

УДК 681.

Е. И. Сокол, Ю. П. Гончаров, А. В. Ерьско, В. В. Ивахно, С. Ю. Кривошеев, Ю. С. Войтович,  
Е. А. Маляренко, Б.А. Стысло

Национальный технический университет "Харьковский политехнический институт"  
г. Харьков, Украина, e-mail: [sokol@kpi.kharkov.ua](mailto:sokol@kpi.kharkov.ua)

### **ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ СОЛНЕЧНОЙ ЭНЕРГИИ В ЭЛЕКТРИЧЕСКУЮ ПРИ ЛИНЕЙНОМ РАСПОЛОЖЕНИИ ФОТОГЕНЕРАТОРОВ**

*Рассматривается двухступенчатая структура с последовательной организацией для преобразования солнечной энергии в электрическую при расположении фотогенераторов вдоль линейных территориальных объектов типа улиц и автодорог.*

**Ключевые слова:** уличное освещение, солнечные панели, структура системы, преобразователь

*Розглядається двоступінчата структура з послідовною організацією для перетворення сонячної енергії в електричну при розташуванні фотогенераторів уздовж лінійних територіальних об'єктів типа вулиць і автодоріг.*

**Ключові слова:** вуличне освітлення, сонячні панелі, структура системи, перетворювач

**Анализ состояния проблемы и постановка задачи работы**

Принцип централизованного производства электроэнергии является одним из двух краеугольных камней современной электроэнергетики, основы которой были заложены М Доливо-Добровольским и Н. Тесла еще в конце 19 столетия. Однако по мере исчерпания традиционных энергоносителей, в электроэнергетике прослеживается тенденция к увеличению доли распределенных генераторов энергии, прежде всего, возобновляемой. По мнению авторов статьи, наиболее перспективно по экологическим и иным соображениям использование солнечной энергии. Мало того, для стран с высокой плотностью населения, к которой принадлежит и Украина, целесообразно строительство, прежде всего, не крупных гелиостанций, занимающих большую площадь, а, в большей мере, использование, по совместительству, уже имеющихся территориальных объектов с линейным расположением, например, улиц, автодорог, полос отчуждения железных дорог и т. д. Авторами предложена структура с продольной линией постоянного тока, которая связывает линейно расположенные фотогенераторы в последовательную электрическую цепь, и полупроводниковыми преобразователями для их подключения к приемнику электрической энергии, в качестве которого может выступать, например, традиционная трехфазная сеть низкой частоты [1, 2].

Стоит обратить внимание и на второй краеугольный камень системы Доливо-Добровольского-Тесла, который состоит в использовании трехфазного переменного тока низкой частоты в системе передачи электроэнергии. Его использование было обусловлено возможностью непосредственного подключения к питающей сети асинхронных электродвигателей как основного вида нагрузки. Однако, развитие силовой электроники сделало привод с прямым подключением на сеть неконкурентоспособным в сравнении с полупроводниковым частотно-регулируемым электроприводом. В качестве альтернативного варианта, как показано в работах авторов [3, 4], целесообразно использовать комбинированную систему, состоящую из линии однофазного переменного тока повышенной частоты и линии постоянного тока.

Задача данной работы состояла в разработке структуры системы преобразования солнечной энергии в электрическую при использовании в приемной сети комбинированной системы, определении целесообразных схем полупроводниковых преобразователей и анализе наиболее принципиальных характеристик получающейся преобразовательной системы.

**Общая идеология и структура преобразовательной системы.** Предлагаемая структура системы мощностью до сотен киловатт представлена на рис. 1. Фотомодули, показанные на рис. 1 символами фотодиодов, представляют собой одну или несколько солнечных панелей, распределенных вдоль условной линии генерации.

