

УДК 621.314.572

## Инверторы с многозонной модуляцией

Т. В. Анисимова, А. Н. Данилина

### Аннотация

В статье рассмотрены способы формирования многоуровневого выходного напряжения инвертора, реализуемые цифровыми методами: способ, основанный на симметричной равномерной дискретизации многоступенчатых модулирующих сигналов пилообразным сигналом и способ, основанный на ассиметричной дискретизации, позволяющей снизить число мостовых модулей, а, следовательно, и источников постоянного напряжения без ухудшения качества выходного напряжения. Уравнения, на основе которых находятся моменты переключений силовых ключей мостовых модулей многоуровневого инвертора, сведены к нетрансцендентным, что позволяет реализовать рассмотренные способы непосредственно с помощью микроконтроллера.

### Ключевые слова:

каскадный многоуровневый инвертор; симметричная равномерная дискретизация; ассиметричная дискретизация; многозонная ШИМ.

Улучшение массогабаритных и энергетических показателей инверторов с синусоидальным выходным напряжением для систем электроснабжения летательных аппаратов требует совершенствования способов формирования импульсных напряжений на входе силового фильтра, что позволяет снизить его массу и габариты. Увеличение числа исключенных низших из высших гармоник при формировании двух- или трехуровневого напряжения в инверторах в режиме синусоидальной ШИМ (ШИМ-СИН) требует увеличения числа импульсов за половину периода основной гармоники. Это неизбежно приводит к повышению частоты коммутации силовых ключей мостового модуля, а, следовательно, к увеличению динамических потерь и, как результат, увеличению габаритов и массы инвертора в целом. В [1] рассмотрены структуры многоуровневых инверторов, позволяющие решить эту задачу без повышения частоты коммутации.

Структуры многоуровневых инверторов классифицируются по трем категориям: с ограничительными диодами (рис. 1а), с переключаемыми конденсаторами (рис. 1б) и каскадные многоуровневые инверторы (рис. 1в).

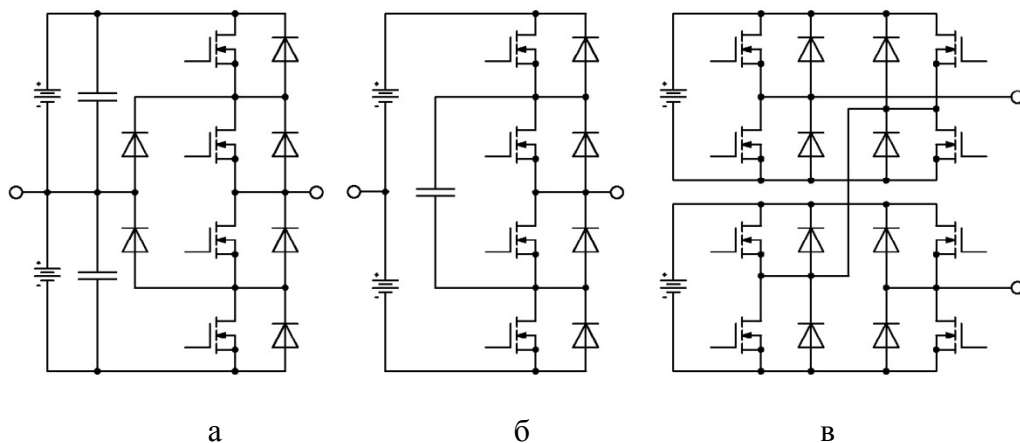


Рис.1 Структуры многоуровневых инверторов: (а) с ограничительными диодами, (б) с переключаемыми конденсаторами и (в) каскадный многоуровневый инвертор.

Основной недостаток структуры многоуровневого инвертора с ограничительными диодами (рис. 1а) – сложность балансировки напряжений на конденсаторах. В структуре (рис. 1б) требуются дополнительные конденсаторы, что существенно ухудшает массогабаритные показатели устройства. Каскадным инверторам (рис. 1в) необходимы отдельные источники постоянного напряжения для питания каждого мостового модуля. Однако ее основное преимущество состоит в том, что управление, контроль и требования к защите каждого моста модульные.

Существуют различные методы формирования напряжения на входе силового фильтра.

### **Суммирование взаимно сдвинутых по фазе прямоугольных напряжений**

Если координаты начал и концов импульсов определять из условий селективного исключения низших из высших гармоник, имеется возможность вычислять моменты переключения силовых ключей, чтобы из спектра сформированного напряжения исключать заданные высшие гармоники. Однако вычисление оптимальных углов переключения требует решения системы трансцендентных уравнений. Эта задача усложняется еще и тем, что распределение решений в диапазоне регулирования нелинейно, что усложняет регулирование. Кроме того, решения могут отсутствовать в некоторой части диапазона регулирования. С одной стороны увеличение числа уровней

позволяет улучшить качество напряжения, приближая ступенчатую форму к синусоидальной, а с другой – при этом усложняется алгоритм переключений.

### Режим многозонной ступенчатой широтно-импульсной модуляции в многоуровневых инверторах

Такой режим основан на сравнении модулирующего сигнала с пилообразными сигналами, число которых на единицу меньше числа уровней ступенчатого напряжения. Режимы многозонной модуляции с симметричной равномерной дискретизацией позволяют снизить частоту переключений, что обеспечивает повышение КПД инвертора при заданном качестве выходного напряжения. Увеличение числа уровней выходного напряжения приводит к увеличению числа мостовых модулей и источников постоянного напряжения, питающих эти модули. Переход к асимметричной дискретизации дает возможность обеспечить заданное качество выходного напряжения без увеличения числа мостовых модулей.

