

# Трёхфазные автономные инверторы для солнечной энергетики

ИВАНОВ А.Г., НУДЕЛЬМАН Г.С.

*Рассмотрены вопросы преобразования энергии в системе «солнечная батарея (СБ)–трехфазный многоуровневый автономный инвертор напряжения (АИН)». Инверторы выполняются по трехфазным мостовым схемам или ячейковым (каскадным) схемам. Звено постоянного тока в системе может быть выполнено с СБ распределенного либо централизованного типа. Структуры с централизованной СБ исключают асимметрию выходного напряжения, но являются более сложными по сравнению со структурами с распределенной СБ. Приведена методика расчета многоуровневых инверторов.*

**Ключевые слова:** солнечная батарея, автономный инвертор напряжения, звено постоянного тока, инвертор мостового типа, АИН ячейкового типа, асимметрия напряжений

Как отмечается в многочисленных источниках, наша планета ежедневно получает от Солнца в тысячи раз больше энергии, чем её вырабатывают все электростанции мира. Полный объем солнечной энергии, поступающей за неделю на поверхность Земли, превышает энергию всех мировых запасов нефти, газа, угля и урана [1, 2]. К основным достоинствам этого вида энергии следует отнести общедоступность и неисчерпаемость источника, а также безопасность для окружающей среды. Известны и недостатки этого способа получения энергии: зависимость от погоды и времени суток, что обуславливает необходимость аккумулирования энергии, необходимость периодической очистки поверхности солнечных элементов от пыли, нагрев атмосферы над электростанцией, большие площади, высокая стоимость конструкции и др.

Однако на сегодня на экологически чистую солнечную энергию, вырабатываемую солнечными энергетическими установками (гелиоустановками), приходится менее 0,5% общемирового объема выработки электроэнергии [3–6]. Наиболее перспективны и экономичны в настоящее время фотопреобразователи солнечной батареи (СБ), состоящие из тонкоплёночных фотоэлементов, масса кремния в которых по отношению к массе подложки (на которую наносятся тонкие плёнки) составляет около 1%. По прогнозам Международного энергетического агентства (IEA) энергия, получаемая при использовании солнечного излучения, к 2050 г. обеспечит до 25% потребностей человека в электроэнергии, что также позволит сократить вы-

*Matters concerned with energy conversion in a «solar battery–three-phase multilevel self-excited voltage inverter» system are considered. The inverters are constructed according to three-phase bridge or cell (cascade) configurations. The DC link in the system can be made with a distributed or centralized solar battery. Structures containing a centralized solar battery exclude asymmetry of the output voltage but are more complicated as compared with structures with a distributed solar battery. A procedure for calculating multilevel inverters is presented.*

**Key words:** solar battery, self-excited voltage inverter, DC link, bridge-type inverter, cell-type self-excited voltage inverter, voltage asymmetry

бросы углекислоты, образующейся при работе тепловых электростанций.

В известных публикациях по солнечной энергетике, например в [5, 7], для преобразования постоянного напряжения солнечных батарей в переменное используются однофазные автономные инверторы напряжения (АИН). В некоторых источниках сообщается об использовании трёхфазных мостовых АИН и установок STATCOM [4]. Для создания мощных солнечных электростанций необходимы не просто трёхфазные инверторы, а многоуровневые трёхфазные АИН, обеспечивающие (без применения громоздких фильтров) минимальные искажения выходного напряжения и способные работать параллельно с энергосистемой.

В статье предлагаются схемотехнические решения в области трёхфазных многоуровневых АИН с ШИМ, широко применяемых в частотно-регулируемых электроприводах (ЧРП) [8], адаптированные для солнечных электростанций с различными видами СБ, в том числе с тонкоплёночными солнечными модулями (ТСМ) на основе кремния. Как указывалось выше, их применение является весьма перспективным, а в Чувашской Республике (г. Новочебоксарск) завершается строительство завода по производству ТСМ по технологии фирмы «Oerlikon». Согласно [9] максимальные параметры модулей на базе технологии «тонких плёнок» (на основе кремния) площадью 1,43 м<sup>2</sup>, толщиной 6,8 мм и массой 26 кг составляют: напряжение 102,7 В, ток 1,22 А, мощность 125 Вт. В отличие от ЧРП, где АИН в составе полупроводникового пре-

