

Многоуровневые автономные инверторы

для электропривода и электроэнергетики

В данной статье рассмотрены схемотехнические возможности повышения выходного напряжения многоуровневых автономных инверторов в условиях ограниченного максимально допустимого напряжения силовых полупроводниковых ключей.

**Николай Донской, к. т. н.
Александр Иванов, д. т. н.
Владимир Матисон, к. т. н.
Игорь Ушаков**

privod@vniir.chfts.ru

В настоящее время происходит интенсивное внедрение силовой полупроводниковой техники в устройствах передачи электроэнергии по ЛЭП переменного и постоянного тока, а также в высоковольтных частотно-регулируемых электроприводах [1–7].

В первом случае получают все большее распространение гибкие системы передачи переменного тока (FACTS) на базе полупроводниковых преобразователей (ПП) (СТАТКОМ и HVDC), обеспечивающие регулирование перетоков мощности между энергосистемами, снижение потерь, увеличение пропускной способности и устойчивости ЛЭП, стабилизацию напряжения, компенсацию потребляемой реактивной мощности, уменьшение нелинейных искажений сети и т. д.

Во втором случае потребители получают частотные электроприводы (ЧЭП), обеспечивающие высокое качество регулирования скорости двигателей переменного тока, оптимизацию технологических процессов и режимов работы электрооборудования.

Общим вопросом для указанных областей применения является рациональное построение ПП для среднего и высокого уровня напряжений. Лидеры рынка электротехнического оборудования (Siemens, ABB, Mitsubishi Electric, Rockwell Automation, Allen-Bradley и др.) для этих целей широко используют автономные инверторы напряжения АИН с ШИМ-регулированием и последовательным включением полностью управляемых ключей. В качестве ключей используются транзисторы IGBT, двухоперационные тиристоры IGCT и SGCT с электрическим управлением.

Однако при разработке указанных АИН на полностью управляемых ключах следует решить первостепенную проблему — обеспечение деления напряжения между последовательно соединенными полупроводниковыми приборами как в статических, так и в динамических режимах. Применение RC-снабберов при реально реализуемых их параметрах приводит к динамическому разбалансу напряжений, подбор приборов по ряду динамических параметров в сочетании со снабберами также имеет существенные

недостатки при практическом использовании в производстве. Наиболее радикально данную проблему решает применение многоуровневых АИН (МАИН), которые наряду с делением напряжений на последовательно включенных приборах обеспечивают форму выходного напряжения, приближающуюся к синусоиде. Управление преобразователем в пределах каждой ступени осуществляется методом ШИМ.

В настоящее время наибольшее распространение в ЧЭП получают следующие электрические схемы МАИН:

1. Трехуровневая мостовая схема (№ 1) с фиксацией нейтрали (топология преобразования NPC). Типичными представителями данного класса систем являются серии преобразователей частоты ACS 1000 фирмы ABB и Simovert MV фирмы Siemens [1–2].
2. Пятиуровневая мостовая схема (№ 2), выполненная на базе трехуровневых схем с фиксацией нейтрали (рис. 1). Данная схема разработана и внедрена фирмой ABB в серии преобразователей частоты для электроприводов ACS5000.
3. Многоуровневая каскадная схема (№ 3) на базе унифицированных вентильных ячеек с многообмоточным трансформатором. Данная схема предложена фирмой Mitsubishi и внедрена в преобразователях частоты MELTRAC-F500HVC [1, 2, 5].

Во всех этих схемах амплитуда выходного линейного напряжения $U_{Л.М.}$ составляет кратное значение от напряжения U_0 звена постоянного тока (на фильтрующем конденсаторе). При этом амплитуда первой гармоники выходного напряжения при ШИМ-регулировании в соответствии с [8] определяется выражением

$$U_{Л.М.1} = 0,866 \times U_{Л.М.}$$

При современном уровне высоковольтных полупроводниковых ключей с максимальным напряжением 6,0...6,5 кВ в схемах № 1 и № 2 обеспечивается номинальное выходное линейное напряжение — соответственно 4,16 и 6 кВ. Например, в схеме № 2