На рис. 2 показана схема каскадного многоуровневого инвертора. В предлагаемом алгоритме многозонной ШИМ в качестве модулирующего сигнала использовано многоступенчатое напряжение (ШИМ-МСТ). Алгоритм пригоден для формирования напряжения с любым числом уровней.

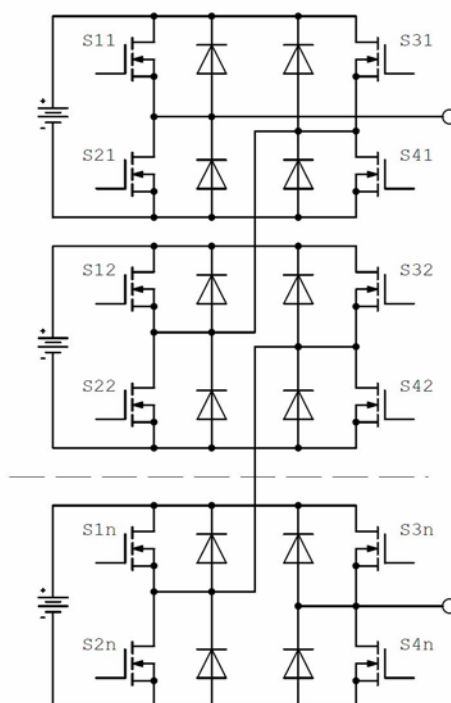


Рис. 2 Схема многоуровневого инвертора напряжения

### Режимы ШИМ-МСТ

Многозонная ступенчатая широтно-импульсная модуляция многоуровневых инверторов напряжения основана на сравнении ступенчатого модулирующего сигнала с  $L - 1$  пилообразных сигналов ( $L$  – желаемое количество уровней). В момент равенства этих сигналов происходит переключение соответствующего мостового модуля. При этом, в момент превышения ступенчатым напряжением спадающего участка пилообразного напряжения выходное напряжение увеличивается на одну ступень, а в противном случае – уменьшается на ступень. По взаимному расположению пилообразного сигнала известны три разновидности режима многозонной ступенчатой широтно-импульсной модуляции (ШИМ-МСТ)[5]:

- ШИМ-МСТ1 – синфазное расположение всех пилообразных сигналов (рис. 3а);
- ШИМ-МСТ2 – сдвиг пилообразных сигналов на 180 градусов (рис. 3б);
- ШИМ-МСТ3 – комбинация синфазного расположения пилообразных напряжений на положительном полупериоде основной гармоники и противофазным на ее отрицательном полупериоде (рис. 3в).

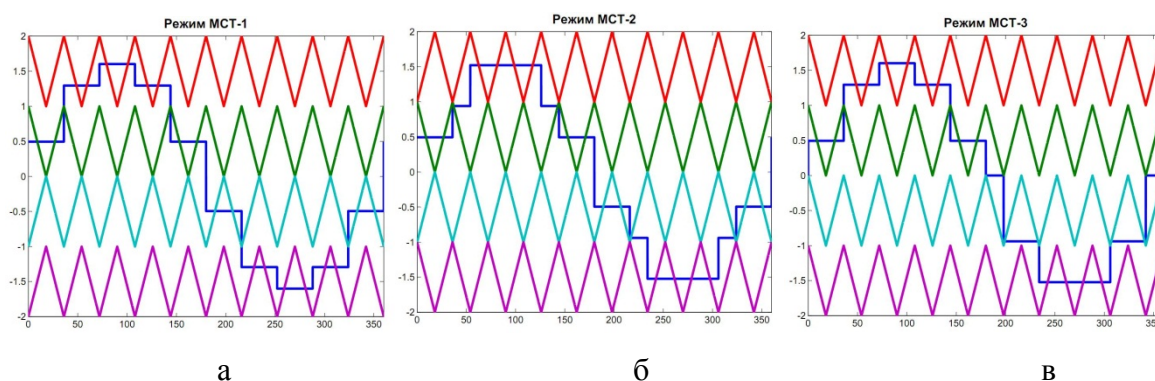


Рис. 3 Многозонные режимы: а) режим МСТ-1; б) режим МСТ-2; в) режим МСТ-3

Следует отметить, что в напряжении режима ШИМ-МСТ3 отсутствует четверть волновая симметрия, а для формирования напряжения режима ШИМ-МСТ2 требуется большее число переключений мостовых модулей для обеспечения заданного качества выходного напряжения. Режим ШИМ-МСТ1 свободен от этих недостатков.

Реализация такого режима с помощью цифровых систем управления требует определения моментов переключения непосредственно с помощью микроконтроллера.

Рассмотрим принцип получения уравнений, определяющих моменты переключения.

Для формирования выходного напряжения  $U_{\text{вых}}$  выходы мостовых модулей соединены последовательно. При  $L$  уровнях количество мостовых модулей  $n$  определяется как:

$$n = \frac{L-1}{2}. \quad (1)$$

Число уровней  $L$  полагаем нечетным, чтобы получить целое число  $n$ . За счет различных комбинаций коммутации четырех ключей  $S_{1n} - S_{4n}$  на выходе каждого модуля формируются три уровня напряжения:  $+E$ ,  $-E$  и  $0$  ( $E$  – напряжение питания каждого модуля). Выходное напряжение инвертора – это сумма выходных напряжений модулей. Например, выходное напряжение пятиуровневого инвертора содержит уровни  $+2E$ ,  $+E$ ,  $0$ ,  $-E$ ,  $-2E$ .