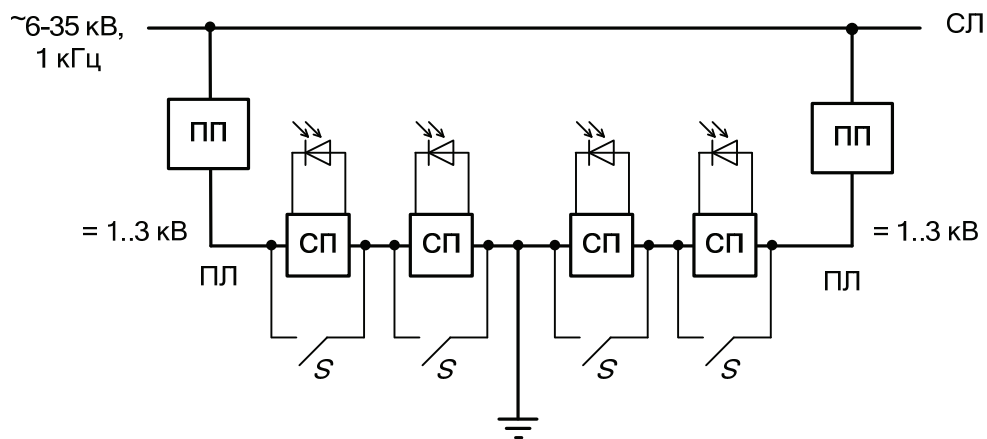


Рис. 1.

Каждый из модулей генерирует невысокое напряжение порядка 50 В, допустимое по условиям электробезопасности, и снабжается согласующим преобразователем (СП), который необходим для максимизации получаемой энергии модуля, а также, при необходимости, позволяет осуществить гальваническую развязку от последующих частей системы, для чего в схеме СП содержится развязывающий трансформатор.

Модули соединяются друг с другом отрезками продольной линии (ПЛ) постоянного тока в единую последовательную цепь. Эта цепь делится на секции с напряжением  $u_c$  на каждой относительно земли порядка (1–3) кВ. Со стороны, противоположной заземленному выводу, секция присоединяется к сетевой линии (СЛ) через переходной преобразователь ПП и получаемая секцией электрическая мощность передается в приемную сеть (6-35 кВ, 1 кГц).

Принцип последовательной организации цепи продольной линии вполне согласуется с характеристиками фотомодуля как генератора. Его идеализированные характеристики приведены на рис. 2.

