

УДК 621.313

DOI: 10.24160/1993-6982-2017-2-62-70

Схемные решения использования возможностей многоуровневого автономного инвертора напряжения в переменных режимах частотного электропривода

К.К. Крутиков, В.В. Рожков

В традиционных схемах многоуровневых автономных инверторов напряжения с фиксирующими диодами питание уровней инвертора осуществляется или от одного неуправляемого выпрямителя, нагруженного на гирлянду емкостных делителей, или нескольких неуправляемых выпрямителей для каждого уровня. При работе на переменной частоте в схемах частотно-регулируемого электропривода на низких скоростях задействуется только часть из возможных уровней напряжения, что существенно ухудшает качество выходной сети инвертора. Тогда при работе приводного асинхронного двигателя на низких скоростях проявляется негативное влияние широтно-импульсной модуляции на обмотки статора двигателя. При этом оно не намного меньше, чем при питании машины от обычного двухуровневого автономного инвертора напряжения. Некоторое снижение отрицательного влияния обусловлено лишь уменьшением амплитуды импульсов напряжения на выходе инвертора. В то же время производные импульсов напряжения по-прежнему не отличаются от этих производных для случая двухуровневого инвертора напряжения. Долговечность приводного двигателя существенно снижается из-за протекающих паразитных токов между витками обмотки и между обмоткой и станиной машины. В результате такого негативного воздействия происходит ускоренное старение изоляции двигателя и преждевременный ее пробой. Эта проблема часто решается конструированием и применением специального частотно-регулируемого двигателя. От двигателя общепромышленных серий он отличается применением специальной изоляции повышенной прочности и непроводящих неметаллических подшипников. При этом значительно возрастает стоимость и так недешевой системы электропривода из-за дорогого объекта управления — двигателя.

В работе показан вариант относительно простого усовершенствования силовой схемы для четырехуровневого автономного инвертора напряжения заменой питания уровней от неуправляемого на управляемый выпрямитель. Это позволяет получить лучший спектр выходного напряжения инвертора. Коэффициент гармоник линейного напряжения при этом снижается почти в 5 раз. Решение может быть рекомендовано, если работа электропривода на низких скоростях составляет значительную часть производственного цикла.

Ключевые слова: многоуровневый автономный инвертор напряжения, управляемый выпрямитель, режимы работы частотного электропривода, коэффициент гармоник.

Circuit Solutions for Utilizing Capabilities of a Multilevel Self-Excited Voltage-Source Inverter in Variable Modes of a Variable-Frequency Drive

К.К. Krutikov, V.V. Rozhkov

In the conventional circuits of multilevel self-excited voltage-source inverters with clamping diodes, the inverter levels take power supply either from a single uncontrollable rectifier loaded on a string of capacitive dividers or from several uncontrollable rectifiers for each level. A drawback pertinent to the circuits of variable-frequency drives is that during operation in a variable-frequency mode at low rotation speeds, only a part of possible voltage levels is engaged in the operation, which results in a significantly degraded quality of the inverter output network. Under such conditions, an adverse effect of pulse-width modulation on the motor stator windings manifests itself at low rotation speeds. It should be noted that this adverse effect is little less than in case of supplying power to the motor from a usual two-level self-excited voltage-source inverter. A somewhat lesser negative effect is only due to a smaller amplitude of voltage pulses at the inverter output. At the same time, the voltage pulse derivatives still do not differ from those observed in the case of using a two-level voltage-source inverter. The drive motor durability decreases significantly due to parasitic currents flowing between the winding turns and between the winding and motor frame. This negative impact causes accelerated aging of the motor insulation and its premature breakdown. This problem is often solved by designing and using a special frequency-adjustable motor. Such a motor differs from general-purpose motor series in using special high-strength insulation and non-conducting non-metallic bearings. As a result, the electric drive system, which is in itself far from being cheap, becomes significantly more costly due to an expensive motor to be controlled by it.

The article presents a relatively simple version of improving the power circuit arrangement for a four-level self-excited voltage-source inverter by using controlled rectifiers instead of uncontrolled ones for supplying power to the inverter levels. This measure makes it possible to obtain a better spectrum of the inverter output voltage. In this case, the total harmonic distortion factor of the line-to-line voltage decreases by almost a factor of 5. The solution can be recommended for use if the electric drive operation at low speeds makes a significant part of the production cycle.

Key words: multilevel voltage-source inverter, controlled rectifier, operation modes of the frequency electric drive, total harmonic distortion.

Применяемые преобразователи частоты для регулируемого привода переменного тока обычно содержат неизменную часть топологии: трехфазную сеть промышленной частоты (380 В или выше для высоковольтных схем), неуправляемый диодный выпрямитель с емкостным выходным фильтром, транзисторный автономный инвертор напряжения (АИН) с высокочастотной коммутацией. Управление транзисторными ключами также имеет устоявшиеся неизменные признаки: применение высокочастотной коммутации как с несущей, так и чисто релейные в скользящих режимах. Объект управления - трехфазный двигатель (асинхронный, синхронный или вентильно-индукторный) обычно рассматривается с позиций векторного управления при воздействии на него трехфазного обобщенного вектора. [1—5].

Известно, что для нормального состояния магнитной системы машины требуется поддерживать почти постоянное отношение амплитуды к частоте выходного напряжения ($U/f = \text{const}$). Одна из особенностей многоуровневого АИН известных вариантов топологии с питанием по входу от диодного выпрямителя с гирляндой «плавающих» конденсаторов как источника питания частотно-регулируемого двигателя состоит в том, что при малых частотах малая амплитуда напряжения формируется не из всех возможных многих уровней, а только из низших [6, 7]. Выходное напряжение имеет вид «гребенки» с порогами низшего уровня, как в простейшем двухуровневом АИН. Заложенные возможности многоуровневого характера напряжения при этом не используются. Гармонический состав (коэффициент гармоник) такой «гребенки» в десятки раз хуже, чем многоступенчатой кривой, приближающейся к идеальной синусоиде в случае использования достаточно большого числа ступеней [8].