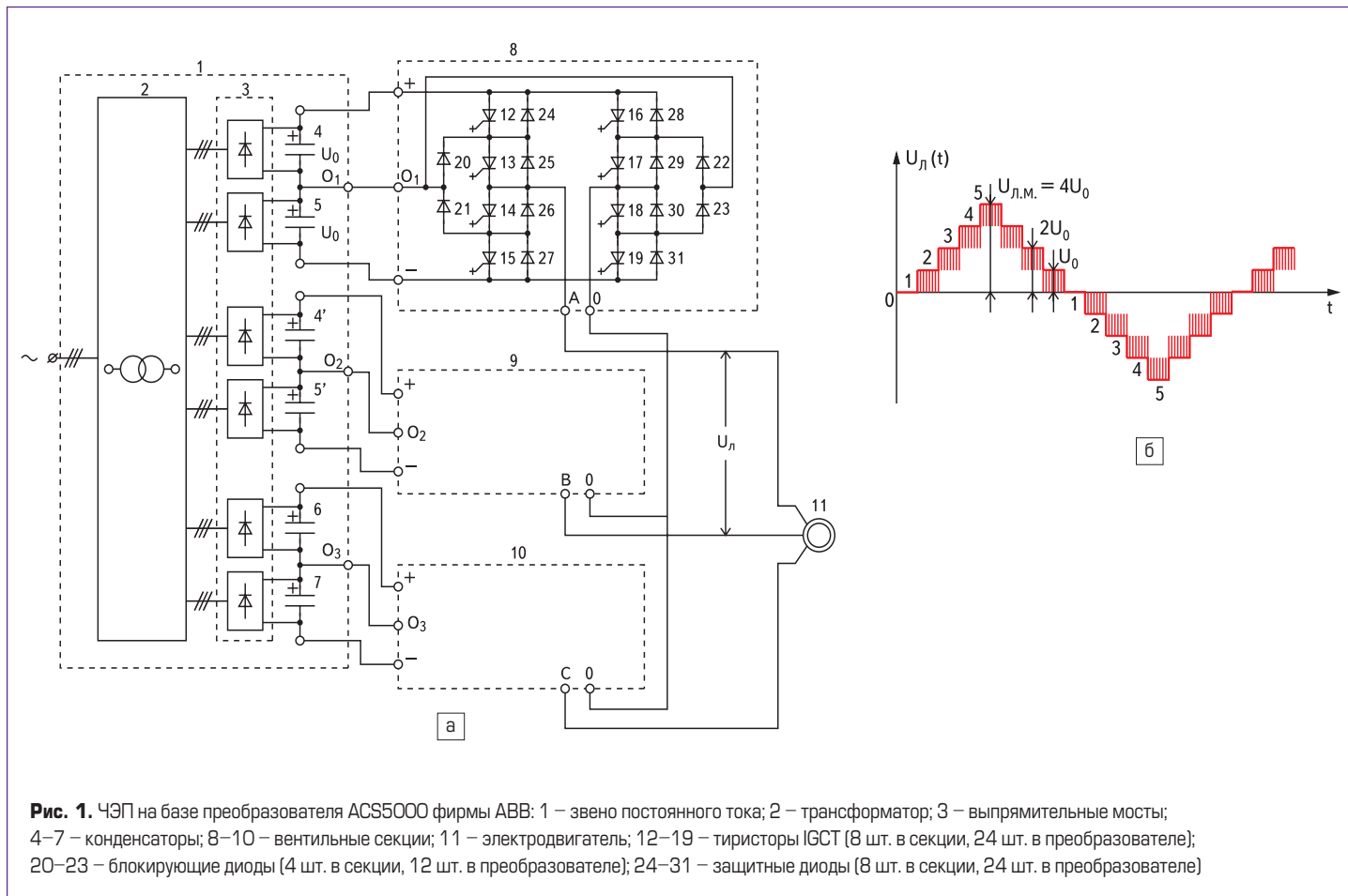


Рис. 1. ЧЭП на базе преобразователя ACS5000 фирмы ABB: 1 – звено постоянного тока; 2 – трансформатор; 3 – выпрямительные мосты; 4–7 – конденсаторы; 8–10 – вентильные секции; 11 – электродвигатель; 12–19 – тиристоры IGCT (8 шт. в секции, 24 шт. в преобразователе); 20–23 – блокирующие диоды (4 шт. в секции, 12 шт. в преобразователе); 24–31 – защитные диоды (8 шт. в секции, 24 шт. в преобразователе)

наибольшее напряжение на ключе с учетом повышения напряжения в питающей сети на 10% составляет

$$U_{к.л.} = 1,1U_0 = 2,69 \text{ кВ}, \quad (1)$$

где $U_0 = \frac{U_{л.м.}}{4} = \frac{6\sqrt{2}}{4 \times 0,866} = 2,45 \text{ кВ}.$

Схема № 3 позволяет при низком классе ключей получить высокое выходное напряжение, но обладает рядом недостатков: имеет большое количество полупроводниковых эле-

ментов, сложный многообмоточный трансформатор, большое количество источников напряжения с емкостными фильтрами и принципиально не допускает двустороннюю передачу энергии.