образователя питается от промышленной сети переменного тока, в данном случае источником энергии является СБ, причем принципиально здесь возможны два варианта питания:

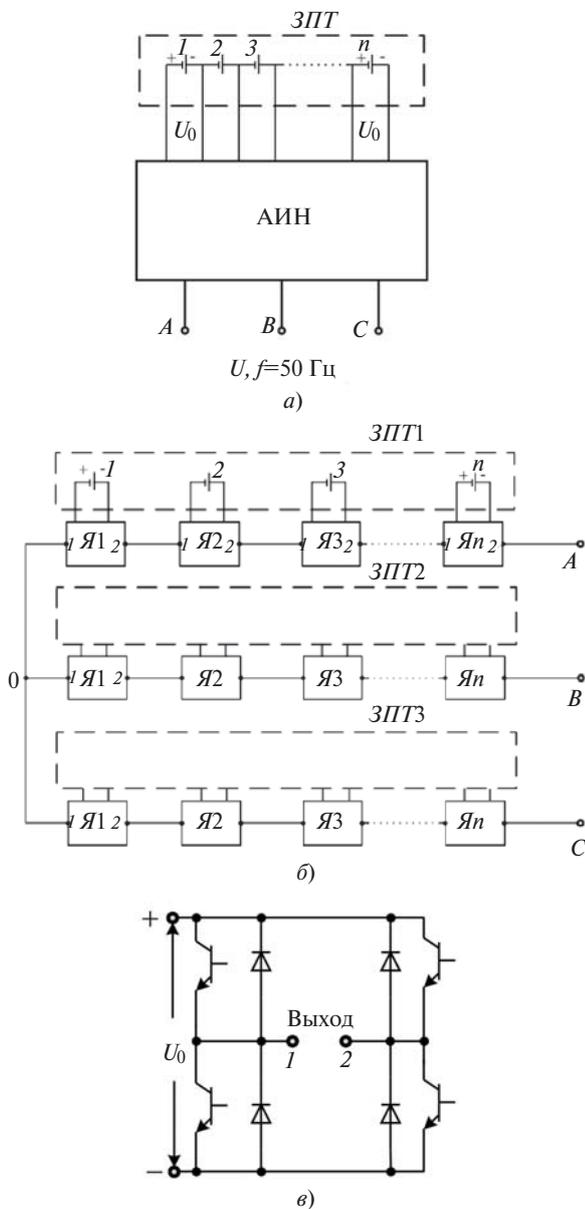
1) от СБ **распределённого типа**, образующих звено постоянного тока (*ЗПТ*) или несколько *ЗПТ*, состоящих из отдельных минибатарей СБ1 – СБ *n* с одинаковым напряжением  $U_0$ ;

2) от СБ **централизованного типа** с общим напряжением  $U_d$ .

