

АВТОНОМНАЯ СИСТЕМА ЭНЕРГОСНАБЖЕНИЯ ОТ СОЛНЕЧНЫХ МОДУЛЕЙ RZMP-240-T ДЛЯ ОБЪЕКТОВ СЕЛЬСКОГО ХОЗЯЙСТВА

Л.Г. Зотов

В статье рассмотрена автономная система энергоснабжения от солнечных модулей на основе конденсаторных повышающих и понижающих, многотактных, резонансных DC-DC преобразователей, а также конденсаторных повышающих инверторов с изменяющейся структурой. Показано, что наряду с технологичностью рассматриваемая система имеет высокий КПД и низкий уровень создаваемых кондуктивных импульсных помех.

Ключевые слова: автономное энергоснабжение, солнечные модули, DC-DC и AC-DC преобразователи на основе структур с переключаемыми конденсаторами, кондуктивная импульсная помеха.

Главные требования при проектировании автономных систем энергоснабжения (АСЭ) – малые габариты, высокий КПД и низкий уровень создаваемых импульсных помех. КПД современных устройств преобразования электрической энергии – классических высокочастотных широтно-импульсных инверторов и DC-DC преобразователей, для автономных систем энергоснабжения близок к достижению своего максимально предельного значения. Дальнейшее увеличение КПД на несколько процентов может быть достигнуто снижением коммутационных потерь мощности в силовых ключах применением резонансных методов, обеспечивающих режим их мягкой коммутации, а также уменьшением динамических перепадов напряжения при переходе из режима отсечки в насыщение. Снижение уровня импульсных помех достигается разумной децентрализацией в сочетании с многотактным режимом работы используемых преобразователей.

Поставленная в [1] задача решается применением в составе АСЭ повышающих и понижающих многотактных DC-DC преобразователей (МКП), а также повышающих ин-

верторов на основе структур с переключаемыми конденсаторами [2-9]. Структурная схема АСЭ представлена на рисунке 1.

Особенность АСЭ состоит в том, что её электропитание осуществляется от групп из 4-х последовательных солнечных модулей (СМ) RZMP 240-T, соединенных параллельно. Такое решение позволяет применить входную аккумуляторную батарею (АБ) с достаточно высоким выходным напряжением 96-112 В и тем самым уменьшить сечение и потери мощности в подводящих кабелях. В дальнейшем это напряжение дважды удваивается – вначале DC-DC, а затем DC-AC преобразователями. С целью энергосбережения применена светодиодная система освещения (ССО) в сочетании с питающим её понижающим в два раза DC-DC преобразователем.

Другая отличительная особенность данной АСЭ в том, что при увеличении напряжения заряда выше 112 Вольт СМ отключаются от АБ и переключаются на теплонагревательный элемент, осуществляющий, например, подогрев воды.

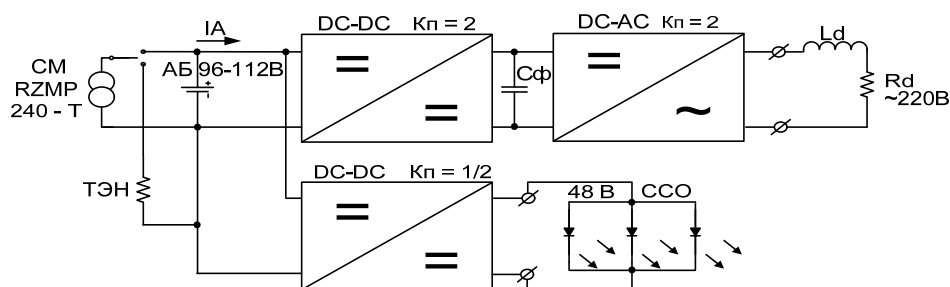


Рисунок 1 – Структурная схема АСЭ

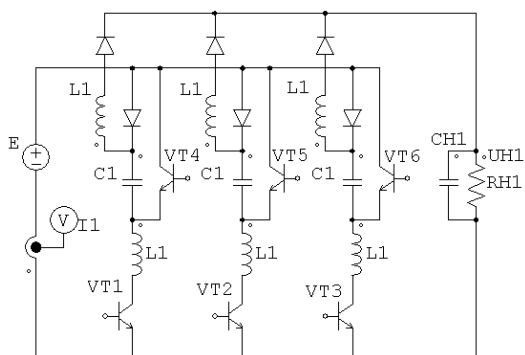


Рисунок 2 – 3-х тактный резонансный повышающий конденсаторный преобразователь DC/DC $K_n = 2$

Принципиальная схема силовой цепи 3-х тактного, повышающего, конденсаторного, резонансного DC-DC преобразователя используемого в АСЭ приведена на рисунке 2, а на рисунке 3 даны временные диаграммы, поясняющие её работу.