В связи с вышеизложенным представляются достаточно перспективными мостовые схемы МАИН.

Рассмотрим пути увеличения напряжения в мостовых МАИН.

Наряду с широко распространенной относительно простой трехуровневой схемой МАИН ($n = 3$), которая при современной эле-

ментной базе имеет ограничения по выходному напряжению до 4 кВ, представляют большой интерес инверторы с числом уровней $n \geq 4$.

Далее приводятся предлагаемые авторами новые схемы МАИН, обеспечивающие высокое напряжение за счет последовательного соединения ключей без применения делителей напряжения.

На рис. 2 приведена четырехуровневая ($n = 4$) функциональная схема силовой части ЧЭП, выполненная на транзисторах IGBT. В отличие от трехуровневой схемы здесь есть две

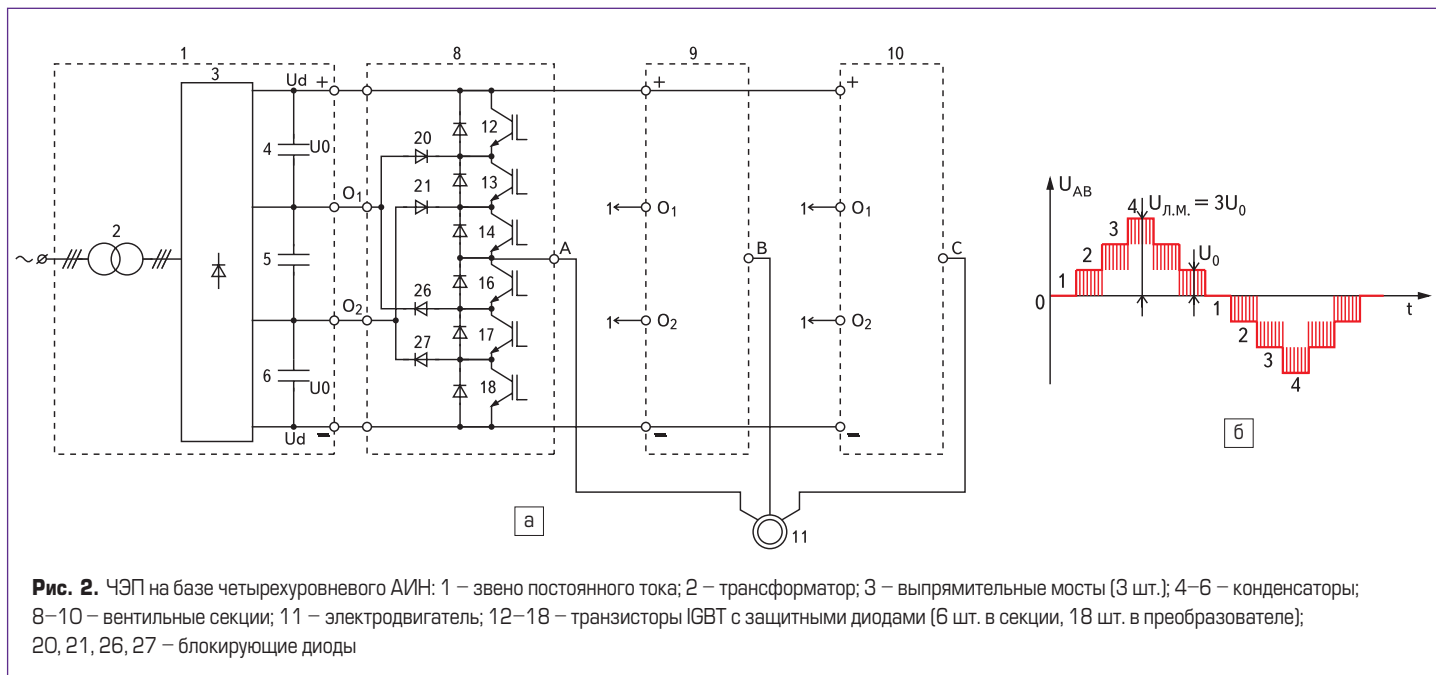


Рис. 2. ЧЭП на базе четырехуровневого АИН: 1 – звено постоянного тока; 2 – трансформатор; 3 – выпрямительные мосты (3 шт.); 4–6 – конденсаторы; 8–10 – вентильные секции; 11 – электродвигатель; 12–18 – транзисторы IGBT с защитными диодами (6 шт. в секции, 18 шт. в преобразователе); 20, 21, 26, 27 – блокирующие диоды

общие точки O_1 и O_2 , при этом амплитуда линейного напряжения инвертора, которое может быть достигнуто

$$U_{Л.М.} = 3U_0. \quad (2)$$

Наибольшее напряжение на ключе при напряжении двигателя 6 кВ

$$U_{К.Л.} = 1,1[U_{Л.М.}/(3 \times 0,866)] = 1,1U_0 = 3,6 \text{ кВ}, \quad (3)$$

где $U_0 = \frac{U_{Л.М.}}{3} = \frac{6\sqrt{2}}{3 \times 0,866} = 3,27 \text{ кВ}.$

При использовании транзисторов на напряжение 6...6,5 кВ имеем коэффициент запаса по напряжению 1,7...1,8.

Аналогично могут быть составлены силовые схемы с большим количеством последовательно соединенных ключей на большее выходное напряжение.

Например, для шестиуровневого МАИН (рис. 3) при допустимом напряжении на ключе по (3) и с учетом диаграммы на рис. 3б действующее значение выходного линейного напряжения может составить

$$U_{Л} = \frac{5U_0 \times 0,866}{\sqrt{2}} = 10 \text{ кВ}. \quad (4)$$

Для построения МАИН целесообразно использовать транзисторные модули типа «чоппер», где ключ и два диода интегрированы в один модуль.