Метод сравнения нескольких ступенчатых сигналов модуляции  $S_u(k)$  с одним пилообразным сигналом  $r(k)$  показан на рис. 4. Все ступенчатые сигналы имеют одинаковые частоту ( $f$ ) и амплитуду ( $A$ ). Несущим сигналом является пилообразный сигнал с частотой ( $f_{\text{пил}}$ ) и амплитудой ( $A_{\text{пил}}$ ). Индекс модуляции  $m_i$  и кратность частот  $p$  для  $L$ -уровневого инвертора, состоящего из  $n$  мостовых модулей, определяются как:

$$m_i = \frac{A}{A_{\text{пил}}} \cdot \frac{1}{\frac{(L-1)}{2}} = \frac{A}{nA_{\text{пил}}} \quad (2)$$

$$p = \frac{f_{\text{пил}}}{f}. \quad (3)$$

При этом отношение частоты пилообразного сигнала выбирается кратной удвоенной частоте модулируемого сигнала, что позволяет обеспечить одинаковое расположение импульсов на каждом полупериоде основной гармоники.

Для  $L$ -уровневого инвертора необходимы  $n$  модулирующих сигналов, что соответствует числу мостовых модулей. Переходы на  $h$ -ый уровень происходят при:

$$m_h = \frac{h}{n} \quad (4)$$

$$h = 1, \dots, n-1.$$

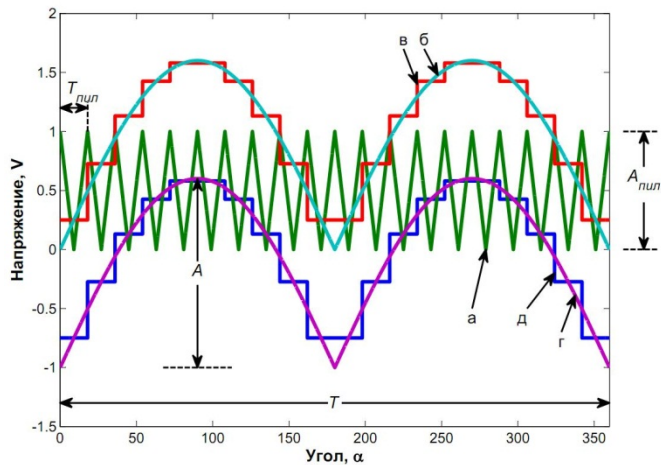


Рис. 4 Модулирующие и общий пилообразный сигналы: а – пилообразный  $r(k)$ ; б – выпрямленный синусоидальный  $m_1(t)$ ; в – ступенчатый  $s_1(k)$ ; г. смещенный выпрямленный синусоидальный  $m_2(t)$ ; д – смещенный ступенчатый  $s_2(k)$

### Определение углов переключения

Параметр  $k$  определяет положение каждого импульса на половине периода основной гармоники выходного напряжения, то есть  $k = 1, 2, 3, \dots, p/2$ . Пересечения ступенчатых сигналов с пилообразными определяют моменты переключения последовательности импульсов ШИМ.

Из рис. 4 видно, что  $k$ -ый фронт задан как пересечение среза пилообразного напряжения  $r^-(k)$  с двумя эталонными сигналами  $s_1(k)$  и  $s_2(k)$ . Поскольку сигналы симметричны, нахождение точки пересечения фронта  $r^+(k)$  и эталонных сигналов не требуется. Моменты пересечения  $r(k)$  и  $s_1(k)$  или  $s_2(k)$ , показанные на рис. 5, могут быть получены из уравнений фронта.

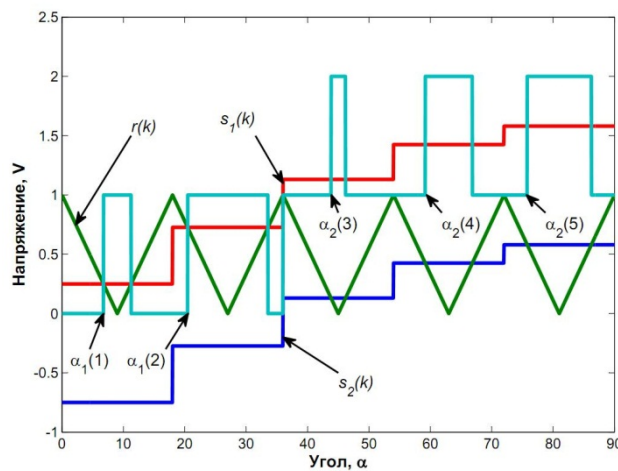


Рис. 5 Формирование моментов переключения импульсов ШИМ

Уравнение спадающий прямой пилообразного сигнала  $r(k)$ :

$$r^-(k) = \left( \frac{-A_{\text{пилл}}}{\frac{T_{\text{пилл}}}{2}} \right) \alpha_k + (2k-1)A_{\text{пилл}} ; \quad k = 1, 2, 3, \dots, \quad (5)$$

$$k = 1, 2, 3, \dots$$

где  $f_{\text{пилл}}$  – частота пилообразного сигнала и  $f$  – частота модулируемого сигнала.

Симметричное повторение выбранного сигнала модуляции  $s_1(k)$  и  $s_2(k)$  можно выразить как

$$s_1(k) = A \sin \left[ \omega(i) + \frac{\pi}{p} \right] \quad \text{and} \quad s_2(k) = A \sin \left[ \omega(i) + \frac{\pi}{p} \right] - A, \quad (6)$$

где  $i = 0, 1, 2, \dots, (p/2) - 1$ , в момент пересечения  $s_1(k)$  и  $s_2(k)$  с  $r(k)$ . Круговая частота  $\omega = 2\pi/p$ . Общее выражение для  $k$ -ого фронта  $\alpha_1(k)$  сигнала ШИМ  $V_1(k)$ , получаем моменты пересечения  $s_1(k)$  и  $r(k)$ :

$$\left( \frac{-A_{\text{пилл}}}{\frac{T_{\text{пилл}}}{2}} \right) \alpha_{1(k)} + (2k-1)A = A \sin \left[ \omega(i) + \frac{\pi}{p} \right]; \quad (7)$$

$$i = k - 1$$

Решением уравнения (7) является  $k$ -й момент переключения  $\alpha_1(k)$

$$\alpha_1(k) = \frac{T_{\text{пилл}}}{2} \left[ (2k-1) - \frac{A}{A_{\text{пилл}}} \sin \left( \omega(k-1) + \frac{\pi}{p} \right) \right] \quad (8)$$