Снижение габаритов и увеличение КПД достигается соответственно благодаря увеличению частоты преобразования до величины порядка 500 кГц и выше и уменьшением коммутационных потерь в высокочастотных зарядных ключах VT1–VT6 введением в силовую цепь последовательных реакторов L1, обеспечивающих режим их мягкой коммутации [1].

В исходном состоянии преобразователь состоит из k1 (тактность) однотипных повышающих преобразователей (ОКП), содержащих каждый по n1 конденсаторно-диодных цепочек (КДЦ), работающих на нагрузку.

Принцип действия повышающего ОКП заключается в периодическом параллельном подзаряде конденсаторов его цепочек от входного источника постоянного напряжения E через зарядные ключи VT4–VT6 с их последующим последовательным разрядом на нагрузку через соответствующие данному состоянию разрядные ключи ((VT1–VT3)). Поскольку разряд конденсаторов на нагрузку происходит через последовательно соединенную АБ с напряжением E, то силовая цепь ОКП упрощается уменьшением числа КДЦ на единицу. В результате выходное напряжение преобразователя оказывается равным

$$U_{HI} = (n1 + 1) \cdot E.$$

Увеличение тактности преобразователя - k1 приводит к пропорциональному увеличе-

нию максимального тока нагрузки и снижению уровня кондуктивной импульсной помехи на зажимах АБ. С целью её минимизации подзаряд конденсаторов ОКП осуществляется положительными импульсами синусоидального тока длительностью $0,5 \cdot T_K$ равномерно распределенными по периоду T_K частоты коммутации зарядных ключей со сдвигом по времени друг относительно друга равным $(\Delta t)_1 = (T_K / k1)$ рисунок 3.

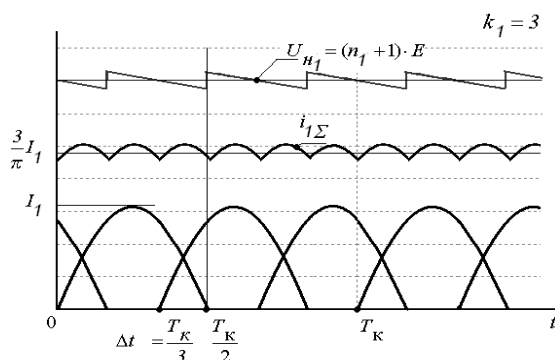


Рисунок 3 – Временные диаграммы, поясняющие работу 3-х тактного резонансного повышающего КП

При этом зарядный ток ОКП определяется выражением

$$i_1(t, \tau_1) = I_1 \cdot \sum_{i=0}^{k1-1} [\sin \omega_K \cdot (t - i \cdot \frac{T_K}{k1} - \tau_1)] \cdot \rightarrow$$

$$\rightarrow \cdot I_1 [i \cdot \frac{T_K}{k1} + \tau_1, \frac{T_K}{2} + i \cdot \frac{T_K}{k1} + \tau_1]$$

где τ_1 временной сдвиг последовательности импульсов зарядного тока относительно на-

чала координат, $I_1 = \frac{\pi}{k1} \cdot n1 \cdot I_{HI}$ амплитуда

зарядного тока ОКП, ΔE – пульсация напряжения на конденсаторах ОКП,

$\rho = \frac{1}{n1} \cdot \sqrt{\frac{L1}{C1}}$ – характеристическое сопротивление зарядного контура ОКП,

АВТОНОМНАЯ СИСТЕМА ЭНЕРГОСНАБЖЕНИЯ ОТ СОЛНЕЧНЫХ МОДУЛЕЙ RZMP-240-T ДЛЯ ОБЪЕКТОВ СЕЛЬСКОГО ХОЗЯЙСТВА

$$i_{1\partial\sim} = \sqrt{(i_{1\partial}^2 - i_{10}^2)} = \sqrt{\frac{I}{T_K} \cdot \int_0^T i_1^2(t) \cdot dt} \rightarrow$$

$$\rightarrow -I \frac{I}{T_K} \int_0^T i_1(t) \cdot dt]^2$$

где

$$i_{10} = \frac{I}{T_K} \cdot \int_0^T i_1(t) \cdot dt = I_1 \cdot \frac{k_1}{\pi}$$

среднее значение зарядного тока

$$i_1(t).$$

С увеличением тактности преобразователя k_1 происходит уменьшение $i_{1\partial\sim}(k_1)$.