Таким образом, для МАИН рассматриваемого типа имеем количество уровней

$$n = m + 1, \quad (5)$$

где m — число ключей, находящихся в плече одной секции моста (число конденсаторов в звене постоянного тока также равно m).

Максимальное прямое напряжение на ключах при этом будет

$$U_{К.Л.} = 1,1U_0 = \frac{1,1U_d}{m} = \frac{1,1\sqrt{2}U_{Л.}}{0,866m} = 1,8 \frac{U_{Л.}}{m}. \quad (6)$$

Количество общих точек O_i равно $(m - 1)$. Выбор ключей по напряжению следует производить с более чем 100%-ным запасом.

Приведенные на рис. 2 и 3 схемы имеют нечетное количество ключей в плече МАИН и четное число уровней. Аналогично могут быть составлены схемы с четным количеством ключей.

МАИН мостового типа, так же как и каскадные АИН, за счет увеличения числа уровней позволяют использовать ключи на низкое напряжение, но при более простом силовом трансформаторе и меньшем количестве индивидуальных источников постоянного напряжения. При заданном напряжении на ключе количество ключей в обеих схемах одинаковое.

Рассмотренные выше принципы построения МАИН могут быть использованы также при построении СТАТКОМов для электроэнергетики с использованием как тиристорных, так и транзисторных ключей. На рис. 4 приведен пример пятиуровневого СТАТКОМа, каждое плечо его вентильных секций 19–21 состоит из 4 ключей IGBT (12–14 и 15–18), содержит 4 конденсатора 2–5, имеющих 3 общих точки $O_1...O_3$, которые соответственно подключены к секциям 19–21. Через зажимы АВС преобразователь подключается параллельно сети, в которой осуществляется компенсация реактивной мощности и мощности искажений.

На базе двух СТАТКОМов может выполняться вставка постоянного тока (ВИТ) в энергосистемах, которая обеспечивает двустороннюю передачу электроэнергии (рис. 4б).

Схема по рис. 4а ($m = 4$) при использовании транзисторов на 6,0 кВ и 100%-ном запасе по напряжению обеспечивает выходное линейное напряжение в соответствии с (6)

$$U_{Л} = \frac{mU_{К.Л.}}{1,8} = \frac{4 \times 3,6}{1,8} = 8 \text{ кВ}$$

При 25%-ном резервировании ключей (в каждой вентильной секции допускается работа на шести ключах из восьми) СТАТКОМ обеспечит надежную работу в сети линейным напряжением 6 кВ.