Обычным оправданием применения этой ситуации служит довод, что работа машины на низших скоростях занимает незначительную часть времени производственного цикла, так что плохие энергетические показатели на низших частотах и напряжениях не несут существенного ущерба в целом. А что если работа привода на низших скоростях составляет большую часть рабочего цикла? Можно смириться с ситуацией, но можно изменить ее к лучшему.

Относительно простое и дешевое решение для улучшения спектра выходного напряжения во всех режимах можно получить заменой питания инвертора от неуправляемого диодного выпрямителя на питание от управляемого одного тиристорного моста и гирлянды «плавающих» конденсаторов, или нескольких тиристорных мостов. Это позволяет при всех режимах работы привода находиться в ситуациях, когда напряжение питания АИН U_d имеет такой уровень, какой требует задействования всех возможных N ступеней инвертора.

Рассмотрим проблему на примере известной схемы четырехуровневого АИН с фиксирующими диодами

[7, 8]. Силовая часть имеет вид, представленный на рис. 1.

Схема содержит три фазных стойки с шестью активными ключами (транзисторами со своими обратными диодами-снабберами), а также по четыре фиксирующих уровня выходного трехфазного напряжения диода при любом направлении выходного тока.

Входное постоянное напряжение диодного выпрямителя U_d делится на три части по $U_d/3$, а внутренний источник — еще на две половины по $U_d/6$. В схеме эти источники показаны явно.

В реальном АИН роль расщепленных источников выполняют конденсаторы, соединенные в гирлянду. При этом возникает задача выравнивания напряжений на «плавающих» конденсаторах, вариант решения которой показан в [6].

В каждой стойке выходное фазное напряжение (относительно показанной точки «земля») может принимать четыре фиксированных уровня: $U_d/2$; $-U_d/2$; $U_d/6$; $-U_d/6$. В пределах интервала существования каждой ступени между соседними уровнями активны только два ключа, работающие инверсно по используемому алгоритму управления (трубчному [6, 8] или симплекстному [7]). Активность означает наличие отпирающего сигнала управления. Третий, участвующий в работе данной ступени, замкнут по управлению в течение всего интервала данной «трубки» (ступени). Остальные три — разомкнуты. Так, при работе в верхней ступени $U_d/2 - U_d/6$ в состоянии $U_d/2$ (и токе фазы > 0) активен по управлению и проводит ключ $S3$. Ключи $S2$ и $S1$ по управлению замкнуты и также проводят. Если же при этом ток нагрузки фазы отрицателен, транзисторные ключи не проводят, хотя по команде управления они готовы к включению. В этом случае оказываются проводящими три верхних снабберных диода. В состоянии $U_d/6$ активны по управлению ключи $S2$ и $S3$, но проводит только один из них в зависимости от знака тока фазы. Постоянно замкнут по управлению $S1$. Уровень $U_d/6$ фиксируется диодами $D1$ (при положительном токе фазы) или $D1'$ (при отрицательном токе фазы).

При работе в средней ступени $-U_d/6 - U_d/6$ состояние $-U_d/6$ обеспечивается активными по управлению $S1$ и $S3$ (проводит только один из них), постоянно активен по управлению $S2$. Фиксация уровня $-U_d/6$ обеспечивается диодами $D2$ (при положительном токе фазы) или $D2'$.

При работе в нижней ступени ($-U_d/6$ до $-U_d/2$) состояние $-U_d/2$ обеспечивается замкнутыми по управлению ключами $S3$, $S2$ (проводит один из них в зависимости от знака фазного тока), а также $S1$.

Состояние каждой из трех фаз четырехуровневого АИН можно представить комбинацией команд двоичной логики (1, 0) с указанием состояния всех ключей в последовательности 3-2-1-3'-2'-1' (111000 — состояние $U_d/2$, 011100 — состояние $U_d/6$, 001110 — состояние $-U_d/6$, 000111 — состояние $-U_d/2$). Определение

