

Специализированные модули для 3-уровневых инверторов

Массовое использование возобновляемых источников энергии является одной из основных тенденций современности. Совершенствование ветроэнергетических установок (ВЭУ), появившихся более 20 лет назад, идет параллельно с повышением эффективности и надежности преобразовательных устройств. Бурное развитие силовой электроники позволило существенно повысить мощность таких устройств (для единичной ВЭУ с 2 до 3 МВт, активно идет разработка установок, рассчитанных на 5 МВт) и, соответственно, снизить удельную стоимость вырабатываемой энергии.

**Норберт Плушке
(Norbert Pluschke)**

**Томас Грашхоф
(Thomas Grasshoff)**

Андрей Колпаков

Andrey.Kolpakov@semikron.com

В отличие от ветроэнергетических станций, возможности которых близки к технологическому пределу, солнечные энергетические установки (СЭУ) имеют огромный потенциал развития. Постоянно идет совершенствование и повышение эффективности как самих фотогальванических элементов, так и управляющей электроники.

Концепция построения СЭУ малой и средней мощности (менее 250 кВА) была отработана при проектировании популярной европейской серии преобразователей String inverter. Повышение КПД устройств данного класса достигается в первую очередь за счет увеличения рабочей частоты, что позволяет снизить так называемые «потери в меди», упростить кон-

струкцию выходного фильтра. Последовательное соединение фотогальванических элементов солнечных батарей также дает возможность обеспечить более эффективную работу системы.

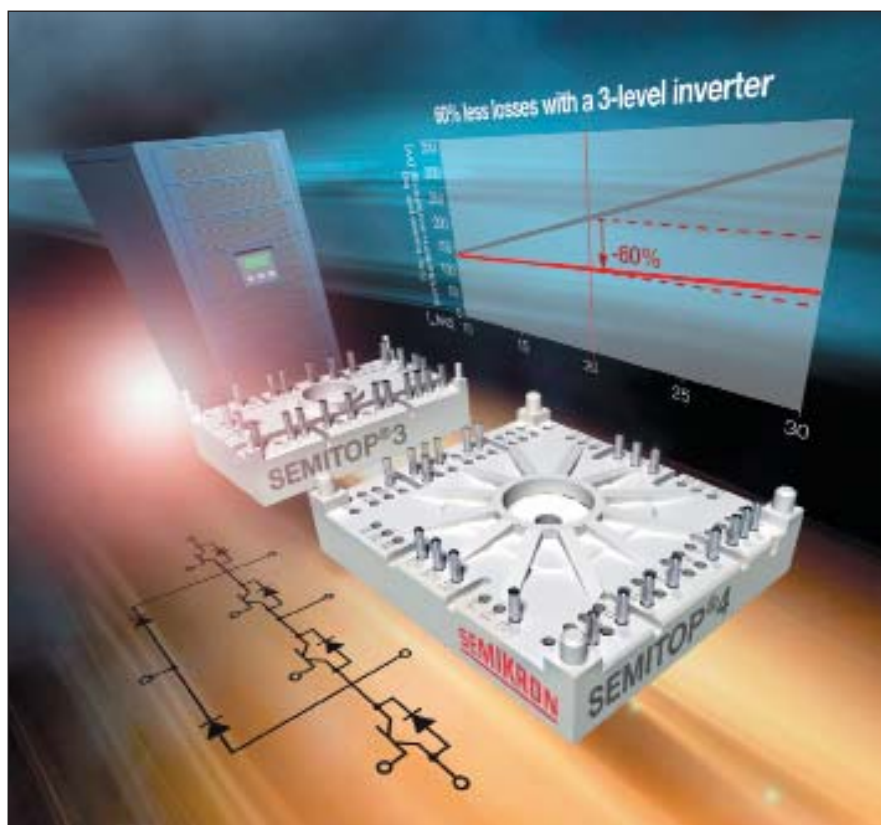
При повышении частоты коммутации растут динамические потери IGBT, увеличивается перегрев кристаллов. До недавнего времени считалось, что надежная работа силовых ключей обеспечивается при температуре полупроводниковых чипов до 150 °С. Современные технологии позволили расширить температурный диапазон IGBT до 175 °С, однако у новых кристаллов несколько выше и тепловое сопротивление. Поиск компромиссного решения, позволяющего увеличить эффективность работы преобразователя на высокой частоте, требует анализа различных схемных решений.