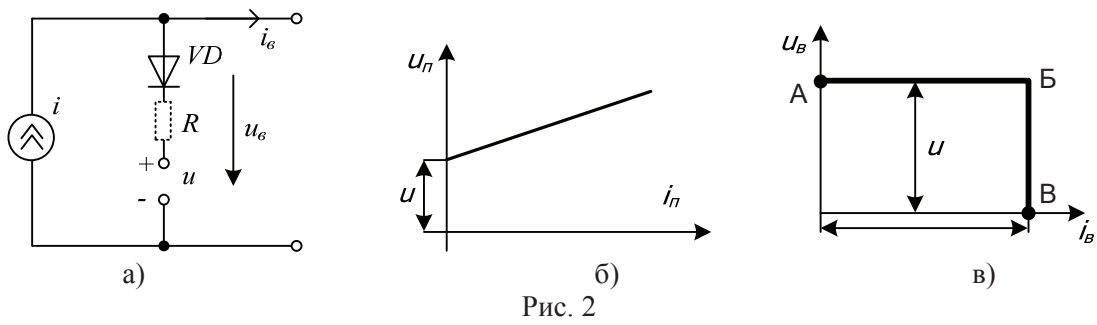


Рис. 2

В первом приближении фотомодуль можно рассматривать как источник тока  $i$ , пропорциональный интенсивности солнечного излучения (рис 2, а). Следовательно, генератор задает в продольной линии режим источника тока. При снабжении каждого из фотомодулей индивидуальным СП, обеспечивающим максимизацию генерируемой мощности, становится возможным их соединение в единую последовательную цепь (рис. 1). Остальные параметры эквивалентной схемы (рис 2, а) учитывают реальные характеристики фотогенератора как источника тока. Источник напряжения  $u$  с последовательным идеальным диодом  $VD$  учитывает пороговое напряжение  $p-n$  перехода, который лежит в основе конструкции фотомодуля (рис. 2, б). На рис. 2, г показана идеализированная внешняя характеристика фотомодуля как электрического генератора. Она содержит участок ограничения напряжения  $AB$  и участок ограничения тока  $BB$ . Иногда учитывают также наклон линеаризованной характеристики  $p-n$  перехода (рис. 2, б), что соответствует эквивалентному резистору  $R$ , показанному на рис.2, а пунктиром. Для эффективной работы последующей части преобразовательной системы возможно использовать фотомодули с рабочим напряжением  $u$  порядка 50 В.

Шунтирующий ключ  $S$  (рис. 1) необходим для предотвращения аварийного режима при обрыве цепи фотомодуля. Обрыв цепи любого фотомодуля при последовательной организации системы ведет к отказу всей системы, аналогично тому, как при параллельной организации системы к отказу системы приводит короткое замыкание в любом из ее элементов. В случае обрыва цепи поврежденный модуль шунтируется ключом  $S$ , а остающаяся часть системы продолжает нормальную работу при несколько пониженном выходном напряжении.

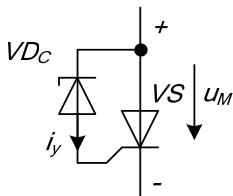


Рис. 3

На рис. 3 показано возможное исполнение шунтирующего ключа. В случае обрыва цепи фотомодуля напряжение  $u_m$  повышается до пробивного напряжения стабилитрона  $VD_c$  и тиристор  $VS$  включается током  $i_y$ , который начинает протекать в цепи управляющего электрода [1].

**Согласующий преобразователь.** Для согласующего преобразователя, имеющего вход и выход на постоянном токе, может быть использована топология, которая в технике источников вторичного электропитания называется прямоходовой [5]. На рис. 4, показан возможный вариант исполнения СП и диаграммы работы схемы. Схема содержит: емкостной входной фильтр  $C_B$ ; инвертор напряжения (ИН); согласующий (развязывающий) трансформатор (ТС), выпрямитель (В) и выходной  $LC$ -фильтр.

Паузу можно использовать для регулирования выходных параметров. С учетом назначения СП целесообразно использовать экстремальный регулятор выходного напряжения, максимизирующий получаемую от фотомодуля мощность. Общая идеология построения таких регуляторов известна из ряда работ, например, [6].

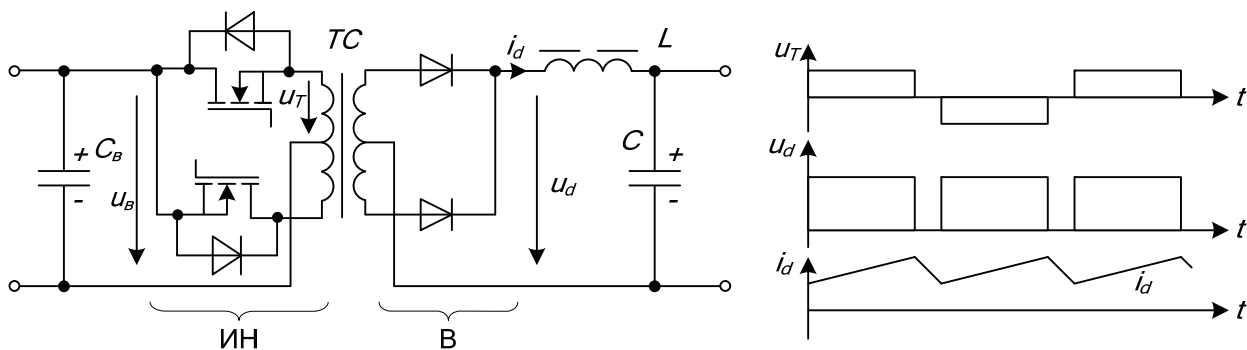


Рис. 4

Ввиду низких напряжений на входе и выходе СП для инвертора и выпрямителя целесообразно использовать нулевые схемы. Для ключей инвертора наиболее подходят низковольтные MOSFET с внутренними обратными диодами, что позволяет получить малое статическое падение напряжения  $\Delta u$ , имеющее порядок десятой доли вольта. Тот же ключ может быть применен и в выпрямителе взамен диодов, что соответствует схемной идеологии синхронного выпрямителя.