Используя этот метод, каждый фронт  $\alpha_2(k)$  сигнала ШИМ  $V_2(k)$  может быть выражен как

$$\alpha_2(k) = \frac{T_{\text{пилл}}}{2} \left[ 2k - \frac{A}{A_{\text{пилл}}} \sin \left( \omega(k-1) + \frac{\pi}{p} \right) \right] \quad (9)$$

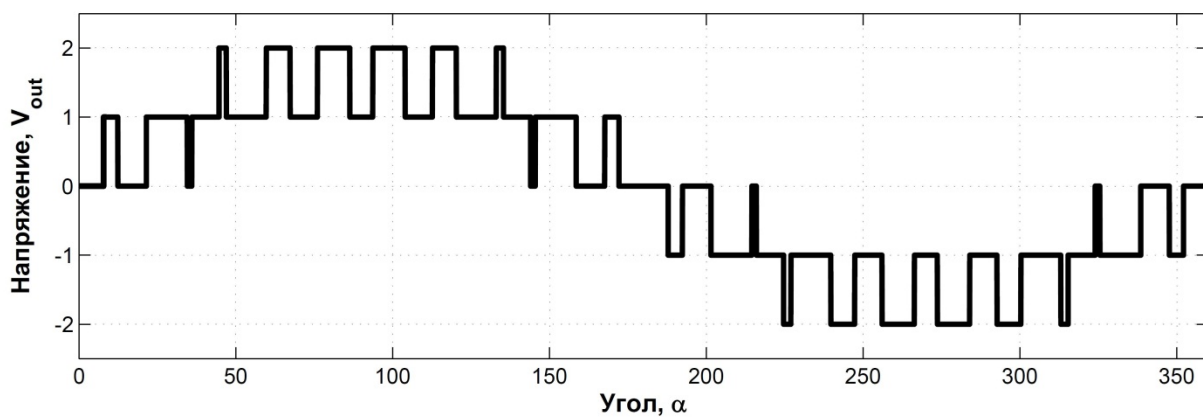
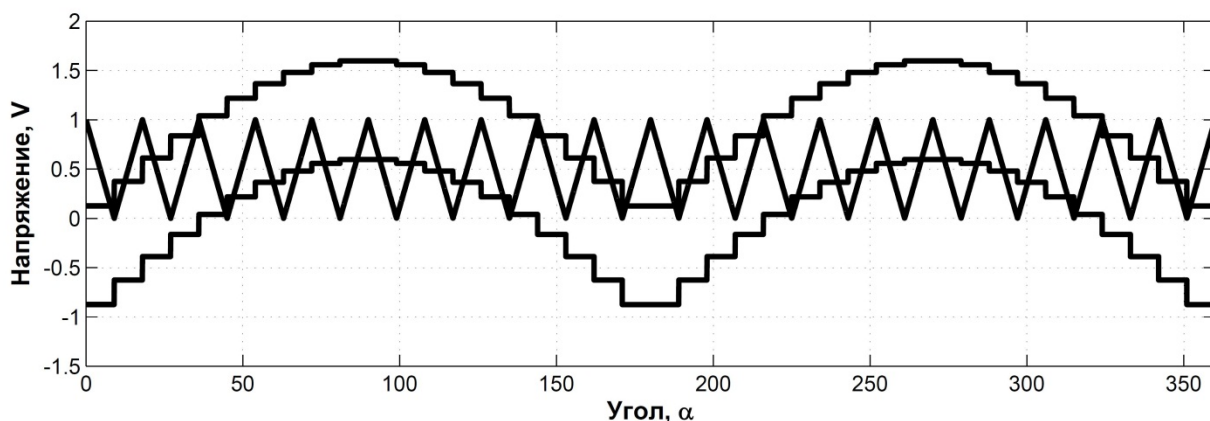
Для нахождения общих углов переключения  $L$ -уровневого инвертора обобщаем уравнения (8) и (9)

$$\alpha_u(k) = \frac{T_{\text{пилл}}}{2} \left[ (2k+u-2) - \frac{A}{A_{\text{пилл}}} \sin \left( \omega(k-1) + \frac{\pi}{p} \right) \right], \quad (10)$$

где  $u = 1, \dots, n$  и  $n = (L-1)/2$ . Уравнение (10) используется для определения  $k$ -х импульсов ШИМ для многоуровневого инвертора с любым числом уровней  $L$ . Параметр  $u$  соответствует конкретному переключаемому мостовому модулю, то есть  $\alpha_n$  – угол