Специализированные модули IGBT для 3-уровневого инвертора

Одним из возможных путей решения проблемы является использование 3-уровневых схем (3 Level, или 3L). В недалеком прошлом подобные устройства строились только на основе стандартных полумостовых ключей и чопперов.

Принцип работы любой многоуровневой схемы прост: модули или ячейки соединяются последовательно, за счет этого напряжение питания устройства может быть выше рабочего напряжения отдельных ключей. Данная концепция, ранее используемая только в мощных преобразователях на базе высоковольтных IGBT (33 класса и выше), применима и к стандартным модулям. Подобное решение позволяет формировать «многоступенчатый» выходной сигнал. В результате удается существенно снизить уровень гармонических искажений и отказаться от дорогостоящих и громоздких выходных фильтров. Очевидно, что все силовые ключи при этом должны управляться гальванически изолированными сигналами.

Типовые схемы 2- и 3-уровневых (2L и 3L) инверторов приведены на рис. 1. Оба устройства работают в режиме модуляции частоты и напряжения. В первом



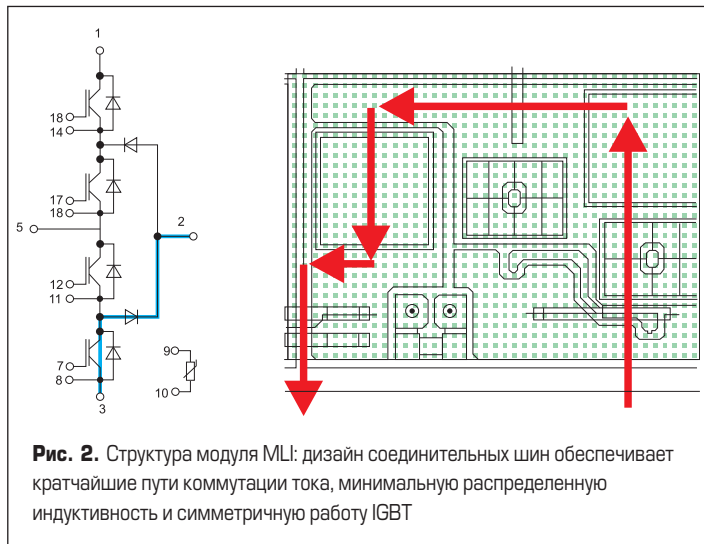
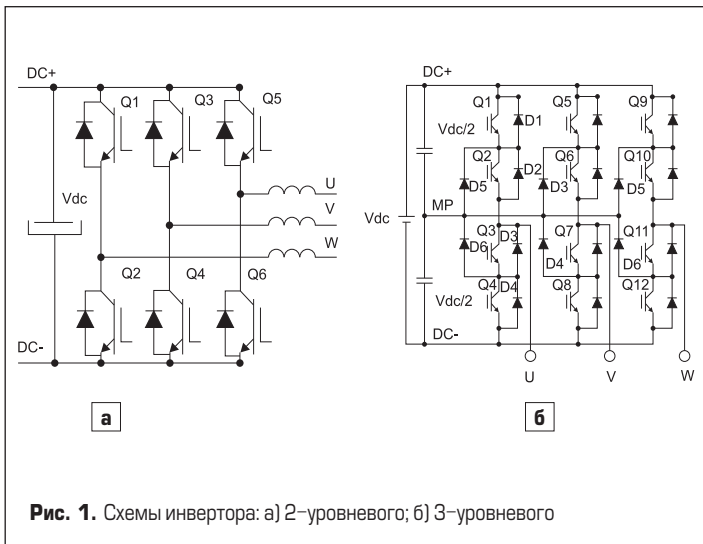


Рис. 2. Структура модуля MLI: дизайн соединительных шин обеспечивает кратчайшие пути коммутации тока, минимальную распределенную индуктивность и симметричную работу IGBT

случае выходное напряжение может принимать только 2 значения, равных по амплитуде: $-V_{DC}$ или $+V_{DC}$. Топология 3L позволяет сформировать сигнал, каждая из полуволн которого состоит из трех уровней ($0, V_{DC}/2, V_{DC}$).