К недостаткам рассматриваемых МАИН следует отнести более высокое обратное напряжение блокирующих диодов, которое для средних диодов (диоды 8, 9 на рис. 4) составляет $(m - 1) U_0$, а для крайних (диоды 6, 11) — U_0 .

На приведенных схемах (рис. 1–4), являющихся функциональными, не показаны некоторые детали: LC-фильтры, устройства заряда конденсаторов и узлы защиты их от недопустимого превышения напряжения на основе «чопперов».

Для иллюстрации повышения качества напряжения с увеличением числа уровней МАИН на рис. 5 представлены диаграммы линейных напряжений (в долях от U_0), полученные при моделировании на ЭВМ при частоте коммутации 1000 Гц. Гармонический анализ диаграмм показывает, что амплитуда первой гармоники для трехуровневого инвертора $U_{Л.М.1} = 1,732 \times U_0$, а коэффициент искажения синусоидальности THD = 25,33%. Для пятиуровневого инвертора эти величины соответственно составляют: $U_{Л.М.1} = 3,464 \times U_0$, а THD = 11,05%.

Таким образом, рассмотренные выше новые схемотехнические решения позволяют решить проблему повышения напряжения и мощности МАИН.

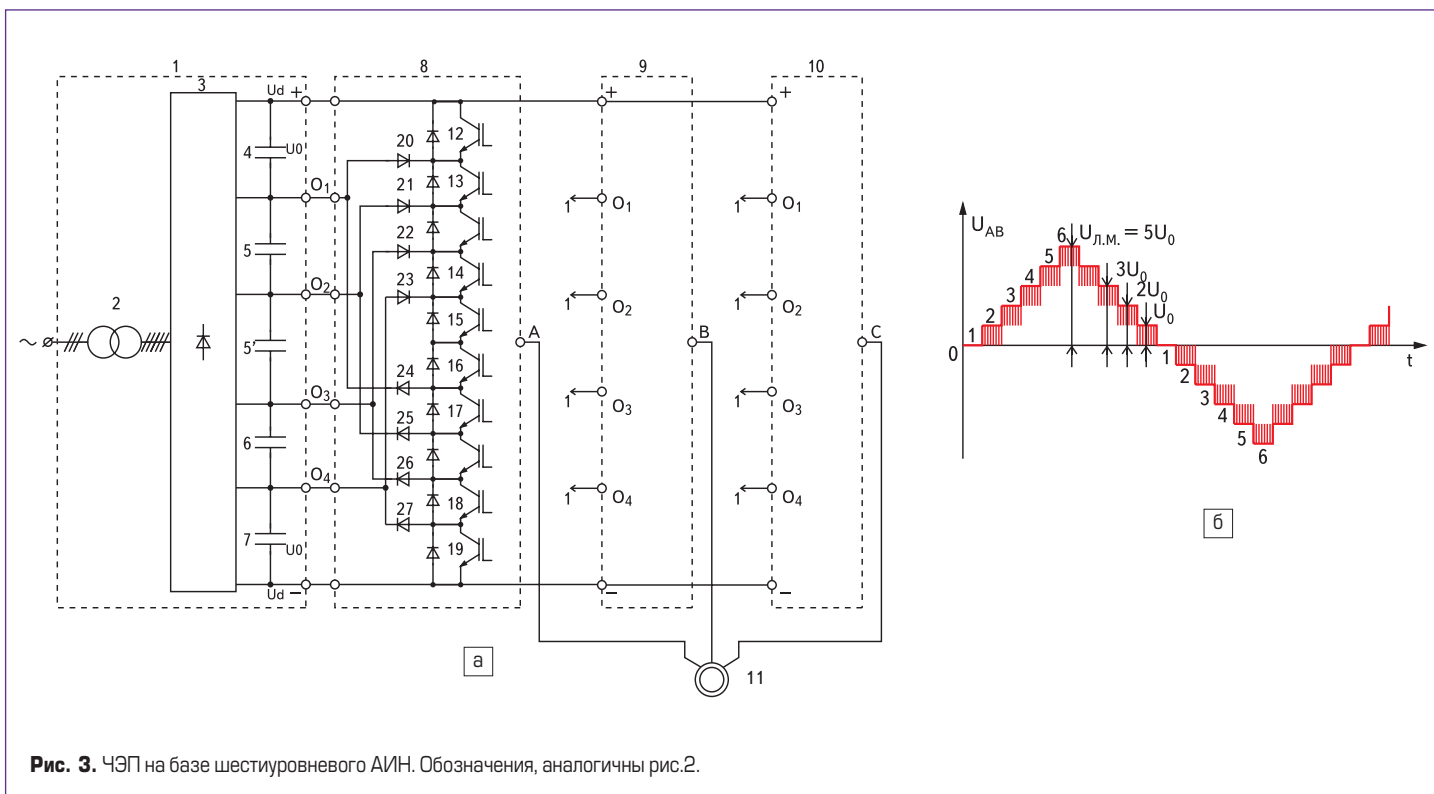


Рис. 3. ЧЭП на базе шестиуровневого АИН. Обозначения, аналогичны рис.2.