Суммарное относительное падение напряжения совпадает с относительными потерями мощности в ключах СП

$$P_s^* = \frac{2\Delta u}{u} = \frac{2 \cdot 0,1}{50} = 0,4 \cdot 10^{-2} \tag{1}$$

Тот же порядок имеют и суммарные потери мощности в трансформаторе ТС и силовых фильтрах, что соответствует результирующему к.п.д. СП порядка 99%.

Возможно также применение однотактных схем, но они обеспечивают плохое использование трансформатора.

**Коммутация в нулях тока основной частоты. Энергетические характеристики переходного преобразователя.** Коммутация в нулях тока при частоте порядка 1 кГц позволяет получить малые коммутационные потери и учитывать при определении энергетических характеристик только статические потери в полупроводниковых ключах, определяемые по статическим вольт-амперным характеристикам.

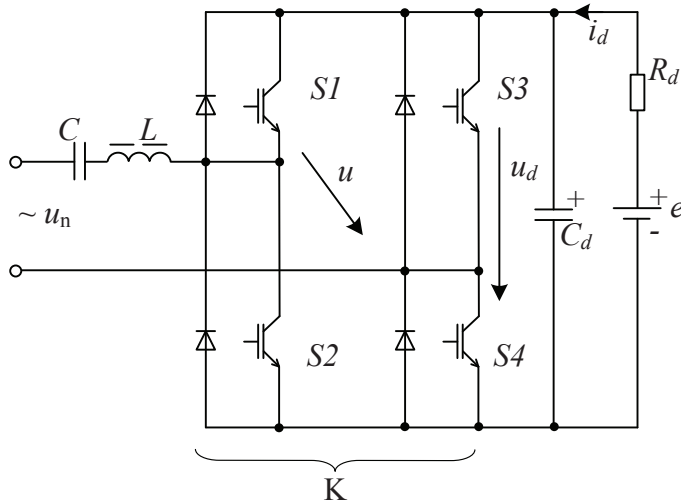


Рис. 5

Однофазная мостовая схема с коммутацией в нулях тока [4] приведена на рис. 5. Она содержит:

- источник синусоидального напряжения  $u_n$ , учитывающий приемную сеть;
- резонансный балласт LC (выходной фильтр), настроенный на основной частоте  $\omega$  в резонанс согласно равенству

$$X = \omega L = \frac{1}{\omega C} = x^* R_N = U_{1m} / I_{1m} \quad (2)$$

– коммутатор на базе IGBT модулей с ключами знакопеременного тока S1-S4;

– входной фильтр  $C_d$ ;

– источник э.д.с.  $e$ , совместно с СП, учитывающий фотогенераторы (при  $i_d > 0$ ) или светодиодную нагрузку (при  $i_d < 0$ ), как это предполагалось в работе [1];

– активное сопротивление  $R_d$ , учитывающее потери энергии в продольной линии.