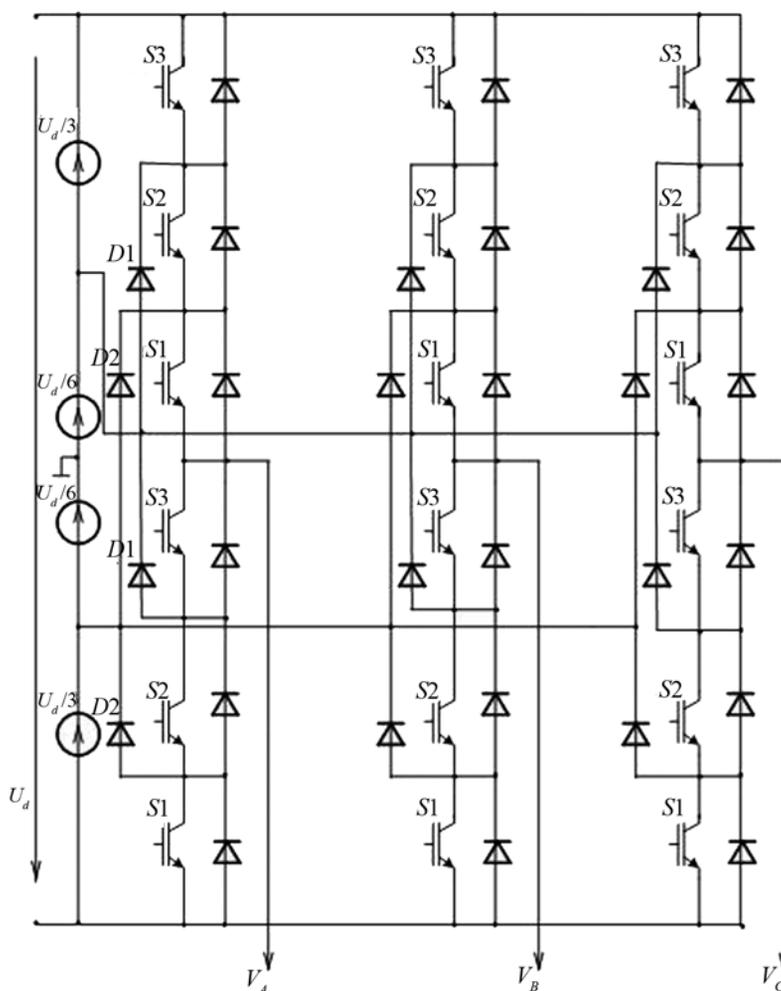


Рис. 1. Силовая часть четырехуровневого АИН

состояния фаз и их активных ключей производится или по «трубчатой» технологии ШИМ [1—6, 8], или в зависимости от величины желаемого обобщенного вектора управления, который синтезирует ключевая схема АИН в симплексном методе [7].

При использовании широтно-импульсной модуляции (ШИМ) и ее аппаратной «трубчатой» реализации схема управления ключами каждой стойки N -уровневого АИН содержит:

- три симметричных трехфазных задающих синусоидальных сигнала управления переменной амплитуды и частоты. Иногда в номинальных режимах к ним добавляется сигнал тройной частоты для увеличения амплитуды первой гармоники выходного напряжения. Максимальное значение сигнала управления должно быть согласовано с амплитудой опорного сигнала и числом «трубок» так, чтобы их сравнение было возможно без «перемодуляции»;
- сигнал опорного напряжения несущей частоты (обычно это симметричная пила);
- устройство, формирующее «трубки» $N-1$ опорных сигналов, заполняющих без перекрытия все поле возможных сигналов управления и опорных пило-

образных. Для четырехуровневого АИН (см. рис. 1) требуется три трубки;

- релейные устройства сравнения (компараторы) опорных пилообразных сигналов с сигналом управления стойки (фазы). Выходной релейный сигнал управляет двумя инверсными активными ключами в поле данной трубки. При условии положительного значения разностного сигнала работает ключ, формирующий верхний уровень выходного напряжения данной трубки, иначе — инверсный ключ, формирующий нижний уровень. Третий активный ключ также замкнут. Таким образом, управление ключами каждой из трех стоек может производиться независимо друг от друга, и выходное фазное напряжение имеет кусочно-постоянную форму с N уровнями.

Спектр фазного напряжения важен для инверторов, работающих на нагрузку с заземленной нейтралью. В схемах частотного электропривода нейтраль двигателя изолирована, и имеют значение линейные напряжения и их спектр.

Спектр напряжения может быть получен или средствами численного разложения в ряд осциллограмм компьютерного моделирования [6], или аналитически,

как это делается при упрощающих допущениях, например в [8]. Этот спектр зависит от режима работы (глубины модуляции, т. е. отношения амплитуды сигнала управления к $(N-1)/2$ амплитудам пилю).

В режимах пуска двигателя с малыми частотами и амплитудами напряжений (малой глубиной модуляции, меньшей $1/3$) получается наихудший спектр линейных напряжений. Он содержит:

- первую гармонику, амплитуда которой пропорциональна амплитуде сигнала управления, а частота равна частоте сигнала управления;
- высшие гармоники. При этом в спектре высших гармоник отсутствуют низкочастотные вплоть до частот вблизи несущей. Амплитуды высших гармоник зависят от числа уровней N ; при $N = 4$ наиболее ярко выраженные составляют более 400 % от амплитуды первой гармоники.

В режимах, близких к номинальному (с глубиной модуляции, приближающейся к максимально возможному единичному значению), наилучший спектр содержит:

- первую гармонику, амплитуда которой пропорциональна амплитуде сигнала управления, а частота равна частоте сигнала управления. Максимальная ве-

личина амплитуды первой гармоники не может превышать 86 % от предельного значения ($U_d/2$) при использовании синусоидального сигнала управления и приближается к 100 % с применением комбинации из синусоид основной и тройной частот;

- высшие гармоники. При этом в спектре высших гармоник также отсутствуют низкочастотные вплоть до частот вблизи несущей. Амплитуды высших гармоник зависят от числа уровней N , и при $N = 4$ наиболее ярко выраженные составляют около 10 % от амплитуды первой гармоники [8].

При симплексном управлении решается задача синтеза обобщенного вектора управления, совпадающего с желаемым. При этом формируется команда управления ключами сразу всех фаз (стоек), что позволяет минимизировать число переключений в сравнении с алгоритмом ШИМ [7]. Однако спектр напряжений в симплексных методах оказывается хуже, чем в синусоидальных симметричных ШИМ.

Верхний уровень модели, соответствующей замене входного питания с постоянным уровнем напряжений (см. рис. 1) управляемыми выпрямителями, формирующими требуемые уровни напряжений, представлен на рис. 2.