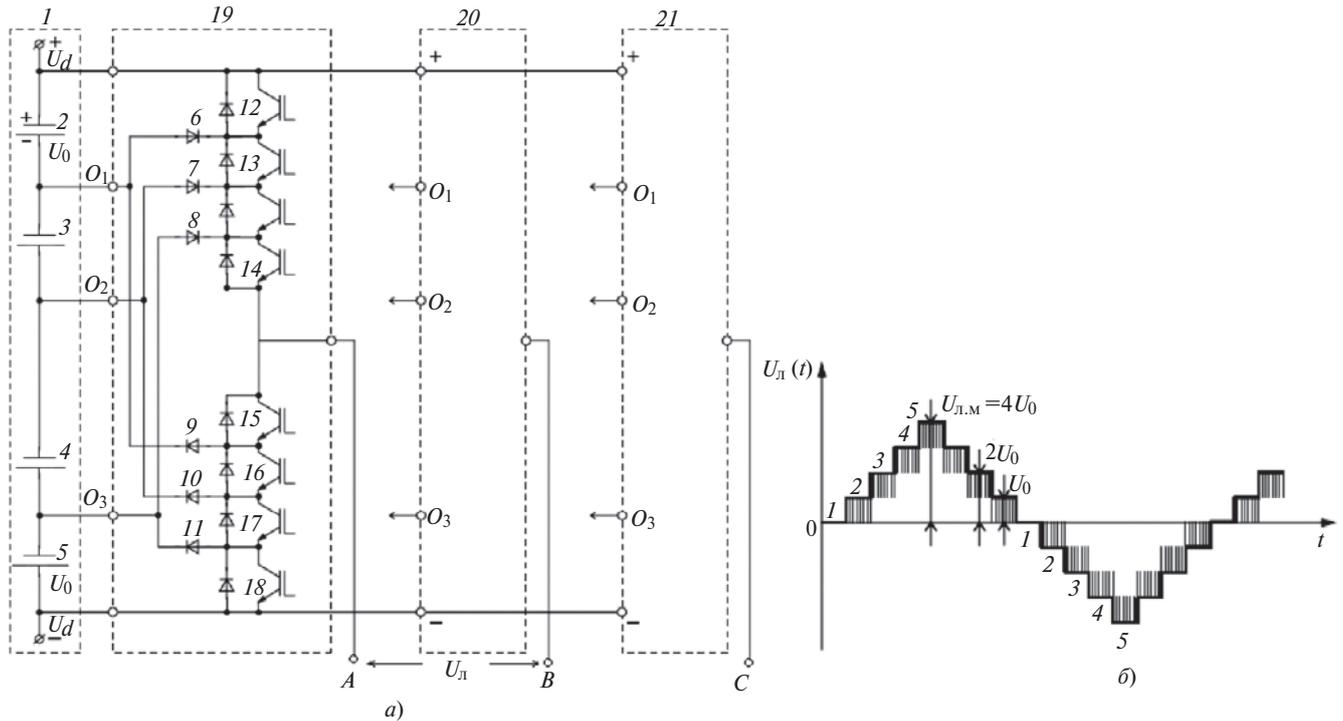
В первом варианте для симметрии выходных фазных напряжений АИН необходимо обеспечить идентичность напряжений  $U_0$  каждой минибатареи, что при большом их числе, расположенных на значительной площади с различной степенью сол-

нечного освещения, может представлять определённые технические трудности. Структуры реализации первого варианта с различными типами многоуровневых АИН [8] даны на рис. 1: мостового типа (МАИН) выполняются по схеме на рис. 1,а, каскадного или ячейкового типа (ЯАИН) – рис. 1,б. Входы каждой ячейки ЯАИН подключены к соответствующей СБ, а их выходы 1–2 в каждой фазе инвертора соединены между собой последовательно. В зависимости от комбинации включённых транзисторов на выходе ячейки будут три уровня напряжений:  $+U_0$ ,  $-U_0$  и 0. При этом МАИН имеет одно общее *ЗПТ* с выводом отдельных минибатарей, а ЯАИН содержит три *ЗПТ* – по одному в каждой фазе инвертора (*ЗПТ1–ЗПТ3*). Жазимы *A, B, C* предназначены для подключения нагрузки промышленной частоты. Значение выходного напряжения и мощность определяются схемой и параметрами СБ. Каждая фаза ЯАИН содержит определённое число ячеек (*Я1–Яn*), выполненных в виде однофазных мостовых инверторов (рис. 1,в), характеризующих уровень и число ступеней выходного напряжения *U* промышленной частоты. Например, при 5 ячейках в фазе ЯАИН каждая полуволна синусоиды линейного напряжения состоит из 11 ступеней (уровней) напряжения – одной нулевой и 10 соответственно  $1U_0, 2U_0, 3U_0, \dots, 10U_0$  (рис. 2,б). В качестве примеров по первому варианту питания на рис. 2, 3 приведены схемы 4- и 5-уровневых трёхфазных МАИН с диаграммами выходных линейных напряжений, вентильные секции (ВС) которых выполнены на транзисторах и диодах, а *ЗПТ* – на отдельных батареях СБ1–СБ4. При этом число транзисторов в одной ВС равно удвоенному числу батарей в *ЗПТ*.