Применение специализированных компонентов, разработанных для реализации 3-уровневой схемы, дает возможность упростить конструкцию, улучшить динамические характеристики и снизить общую стоимость изделия. При проектировании таких модулей основное внимание уделялось оптимизации размещения чипов на изолирующей подложке и удобству подключения к внешним терминалам. Силовые ключи в конфигурации MLI рассчитаны на предельное напряжение 600 В, диапазон рабочих токов составляет 50–400 А. В их состав входят быстродействующие фиксирующие диоды, необходимые для реализации схемы 3L.

С точки зрения DC/AC-преобразования классическая и 3-уровневая схемы выполняют одну и ту же функцию. Оба устройства, питающиеся от шины постоянного тока, способны формировать переменное выходное напряжение заданной частоты. Основное отличие двух

концепций состоит в аппаратной реализации: количестве IGBT, диодов и конденсаторов и способе управления инвертором.

Стойка 3-уровневого преобразователя выполнена по так называемой «схеме со связанной нейтралью» — NPC (Neutral Clamping Point), содержащей 4 последовательно соединенных IGBT/FWD и 2 фиксирующих диода, подключенных к искусственной средней точке (MP).

В отличие от обычного инвертора, в котором силовые ключи коммутируются между выводами DC-шины, мгновенное напряжение на закрытом IGBT в 3-уровневом инверторе равно половине напряжения V_{DC} . Соответственно, конденсаторы звена постоянного тока должны быть рассчитаны на $V_{DC}/2$. В данном устройстве существует несколько путей коммутации тока, кратчайший из которых идет от фиксирующего диода к IGBT, подключенному к шине питания (рис. 2), а самый длинный содержит 3 последовательных IGBT и диод.

Чтобы уровень переходных перенапряжений и динамических потерь был минимальным, прохождение тока по всем путям должно осуществляться по кратчайшему расстоянию. Желательно также, чтобы цепи коммутации в различных направлениях были симметричными. Выполнить эти требования можно

с помощью модулей, кристаллы в которых соединены в соответствии с 3L-топологией.

Специализированные IGBT, при разработке которых был использован многолетний конструкторский опыт SEMIKRON, предназначены для применения в компактных 3-уровневых инверторах. Топология внутренних соединений (рис. 2) обеспечивает кратчайший путь коммутации тока. Благодаря этому удается минимизировать значения распределенных индуктивностей силовых цепей и обеспечить симметричную работу IGBT.

Еще одним достоинством разработанных схем является удобное положение силовых терминалов. На рис. 3 показана конструкция силовой секции инвертора мощностью 150 кВт, построенная на трех специализированных IGBT, соединенных 3-слойной копланарной DC-шиной.

В таблице 1 приведено сравнение по уровню потерь двух вариантов схем, в которых использованы специализированные 600-вольтовые силовые ключи и стандартные модули 12 класса. Сравнение проведено с учетом оптимизированного значения резисторов затворов R_{Gon}/R_{Goff} для каждого случая. Судя по данным таблицы, при работе на частотах выше 10 кГц 3-уровневый инвертор обеспечивает более высокую эффективность преобразования.

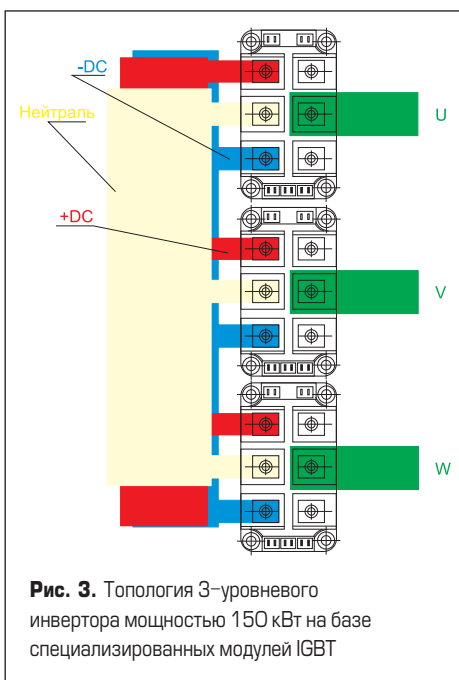


Рис. 3. Топология 3-уровневого инвертора мощностью 150 кВт на базе специализированных модулей IGBT