В таблице 1 приведены результаты моделирования, иллюстрирующие темпы снижения уровня помехи с увеличением k_1 .

Активная мощность нагрузки определяется средним значением. Поэтому, сравнивая величины $i_{1\partial\sim}$ для одинаковых средних значений i_{10} , приходим к выводу, что уменьшение действующего значения тока помехи $i_{1\partial\sim}$ для нечетных k_1 происходит на существенно пониженном уровне.

Таблица 1

k	$K_{\Gamma I} = \frac{i_{I\Sigma\partial\sim}}{i_{I\Sigma\text{ср}}}$	k
2	0,483455	1
4	0,097759	3
6	0,042200	5

Например, уровни помехи для k_1 равном трем и шести совпадают. Отсюда следует вывод о целесообразности применения в группах только нечетного количества ОКП. Из закона сохранения заряда следует, что средние значения токов всех ключей ОКП одинаковы и равны $I_{\text{ксп}} = \frac{I}{k_1} \cdot I_{HI}$. Амплитуда тока через зарядные ключи VT4-VT6 ОКП определяется выражением

$$I_{kl} = \frac{I}{n_1} \cdot I_1 = \frac{\pi}{k_1} \cdot I_{HI}$$

Количество ОКП - k_1 , величина емкости C_1 и индуктивности L_1 цепочек определяются из максимального требуемого тока I_{Hmax} , коэффициента пульсации по первой гармонике напряжения нагрузки $K_{n1} = \frac{U_{H1}}{U_{H0}}$ и частоты коммутации ключей ω_K .

$$k_1 \cdot C1 = \frac{2 \cdot n_1 \cdot I_{HI} \cdot I_{Hmax}}{K_{n1} \cdot \omega_K \cdot (n_1 + 1) \cdot E}, L1 = \frac{I}{\omega_K^2 \cdot C1}$$

Принципиальная схема силовой цепи 3-х тактного, резонансного понижающего DC-DC преобразователя используемого в АСЭ для системы освещения приведена на рисунке 4, а на рисунке 5 даны временные диаграммы, поясняющие его работу.

Преобразователь состоит из k_2 понижающих ОКП, состоящих из n_2 КДЦ каждый. Принцип действия понижающего ОКП заключается в периодическом подзаряде последовательно соединенных конденсаторов его цепочек от АБ с напряжением E через зарядные ключи VT1-VT3, с их последующим параллельным разрядом на нагрузку через разрядные ключи VT4-VT6. Так как подзаряд конденсаторов от источника E происходит через последовательно соединенную нагрузку, то силовая цепь ОКП упрощается уменьшением числа КДЦ на единицу. В результате выходное напряжение преобразователя оказывается равным

$$U_{H2} = \frac{E}{(n_2 + 1)}$$

Увеличение количества ОКП - k_2 также приводит к пропорциональному увеличению максимального тока нагрузки и снижению уровня кондуктивной импульсной помехи.

Зарядный ток понижающего КП определяется выражением

$$i_2(t, \tau_2) = I_2 \cdot \sum_{i=0}^{k_2-1} [\sin \omega_K \cdot (t - i \cdot \frac{T}{k_2} - \tau_2)] \cdot [i \cdot \frac{T}{k_2} + \tau_2, \frac{T}{2} + i \cdot \frac{T}{k_2} + \tau_2]$$

где τ_2 – временной сдвиг последовательности импульсов зарядного тока относительно начала координат, $I_2 = \frac{\pi}{k_2} \cdot \frac{I_{H2}}{(n_2 + 1)}$ – ам-

плитуда зарядного тока понижающего КП,

$$I_{H2} \approx \frac{E}{(n_2 + 1) \cdot R_{H2}} -$$

среднее значение тока нагрузки.

