

# ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКОЕ ОБОРУДОВАНИЕ И АВТОМАТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ

УДК 621.314

## УНИВЕРСАЛЬНАЯ СПЕКТРАЛЬНАЯ МОДЕЛЬ МНОГОУРОВНЕВОГО ИНВЕРТОРА НАПРЯЖЕНИЯ

Д.В. Рожков  
(ОАО «Корпорация «ВНИИЭМ»)

*Применение многоуровневых автономных инверторов напряжения (АИН) в системах преобразования постоянного напряжения в переменное обеспечивает повышенную (по сравнению с двухуровневыми АИН) энергоэффективность и качество выходного сигнала, что является существенным критерием при питании ответственных потребителей собственных нужд и электроприводов различного назначения. Во многом уровень АИН ( $n = 3, 4, 5 \dots$ ) определяется уровнем напряжения звена постоянного тока.*

*На сегодняшний день большое количество научных работ и статей посвящено рассмотрению и описанию принципов работы трёхуровневых АИН. Куда в меньшей степени затрагиваются вопросы 4- и 5-уровневых АИН, а АИН с  $n > 6$  упоминаются в редких работах с кратким пояснением процессов, происходящих в схеме.*

*Авторами предложен метод анализа многоуровневых АИН как универсальной  $n$ -уровневой системы с  $n \geq 3$  с ШИМ. Приведена универсальная спектральная модель  $n$ -уровневого инвертора напряжения, позволяющая рассмотреть принцип работы схемы и оценить спектральный состав её токов и напряжений при различных способах ШИМ-управления и относительно малых временных затратах на расчёт модели.*

**Ключевые слова:** многоуровневый инвертор напряжения, спектральная модель, гармонический состав, широтно-импульсная модуляция, моделирование, сигнал развёртки.

Задачи создания универсальных моделей устройств силовой электроники, позволяющих исключить временные затраты на существенное изменение модели при необходимости изменения топологии схемы и имеющих удовлетворительное время расчёта модели, одновременно актуальны и сложны для реализации. Во многом это обусловлено сложностью описания модели, в которой переменным параметром является изменяемая в топологии схемы величина, а математические уравнения, описывающие принцип работы устройства, не изменяются. При этом стоит отметить, что даже получение адекватной универсальной модели, объединяющей семейство устройств силовой электроники, не гарантирует удобства её применения, если время её расчёта превышает время, необходимое на создание конкретной модели устройства с изменённой топологией.

Очевидно, что удовлетворение требованиям адекватности и скорости расчёта универсальной модели может быть выполнено лишь при условной линейности изменения топологии анализируемой схемы. Такой линейностью обладают многоуровневые автономные инверторы напряжения (АИН) [1, 2], изменяемым параметром в которых является число уровней в их выходном напряжении. Именно это свойство семейства многоуровневых АИН позволяет решить основную задачу данной работы – провести анализ многоуровневых АИН как системы с  $n$ -уровнями выходного напряжения и создать их быструю и адекватную универсальную модель.

За последнее десятилетие было разработано и выпущено немало мощных пакетов универсальных

программ (OrCad, MatLab и др.), которые позволяют на основе заданной электрической схемы устройства провести моделирование электромагнитных процессов. Возможности таких пакетов программ очень велики, но, как и в любых полных моделях, их быстродействие и производительность малы в силу избыточности самой модели.

Для обеспечения высокого качества электрической энергии на входе и (или) выходе ключевых преобразователей (в данном случае АИН) применяются различные виды широтно-импульсной модуляции. Наличие множества (до нескольких сотен) межкоммутационных интервалов на периоде несущей частоты существенно затрудняет моделирование, и применение пакетов вышеуказанных программ в данном случае вызывает трудности, связанные с большими затратами времени на проведение модельного эксперимента. В связи с этим на полных моделях затруднен анализ множества режимов работы и подбор параметров элементов при поиске оптимальных решений.