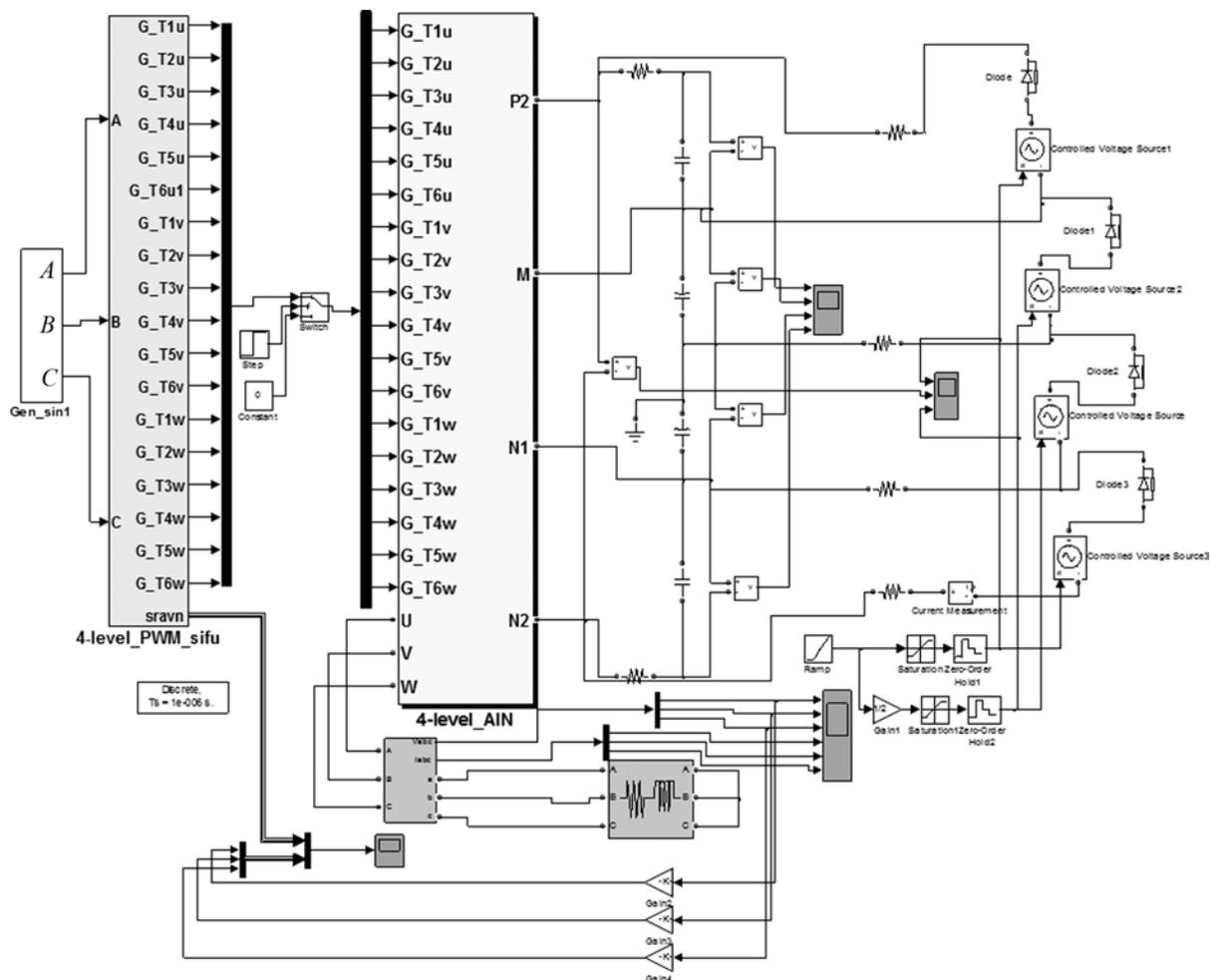


Рис. 2. Верхний уровень модели

Модель содержит:

- четыре управляемых выпрямителя с нагрузкой в виде гирлянды емкостей вместо одного управляемого выпрямителя с нагрузкой на «плавающие» конденсаторы (тогда исчезает проблема выравнивания напряжений внешних и внутренних конденсаторов в отношении 2:1, если питание гирлянды осуществляется от одного выпрямителя). При этом упрощении на этапе моделирования идеи можно сам тиристорный выпрямитель (один или четыре) также подробно не рассматривать. Выпрямители моделируются управляемыми по напряжению источниками напряжения односторонней проводимости. Выходные напряжения выпрямителей линейно нарастают на интервале пуска (в модели принят равным 0,5 с);

- подмодели формирования симметричных трехфазных синусоидальных напряжений управления постоянной заданной амплитуды, согласованной с амплитудами пилообразных напряжений трубок для получения постоянной глубины модуляции, и линейно нарастающей частотой на интервале пуска;

- подмодели управления ключами трех стоек инвертора, содержащие формирование опорных пилообразных сигналов несущей и разнесение их на три трубки, сравнение пилообразных сигналов с сигналом управления в поле действия данной трубки и формирование сигналов управления ключами стоек по описанному «трубчному» алгоритму.

Силовая часть четырехуровневого инвертора напряжения представлена моделью верхнего уровня (рис. 3). Подмодель транзисторного ключа содержит снабберную диодную часть.

Асинхронный двигатель с изолированной нейтралью упрощенно представлен трехфазной нагрузкой *RL*-типа.

Результаты моделирования пуска показаны на осциллограммах рис. 4, 5.

Из результатов моделирования видно, что форма выходного напряжения инвертора сохраняется неизменной на всем интервале пуска.

Проведен гармонический анализ фазного и линейного напряжения на нагрузке с использованием интегрального показателя — коэффициента гармоник (англ. THD). На рис. 6 показан фрагмент модифицированной модели с включенными библиотечными блоками THD для вычисления коэффициента гармоник для фазного и линейного напряжения.

Эксперимент проведен для пяти точек установившегося режима в схеме: при номинальном напряжении источников и номинальной частоте 50 Гц, 50%-ных напряжении и частоте, 25%-ных напряжении и частоте, 10%-ных напряжении и частоте. Глубина модуляции во всех случаях одинакова и равна 0,8.

Результаты представлены осциллограммами на рис. 7. Видно, что формы фазных и линейных напряжений подобны при всех частотах, число уровней фазных напряжений равно четырем, а линейных — семи.

Для сравнения рассмотрен режим симметричной ШИМ с неуправляемым выпрямителем 500 В, глубиной модуляции 0,1 при частоте 5 Гц. Как было отмечено, при этом выходное фазное напряжение имеет всего два уровня, а линейное — три (рис. 8).