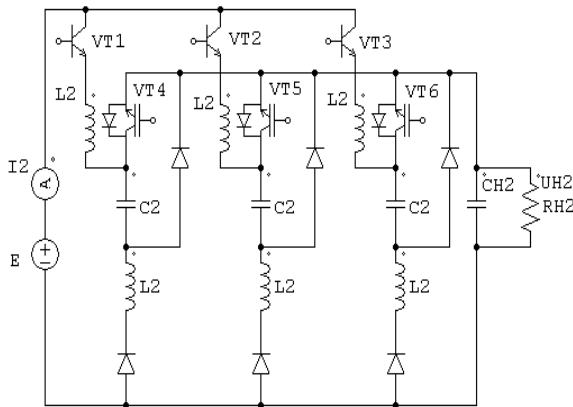


Рисунок 4 – 3-х тактный резонансный понижающий конденсаторный преобразователь DC/DC $k_2 = 1/2$

Количество ОКП в группах k_2 , величина емкости C и индуктивности L модулей определяются из максимального требуемого тока $I_{н\text{иср}}$, величины пульсации напряжения на конденсаторах ΔU_c и частоты коммутации ключей ω_k

$$k_2 \cdot C_2 = \frac{2 \cdot \pi \cdot I_{H2}}{\omega_k \cdot (n_2 + 1) \cdot \Delta U_c}, L_2 = \frac{1}{\omega_k^2 \cdot C_2}$$

$$\omega_k = (2\pi / T_k) = (1 / \sqrt{L_2 \cdot C_2}) - \text{резонансная частота зарядного контура, } L_2, C_2 - \text{индуктивность и емкость КДЦ понижающего КП.}$$

Дальнейшее уменьшение уровня кондуктивной импульсной помехи на зажимах АБ при одновременной работе повышающего и понижающего КП в составе АСЭ достигается оптимальным выбором временных сдвигов:

τ_1, τ_2 зарядных токов $i_1(t, \tau_1)$ и $i_2(t, \tau_2)$.

Обобщенный критерий оптимизации формулируется следующим образом: при одинаковых частотах коммутации ключей $\omega_k = (2\pi / T_k)$, работающих со скважностью равной двум, определить временные сдвиги $\tau_1, \tau_2, \dots, \tau_k$, доставляющие минимум квадрату действующего значения переменной составляющей суммарного зарядного тока, потребляемого K преобразователями от АБ.

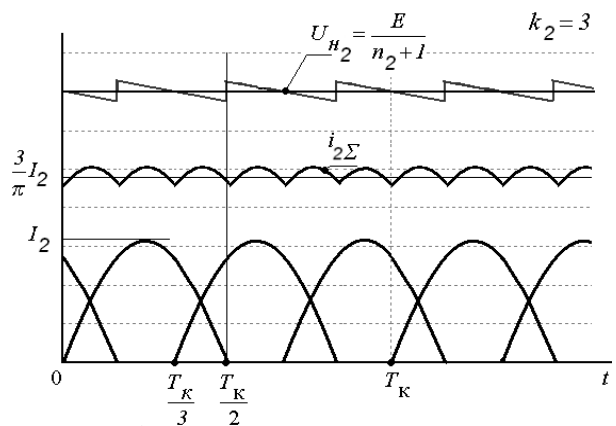


Рисунок 5 – Временные диаграммы, поясняющие работу понижающего 3-х тактного резонансного КП

$$i_{\partial\Sigma}^2 \sim (\tau_j) = \frac{k_{\min}}{T_k} \cdot \int_0^{T_k} [\sum_{j=1}^k i_j(t, \tau_j) - i_{0\Sigma}]^2 \cdot dt - \min$$

здесь k_{\min} – наименьшая тактность КП, потребляющего ток от АБ,

$$i_{0\Sigma} = \frac{I}{T_k} \cdot \int_0^{T_k} i_{\Sigma}(t, \tau_j) \cdot dt = \sum_{j=1}^k I_j \cdot \frac{k_j}{\pi}$$

постоянная составляющая суммарного зарядного тока не зависящая от τ_j . Если

k_{\max} – наибольшая тактность КП, то для АСЭ из двух КП ($K=2$) анализ дает следующие выражения для оптимальных временных сдвигов:

АВТОНОМНАЯ СИСТЕМА ЭНЕРГОСНАБЖЕНИЯ ОТ СОЛНЕЧНЫХ МОДУЛЕЙ RZMP-240-Т ДЛЯ ОБЪЕКТОВ СЕЛЬСКОГО ХОЗЯЙСТВА

$$\tau_1 = 0, \tau_2 = \frac{T_K}{2 \cdot k_{max}}$$

$$\tau_2 = \frac{T_K}{4 \cdot k_{max}} \text{ -- соответственно для}$$

четных и нечетных значений k_{max} . Если АСЭ состоит из двух трехтактных КП, т.е. $k1=k2=3$, то оптимальный сдвиг $\tau_2 = (T_K / 12)$ рисунок 6, а соответствующее ему

$$i_{min\Delta\Sigma}^2(\tau_2 = \frac{T_K}{12}) = \frac{1}{2} \cdot (1 + \frac{3\sqrt{3}}{2\pi}) \cdot (I_1^2 + I_2^2) + (\frac{\sqrt{3}}{2} + \frac{3}{\pi}) \cdot I_1 \cdot I_2 - [\frac{3}{\pi} \cdot (I_1 + I_2)]^2$$

