\alpha_0 U_\phi}{I_{Omin} f}$  где f: частота переключения

Определяем рабочий цикл  $\alpha$ , который можно ожидать при номинальных условиях (U<sub>вх</sub> U<sub>i</sub> = 17,5 В и U<sub>вых</sub> = U<sub>o</sub> = 24 В):  $\frac{U_i}{U_o} = \frac{1}{1-\alpha}$ , то есть  $\alpha = 0.27$ . Мы предполагаем, что наш преобразователь работает при частоте 10 кГц (частота переключения коммутатора), и так  $L \approx 2 \text{ мГн}$

- Входной конденсатор C<sub>1</sub>.  $C_1 = \frac{I_{OПТ} \alpha}{\Delta U_i f}$ ,  $\Delta U_i = 10 \text{ мВ}$   
значение C<sub>1</sub> будет = 11.90 мкф

- Выходной конденсатор C<sub>2</sub>. Используется уравнение пульсации выходного напряжения.

$$\frac{\Delta U_o}{U_o} = \frac{1-\alpha}{8LC_2 f^2}, \text{ при } \frac{\Delta U_o}{U_o} = 1\%, C_2 = 58.12 \text{ мкф}$$

- Выбраны МОП-транзистор (MOSFET) IRF 540 и диод Шоттки со средним током 5А и обратным напряжением 100В.

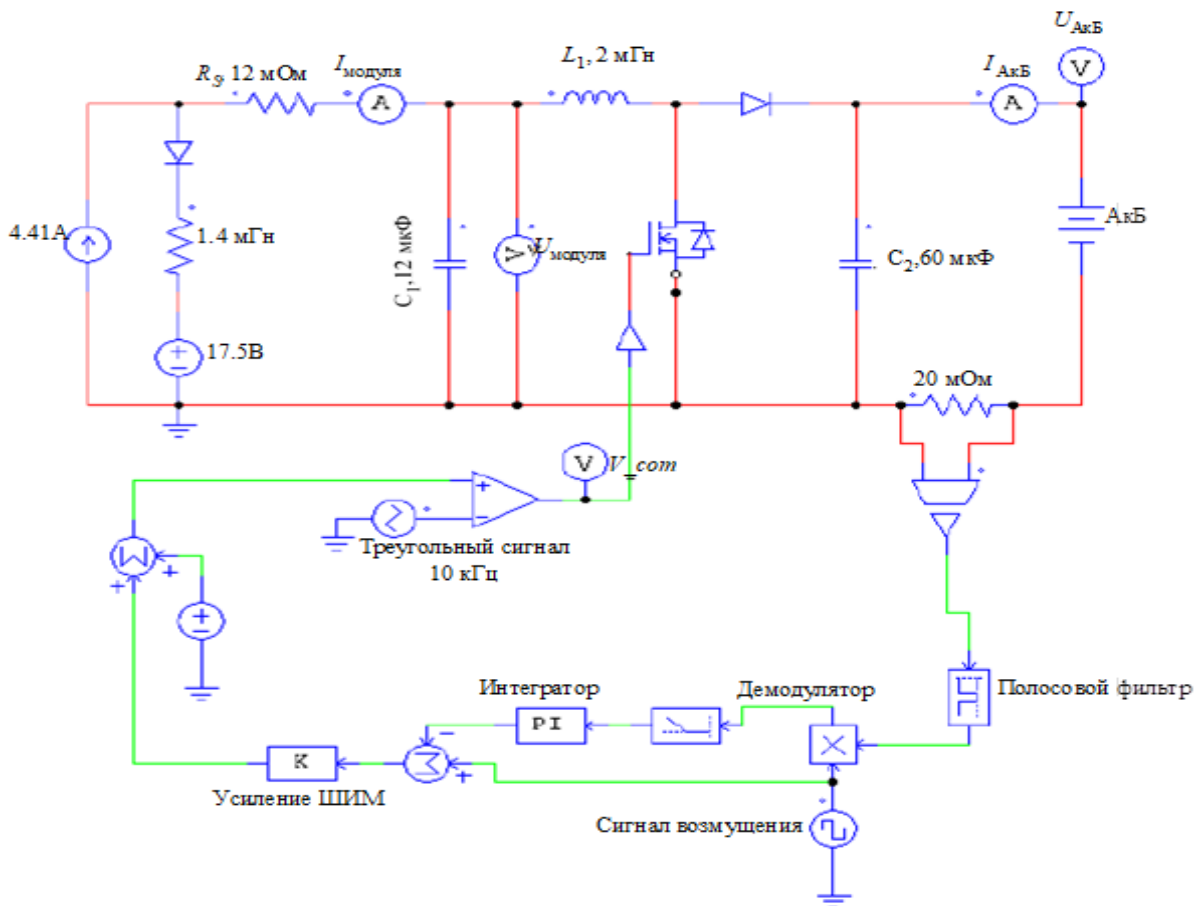


Рис. 4. Схема регулирования всей системы в среде PSIM

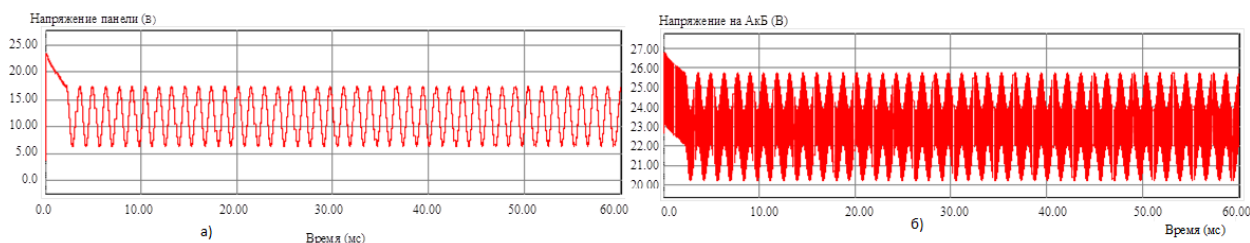


Рис. 5. Результаты моделирования по напряжению на входе и выходе моделируемого ПП без mppt

