

МЕЖДУНАРОДНЫЙ ФОРУМ
«ВОЗОБНОВЛЯЕМАЯ ЭНЕРГЕТИКА. ПУТИ ПОВЫШЕНИЯ
ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ И ЭКОНОМИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ»
REENFOR 2013

ИССЛЕДОВАНИЕ PV МОДУЛЕЙ С ИНТЕГРИРОВАННЫМИ В ИХ КОНСТРУКЦИЮ КОНДЕНСАТОРАМИ С ДВОЙНЫМ ЭЛЕКТРИЧЕСКИМ СЛОЕМ

Карабанов С.М., Суворов Д.В., Кухмистров Ю.В., Сливкин Е.В.
Рязанский государственный радиотехнический университет, Рязань, Россия

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ КОНДЕНСАТОРОВ С ДВОЙНЫМ ЭЛЕКТРИЧЕСКИМ СЛОЕМ

В последнее время появился интерес к разработке PV модулей с интегрированными элементами – управляющей и силовой электроникой, элементами накопления энергии.

Использование конденсаторов с двойным электрическим слоем (EDLC, Ultra capacitors) в качестве элементов накопления энергии в PV системах позволяет решать следующие задачи:

- оптимизация работы MPPT устройств;
- сглаживание мощности PV генератора при частичном затенении;
- сглаживание мощности PV генератора при изменении погодных условий (затенение облаками);

Конструктивно EDLC могут быть выполнены в виде плоских модулей, что позволяет интегрировать их непосредственно с солнечный модуль.

Целью работы является исследование параметров и динамических характеристик PV модуля, интегрированного с конденсатором с двойным электрическим слоем методом математического моделирования.

ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ СОЛНЕЧНОГО МОДУЛЯ С ВНЕШНИМ КОНДЕНСАТОРОМ С ДВОЙНЫМ ЭЛЕКТРИЧЕСКИМ СЛОЕМ И РАЗДЕЛИТЕЛЬНЫМ ДИОДОМ

В условиях изменяющейся освещенности электрические процессы протекающие в системе «солнечный модуль»-«разделительный диод»-«конденсатор с двойным электрическим слоем»-«контроллер» можно разделить на 3 режима:

- квазистационарный режим, когда уровень внешней освещенности не изменяется.
- переходный режим соответствующий резкому спаду внешней освещенности. При этом солнечный модуль фактически отключается от нагрузки и конденсатора с помощью диода.
- переходный режим соответствующий быстрому возрастанию внешней освещенности до прежнего уровня. При этом ток вырабатываемый солнечным модулем частично заряжает накопительный конденсатор с двойным электрическим слоем и частично идет в нагрузку.