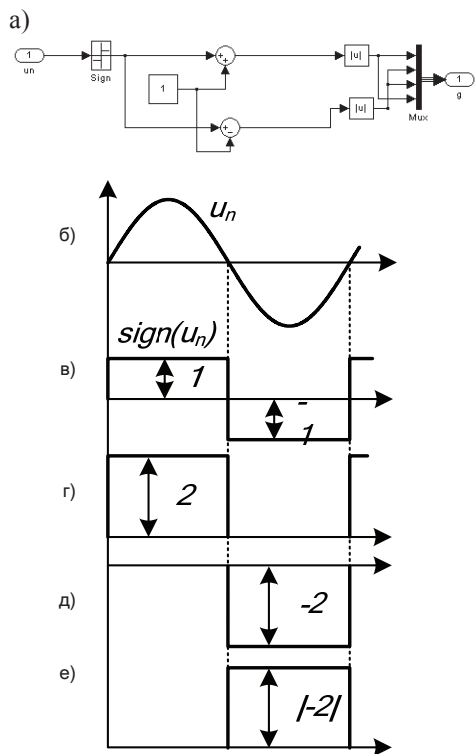


Рис. 6

Частью схемы, отличающей ее от традиционного инвертора напряжения, является последовательный резонансный контур, позволяющий получить малое содержание высших гармоник в выходном токе при малой, в связи с повышенной основной частотой, установленной мощностью реактивных элементов. Улучшение формы тока приемной сети достигается за счет того, что реактивное сопротивление  $x$  соизмеримо с сопротивлением номинальной нагрузки  $R_N$  (величина  $x^*$  в (2) имеет порядок единицы). Относительное содержание высших (нечетных) гармоник тока сети имеет при этом порядок  $1/k^2$ , где  $k$  - номер гармоники. В частности, третья гармоника как преобладающая составляет около 10% от основной. Дополнительное улучшение формы тока с целью предотвращения резонансных явлений в подводящей кабельной линии достигается за счет активных фильтров [4].

Чтобы получить высокий коэффициент мощности в приемной сети, основная гармоника тока в ней должна, совпадать по фазе с основной гармоникой напряжения  $u_n$  в выпрямительном режиме (ВР) и быть противофазной в инверторном режиме (ИР).

При этом примерно совпадают и моменты перехода через нулевые значения в токе и напряжении приемной сети, что позволяет реализовать более простой косвенный принцип коммутации при малых значениях коммутируемого тока путем совмещения моментов коммутации не с нулями тока, а с нулями напряжения сети. Для этого используется структура системы управления, которая в обозначениях Matlab приведена на рис 6, а. Она содержит:

– входной сигнал  $u_n$ , в качестве которого используется источник переменного напряжения  $u_n$  на рис. 5, (рис. 6, б);

– блок  $sign$  для определения функции знака от  $u_n$  (рис. 6, в);

– два блока смещения, верхний из которых добавляет к функции знака +1 (рис. 6, г), а нижний – минус 1 (рис. 6, д). Первый сигнал используется непосредственно как логический, а второй – берется по модулю (рис. 6, е);

– распределитель импульсов управления, в качестве которого используется мультиплексор  $MUX$ .

Векторный сигнал  $g$  (выходной сигнал мультиплексора) поступает на управление ключами коммутатора в порядке их номеров  $S1, S2, S3, S4$  согласно рис. 5.

Процессы, происходящие в силовой схеме,

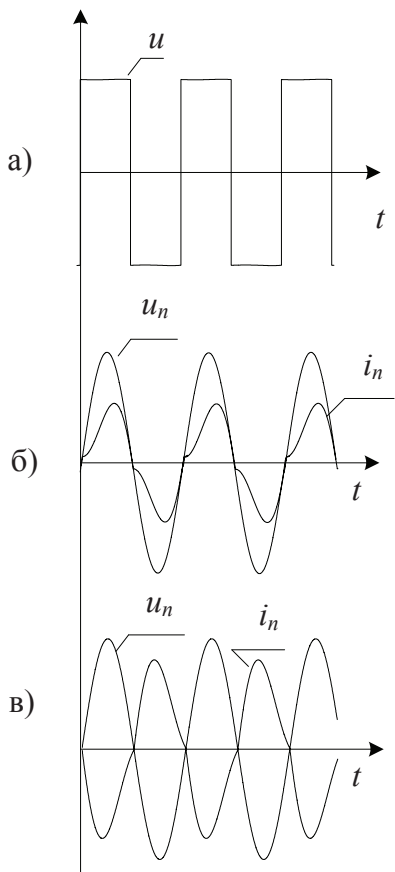


Рис. 7

поясняет рис. 7. Переключения происходят в нулях напряжения  $u_n$  (рис. 6, б), а форма напряжения  $u$  на выходе коммутатора при этом близка к функции знака (рис. 6, в). На рис. 7, а выходное напряжение коммутатора показано отдельно. На рис. 7, б показаны совместно напряжение и ток приемной сети для ВР. Напряжение проходит через нулевые значения в точках коммутации, в то время как значения тока также достаточно малы, хотя и отличны от нуля. На рис. 7, в те же величины показаны для ИР.