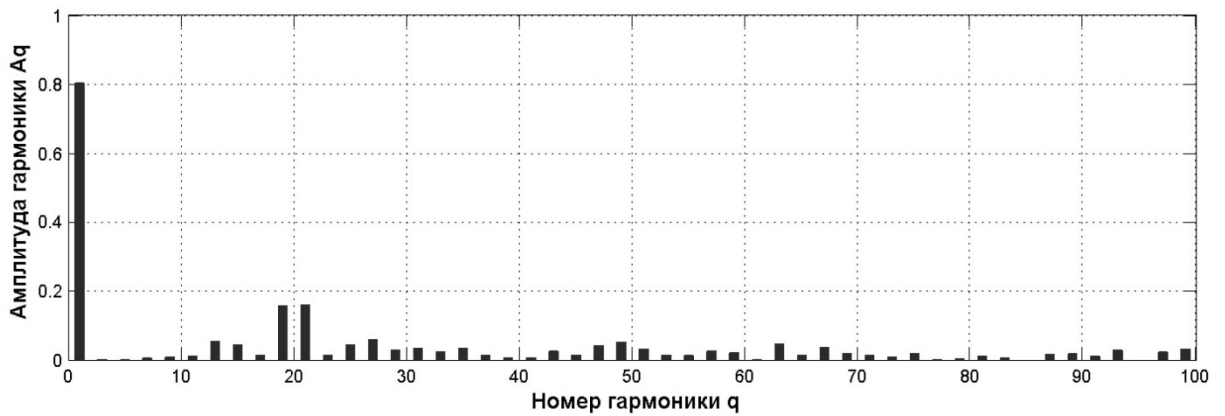
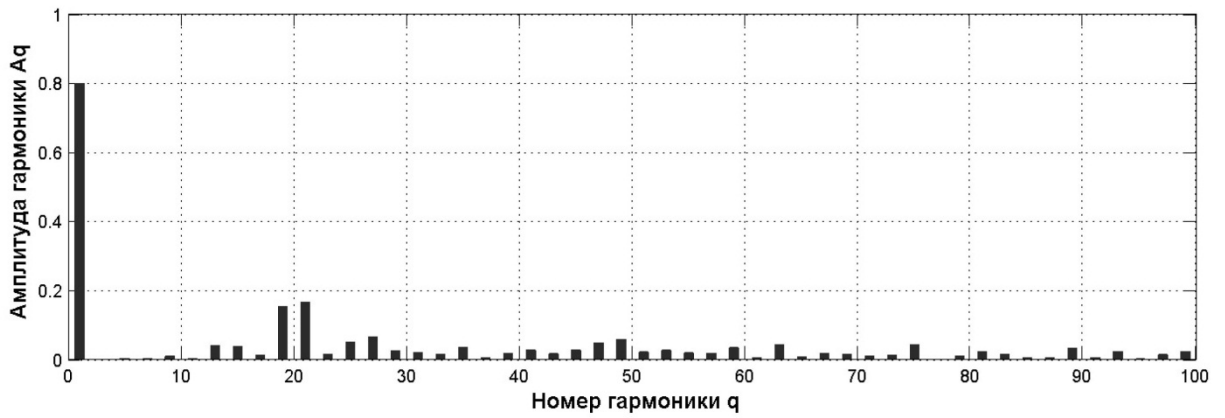
переключения для  $k$ -ого импульса  $n$ -ого модуля моста. Таким образом уравнение (10) – нетрансцендентное. Все параметры правой части этого уравнения известны и, следовательно, углы переключения могут быть рассчитаны непосредственно, что существенно облегчает реализацию схемы управления инвертором цифровыми методами.

По полученным выражениям проведен расчет углов переключения, определена форма выходного напряжения и рассчитан коэффициент гармоник при числе уровней ступенчатого моделируемого напряжения вдвое большем числа импульсов на четверти периода основной гармоники. Для сравнения были рассчитаны спектральный состав и коэффициент гармоник для синусоидального модулируемого сигнала (рис. 6). Коэффициенты гармоник для первого и второго случаев соответственно равны 36,56% и 36,69%.



а





б

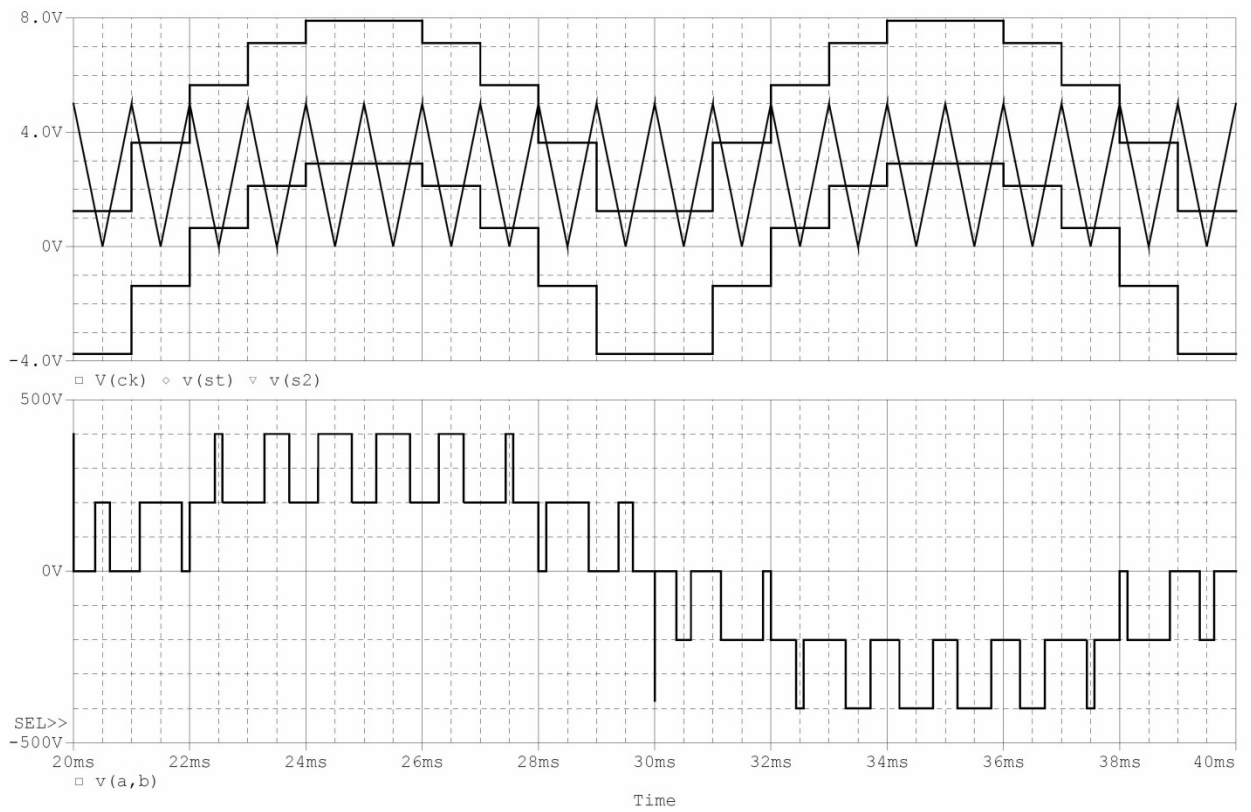
Рис. 6 а) формы модулируемых и пилообразного сигналов и форма выходного напряжения пятиуровневого инвертора; б) спектральные составы выходных напряжений при ступенчатом и синусоидальном модулируемых сигналах.