Преимуществами в этом плане обладают спектральные модели. Впервые применил спектральное моделирование в силовой электронике профессор Новосибирского электротехнического института Г.В. Грабовецкий ещё в конце 1960-х гг., создавший корректную модель непосредственного преобразователя частоты. В 1999 г. профессор Московского энергетического института Е.Е. Чаплыгин дополнил спектральную модель специальным модулятором, преобразующим управляющий сигнал во временной интервал, решив проблему

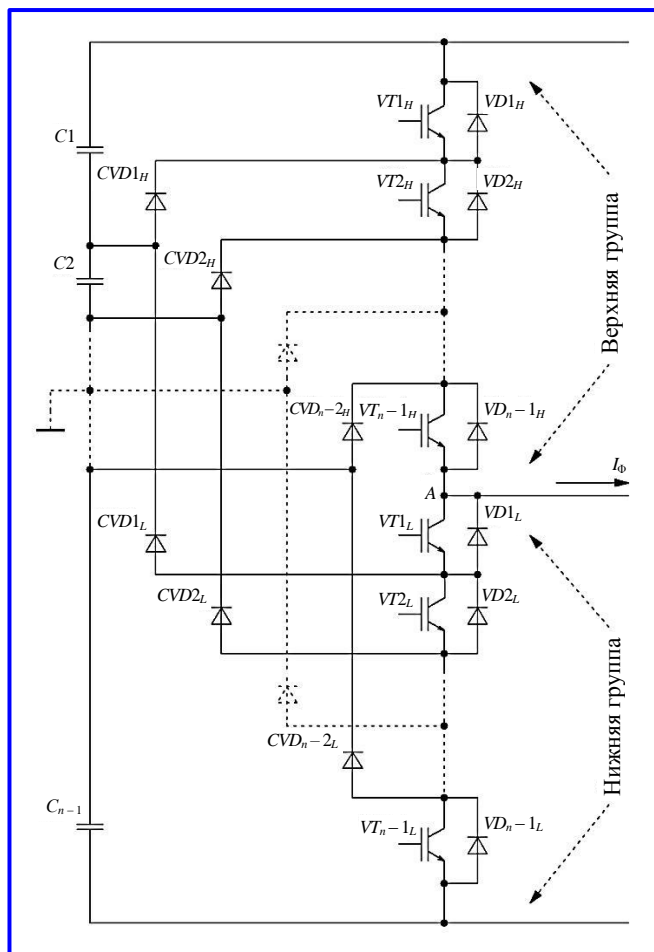


Рис. 1. Плечо  $n$ -уровневого АИН

аналитического задания временного положения переключающей функции [3].

Спектральные модели реализуются в пакете MathCad или в иных аналогичных программах. К числу достоинств спектральных моделей относятся:

- возможность непосредственного моделирования установившегося режима без затраты времени на расчёт переходных процессов;
- простота составления программы, основанной на использовании стандартных расчётных блоков;
- высокая производительность модели, которая существенно превышает показатели моделей на основе универсальных пакетов программ;
- простота процедуры изменения параметров элементов, как и изменения силовой схемы и алгоритма управления в целом.

Таким образом, спектральные модели позволяют анализировать множество режимов, выявлять критические режимы, определять и оптимизировать параметры элементов силовой схемы и характеристики преобразователя.

Наряду с этим спектральное моделирование имеет недостатки:

- невозможность анализа процессов в системах с замкнутым контуром управления (это ограничение снимается при допущении об абсолютной устойчивости системы управления при априорном задании моментов коммутации ключей);
- необходимость идеализации схемы (идеальные ключи, идеальные источники питания).

Быстродействие спектральных моделей базируется на том, что специализированные модели в отличие от полных обладают меньшей избыточностью, не затрачивается время на проведение заведомо лишних операций. В этом смысле и модель, основанная на записи интегро-дифференциальных уравнений силовой части преобразователя, будет обладать большим быстродействием, чем полная модель. Но решение интегро-дифференциальных уравнений и сам процесс их составления чрезвычайно усложняются по мере роста порядка системы, поэтому такой способ моделирования применяют только для систем невысокого порядка. Спектральные модели лишены этого недостатка.

При разработке универсальной спектральной модели  $n$ -уровневого АИН за основу принята схема с фиксирующими диодами как наиболее энергоэффективная [4], а также учтены следующие допущения:

- все элементы схемы идеальные;
- установившийся режим работы АИН;
- нагрузка симметричная.

Схема плеча  $n$ -уровневого АИН с фиксирующими диодами, на основе которой создана модель, приведена на рис. 1.