Его максимум достигается при $\tau_1 = \tau_2 = 0$

$$i_{max\Delta\Sigma}^2(\tau_2 = 0) = \frac{1}{2} \cdot (1 + \frac{3\sqrt{3}}{2\pi}) \cdot (I_1^2 + I_2^2) - [\frac{3}{\pi} \cdot (I_1 + I_2)]^2$$

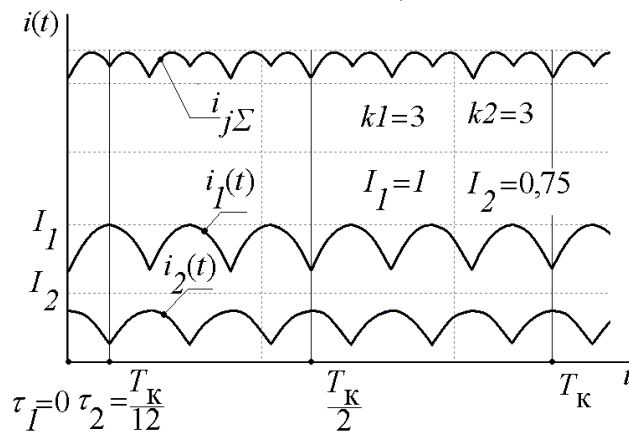


Рисунок 6 – Временные диаграммы токов от АБ при оптимальном $\tau_2 = (T_K / 12)$.

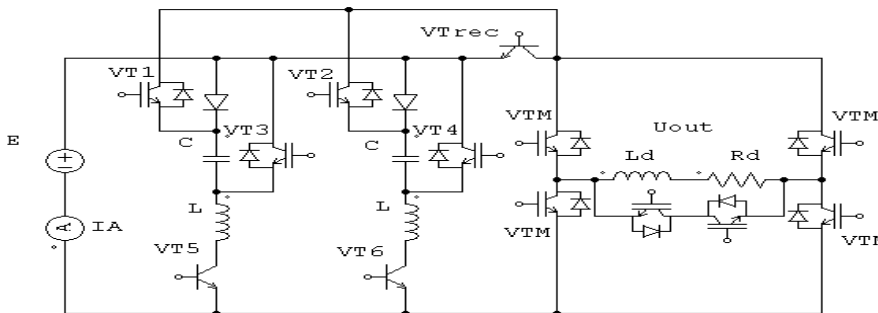


Рисунок 7 – Базовая схема мостового однофазного инвертора напряжения на основе повышающего КП с изменяющейся структурой

Важно отметить, что для типовых значений $k_j = 2,3$ эффективность проведенной оптимизации весьма существенна.

Для ее оценки достаточно сравнить максимальные и минимальные значения $i_{\Delta\Sigma}^2$. При одинаковых амплитудах импульсов тока $I_1 = I_2$ величина выигрыша составляет 15,46 раза.

Расчеты по приведенным в статье формулам показывают, что для АСЭ с выходной мощностью по цепи переменного тока $P_{вых} \sim 10$ кВт и по цепи постоянного тока (освещение) $P_{вых} = 1$ кВт необходимо применить 2 конденсатора с емкостью $C = 6$ мкф и напряжением $U = 130$ В и 6 конденсаторов с емкостью $C = 1$ мкф и напряжением $U = 260$ В. Для системы освещения необходимо 2 конденсатора с емкостью $C = 13$ мкф и напряжением $U = 60$ В.

Принцип работы инвертора основан на изменении структуры повышающего DC-DC конденсаторного преобразователя, поочередной коммутацией транзисторных ключей VT3, VT4 с частотой 50 Гц.

При этом происходит скачкообразное изменение коэффициента преобразования $K_n = 0,1,2$, приводящее к изменению выходного напряжения

U_{out} , как показано на рисунке 8. Воздействием гармонической ШИМ на транзисторы V_{TM} моста получаем синусоидальный ток в нагрузке $I(Ld)$. Важное достоинство рассматриваемого инвертора заключается в уменьшенном динамическом перепаде напряжения на транзисторах моста не превышающем в рассматриваемой АСЭ 224 В.