### Моделирование

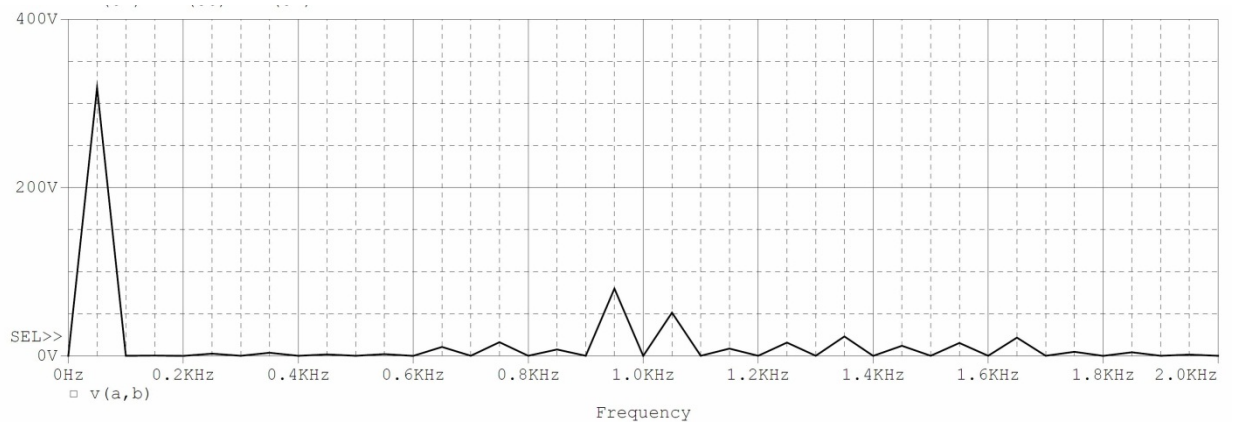
Для проверки полученных теоретических результатов проведено моделирование пятиуровневого модульного многоуровневого инвертора со следующими параметрами:

- напряжение питания каждого источника 200 В;
- частота основной гармоники выходного сигнала 50 Гц;
- частота пилообразного напряжения 500 Гц.

На рис. 7 представлены результаты моделирования при числе уровней ступенчатого моделируемого напряжения, равном числу импульсов на четверти периода основной гармоники, а на рис. 8 – вдвое большем.