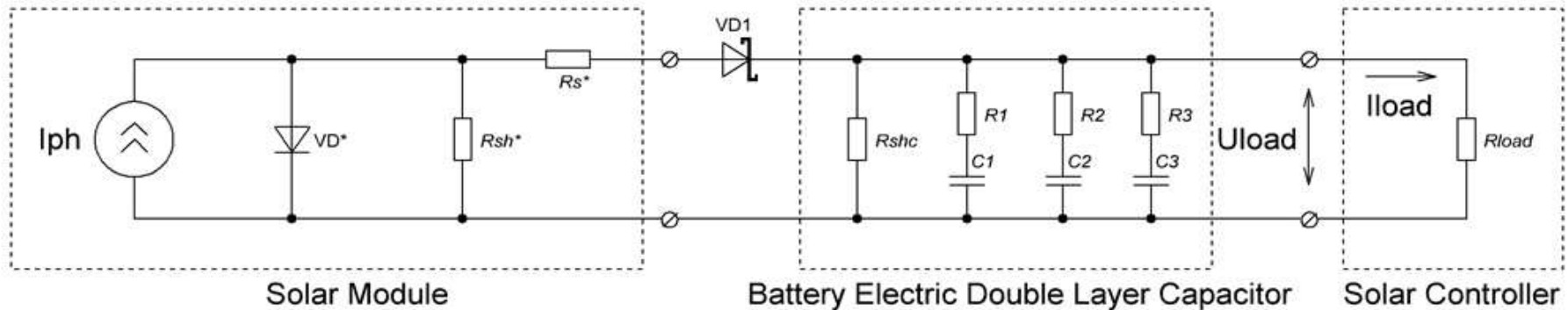


Рисунок 1 - Эквивалентная электрическая схема системы «солнечный элемент» - «конденсатор с двойным электрическим слоем» - «силовой контроллер» с диодом

ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ СОЛНЕЧНОГО МОДУЛЯ С ВНЕШНИМ КОНДЕНСАТОРОМ С ДВОЙНЫМ ЭЛЕКТРИЧЕСКИМ СЛОЕМ И РАЗДЕЛИТЕЛЬНЫМ ДИОДОМ

$$I_{load}(t) = I_1(t) + I_2(t) + I_3(t)$$

$$I_1(t) = \frac{U_{c1}(t) - U_{load}(t)}{R1}$$

$$I_2(t) = \frac{U_{c2}(t) - U_{load}(t)}{R2}$$

$$I_3(t) = \frac{U_{c3}(t) - U_{load}(t)}{R3}$$

$$U_{c1}(t) = U_{load}(0) - \frac{1}{C1} \int_0^{T_{dark}} I_1(t) dt$$

$$U_{c2}(t) = U_{load}(0) - \frac{1}{C2} \int_0^{T_{dark}} I_2(t) dt$$

$$U_{c3}(t) = U_{load}(0) - \frac{1}{C3} \int_0^{T_{dark}} I_3(t) dt$$

$$U_{load}(t) = R_{load} I_{load}(t)$$

Переходный режим соответствующий резкому спаду внешней освещенности.

При этом солнечный модуль фактически отключается от нагрузки и конденсатора с помощью диода.

В системе уравнений:

$C1, C2, C3$ - емкости эквивалентной схемы замещения конденсатора с двойным электрическим слоем;

U_{c1}, U_{c2}, U_{c3} – напряжения на емкостях $C1, C2, C3$ эквивалентной схемы;

I_{c1}, I_{c2}, I_{c3} – токи через емкости $C1, C2, C3$ эквивалентной схемы;

$U_{load}(0)$ – напряжение на нагрузке в квазистационарном режиме;

I_{load} – ток нагрузки в квазистационарном режиме;

T_{dark} – время затемнения

ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ СОЛНЕЧНОГО МОДУЛЯ С ВНЕШНИМ КОНДЕНСАТОРОМ С ДВОЙНЫМ ЭЛЕКТРИЧЕСКИМ СЛОЕМ И РАЗДЕЛИТЕЛЬНЫМ ДИОДОМ

$$I_{load}(t) = I_{PV}(U_{load} - U_{VD}) - (I_1(t) + I_2(t) + I_3(t))$$

$$I_1(t) = \frac{U_{load}(t) - U_{c1}(t)}{R1}$$

$$I_2(t) = \frac{U_{load}(t) - U_{c2}(t)}{R2}$$

$$I_3(t) = \frac{U_{load}(t) - U_{c3}(t)}{R3}$$

$$U_{c1}(t) = U_{load}(T_{dark}) + \frac{1}{C1} \int_0^{\infty} I_1(t) dt$$

$$U_{c2}(t) = U_{load}(T_{dark}) + \frac{1}{C2} \int_0^{\infty} I_2(t) dt$$

$$U_{c3}(t) = U_{load}(T_{dark}) + \frac{1}{C3} \int_0^{\infty} I_3(t) dt$$

$$U_{load}(t) = R_{load} I_{load}(t)$$

Переходный режим соответствующий быстрому возрастанию внешней освещенности до прежнего уровня.