Как показано в [10] это позволяет дополнительно повысить КПД инвертора на 1,5-2 % за счет снижения потерь мощности на коммутационные потери в транзисторах V_{TM} моста.

Недостаток рассматриваемого инвертора в пульсирующем токе, потребляемом от АБ.

Из рисунка 8 видно, что величина пульсации тока I_A в два раза превышает пульсацию тока в нагрузке, что отрицательно сказывается на работе АБ.

Существенное уменьшение пульсации потребляемого тока достигается построением АСЭ по децентрализованной схеме (рисунок 9).

Эффект достигается равномерным распределением токов потребления децентрализованных нагрузок $I(Ld)$ по половине или целому периоду их частоты. Временные диаграммы входных и выходных токов децентрализованной АСЭ, подтверждающие резкое снижение величины пульсации тока АБ приведены на рисунке 10.

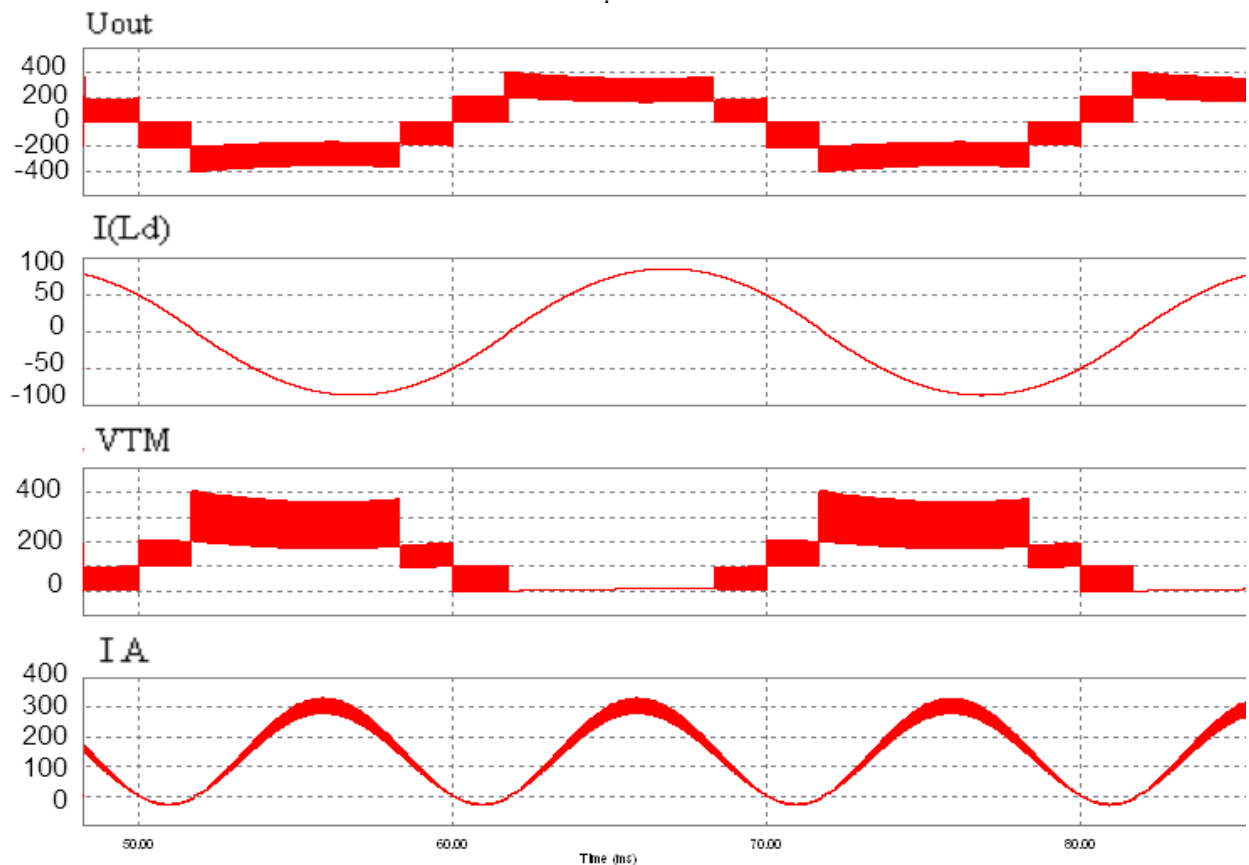


Рисунок 8 – Временные диаграммы поясняющие работу мостового однофазного инвертора напряжения на основе повышающего КП