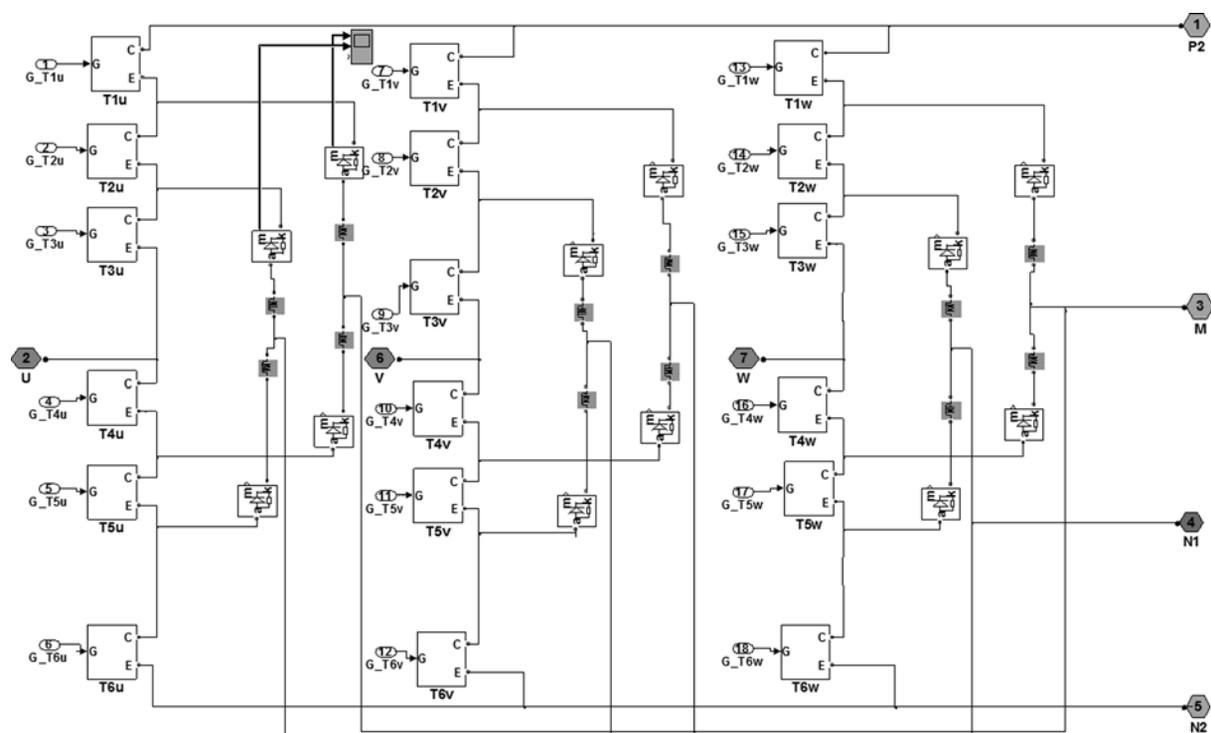


Рис. 3. Модель силовой части

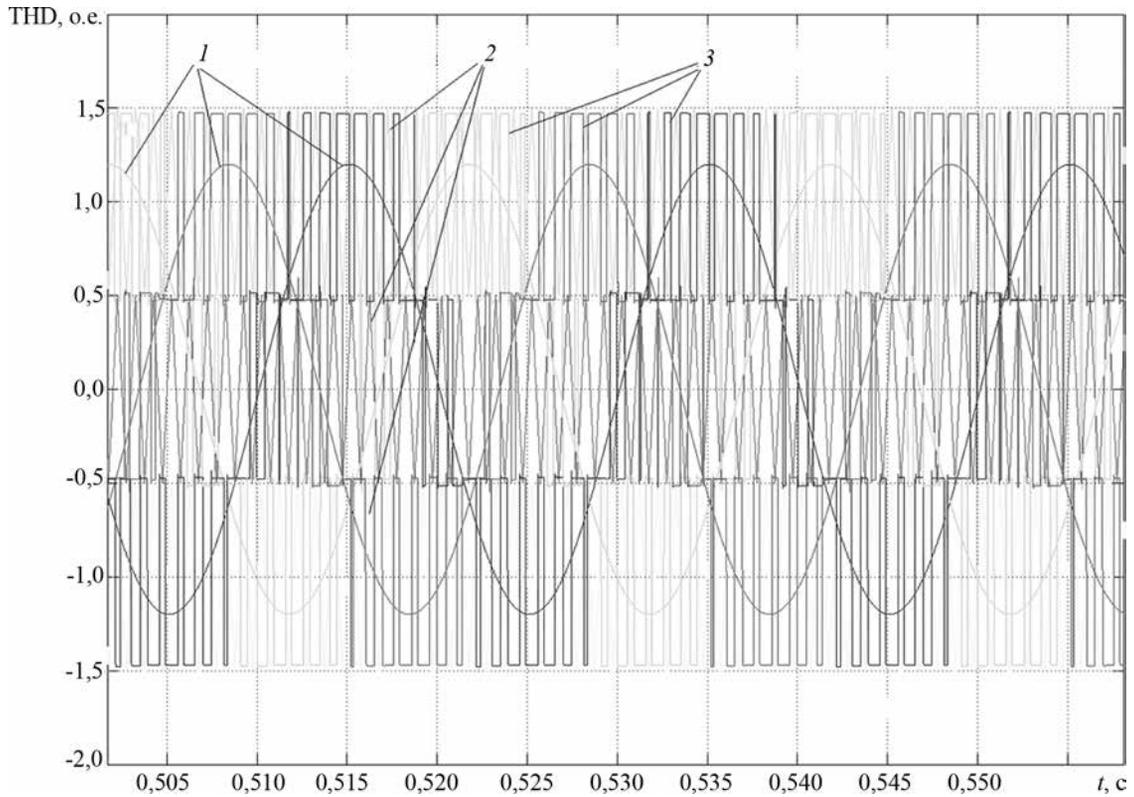


Рис. 4. Формирование выходных фазных напряжений с применением симметричной четырехуровневой ШИМ:
 1 — фазные напряжения управления; 2 — сигналы опорных трубок; 3 — выходные фазные напряжения