Каждое плечо  $n$ -уровневого АИН состоит из:

- $(n - 1)$  силовых транзисторов с противофазными диодами ( $VT_H, VD_H$ ) верхней (см. рис. 1) и  $(n - 1)$  силовых транзисторов с противофазными диодами ( $VT_L, VD_L$ ) нижней (см. рис. 1) группы ключей;
- $(n - 1)$  конденсаторов, заряженных до  $E/n - 1$  каждый, в цепи питания  $C$ ;
- $(n - 2)$  верхних и  $(n - 2)$  нижних фиксирующих диодов  $CVD_H, CVD_L$ .

Для организации ШИМ в одном плече  $n$ -уровневого АИН применяют один сигнал управления (в данном случае синусоидальный) и  $(n - 1)$  сигналов развёртки. При вертикальном управлении происходит сравнение управляющего сигнала, период которого равен периоду выходной частоты АИН, с сигналом развёртки, частота повторения которого равна частоте коммутации.

Вне зависимости от числа уровней преобразователя задание сигнала управления на одном периоде работы схемы в спектральной модели будет неизменным:

$$\begin{cases} U_{a-y}(\theta) := K_m \sin(\theta); \\ U_{b-y}(\theta) := K_m \sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right); \\ U_{c-y}(\theta) := K_m \sin\left(\theta - \frac{4\pi}{3}\right), \end{cases} \quad (1)$$

где  $U_{a-y}(\theta)$ ,  $U_{b-y}(\theta)$ ,  $U_{c-y}(\theta)$  – сигналы управления для фаз  $A$ ,  $B$  и  $C$  соответственно;  $K_m$  – коэффициент модуляции схемы, определяющий соотношение амплитуды управляющего сигнала к максимальному значению верхнего (первого) сигнала развертки;  $\theta = \omega t := 0, d \dots 2\pi$ ;  $d$  – шаг квантования переменной  $\theta$ .

В [2] приведены математические формулы, описывающие формирование в пакете MathCad одиночных пилообразных сигналов развертки по фронту, срезу и фронту и срезу одновременно. При разработке спектральной модели  $n$ -уровневого АИН получена универсальная математическая формула сигнала развёртки по фронту и срезу, зависящая от соотношения частоты коммутации силовых транзисторов к выходной частоте, числа уровней АИН и порядкового номера развёртки. Уравнение универсальной развёртки:

$$U_r(\theta, i) := \frac{2}{n-1} \frac{1}{\pi} \operatorname{asin}\left(\sin\left(A\theta - \frac{\pi}{2}\right)\right) + (n-2i) \frac{1}{n-1}, \quad (2)$$

где  $n$  – число уровней АИН;  $i := 1, 2 \dots (n-1)$  – порядковый номер сигнала развёртки от положительного (верхнего) к отрицательному (нижнему);

$A := \frac{f_k}{f_{out}}$  – отношение частоты коммутации силовых транзисторов к выходной частоте АИН.

Аналогичным способом приведённые в [2] формулы преобразуются в универсальные уравнения сигналов развёрток по фронту или срезу:

$$\begin{cases} U_{r\_rise}(\theta, i) := -\frac{2}{n-1} \frac{1}{\pi} \operatorname{atan}\left(\tan\left(\frac{A}{2}\theta - \frac{\pi}{2}\right)\right) + (n-2i) \frac{1}{n-1}; \\ U_{r\_fall}(\theta, i) := \frac{2}{n-1} \frac{1}{\pi} \operatorname{atan}\left(\tan\left(\frac{A}{2}\theta - \frac{\pi}{2}\right)\right) + (n-2i) \frac{1}{n-1}. \end{cases} \quad (3)$$