АВТОНОМНАЯ СИСТЕМА ЭНЕРГОСНАБЖЕНИЯ ОТ СОЛНЕЧНЫХ МОДУЛЕЙ RZMP-240-T
ДЛЯ ОБЪЕКТОВ СЕЛЬСКОГО ХОЗЯЙСТВА

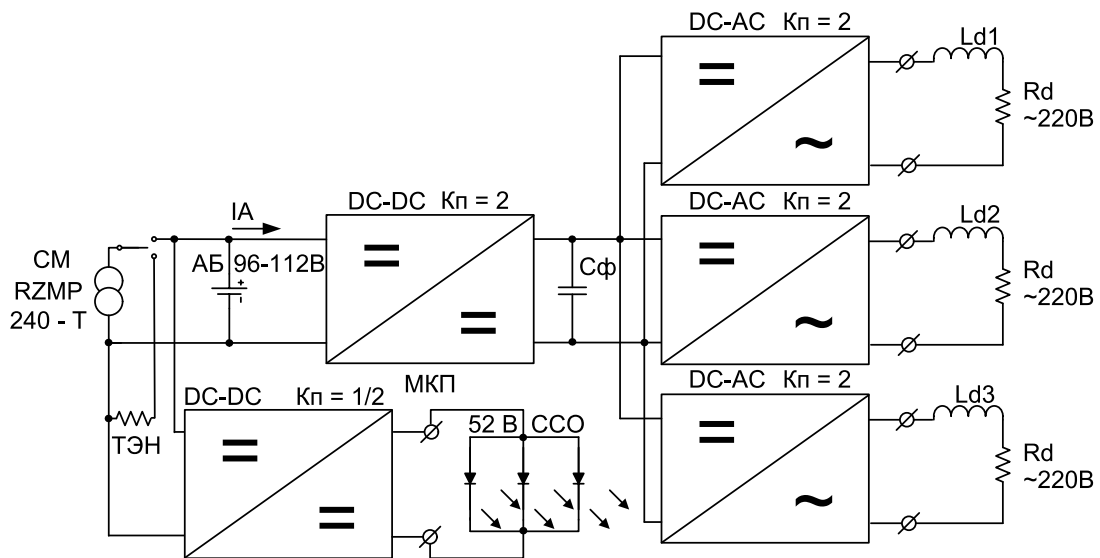


Рисунок 9 – Структурная схема децентрализованной АСЭ

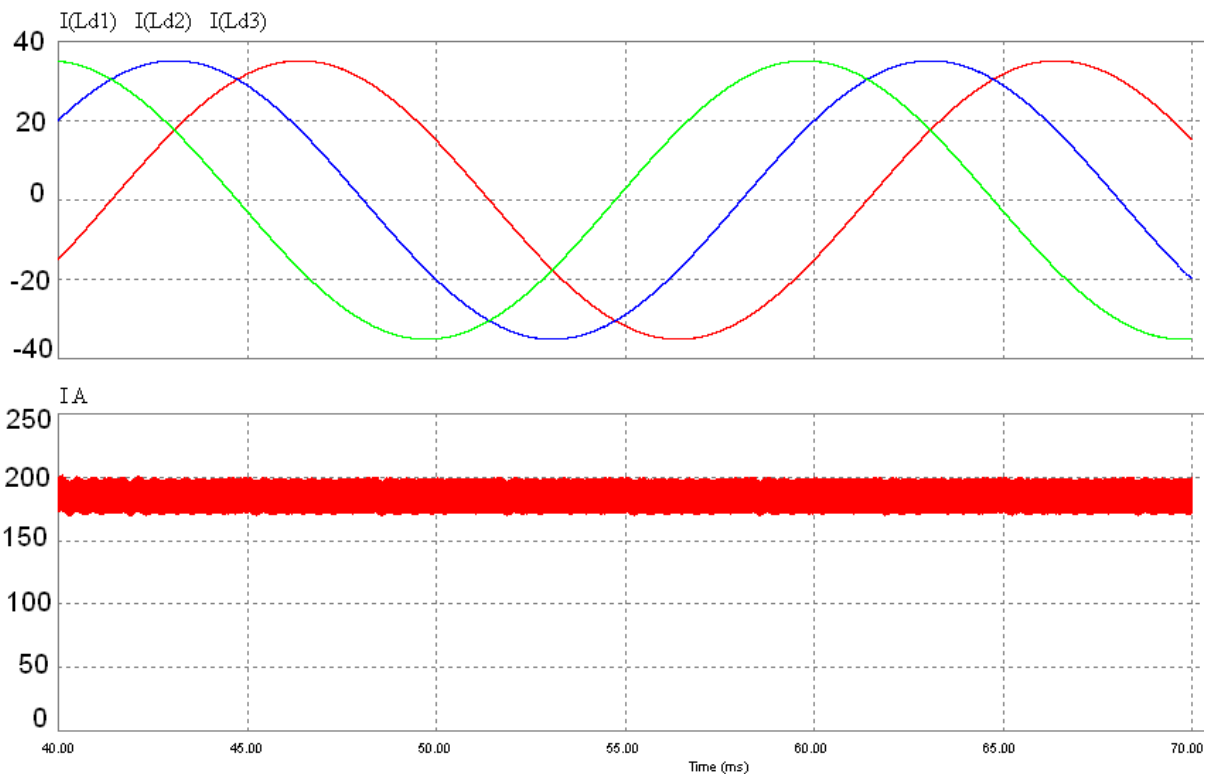


Рисунок 10 – Временные диаграммы поясняющие работу мостового однофазного инвертора напряжения на основе ПКП

Выводы

Предложен принцип построения автономных децентрализованных энергосистем от солнечных модулей на основе конденсаторных повышающих и понижающих, многотактных, резонансных DC-DC преобразовате-

лей, а также конденсаторных повышающих инверторов с изменяющейся структурой.

Показано, что благодаря снижению коммутационных потерь в силовых ключах DC-DC преобразователей и конденсаторных инверторов с изменяющейся структурой и при-

ЗОТОВ Л.Г.

менению многотактного режима их работы АСЭ имеет повышенный КПД и существенно более низкий уровень создаваемых импульсных помех.

Проведен анализ электрических процессов, позволяющий рассчитать параметры режимов работы элементов силовой цепи и дать рекомендации по применению в преобразователях только нечетного количества ОКП;

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Н.Н.Weiss, K.Ince, G.Zinoviev "Multi-Input Small-Power Renewable Energy Supply System Realized By Special Power Electronics" с. 617-622.
2. Зотов, Л.Г. Анализ импульсных помех в бестрансформаторных системах вторичного электропитания / Л.Г. Зотов // Научный вестник НГТУ. – №1(19). – 2005. – С. 83-88.