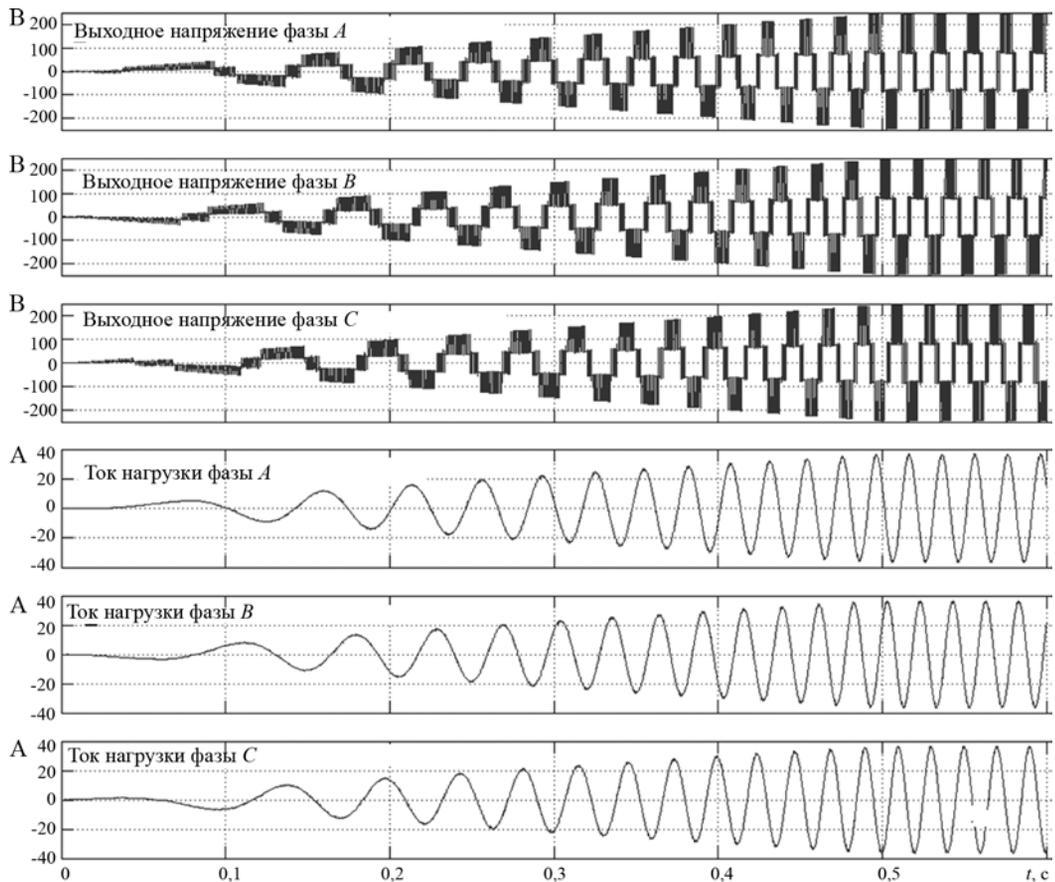


Рис. 5. Выходные фазные напряжения и фазные токи нагрузки

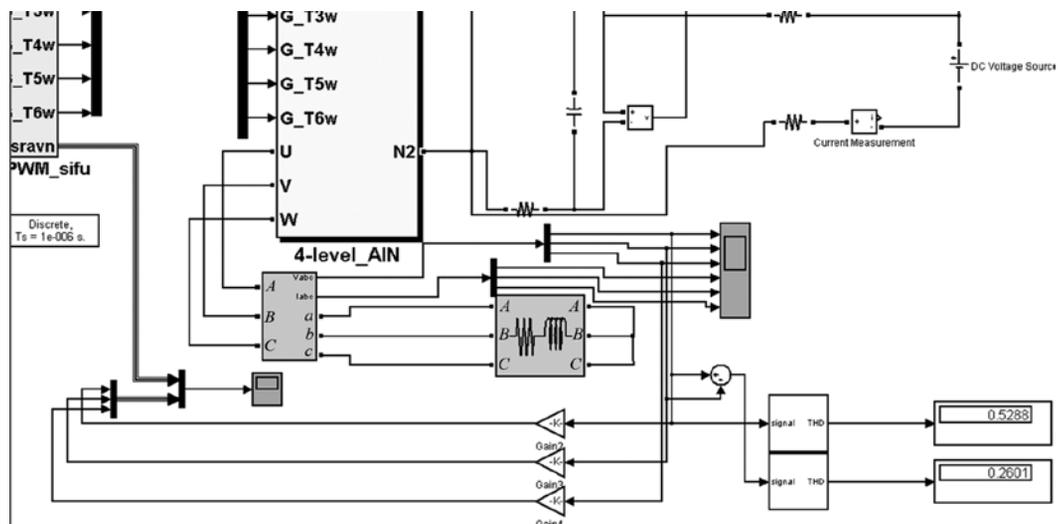


Рис. 6. Фрагмент модели с блоками расчета коэффициента гармоник (THD) фазного и линейного напряжений