Таблица 1. Потери 3L- и 2L-схемы на частоте 10 кГц

Схема	3-уровневый инвертор		2-уровневый инвертор	
	SKM 150 MLI 066T	Потери, Вт	SKM 400 GB 12E4	Потери, Вт
Потери проводимости IGBT	Q1/Q4	88,1	Q1/Q2	61
Потери проводимости IGBT	Q2/Q3	118,8	Q1/Q2	226
Потери переключения IGBT	Q1/Q4	18,1		
Потери переключения IGBT	Q2/Q3	≈ 0		
Общие потери IGBT	Q1/Q4	106,2	Q1/Q2	288
Общие потери IGBT	Q2/Q3	118,8		
IGBT: общие потери на плечо		450		576
Фиксирующий диод	D5/D6			
Потери проводимости		56,6		31
Потери переключения		13,6		89
Общие потери IGBT		70,2		120
Фиксирующий диод: общие потери		140,4		240
IGBT: общие потери на плечо		590		816
Общие потери инвертора		1770		2448
Температура кристалла IGBT, °C		111		132
Температура кристалла диода, °C		117		128

Основные особенности 3-уровневой топологии

Повышение рабочей частоты преобразователя позволяет упростить и удешевить выходной фильтр и, соответственно, уменьшить габариты и стоимость всей системы. Использование более высокого напряжения DC-шины при соответствующем снижении выходного тока также дает возможность сократить суммарные потери мощности. Высоковольтная 3-уровневая схема несколько сложнее в реализации, однако сравнение комплексных затрат показывает, что 3L-инвертор, построенный с применением специализированных модулей, имеет более высокие технические и экономические показатели.

К недостаткам 3-уровневой концепции можно отнести более сложный алгоритм управления IGBT, большее количество каналов контроля (12 вместо 6). Для работы на высокой частоте драйвер затворов 3L-инвертора должен иметь низкое время реакции. Должна быть уменьшена и длительность «мертвого времени», что позволит обеспечить линейное управление системой и снизить нагрузку на контроллер.

Реализация защитных функций в 3-уровневой схеме не представляет особых проблем, поскольку ситуация прямого КЗ силового каскада здесь исключена. Последовательность включения IGBT должна контролироваться таким образом, чтобы не допустить появления полного напряжения питания на одном ключе. Процесс мониторинга напряжения DC-шины, построенной по 3-уровневой схеме, оказывается несколько сложнее, поскольку звено постоянного тока состоит из 2 частей.

В обычном полумостовом каскаде переключение напряжения 800 В может быть осуществлено примерно за 100 нс, что эквивалентно скорости коммутации 8 кВ/мкс. У 3L-инвертора при том же напряжении DC-шины ($V_{DC} = 800$ В) только половина V_{DC} присутствует на IGBT-ключках, переключение происходит в 2 раза быстрее и на разных интервалах времени. Соответственно, требования к фильтру ЕМI в этом случае оказываются существенно ниже.

Эффективность работы солнечных энергетических станций средней мощности (250 кВА) становится максимальной на частотах свыше 20 кГц, такие же режимы считаются предпочтительными для UPS. Применение 3-уровневых схем в данном случае является наиболее целесообразным, и такие устройства используются многими ведущими мировыми производителями, в первую очередь азиатскими.

Алгоритмы управления

Полная трехфазная 3L-схема, показанная на рис. 1, содержит 12 силовых ключей. Сигнал в каждой фазе изменяет свое значение между уровнями $+V_{DC}/2$, 0, $-V_{DC}/2$. Напряжение на IGBT ограничено величиной $V_{DC}/2$, поскольку каждый транзистор подключен к средней точке (MP) через два фиксирующих диода.