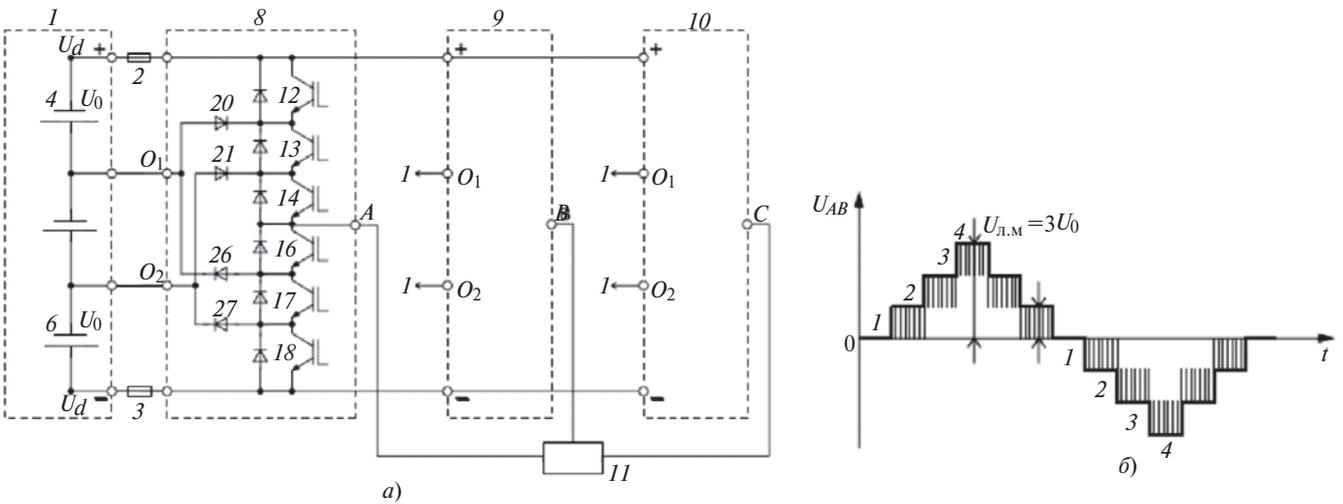
Как указывалось выше, для исключения асимметрии выходных напряжений на фазах *A, B, C* в рассматриваемом первом варианте необходимо обеспечивать одинаковые напряжения  $U_0$  всех ступеней СБ. При реализации второго варианта (с одной общей СБ) указанный недостаток исключается, так как изменение напряжения СБ приводит к одинаковому изменению выходного напряжения каждой фазы, но не к асимметрии фаз. Этот недостаток устраняется введением в систему регулирования отрицательной обратной связи по выходному напряжению. Однако для создания многоуровневых АИН с общей СБ необходима более сложная структура, например с введением промежуточного высокочастотного преобразователя частоты (ВЧПЧ) и высокочастотного многообмоточного трансформатора (ВЧТр), который целесообразно выполнять повышающим. При этом ВЧПЧ, состоящий из блоков выпрямителя и инвертора, обеспечивает общее питающее напряжение для



**Рис. 1.** Автономные инверторы напряжения с СБ распределенного типа МАИН (а) и ЯАИН (б), ячейка ЯАИН (в): *ЗПТ* – звено постоянного тока; *Я1–Яn* – ячейки ЯАИН; *A, B, C* – выходные зажимы инвертора



**Рис. 2.** Силовая часть пятиуровневого МАИН с распределенной СБ: схема (а); диаграмма (б); 1 – ЗПТ; 2 – 5 – СБ; 6 – 11 – блокирующие диоды; 12 – 18 – транзисторы IGBT с защитными диодами; 19 – 21 – ВС;  $f = 50$  Гц