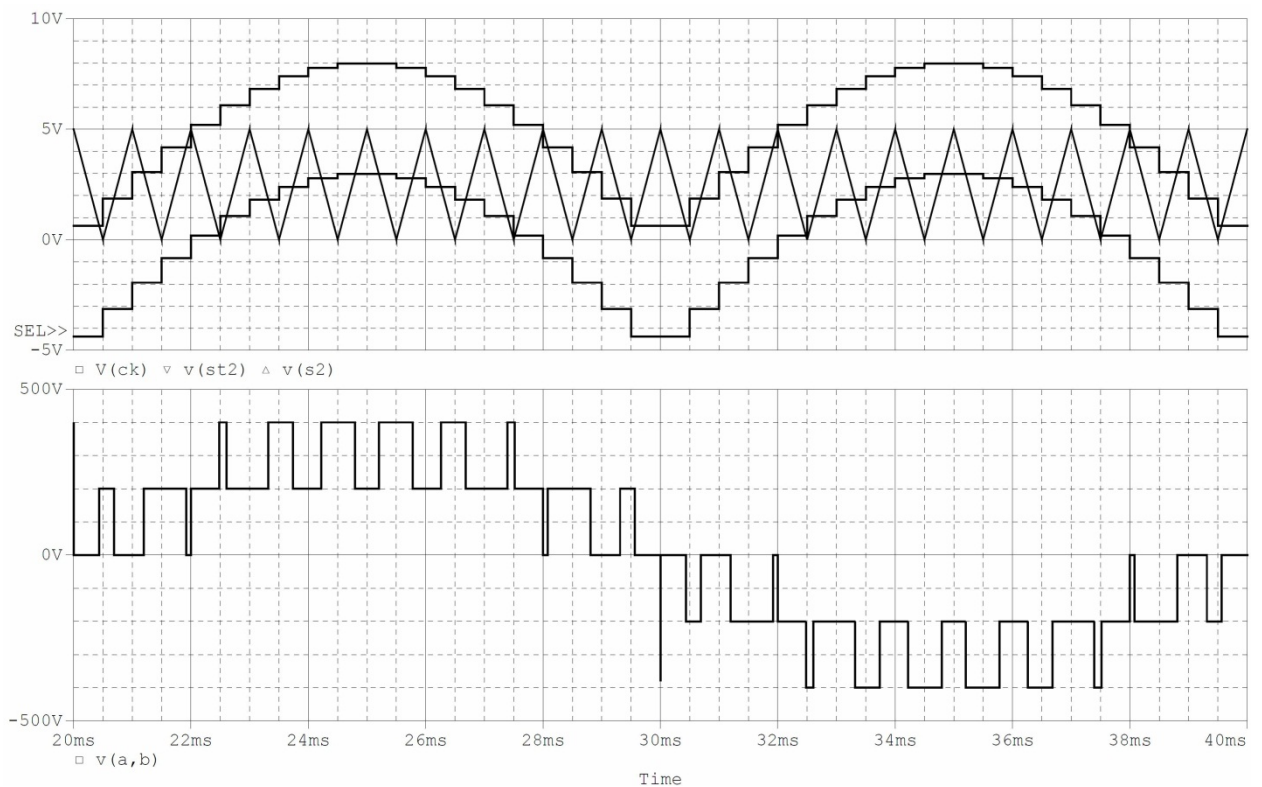


а

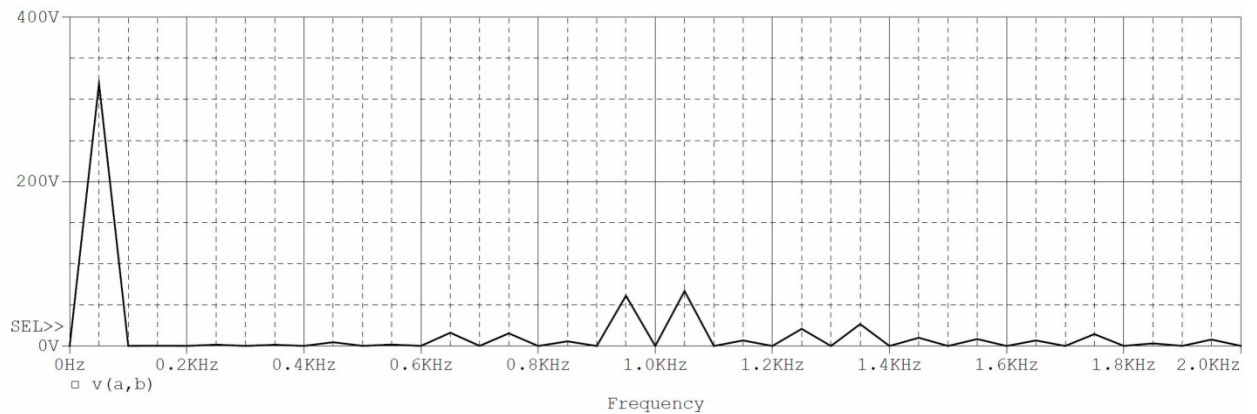


б

Рис. 7. ШИМ-МСТ при числе уровней ступенчатого сигнала равном 5: а) напряжения модулируемых и пилообразного сигнала и напряжение на выходе пятиуровневого модульного инвертора; б) спектральный состав выходного напряжения



а



б

Рис. 8 ШИМ-МСТ при числе уровней ступенчатого сигнала равном 10: а) напряжения модулируемых и пилообразного сигнала и напряжение на выходе пятиуровневого модульного инвертора; б) спектральный состав выходного напряжения.

Номер первой учитываемой высшей гармоники в спектре выходного напряжения на единицу меньше кратности частот  $p$ . При этом коэффициент гармоник в первом случае равен 38,1%, а во втором – 36,5%. Следует отметить, что расчетный коэффициент гармоник при модуляции синусоидального напряжения равен 36,7%, что подтверждают результаты моделирования.

### Каскадный многоуровневый инвертор с асимметричной дискретизацией

Для обеспечения  $2n+1$  уровней выходного напряжения каскадному многоуровневому инвертору с симметричной равномерной дискретизацией необходимо  $n$  мостовых модулей и источников постоянного напряжения.

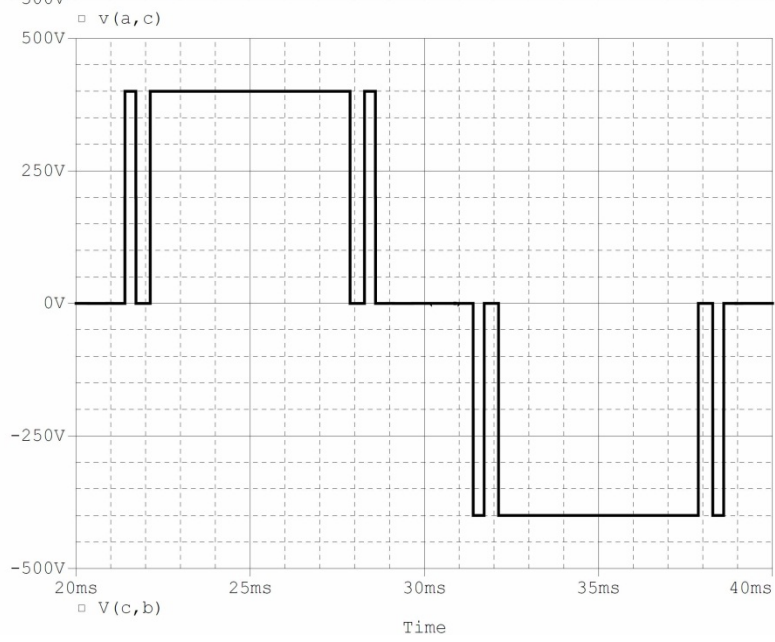
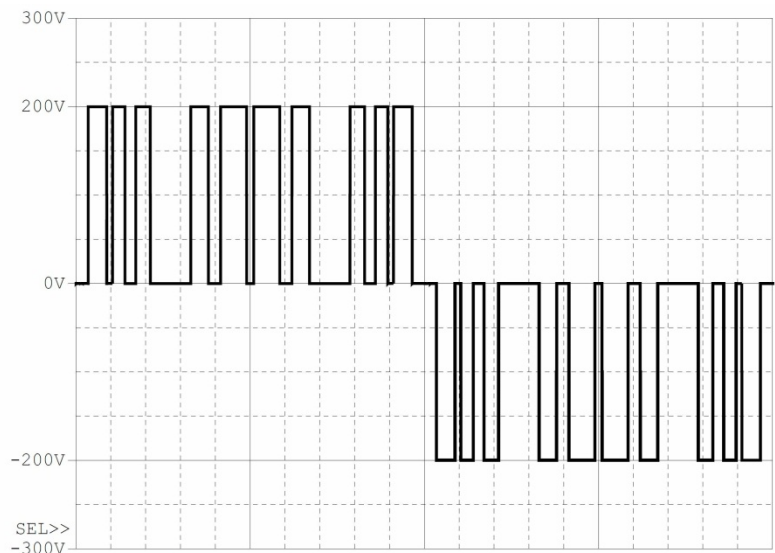
Увеличение числа уровней выходного напряжения приводит к увеличению числа мостовых модулей и источников постоянного напряжения, питающих эти модули. Переход к ассиметричной дискретизации [3] позволяет обеспечить заданное качество выходного напряжения без увеличения числа мостовых модулей.