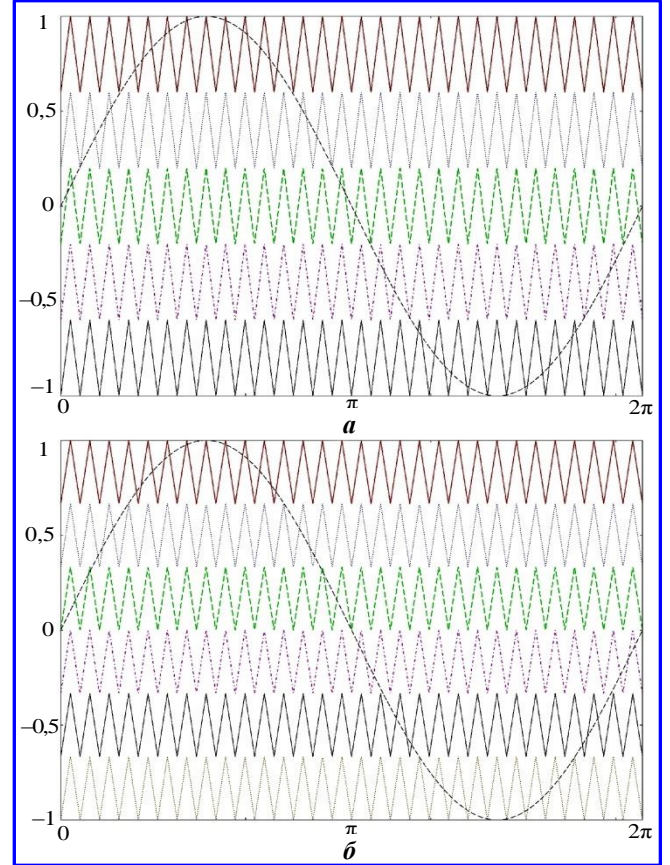


Рис. 2. Сигналы управления и развёртки для 6-уровневого АИН (а) и 7-уровневого АИН (б)

Формы сигналов управления и развёртки для 6- и 7-уровневых АИН при  $K_m = 1$ ,  $A = 30$ , полученные в пакете MathCad 15.0 в соответствии с выведенными формулами (1) и (2), приведены на рис. 2.

Задание сигналов управления силовыми транзисторами в разработанной модели  $n$ -уровневого АИН осуществляется посредством сравнения описанных выше сигналов управления и развёртки. На каждом этапе такое сравнение может быть описано при помощи встроенной функцией *if* пакета MathCad 15.0. Данная форма определения управляющих сигналов является универсальной и не требует внесения изменений в неё при изменении числа уровней АИН, частоты коммутации или же типа применяемого ШИМ:

$$\begin{cases} VT_{fa1}(\theta, i) := \operatorname{if}(U_{a-y}(\theta) > U_r(\theta, i), 1, 0); \\ VT_{fa2}(\theta, i) := \operatorname{if}(U_{a-y}(\theta) < U_r(\theta, i), 1, 0); \\ VT_{fb1}(\theta, i) := \operatorname{if}(U_{b-y}(\theta) > U_r(\theta, i), 1, 0); \\ VT_{fb2}(\theta, i) := \operatorname{if}(U_{b-y}(\theta) < U_r(\theta, i), 1, 0); \\ VT_{fc1}(\theta, i) := \operatorname{if}(U_{c-y}(\theta) > U_r(\theta, i), 1, 0); \\ VT_{fc2}(\theta, i) := \operatorname{if}(U_{c-y}(\theta) < U_r(\theta, i), 1, 0), \end{cases} \quad (4)$$