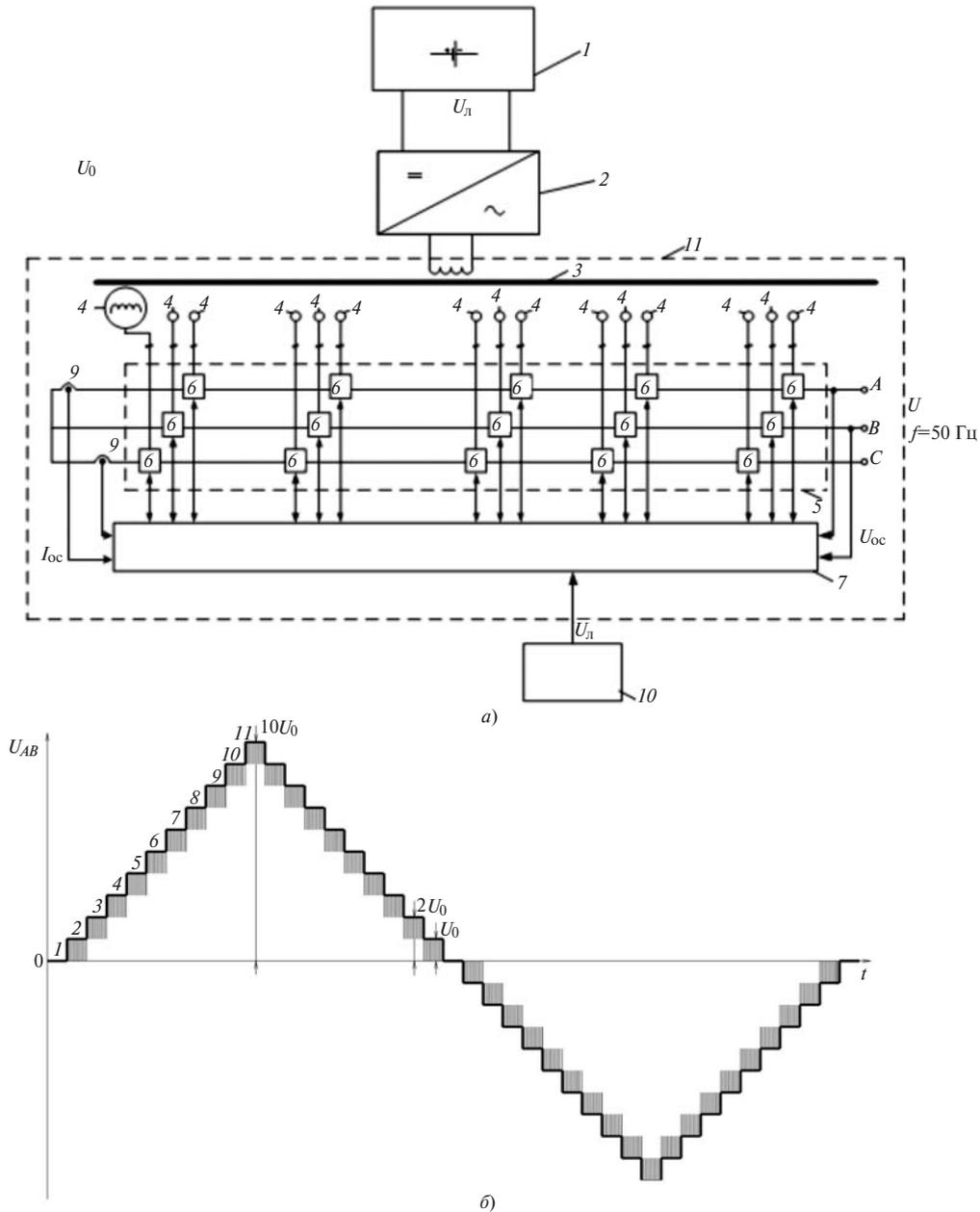


**Рис. 3.** Силовая часть четырехуровневого МАИН с распределенной СБ: схема (а); диаграмма (б); 1 – ЗПТ; 2, 3 – предохранители; 4 – 6 – СБ; 8 – 10 – ВС; 11 – нагрузка; 12 – 18 – транзисторы IGBT с защитными диодами; 20, 21, 26, 27 – блокирующие диоды

первичной обмотки ВЧТр, который в зависимости от схемы АИН с помощью нескольких вторичных обмоток подает его на соответствующие выпрямители. Примеры таких систем приведены для ЯАИН на рис. 4, а для МАИН – на рис. 5, при этом трёхфазный пятиуровневый МАИН 7 состоит из трёх вентильных секций (ВС) согласно рис. 2. В ЯАИН каждая ячейка 6 состоит из однофазного выпрямителя и инвертора по рис. 1,в. В МАИН блок выпрямителей 6 содержит несколько отдельных однофазных выпрямителей, которые аналогично рис. 2, 3 подключаются к силовой части инвертора 7.