3. Зотов, Л.Г. Метод построения многоуровневых инверторов на основе повышающих конденсаторных преобразователей с изменяющейся структурой / Л.Г. Зотов // Электротехника №10. – 2007. – С.34-40.
4. Зотов, Л.Г. Конденсаторные повышающие преобразователи с изменяющейся структурой

для автономных энергосистем / Л.Г. Зотов // Электротехника. – №4. – 2011. – С. 46-50.

5. Зотов, Л.Г. Понижающие преобразователи постоянного напряжения на основе структур с переключаемыми конденсаторами для автономных энергосистем / Л.Г. Зотов // Научный вестник НГТУ. – №1(42). – 2011. – С.151-158.
6. Зотов, Л.Г. Патент RU №2284633. Регулируемый понижающий преобразователь постоянного напряжения. Оpubл. БИ №27, 27.09.2006 г.
7. Зотов, Л.Г. Патент RU №2323515. Регулируемый понижающий преобразователь постоянного напряжения. Оpubл. БИ №12, 27.04.2008 г.
8. Зотов, Л.Г. Патент RU №2394345. Регулируемый повышающий преобразователь постоянного напряжения. Оpubл. БИ №19, 10.07.2010 г.
9. Зотов, Л.Г. Патент RU №2415506. Регулируемый понижающий преобразователь постоянного напряжения / Л.Г. Зотов, Г.С. Зиновьев. – Оpubл. БИ №9, 27.03.2011 г.
10. С.Nunez, J.lira, N.Visairo "Analysis of the Boundaries to Compensate Voltage Sag Events Using a Single.
11. Phase Multi-Level Rectifier", EPE Journal. – Vol.20. – No 4. – Dec. 2010. – с. 5-11.

Зотов Л.Г., к. т. н., доц., Новосибирский государственный технический университет,
E-mail: zotovlg@mail.ru.