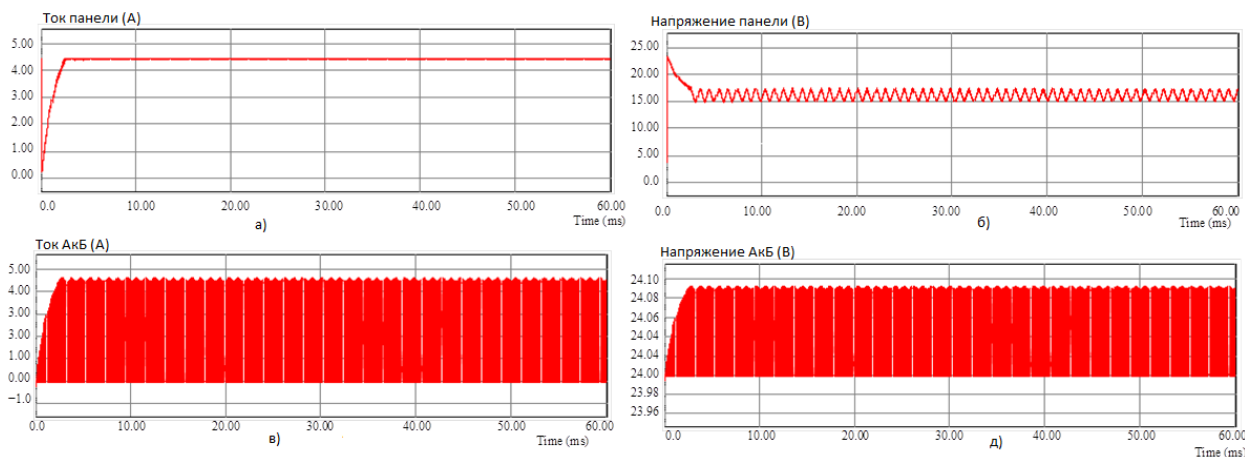


Рис. 6. Результаты моделирования на выходах панели и повышающего преобразователя, управляемого MPPT

Анализ работы преобразователя в среде PSIM без системы управления mppt показывает на рис. 5 а и б результаты по напряжению на входе ( $U$  панели) и выходе ( $U$  аккумуляторной батареи,  $U_{АкБ}$ ) в зависимости от времени. Из приведенных графиков можно сделать вывод, что напряжение стабилизируется на значении 15В на входе и 24В на выходе ПП, можно отметить повышающее поведение преобразователя.

Моделирование системы с управлением MPPT показывает на рис. 6 а,б,в,д, при постоянном солнечном освещении 1000 Вт / м<sup>2</sup> и температуре 25 °С типичные результаты моделирования электрических характеристик (напряжение и ток) на выходе панели (рис. 6 а и б) и на выходе ПП [вход АкБ, рис 6. в и д].

Можно отметить, что после переходного режима, управление MPPT заставляет рабочую точку колебаться вокруг точки ТММ. Величины ( $U$  и  $I$ ) стабилизируются вокруг значений, установленных нашими данными: На выходе панели  $U$  и  $I$  стабилизируются соответственно около 17 В и 4,4 А; На нагрузке,  $U$  и  $I$  стабилизируются соответственно около 24 В и 4,5 А.

## V. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В статье спроектирован и смоделирован ПП, проанализированы его технические характеристики в среде PSIM с управлением MPPT. Полученные результаты

показывают, что ПП с управлением MPPT эффективно выполняет свою роль, и что в течение менее 50 мс путем автоматического изменения коэффициента заполнения сигнала, система приближается к оптимальным условиям независимо от погодных условий и изменений нагрузки.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Abdelghani Harrag, Sabir Messalti. PSO- based SMC variable step size P&O MPPT controller for PV systems under fast changing atmospheric conditions. Int J Numer Model. 2019;e2603. doi.org/10.1002/jnm.2603
- [2] Али Кейхани. Проектирование систем возобновляемой энергии Smart Power Grid, третье издание. Моделирование преобразователей в системах распределенного поколения мощности. 2019 John Wiley & Sons, Inc.
- [3] Капустин И.В., Лукашенко А.В. Математическое моделирование и анализ импульсного повышающего преобразователя напряжения. Известия ТулГУ. Технические науки. Управление, вычислительная техника и информационные технологии, 2013. Вып. 2, С. 126-135
- [4] Повышающий преобразователь. [Электронный ресурс] URL: <https://academic.com/dic.nsf/frwiki/448456> (дата обращения: 03.01.2020).
- [5] Рашид М.У., Хабиб А. и Хасан М.М. Проектирование и создание системы солнечного фотовольтического моделирования с реализацией mppt и boost-преобразователей с использованием matlab / simulink. // Азиатский журнал текущих исследований. 3(1): 27-36, 2018. ISSN: 2456-804X