Число уровней в преобразователях может быть любым и зависит от требуемого качества электроэнергии. Недостатком данного варианта является двойная установленная мощность преобразовательной части ( блоки 1 и 11), но при этом кроме вышеуказанного достоинства также обеспечиваются гальваническая развязка и меньшее значение напряжения СБ.

На зажимах А, В, С может быть обеспечено напряжение 380 В, 50 Гц или другое, требуемое соответствующими видами нагрузки, например электродвигателями 8 (рис. 5). Связь с энергосистемой 10 осуществляется с помощью повышающего



**Рис. 4.** Одиннадцатилевоуровневый ЯАИН с общей СБ: схема (а); диаграмма (б); 2 – ВЧПЧ; 3 – ВЧТр; 4 – вторичные обмотки ВЧТр; 5 – ячейковая часть инвертора; 6 – ячейка; 7 – контроллер; 8 – датчик напряжения; 9 – датчик тока; 10 – пульт управления; 11 – ПЧ;  $I_{oc}$ ,  $U_{oc}$  – сигналы датчиков 8, 9

высоковольтного трансформатора 9 промышленной частоты. Для проведения сравнительного анализа инверторов введём следующие обозначения и определения:

$n$  – число уровней инвертора, определяемое максимальным числом источников питания (СБ) в контуре линейного напряжения плюс один нулевой уровень. Это отражается числом ступеней в полуволне линейного напряжения. Например, для МАИН на рис. 2  $n = 4 + 1 = 5$ , а для ЯАИН по рис. 4  $n = 2 \cdot 5 + 1 = 11$ ;  $U_0$  – напряжение одной батареи СБ (рис. 1);  $U_{л}$  – действующее значение первой гармоники линейного напряжения инвертора (3, 6, 10, ... кВ);  $U_d$  – постоянное напряжение ЗПТ

(рис. 1–3);  $U_{л.м}$  – наибольшее значение выходного ступенчатого напряжения инвертора:

для МАИН

$$U_{л.м} = U_d = (n - 1)U_0;$$

для ЯАИН

$$U_{л.м} = 2U_d = (n - 1)U_0.$$

Для амплитудного значения первой гармоники линейного напряжения  $U_{лм}$ , выделяемой из ступенчатой кривой напряжения инвертора, при синусоидальной ШИМ в соответствии с [8, 10] имеем:

$$U_{лм} = \sqrt{2}U_{л} = 0,866U_{л.м}. \tag{1}$$

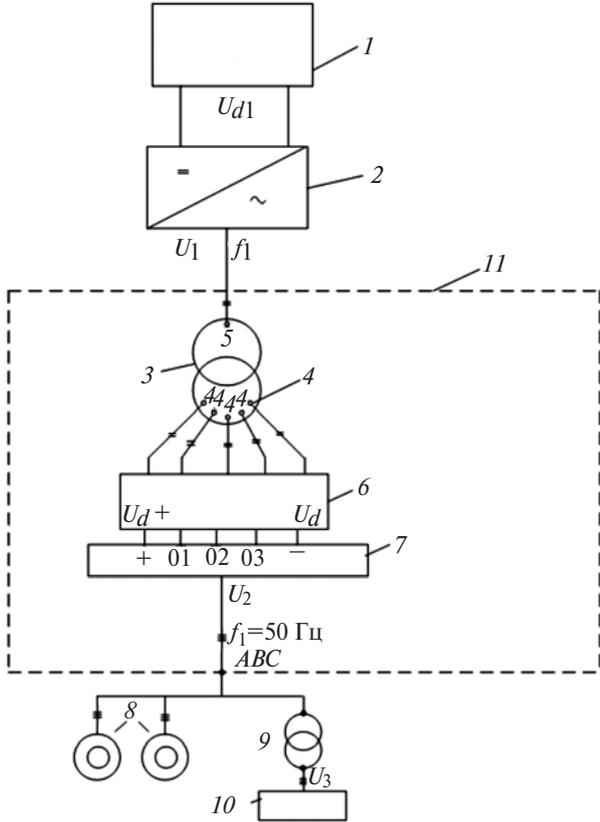


Рис. 5. Пятиуровневый МАИН с общей СБ: 1–4 – обозначения, что и на рис. 4; 5 – первичная обмотка ВЧТр; 6 – блок однофазных выпрямителей с емкостными сглаживающими фильтрами; 7 – силовая часть инвертора; 8 – двигатель; 9 – промежуточный трансформатор; 10 – энергосистема

С учетом вышеизложенного определим основные параметры инверторов и СБ при синусоидальной ШИМ.

Для ЯАИН (рис. 1):

число ячеек, а также СБ в одной фазе инвертора (рис. 1,б)

$$Я = 0,5(n - 1); \tag{2}$$

число ключей в одной фазе инвертора

$$K = 4Я = 2(n - 1);$$

общее число ключей в инверторе

$$K_0 = 3K = 6(n - 1);$$

общее число батарей СБ в инверторе

$$B = 3Я = 1,5(n - 1);$$

напряжение  $U_0$  на входе ячейки (рис. 1,в), равное напряжению одной СБ. С учетом (1) и (2) получим:

$$U_0 = \frac{U_{л.м}}{2Я} = \frac{\sqrt{2}U_{л}}{2 \cdot 0,866 \cdot 0,5(n - 1)} \cdot 1,63 \frac{U_{л}}{n - 1}; \tag{3}$$

наибольшее значение напряжения на ключах ячейки

$$U_{кл} = U_0. \tag{4}$$

Для МАИН (рис. 3):

число ключей в одной вентиляльной секции

$$K = 2(n - 1); \tag{5}$$

например, в секции 19 (рис. 2,а)  $K = 8$ ;

общее число ключей в инверторе

$$K = 3K = 5(n - 1); \tag{6}$$

общее число батарей СБ в инверторе

$$B = 0,5K = (n - 1); \tag{7}$$

напряжение одной батареи с учетом (1) и (5)

$$U_0 = \frac{U_{л.м}}{0,5K} = \frac{\sqrt{2}U_{л}}{0,5 \cdot 0,866 \cdot 2(n - 1)} \cdot 1,63 \frac{U_{л}}{n - 1}; \tag{8}$$

напряжение на ключе вентиляльной секции

$$U_{кл} = U_0; \tag{9}$$

напряжение ЗПТ

$$U_d = 0,5KU_0. \tag{10}$$

Диоды 12–18 защитные и конструктивно входят в состав модулей транзисторных ключей. Диоды 6–11 блокирующие.

Обратные напряжения блокирующих диодов:

$$U_6 = U_{11} = U_0; U_7 = U_{10} = 2U_0; U_8 = U_9 = 3U_0.$$

Значение напряжений  $U_0$  и  $U_{кл}$  следует определять с учетом коэффициента запаса, равного например, 1,5.

В заключение сравним основные параметры для ЯАИН и МАИН, например для систем с  $U_{л} = 6$  кВ и  $n = 11$  (см. таблицу).

Тип инвертора	Напряжение, В		Общее число	
	одной батареи $U_0$	ключа $U_{кл}$	ключей	батарей СБ
ЯАИН	980	980	60	15
МАИН	980	980	60	10

Из таблицы следует, что при одинаковых исходных значениях  $U_{л}$  и  $n$  основные параметры элементов инверторов и их число практически одинаковы за исключением общего числа батарей СБ, которых в ЯАИН в 1,5 раза больше.