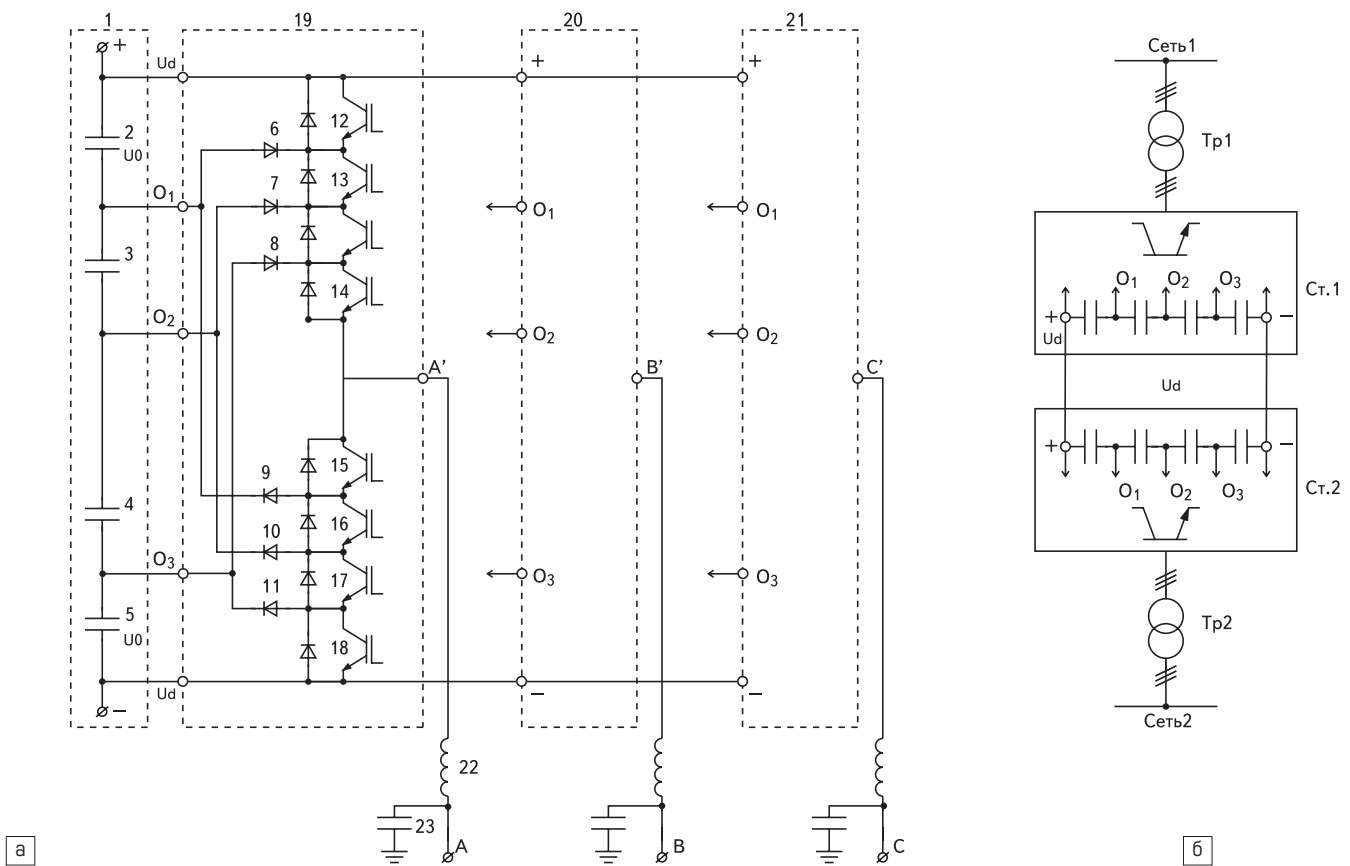


Рис. 4. Силовая часть пятиуровневого МАИН в установке СТАТКОМ: 1 – блок конденсаторов 2–5; 6–11 – диоды; 12–18 – транзисторные ключи с защитными диодами (могут быть и тиристорные); 19–21 – вентильные секции; 22, 23 – выходные фильтры; Тр1, Тр2 – трансформаторы; Ст. 1, Ст. 2 – СТАТКОМы 1 и 2

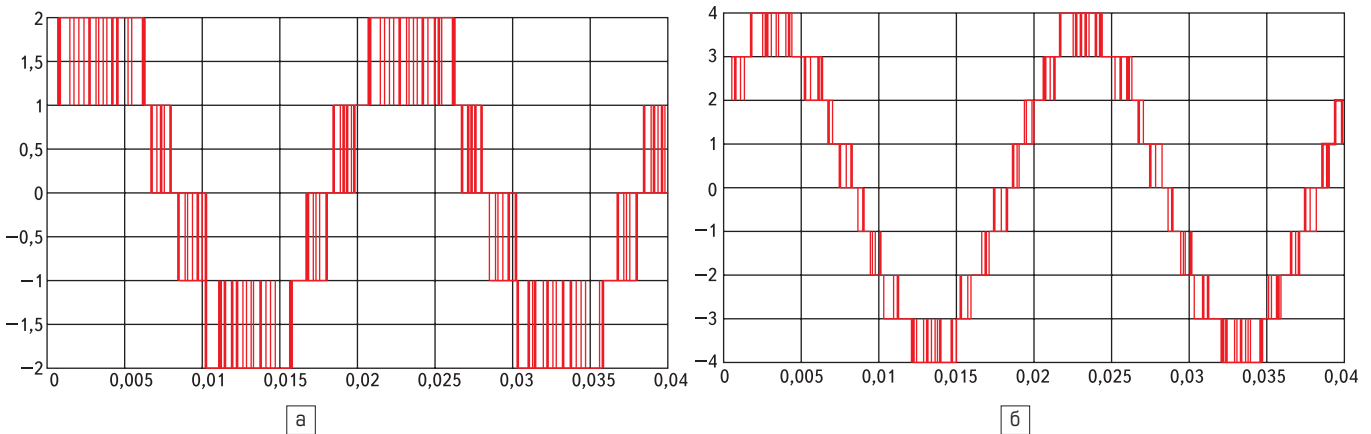


Рис. 5. Диаграммы линейных напряжений: а) трехуровневого инвертора; б) пятиуровневого инвертора

Литература

1. Bordignon P. Многоуровневые преобразователи источников напряжения для мощных приводов и управления энергопотреблением // Труды IV Международной (XV Всероссийской) конференции по автоматизированному электроприводу «Автоматизированный электропривод в XXI веке: пути развития». Магнитогорск, 2004. Ч. I.
2. Лазарев Г. Б. Высоковольтные преобразователи для частотного регулируемого электропривода. Построение различных систем // Новости электротехники. 2006. № 2 (32).
3. Розанов Ю. К. Основные этапы развития и современное состояние силовой электроники // Электричество. 2005. № 7.
4. Добкин И. Д., Таратута И. П., Чуприков В. С. Разработка преобразователя СТАТКОМ-10/10000 // VIII симпозиум «Электротехника 2010», 24–26 мая 2005 г.
5. Шавелкин А. А. Вариант схемы многоуровневого преобразователя частоты для электропривода среднего напряжения // Электротехника. 2005. № 11.
6. Привод ACS5000 переменного тока среднего напряжения для управления двигателями с напряжением до 6,9 кВ. ADVL OCO219CAT06ARU // Технический каталог фирмы ABB, август 2006.
7. Ситников В. Ф., Рябчицкий М. В., Смирнов М. И. Выбор силовых электронных ключей для преобразователей в электроэнергетике // Электротехника. 2007. № 4.
8. Поздеев А. Д. Электромагнитные и электромеханические процессы в частотно-регулируемых асинхронных электроприводах. Чебоксары, 1998.