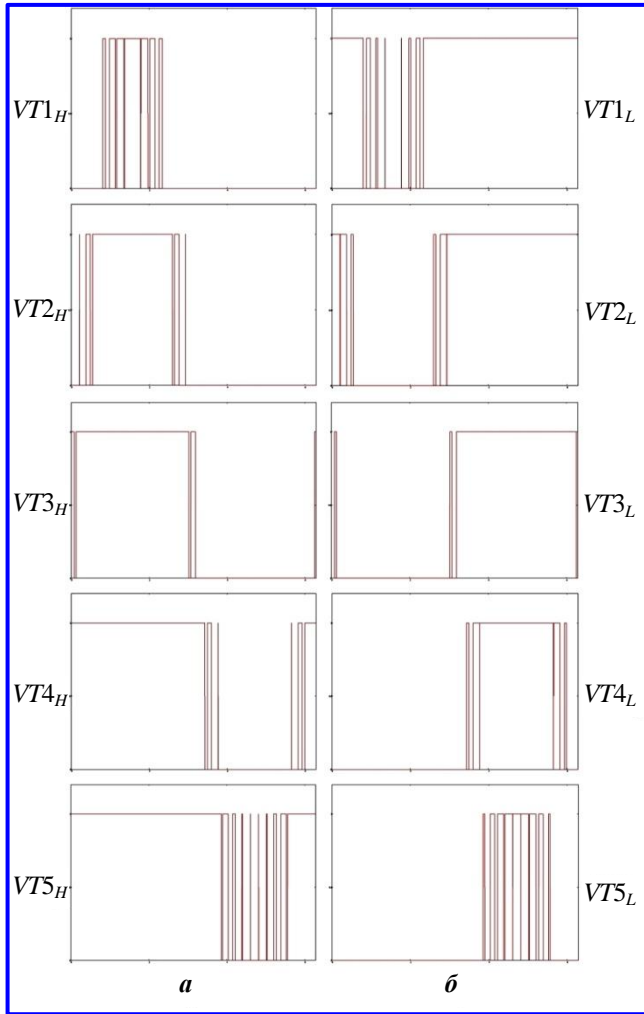


Рис. 3. Сигналы управления верхней (а) и нижней (б) группами транзисторов стойки 6-уровневого АИН

где  $VT_{fa1}(\theta, i)$ ,  $VT_{fb1}(\theta, i)$ ,  $VT_{fc1}(\theta, i)$  – сигналы управления верхней группой транзисторов АИН ( $VT1_H \dots VTn - 1_H$ ) фаз  $A, B$  и  $C$  соответственно;  $VT_{fa2}(\theta, i)$ ,  $VT_{fb2}(\theta, i)$ ,  $VT_{fc2}(\theta, i)$  – сигналы управления нижней группой транзисторов АИН ( $VT1_L \dots VTn - 1_L$ ) фаз  $A, B$  и  $C$  соответственно.

В уравнениях (4) переменная  $i$  переходит от определения порядкового номера сигнала развёртки к определению порядкового номера транзистора верхней или нижней (см. рис. 1) групп ключей АИН в зависимости от функции, в которой она применяется.

Диаграммы сигналов управления силовыми транзисторами верхней и нижней групп ключей стойки фазы  $A$ , полученные на универсальной спектральной модели АИН для  $n = 6$  при  $K_m = 1$ ,  $A = 30$ , приведены на рис. 3.

После задания управляющих воздействий на модели определяются потенциалы АИН:

1. Потенциалы точек  $A$  (см. рис. 1),  $B$  и  $C$  относительно общей точки, обозначенной пунктиром на рис. 1, в рассматриваемой спектральной модели

определяются разностью сумм управляющих воздействий для верхней и нижней групп силовых транзисторов, умноженной на половинное напряжение единичного источника питания АИН. В пакете MathCad 15.0 запись потенциалов точек  $A, B$  и  $C$  принимает следующий вид:

$$\begin{cases} \varphi_a(\theta) := \frac{E}{n-1} \left( \sum_{i=1}^{n-1} VT_{fa1}(\theta, i) - \sum_{i=1}^{n-1} VT_{fa2}(\theta, i) \right); \\ \varphi_b(\theta) := \frac{E}{n-1} \left( \sum_{i=1}^{n-1} VT_{fb1}(\theta, i) - \sum_{i=1}^{n-1} VT_{fb2}(\theta, i) \right); \\ \varphi_c(\theta) := \frac{E}{n-1} \left( \sum_{i=1}^{n-1} VT_{fc1}(\theta, i) - \sum_{i=1}^{n-1} VT_{fc2}(\theta, i) \right), \end{cases} \quad (5)$$

где  $\varphi_a(\theta)$ ,  $\varphi_b(\theta)$ ,  $\varphi_c(\theta)$  – потенциалы точек  $A, B$  и  $C$  стоек  $n$ -уровневого АИН соответственно;  $\frac{E}{2} / (n - 1)$  – половинное напряжение единичного источника питания  $n$ -уровневого АИН;  $E$  – полное напряжение питания  $n$ -уровневого АИН.

Приведённая в (5) форма записи потенциалов точек  $A, B$  и  $C$  АИН также является универсальной и не требует её изменения при изменении топологии схемы (изменение числа уровней АИН) или управления (изменение алгоритма ШИМ).