При этом ток вырабатываемый солнечным модулем частично заряжает накопительный конденсатор с двойным электрическим слоем и частично идет в нагрузку.

В системе уравнений:

$C1, C2, C3$ - емкости эквивалентной схемы замещения конденсатора с двойным электрическим слоем;

U_{C1}, U_{C2}, U_{C3} – напряжения на емкостях $C1, C2, C3$ эквивалентной схемы;

I_{C1}, I_{C2}, I_{C3} – токи через емкости $C1, C2, C3$ эквивалентной схемы;

$U_{load}(0)$ – напряжение на нагрузке в квазистационарном режиме;

I_{load} – ток нагрузки в квазистационарном режиме;

T_{dark} – время затемнения

I_{PV} – ток фотоэлектрического модуля;

ВХОДНЫЕ ПАРАМЕТРЫ ЧИСЛЕННОЙ МОДЕЛИ СОЛНЕЧНОГО МОДУЛЯ С ВНЕШНИМ КОНДЕНСАТОРОМ С ДВОЙНЫМ ЭЛЕКТРИЧЕСКИМ СЛОЕМ И РАЗДЕЛИТЕЛЬНЫМ ДИОДОМ

При выполнении численного моделирования режима работы были использованы следующие параметры:

- время затемнения $T_{\text{dark}} - 1 \text{ сек.} - 3600 \text{ сек.}$
- время затемнения $T_{\text{light}} - 1 \text{ сек.} - 3600 \text{ сек.}$
- временной шаг $\Delta t - 10^{-4} - 1 \text{ сек.}$
- суммарная емкость конденсатора с двойным электрическим слоем $C_0 - 2000 \text{ Ф}$ (последовательное соединение 5 конденсаторов емкостью 10000 Ф каждый).
- Отношение взаимных емкостей эквивалентной схемы замещения конденсатора с двойным электрическим слоем – $C_1 - 40 \% C_0$, $C_2 - 30 \% C_0$, $C_3 - 30 \% C_0$.
- Постоянные времени разряда эквивалентных емкостей – $T_1 - 2 \text{ с.}$ $T_2 - 60 \text{ с.}$ $T_3 - 360 \text{ с.}$
- Сопротивление нагрузки выбиралось из условия максимального отбора мощности при освещении – $1,7229 \text{ Ом.}$
- Параметры выражения для аппроксимации ВАХ:
- $I_{\text{ph}} - 8.5 \text{ А}$ (при освещении) и $I_{\text{ph}} - 0.85 \text{ А}$ (при затемнении).
- $I_0 - 10^{-10} \text{ А}$
- Температура $T - 273 \text{ К.}$
- Последовательное сопротивление $R_s - 1 \text{ Ом;}$
- Параллельное сопротивление $R_{\text{sh}} - 100 \text{ Ом;}$
- Падение напряжения на диоде Шоттки $U_{\text{vd}} - 0,2 \text{ В;}$
- Рабочее напряжение модуля – 14 В.

РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТА

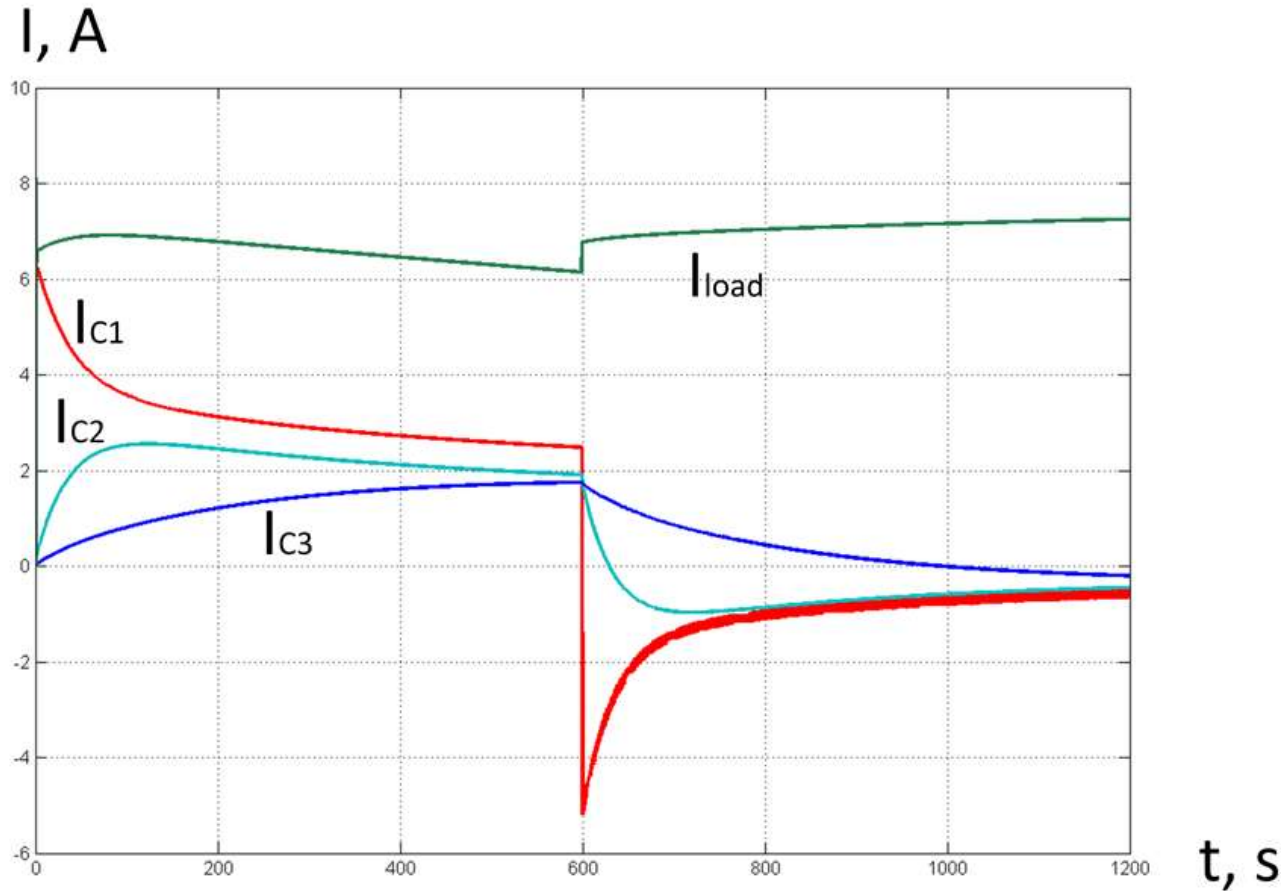


Рисунок 2 - Различные составляющие тока емкостей эквивалентной схемы замещения конденсатора с двойным электрическим слоем и ток нагрузки (время затенения - 1 минута)

РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТА

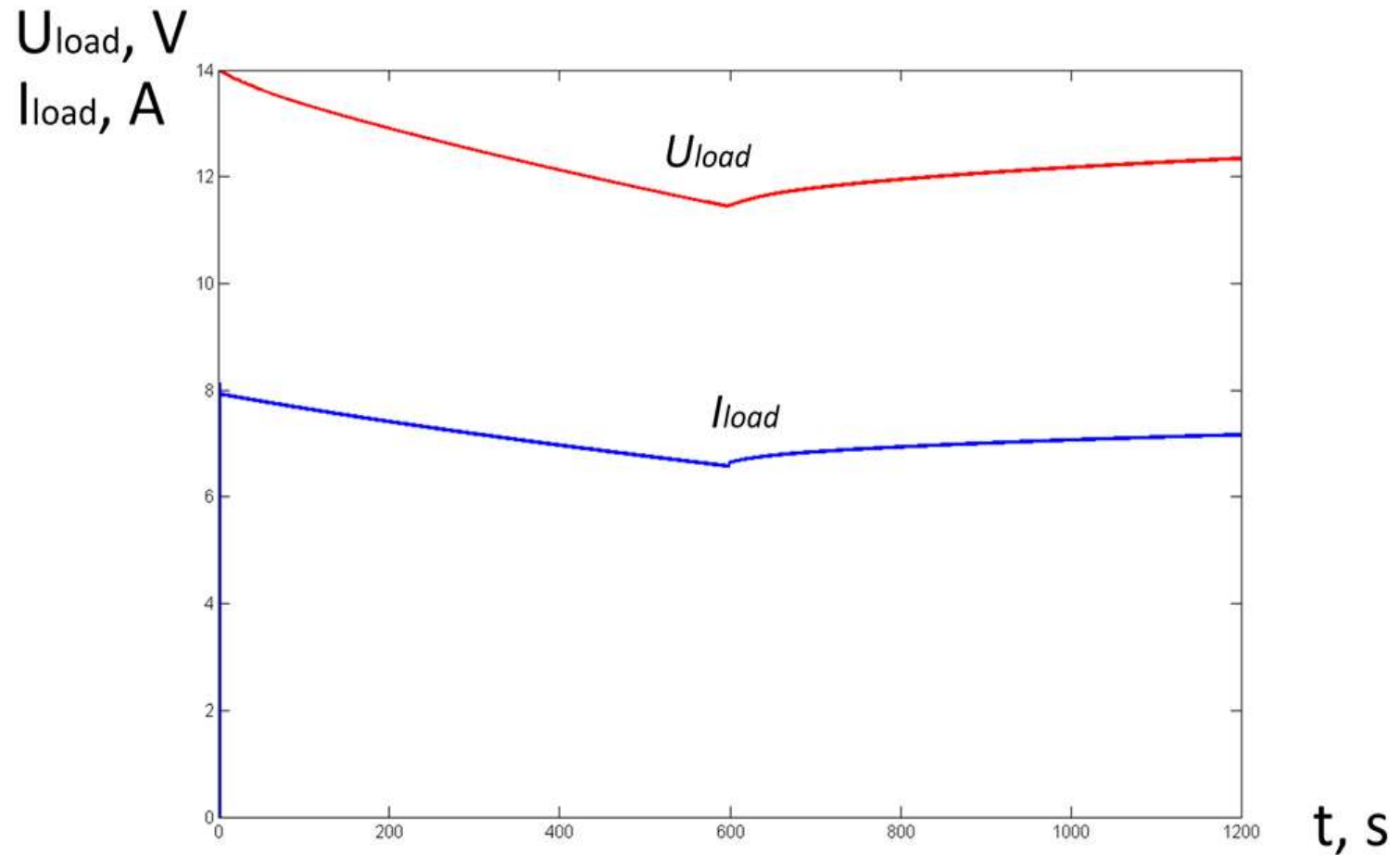


Рисунок 3 - Ток и напряжение на нагрузке (время затенения - 1 минута)

РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТА

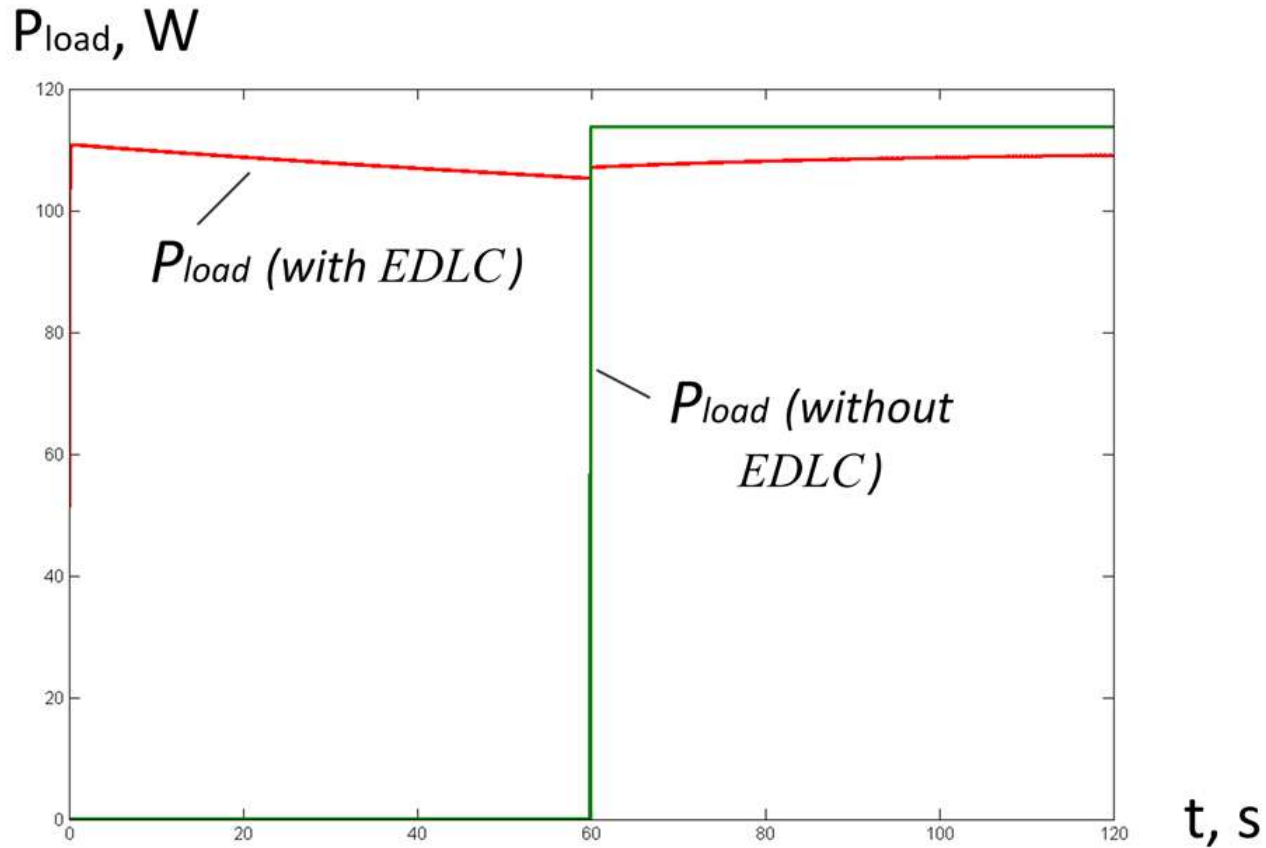


Рисунок 4 - Мощность, выделяемая в нагрузке при использовании конденсатора с двойным электрическим слоем и без него в условиях затенения (время затенения - 1 минута)

РЕЗУЛЬТАТЫ

Использование конденсатора с двойным электрическим слоем интегрированного в конструкцию солнечного модуля позволит существенно снизить требования к контроллеру солнечного модуля и минимизировать потери, возникающие при кратковременном затенении солнечного модуля.

- Полученные результаты позволяют рекомендовать солнечный модуль с интегрированным в конструкцию конденсатором с двойным электрическим слоем для использования в системах солнечной энергетики подвижного транспорта, например в вагонах железнодорожных составов, электромобилях, где вследствие движения транспорта возникают быстрые колебания освещенности.
- Достаточная энергоемкость позволяет использовать такие модули в системах уличного освещения.
- Способность EDLC к быстрому разряду позволяет эффективно питать нагрузки, требующие коротких мощных импульсов, например сигнальные огни маяков, передатчики телеметрических систем.