Окончательный выбор варианта трёхфазного инвертора для солнечной энергетической установ-

ки может быть выполнен с учетом вышеизложенного, реальных условий эксплуатации, а также экономических, патентных и конкурентных аспектов.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Альтернативная** энергия и энергосберегающие технологии, источники энергии и тепла, солнечные батареи: <http://renerg.ru/47-solnechnaya-energetica.html>
2. **Развитие** солнечной энергетики в России; <http://www.energycenter.ru/article/350/1/>
3. **Тэйлор М.** Солнечная энергия стимулирует рынок электроэнергии. — Электроэнергия. Передача и распределение (приложение № 5), 2012, № 5 (14).
4. **Вульф Д.** Широкое внедрение возобновляемых источников электроэнергии требует совершенствования энергосистемы. — Электроэнергия. Передача и распределение (приложение № 5), 2012, № 5 (14).
5. **Архипов А.** Новый взгляд на солнечную энергетику: как сделать фотогальваническое производство энергии более интеллектуальным и эффективным? — Силовая электроника, 2001, № 5.
6. **Аронова Е.С., Грилихес В.А., Тимошина Н.Х., Шварц М.З.** О влиянии реальных условий эксплуатации на энергетические характеристики солнечных фотоэлектрических установок различных типов. — Гелиотехника, 2008, № 3.
7. **Исембергенов Н.Т.** Многоступенчатый инвертор для преобразования энергии солнечных батарей. — Электричество, 2011, № 7.
8. **Поздеев А.Д.** Электромагнитные электромеханические процессы в частотно-регулируемых асинхронных электроприводах. — Чебоксары: Изд-во Чуваш. ун-та, 1998.
9. **Батюнин В.А.** Группа Компаний «Ренова». Завод по производству солнечных модулей на базе технологии «тонких

плёнок» Oerliron. — SEMICON Russia 2009, 1–3 июня 2009 г.: [http // gendocs.ru/v14320/](http://gendocs.ru/v14320/)

10. **Донской Н.В., Иванов А.Г., Матисон В.А., Ушаков И.И.** Многоуровневые автономные инверторы для электропривода и электроэнергетики. — Силовая электроника, 2008, № 1.

11. **Иванов А.Г., Сергеев А.Г.** Силовая электроника в электроприводе. — Чебоксары: Изд-во Чуваш. ун-та, 2012.

[28.02.13]

*А в т о р ы : **Иванов Александр Григорьевич** окончил электромеханический факультет Ивановского энергетического института им. В.И. Ленина (ИЭИ) в 1960 г. В 1998 г. защитил докторскую диссертацию «Создание и исследование электротехнических систем с управляемыми выпрямителями для машиностроения и нефтедобычи» в Чувашском государственном университете им. И.Н. Ульянова (ЧГУ). Главный научный сотрудник ОАО «Всероссийский научно-исследовательский институт релестроения» (ВНИИР), профессор кафедры «Промышленная электроника» ЧГУ.*

*Нудельман Года Семенович* окончил энергетический факультет Новочеркасского политехнического института (НПИ, ныне ЮРГТУ) в 1960 г. В 1983 г. защитил в НПИ кандидатскую диссертацию «Токосная направленная защита нулевой последовательности для линий электропередачи высокого напряжения». Председатель совета директоров ОАО «ВНИИР», профессор и заведующий кафедрой «Теоретические основы электротехники и РЗА» ЧГУ.

\* \* \*

## ЧИТАТЕЛЯМ, ПОДПИСЧИКАМ, РЕКЛАМОДАТЕЛЯМ ЖУРНАЛА «ЭЛЕКТРИЧЕСТВО»

Подписка в России и странах СНГ принимается в отделениях связи.

Для желающих представить в журнал статью сообщаем, что правила подготовки рукописей публикуются в №№ 6 и 12 каждого года.

Реклама в черно-белом изображении может быть размещена на страницах журнала и на его обложке, а также в виде вкладки.

Возможно размещение рекламы в цветном изображении (стоимость по договоренности).

При повторении той же рекламы в следующем номере — скидка 10%. При публикации той же рекламы в третьем и последующих номерах — скидка 20%. Стоимость оплаты рекламных статей — по договоренности. Последний срок представления рекламного материала — за 1,5 месяца до выхода номера из печати (обычно номер выходит в середине каждого месяца).

Адрес для переписки: 101000 Москва, Главпочтамт, а/я 648

тел./факс: (495)362-7485

E-mail: [1.s.kudinova@rambler.ru](mailto:1.s.kudinova@rambler.ru)