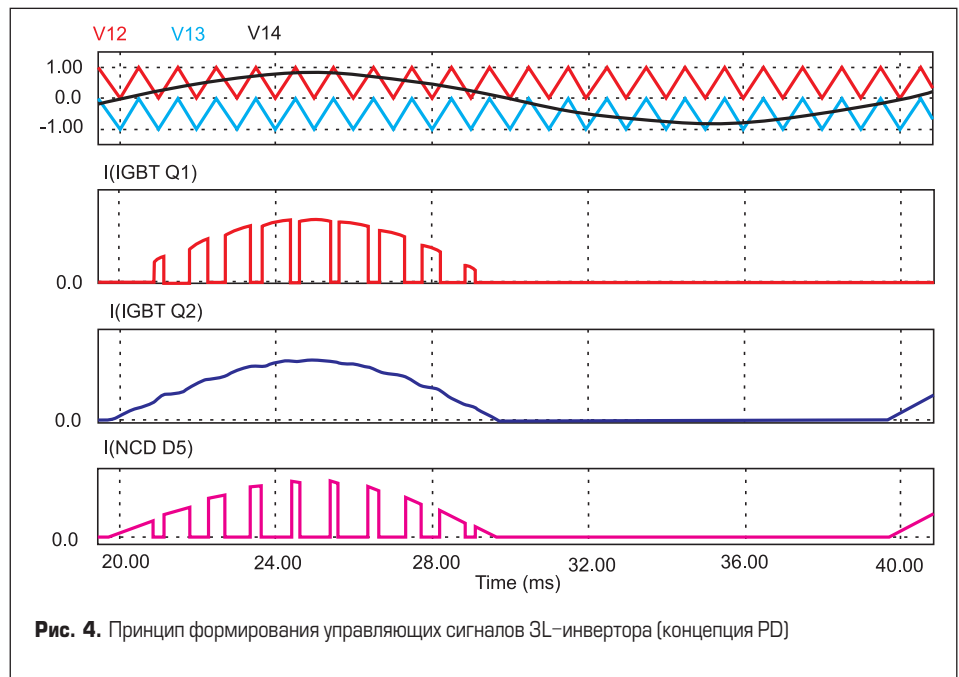


Рис. 4. Принцип формирования управляющих сигналов 3L-инвертора (концепция PD)

Методы управления классическими инверторами могут быть использованы и в многоуровневых схемах. Чаще всего для формирования ШИМ-сигнала применяется опорное напряжение треугольной формы, что позволяет минимизировать уровень гармонических искажений. В общем случае количество опорных сигналов несущей частоты должно быть равно $L-1$, где L — количество уровней преобразователя. Таким образом, для управления каждой фазой 3L-инвертора необходимо два треугольных высокочастотных и один синусоидальный сигнал основной частоты.

Существует три альтернативных концепции формирования ШИМ-сигнала, отличающихся фазовыми соотношениями между опорными напряжениями:

- APOD (Alternative Phase Opposition Disposition): соседние опорные треугольные сигналы отличаются по фазе на 180° .
- POD (Phase Opposition Disposition): опорные треугольные сигналы, расположенные в положительной и отрицательной области относительно нулевого потенциала, отличаются по фазе на 180° .
- PD (Phase Disposition): синфазные опорные треугольные сигналы расположены в положительной и отрицательной области относительно нулевого потенциала.

Первые два варианта позволяют получить минимальный уровень пульсаций тока нагрузки, однако на практике наиболее часто используется простейшая концепция PD, обеспечивающая низкие искажения формы линейного выходного напряжения. Эпюры

Таблица 2. Формулы для расчета потерь проводимости и переключения для 2L- и 3L-инверторов

3-уровневый инвертор (3L)	
Потери проводимости IGBT (Q1/Q4)	$P_{con} = U_o I_{avg} + r_f I_{rms}$
	$I_{avg} = \frac{MI'}{4\pi} [\sin \varphi + (\pi - \varphi) \cos\varphi]$
	$I_{rms}^2 = \frac{MI'^2}{4\pi} \left[1 + \frac{4}{3} \cos\varphi + \frac{1}{3} \cos(2\varphi) \right]$
Потери проводимости IGBT (Q2/Q3)	$P_{con} = U_o I_{avg} + r_f I_{rms}^2$
	$I_{avg} = \frac{I'^2}{\pi} - \frac{MI'}{4\pi} [\sin \varphi - \varphi] \cos\varphi$
	$I_{rms}^2 = \frac{I'^2}{4} - \frac{MI'^2}{4\pi} \left[1 - \frac{4}{3} \cos\varphi + \frac{1}{3} \cos(2\varphi) \right]$
Потери переключения IGBT (Q1/Q4)	$P_{sw} = \frac{1}{\pi} (E_{on} + E_{off}) \times f_{sw}$
2-уровневый инвертор (2L)	
Потери проводимости IGBT (Q1/Q2)	$P_{on} = \frac{1}{2} \left(\frac{V_{CEo}}{\pi} i' + \frac{r_{CE}}{4} i'^2 \right) + m \times \cos\varphi \left(\frac{V_{CEo}}{8} i' + \frac{r_{CE}}{3\pi} i'^2 \right)$
Потери переключения IGBT (Q1/Q2)	$P_{sw} = f_{sw} E_{sw} \frac{\sqrt{2}}{\pi} \times \frac{I_1}{I_{ref}} \left(\frac{V_{cc}}{V_{ref}} \right)^{kv}$