Переход из одного режима в другой происходит при изменении величины э.д.с.  $e$  (в ИР она выше), от величины э.д.с.  $e$  зависит и амплитуда тока в приемной сети. При этом, существует некоторый фазовый сдвиг тока относительно напряжения, то есть в сети имеется наряду с активной, также реактивная мощность. Однако коэффициент мощности получается достаточно высоким (около 0,98).

Оценку других энергетических показателей целесообразно выполнить для ПП, предназначенного для подключения к продольной линии при напряжении на ее секции порядка (1-3) кВ. при этом ПП следует реализовать по трехуровневой идеологии (рис. 9) с целью снижения рабочего напряжения на полупроводниковых ключах инвертора.

Коммутатор содержит две последовательные секции, что позволяет распределить достаточно высокое входное напряжение порядка 3 кВ, действующее в ПЛ, между четырьмя последовательными ключами, получая на каждом напряжение  $u_d/4=3000/4=750$  В.

Как и в схеме рис. 6, ключи знакопеременного тока исполняются на IGBT-модулях. Стандартные ключи на 1700 В обеспечивают более чем двукратный запас по напряжению. Выравнивание напряжений на секциях осуществляют первичные обмотки трансформатора ТП.

В зависимости от направления потока мощности в ПЛ средний входной ток  $i_d$  проходит либо через 8 последовательно соединенных транзисторов, либо через 8 последовательно соединенных диодов. В том, что это так, убеждаемся непосредственно по схеме рис. 8.

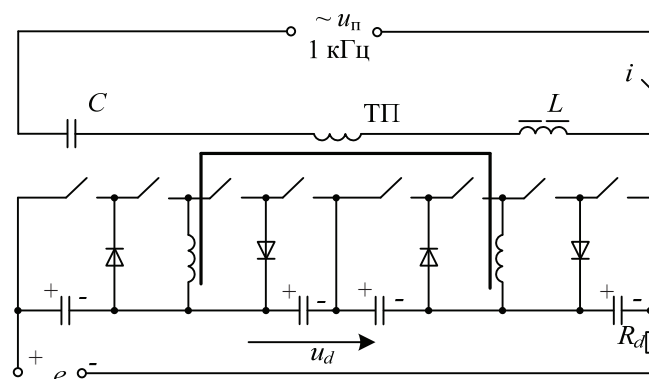


Рис. 8

В фильтровых конденсаторах и обмотках трансформатора постоянной составляющей тока нет, поэтому эти элементы при определении среднего тока ключа можно считать разомкнутыми. Нет никакого среднего тока и в фиксирующих диодах, поскольку широтно-импульсная модуляция в схеме не используется. Тогда из схемы рис. 8 видно, что в каждом из ключей последовательной цепи средний ток равен среднему току  $i_d$  в ПЛ.

Допустим, что статическое падение напряжения в IGBT равно 2,5 В, а в диоде 1,5 В. Усредняя эту величину, найдем относительное падение напряжения в ключах, которое равно относительным потерям мощности, усредненным для двух режимов работы (ВР и ИР):

$$P_s^* = \frac{8 \cdot 2}{3000} \cong 0,005 \quad (3)$$

Как показывает дополнительная оценка, при основной частоте порядка 1 кГц суммарные потери в трансформаторе и резонансном балласте имеют тот же порядок величины.

Таким образом, аналогично СП в рассматриваемой структуре ПП можно получить к.п.д. порядка 99 %, что недостижимо при непосредственном использовании традиционной сети 50 Гц в качестве приемной.