2. Определение потенциала общей точки нагрузки при условии её симметричности сводится к уравнению:

$$\varphi_0(\theta) := \frac{1}{3} (\varphi_a(\theta) + \varphi_b(\theta) + \varphi_c(\theta)). \quad (6)$$

Соответственно фазные выходные напряжения  $n$ -уровневого АИН:

$$\begin{cases} U_a(\theta) := \varphi_a(\theta) - \varphi_0(\theta); \\ U_b(\theta) := \varphi_b(\theta) - \varphi_0(\theta); \\ U_c(\theta) := \varphi_c(\theta) - \varphi_0(\theta). \end{cases} \quad (7)$$

Линейные выходные напряжения:

$$\begin{cases} U_{ab}(\theta) := U_a(\theta) - U_b(\theta); \\ U_{bc}(\theta) := U_b(\theta) - U_c(\theta); \\ U_{ca}(\theta) := U_c(\theta) - U_a(\theta). \end{cases} \quad (8)$$

Определение задания управляющих сигналов и вида потенциалов основных узлов  $n$ -уровневого АИН позволяет решать главную задачу универсальной спектральной модели – определение спектрального состава выходного сигнала и значения его коэффициента гармоник.

Согласно [2] модуль  $k$ -й гармоники фазного напряжения нагрузки  $n$ -уровневого АИН:

$$\begin{cases} Af_k := \frac{d}{\pi} \left( \sum_{\theta} (U_a(\theta) \cos(k\theta)) \right); \\ Bf_k := \frac{d}{\pi} \left( \sum_{\theta} (U_a(\theta) \sin(k\theta)) \right); \\ Cf_k := \sqrt{(Af_k)^2 + (Bf_k)^2}. \end{cases} \quad (9)$$

где  $k$  – номер гармоники фазного напряжения;  $Af_k, Bf_k$  – коэффициенты разложения в ряд Фурье;  $Cf_k$  – амплитуда  $k$ -й гармоники.

Коэффициент гармоник фазного напряжения

$$Kg_f := \frac{\sqrt{\sum_{k=2}^{200} (Cf_k)^2}}{Cf_1}. \quad (10)$$

Аналогичным образом определяется спектральный состав линейного напряжения и выходного тока АИН. Запись выходного тока АИН и токов, протекающих через силовые элементы схемы, приведена в [2].

На рис. 4, а, б приведены диаграммы фазного и линейного выходных напряжений АИН для  $n = 6$ . На рис. 4, в приведён спектральный состав фазного напряжения 6-уровневого АИН. Указанные диаграммы получены на разработанной универсальной спектральной модели при  $K_m = 1, A = 30$ .

Адекватность указанной модели подтверждена путём сравнения диаграмм линейного и фазного напряжений нагрузки, полученных на рассматриваемой универсальной модели для  $n = 5$ , с диаграммами, снятыми на модели 5-уровневого АИН с фиксирующими диодами, построенной в пакете MatLab 8.01.

На рис. 5, а, б приведены фазные и линейные напряжения, полученные на рассматриваемой универсальной спектральной модели, построенной в пакете MathCad 15.0, и модели, построенной в пакете MatLab 8.01, для  $K_m = 0,9, A = 20$  и ШИМ по срезу.

Расчёт универсальной спектральной модели  $n$ -уровневого АИН занял в 1,5 раза меньше времени по сравнению с расчётом модели, созданной в пакете MatLab 8.01, при одном и том же шаге моделирования.