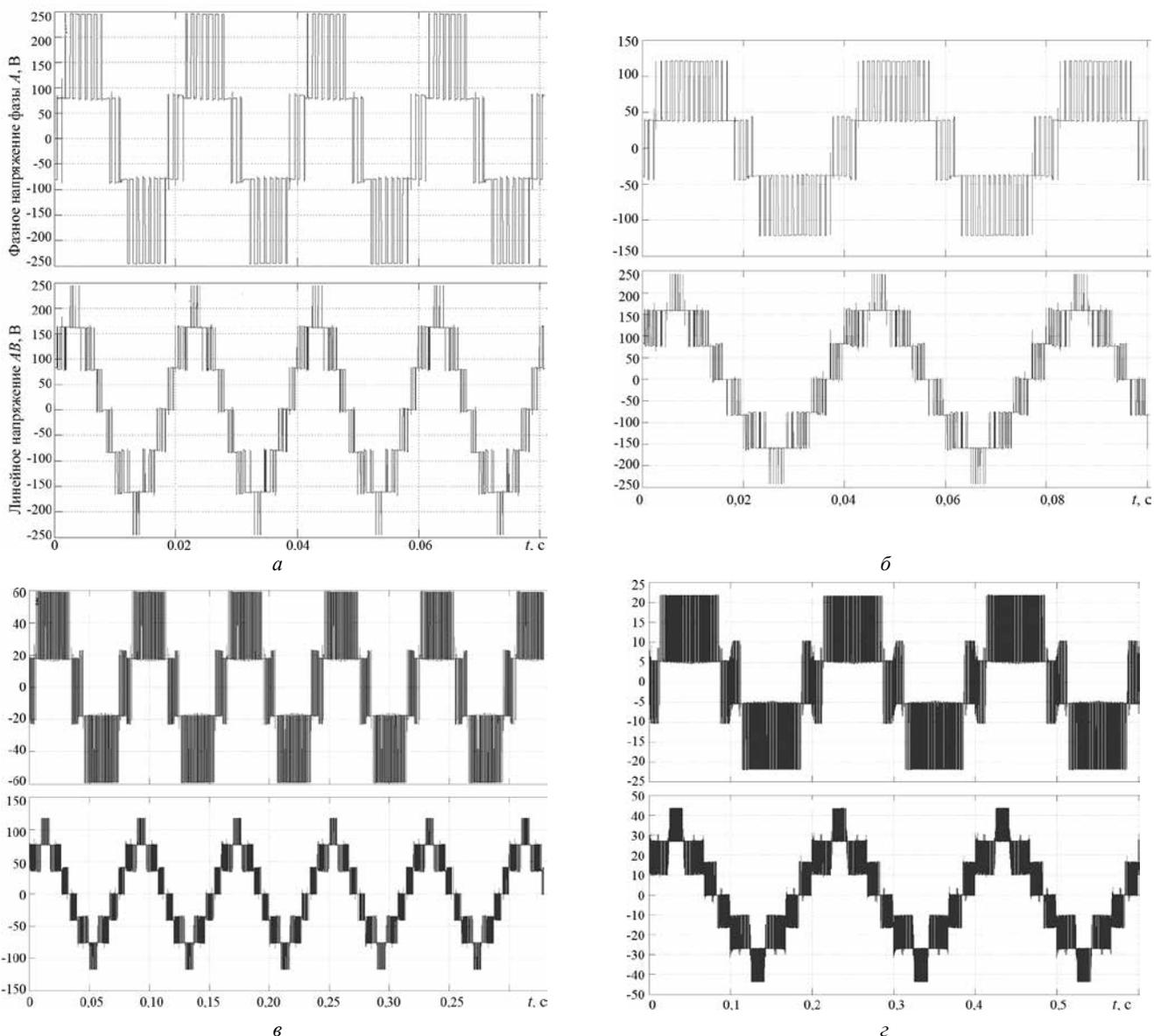
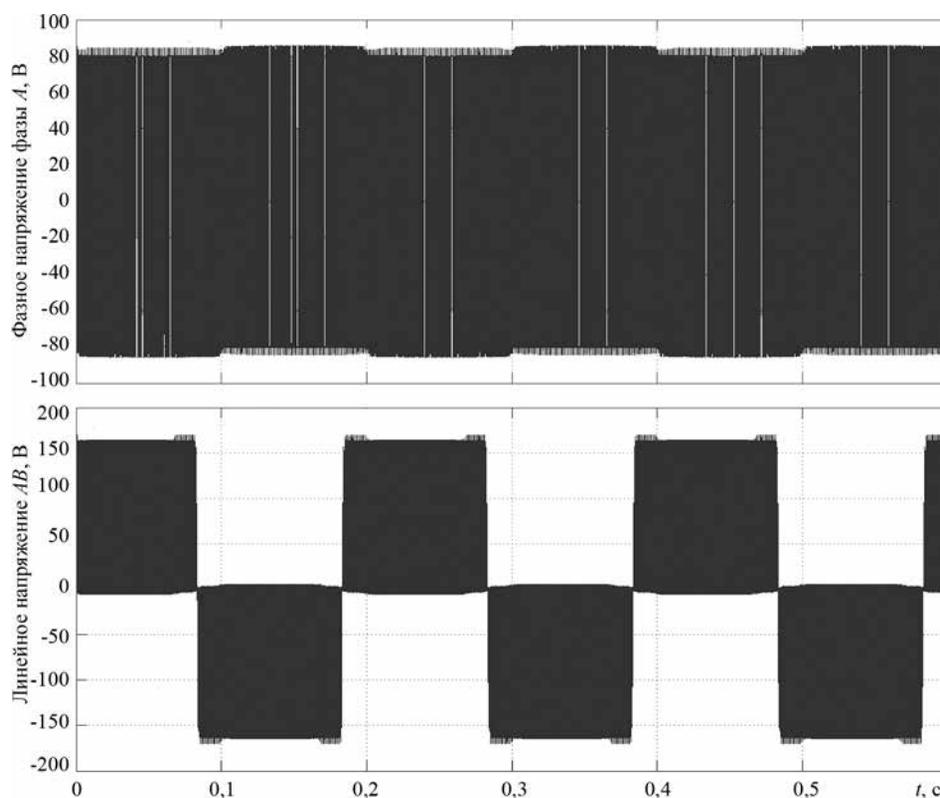