Таблица 3. Номенклатура 3-уровневых модулей IGBT

Тип модуля	$I_C @ 25^\circ\text{C}, \text{A}$	$V_{CE(sat)} @ 25^\circ\text{C}, \text{B}$	$E_{ON}+E_{OFF} @ 125^\circ\text{C}, \text{мДж}$	$R_{th(j-c)}, ^\circ\text{C/Вт}$	Схема
SK 25MLI065	30	1,8	1,35	1,4	
SK 50MLI065	54	1,8	1,83	0,85	
SKM 150MLI066T	200	1,45	5,4	0,29	
SKM 200MLI066T	280	1,45		0,21	
SKM 300MLI066T	400	1,45	10,96	0,15	

несущих треугольных и основного синусоидального сигналов, соответствующих данному случаю, а также токи IGBT и диодов показаны на рис. 4. Основные формулы для расчета потерь проводимости и переключения для 2L- и 3L-инверторов приведены в таблице 2.

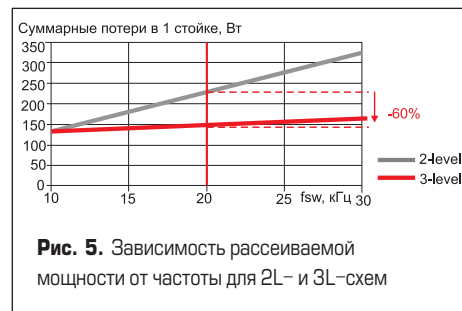
Трехуровневый инвертор в рассматриваемом случае построен на IGBT с рабочим напряжением 600 В, в то время как в классической схеме использованы ключи 12 класса. Отметим, что у чипов с более низким рабочим напряжением при меньшем уровне потерь проводимости и переключения быстрее выше.

Как показано в таблице 1, общий уровень рассеиваемой мощности одного плеча инвертора, построенного по схеме 3L, оказывается заметно ниже. При этом потерями переключения IGBT Q2 и Q3 можно пренебречь, незначительны также потери проводимости диодов D1 и D4, поскольку ток IGBT Q1 замыкается через диод D5, а ток IGBT Q4 — через D6 (рассматривается процесс коммутации между Q2 и Q3).

Заключение

Концепция 3-уровневого преобразователя, несмотря на ее кажущуюся сложность, при работе на высоких частотах обеспечивает очевидные технические и экономические преимущества. На рис. 5 показана зависимость мощности, рассеиваемой в одном плече инвертора, от частоты переключений F_{sw} . В качестве референтной выбрана частота коммутации 20 кГц, находящаяся выше порога слышимости. Как показывают графики, 3L-схема имеет меньший уровень потерь, и это преимущество растет с увеличением F_{sw} .

Трехуровневая схема является более предпочтительной и с экономической точки зрения, так как общая стоимость 600-вольтовых специализированных силовых ключей примерно на 25% ниже, чем у стандартных полумостов 12 класса. Важно отметить, что применение компонентов в конфигурации MLI упрощает конструкции соединительных шин и всего инвертора. Номенклатура выпускаемых модулей в конструктивах SEMITOP и SEMITRANS и их основные характеристики приведены в таблице 3: I_C — номинальный ток коллектора;



$V_{CE(sat)}$ — напряжение насыщения; $E_{ON}+E_{OFF}$ — суммарная энергия потерь; $R_{th(j-c)}$ — тепловое сопротивление «кристалл-тепlostок».

Главными достоинствами 3-уровневой топологии являются низкий уровень потерь, а также близкая к синусоидальной форма выходного сигнала. Меньшее значение рассеиваемой мощности в свою очередь означает пониженные требования к системе охлаждения и больший срок службы силовых ключей. Применение специализированных IGBT позволяет создавать компактные устройства, отличающиеся хорошими техническими и экономическими показателями.

Литература

1. Pluschke N., Grasshoff T. More efficiency for 3-level inverters. SEMIKRON International. 2009.
2. Holmes G., Pulse width modulation for power converters: principle and practice.
3. Tomta G., Nielsen R. Analytical Equations for Three Level NPC Converters / 9th European Conference on Power Electronics and Applications. EPE 2001.