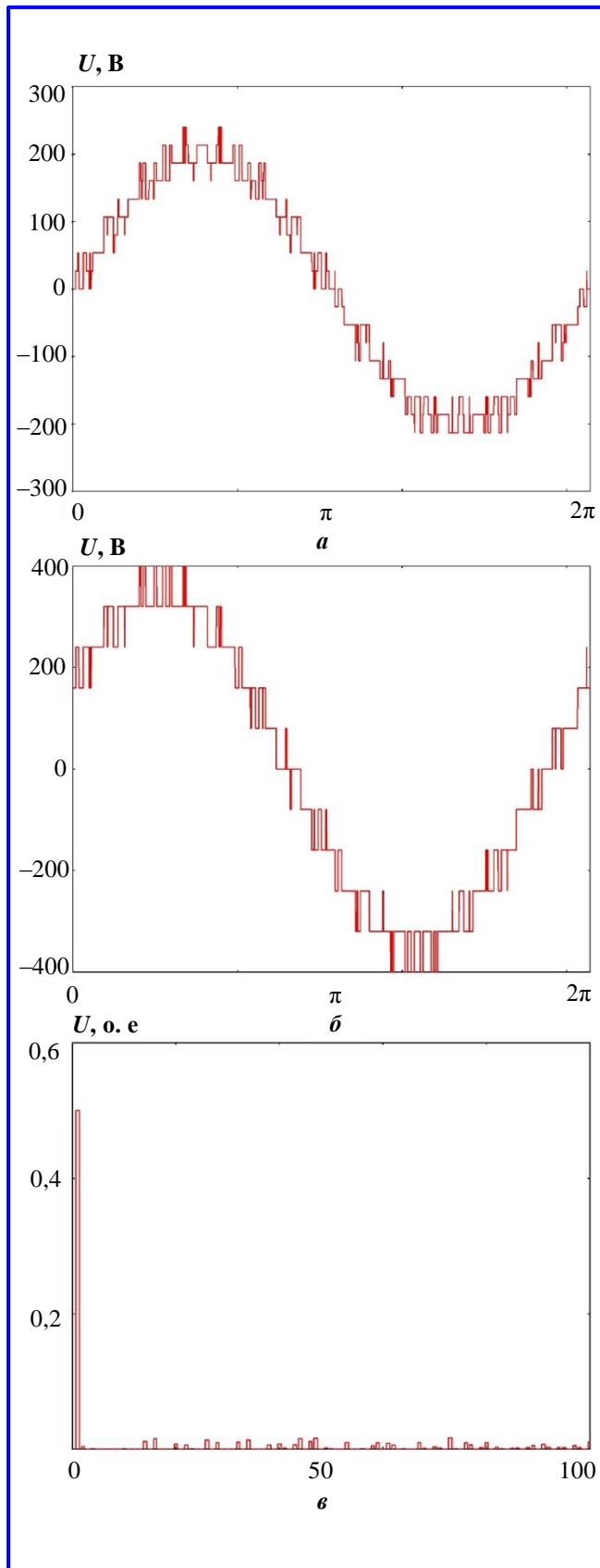


Рис. 4. Фазное (а) и линейное (б) выходные напряжения 6-уровневого АИН и спектральный состав его фазного напряжения (в)