### Выводы

Для преобразователей солнечной энергии в электрическую при линейном распределении фотогенераторов, целесообразна двухступенчатая структура с продольной линией (ПЛ)



электропередачи постоянного тока, которая связывает фотогенераторы в единую последовательную цепь непосредственно или через согласующие преобразователи с низковольтными развязывающими трансформаторами, а её секции с напряжением порядка 1-3 кВ на каждой соединяются с приёмной промышленной сетью через переходные преобразователи с промежуточными звеньями однофазного переменного тока повышенной частоты порядка 1 кГц.

Применение согласующих преобразователей прямоходовой топологии с низковольтными MOSFET позволяет снизить потери энергии в полупроводниковых ключах и получить к.п.д. порядка 99%.

Примерно такой же к.п.д. можно получить и в переходных преобразователях, если использовать в них трехуровневую топологию в сочетании с коммутацией в нулях тока промежуточного звена повышенной частоты.

#### Список литературы

1. Sokol Y. I., Goncharov Y. P., Eresko A. V., and others. Electronic system with series organization for connection the distributed generators of renewable energy to low voltage industrial network. // IEEE 33th International Conference ELNANO'2013.

2. Сокол Е. И., Гончаров Ю. П., Замаруев В. В., и др. «Использование силовой электроники в низковольтных распределительных электросетях коммунальных объектов» //Сборник научных трудов института электродинамики НАН Украины. Киев, 2011 С. 101–111

Sokol Y.I., Goncharov Y.P., Zamaruev V.V. and others “The use of power electronics in low-voltage distribution networks of communal facilities” Proceedings of the Institut Electrodinamiki NAN Ukrainy, Kyiv, 2011 P. 101-111

3. Е. И. Сокол, Ю. П. Гончаров, А. В. Ереско, и др. Интеграция объектов возобновляемой энергетики в низковольтные электрические сети. // Відновлювальна енергетика ХХІ століття: ХІІІ міжнародна науково-практична конференція. 2012, С. 112–115.

Sokol Y.I., Goncharov Y.P., Eresko A.V., and others. “Integration of renewable energy facilities in low-voltage electrical network” vidnovljuvalna eneretyka XXI stolittya: International Scientific and Practical Conference 2012, P. 112–115

4. Ye. Sokol, Yu. Goncharov, A. Eresko, and others. Rectifiers with a combined filtration of primary current for high-frequency power systems //8-th International conference-workshop “Compatibility and power electronics”, Ljubljana, Slovenia.

5. Браун М. Источники питания. Расчет и конструирование// МК-Пресс, К. 2005, 279 с.

Braun M. Sources of supply. Calculation and Design// МК-Press, Kyiv. 2005, 279 p.

6. Сокол Е.И., Гончаров Ю.П., Ереско А.В., и др. Максимизация электрической энергии, получаемой от фотогенератора. // Технічна електродинаміка. Тем. випуск «Силова електроніка та енергоефективність» ч. 4 К.:2012, С. 110–116

Sokol Y.I., Goncharov Y.P., Eresko A.V., and others. Maximizing the electrical energy generated by photogenerators// Technichna electrodynamika. Tem. Vypusk “Power Electronics and Energy Efficiency” Kyiv, 2012. P. 110-116

#### CONVERTERS OF SOLAR ENERGY INTO ELECTRICITY IN LINEAR ARRANGEMENT PHOTOGENERATORS

E. I. Sokol, Y. P. Goncharov, A. V. Yeresko, V. V. Ivahno, Yu.S. Krivocheev, Y.S. Vojtowich, E. A. Malyarenko, B.A.Styslo

National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute"

Kharkov, Ukraine, e-mail: [Sokol@kpi.kharkov.ua](mailto:Sokol@kpi.kharkov.ua)

*We consider a two-tier structure with a consistent organization for converting solar energy into electrical energy at the location of the territorial photogenerators along linear objects such as streets and highways.*

**Key words:** street lighting, solar panels, the structure of the system, the convertor