Рис. 7. Форма фазных и линейных напряжений при разных частотах:
 а — $f = 50$ Гц; б — 25 Гц; в — 12,5 Гц; г — 5 Гц;

Рис. 8. Неуправляемый выпрямитель ($f = 5$ Гц)

Коэффициенты гармоник (ТНД фазного и линейного напряжений) рассмотренных режимов с четырьмя уровнями (коэффициент модуляции 0,8):

Частота, Гц 50,0; 25,0; 12,5; 5,0

ТНД фазных и линейных

напряжений, о.е. 0,53/0,26; 0,56/0,32; 1,2/1,05; 1,8/1,6

Заметим, что:

- коэффициент гармоник фазных напряжений больше, чем линейных;

- коэффициент гармоник как фазных, так и линейных напряжений ТНД растет на малых частотах работы несмотря на подобие формы напряжений. Это объясняется тем, что при малых частотах и малых уровнях напряжения питания ступеней первая гармоника уменьшается в гораздо большей степени, чем амплитуды высших.

Для сравнения приведены коэффициенты гармоник фазных и линейных напряжений в режиме ШИМ и одним диодным выпрямителем при частоте 5 Гц (с осциллограммами на рис. 8), которые составляют соответственно (9/4,5).

Представим выводы.

Показано, что применение четырех управляемых выпрямителей вместо одного диодного для питания четырехуровневого АИН по входу позволяет значительно (почти пятикратно) улучшить ТНД выходных фазных и линейных напряжений при работе привода на малых частотах. Исчезает проблема выравнивания напряжений на «плавающих» конденсаторах. Конечно,

при этом силовая часть преобразователя усложняется появлением четырех независимых тиристорных выпрямителей с согласованным общим управлением.

Литература

1. Усольцев А.А. Векторное управление асинхронными двигателями. СПб.: Изд-во СПбГИТМО, 2002.
2. Виноградов А.Б. Векторное управление электроприводами переменного тока. Иваново: Ивановский государственный энергетический университет им. В. И. Ленина, 2008.
3. Розанов Ю.К., Рябчицкий М.В., Кваснюк А.А. Силовая электроника. М.: Издательский дом МЭИ, 2007.
4. Анучин А.С. Системы управления электроприводов. М.: Издательский дом МЭИ, 2015.
5. Соколовский Г.Г. Электроприводы переменного тока с частотным регулированием. М.: Академия, 2006.
6. Akagi H., Fujita H., Yonetani S., Kondo Y. 6.6-kV Transformerless STATCOM Based on a Five-Level Diode-Clamped PWM Converter: System Design and Experimentation of a 200-V 10-kVA Laboratory Model // IEEE Transactions on Industry applications. 2008. V. 44. No 2.
7. Крутиков К.К., Рожков В.В., Петрухин Ю.В. Симплексные алгоритмы управления трехфазными многоуровневыми автономными инверторами напряжения // Электричество. 2008. № 3. С. 33—41.

8. **Баховцев И.А.** Анализ выходного напряжения многофазных четырехуровневых инверторов напряжения с ШИМ // Доклады ТУСУРа. 2014. № 3. С. 175—180.

References

1. **Usol'tsev A.A.** Vektornoe Upravlenie Asinkhronnymi Dvigatelyami SPb.: Izd-vo SPbGITMO, 2002. (in Russian).

2. **Vinogradov A.B.** Vektornoe Upravlenie Elektroprivodami Peremennogo Toka. Ivanovo: Ivanovskiy Gosudarstvennyy Energeticheskiy Universitet im. V. I. Lenina, 2008. (in Russian).

3. **Rozanov Yu.K., Ryabchitskiy M.V., Kvasnyuk A.A.** Silovaya Elektronika. M.: Izdatel'skiy Dom MPEI, 2007. (in Russian).

4. **Anuchin A.S.** Sistemy Upravleniya Elektroprivodov: M.: Izdatel'skiy Dom MPEI, 2015. (in Russian).

5. **Sokolovskiy G.G.** Elektroprivody Peremennogo Toka s Chastotnym Regulirovaniem. M.: Akademiya, 2006. (in Russian).

6. **Akagi H., Fujita H., Yonetani S., Kondo Y.** 6.6-kV Transformerless STATCOM Based on a Five-Level Diode-Clamped PWM Converter: System Design and Experimentation of a 200-V 10-kVA Laboratory Model // IEEE Transactions on Industry Applications. 2008; 44:2.

7. **Krutikov K.K., Rozhkov V.V., Petrukhin Yu.V.** Simpleksnye Algoritmy Upravleniya Trekhfaznymi

Mnogourovnevymi Avtonomnymi Invertorami Napryazheniya //Elektrichestvo. 2008;3:33—41. (in Russian).

8. **Bakhovtsev I.A.** Analiz Vykhodnogo Napryazheniya Mnogofaznykh Chetyrekhurovnevnykh Invertorov Napryazheniya s SHIM // Doklady TUSURa. 2014;3:175—180. (in Russian).

Сведения об авторах

Крутиков Кирилл Кириллович — кандидат технических наук, доцент кафедры теоретических основ электротехники филиала НИУ «МЭИ» в г. Смоленске

Рожков Вячеслав Владимирович — кандидат технических наук, зав. кафедрой электромеханических систем филиала НИУ «МЭИ» в г. Смоленске, e-mail: umo@sbmpei.ru

Information about authors

Krutikov Kirill K. — Ph.D. (Techn.), Assistant Professor of Theoretical Foundations of Electrical Engineering Dept., Branch of NRU MPEI in Smolensk

Rozhkov Vyacheslav V. — Ph.D. (Techn.), Head of Electromechanical Systems Dept., Branch of NRU MPEI in Smolensk, e-mail: umo@sbmpei.ru

Статья поступила в редакцию 05.09.2016