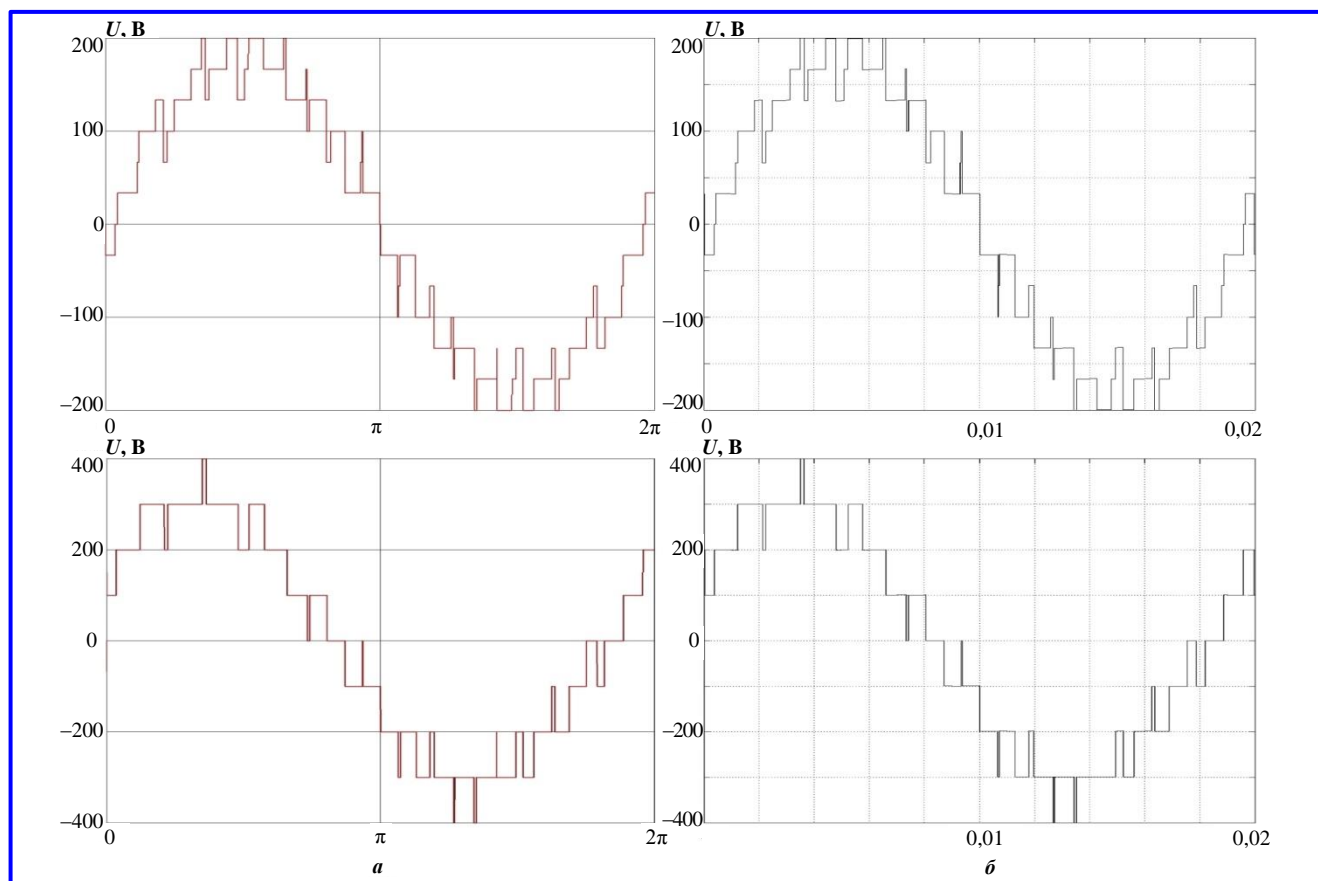


Рис. 5. Фазное и линейное выходные напряжения универсальной спектральной (а) и классической (б) моделей 5-уровневого АИН

### Выводы

Впервые разработанная в пакете MathCad 15.0 и описанная уравнениями (1) – (10) универсальная модель многоуровневого инвертора напряжения с фиксирующими диодами с  $n \geq 3$  является адекватной и быстродействующей. Указанная модель позволяет:

- получить формы напряжений и токов для любого многоуровневого АИН с  $n \geq 3$  без затрат времени на внесение изменений в модель, изменяя лишь значения переменных  $n, A, K_m$ ;
- оценить спектральный состав выходных параметров выбранной заданием  $n, A, K_m$  схемы и определить коэффициенты гармоник её токов и напряжений;
- производить подбор оптимальных параметров схемы без дополнительных временных затрат на расчёт переходных процессов модели;
- исследовать зависимость коэффициента гармоник схемы от изменения числа уровней преобразования АИН, коэффициента модуляции схемы, отношения частоты коммутации силовых транзисторов к выходной частоте АИН и алгоритма ШИМ;
- с наименьшими временными затратами выбирать наиболее подходящую под конкретные задачи

схему многоуровневого инвертора напряжения и алгоритм её ШИМ-управления.

### Литература

1. Гузев Б. В., Хакимьянов М. И. Современные промышленные высоковольтные преобразователи частоты для регулирования асинхронных и синхронных двигателей / Б. В. Гузев, М. И. Хакимьянов // Электронный научный журнал Нефтегазовое дело. – 2011. – № 3.
2. Лазарев Г. Высоковольтные преобразователи для частотно-регулируемого электропривода. Построение различных систем / Г. Лазарев // Новости электротехники. – 2005. – № 2 (32).
3. Чаплыгин Е. Е., Малышев Д. В. Спектральные модели автономных инверторов напряжения с широтно-импульсной модуляцией / Е. Е. Чаплыгин, Д. В. Малышев // Электричество. – 1999. – № 8.
4. Рациональные схемы преобразователей частоты для мощных синхронных индукторных электроприводов / В. Остриров, К. Мильский // Электронные компоненты. – 2008. – № 11.
5. Чаплыгин Е. Е. Инверторы напряжения и их спектральные модели : учебное пособие / Е. Е. Чаплыгин. – М. : Издательство МЭИ, 2003. – 64 с.

Поступила в редакцию 01.07.2013

Денис Владимирович Рожков, аспирант, инженер, e-mail: rozhkovdv@gmail.com, т. (495) 366-22-10.