Структура с ассиметричной дискретизацией обладает рядом преимуществ:

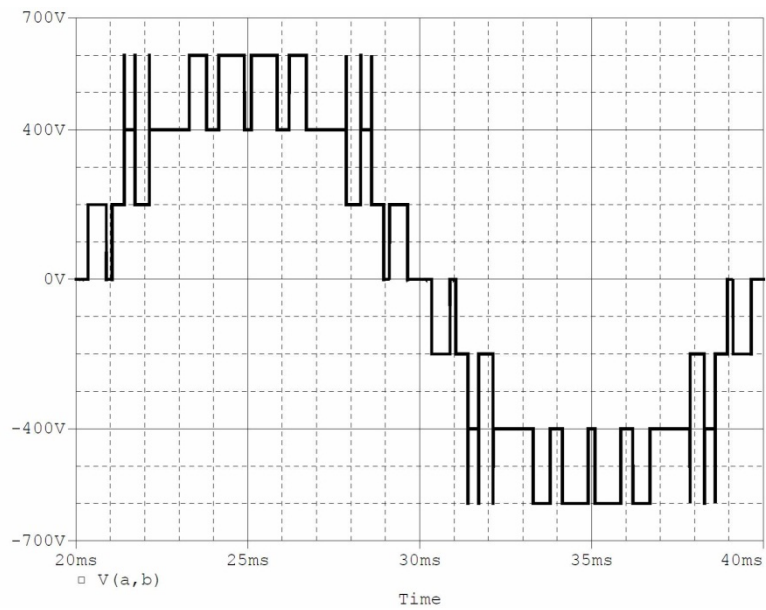
- уменьшение числа источников постоянного напряжения;
- снижение частоты переключения, и, следовательно, уменьшение потерь на переключение;
- повышение КПД.

Для формирования выходного напряжения с  $2n+1$  уровнями при использовании ассиметричной дискретизации необходимо  $n-1$  мостовых модулей, а соответственно и источников постоянного напряжения.

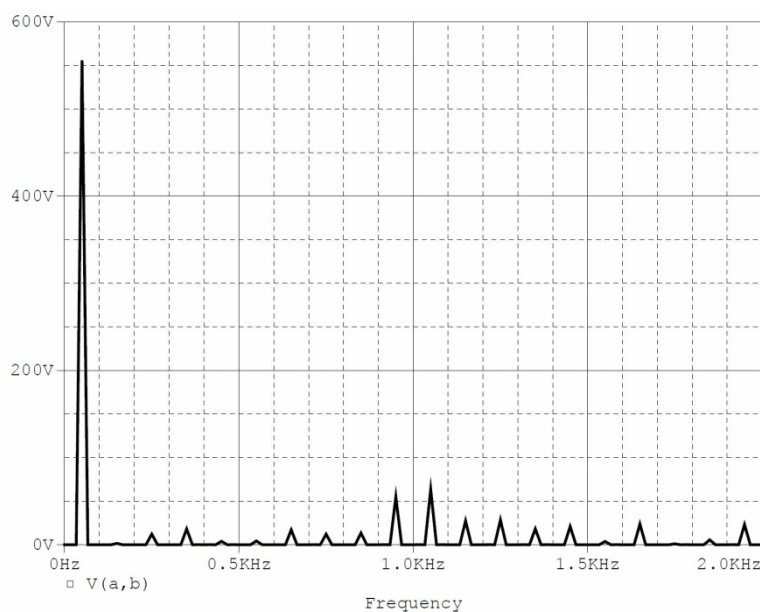
На рис. 9 представлены результаты моделирования работы каскадного многоуровневого инвертора с ассиметричной дискретизацией.



a



б



**В**

Рис. 9 Каскадный многоуровневый инвертор с асимметричной дискретизацией: а – напряжение на первом мостовом модуле, напряжение на втором мостовом модуле, б – напряжение на выходе пятиуровневого инвертора; в – спектральный состав

### **Выводы**

Предложена общая стратегия многоуровневой модуляции, основанная на методе симметричной равномерной дискретизации однополярной ШИМ, для модульного многоуровневого инвертора. В такой структуре общий пилообразный сигнал сравнивается со ступенчатыми модулируемыми сигналами. Получены математические выражения для определения углов переключения. При вычислении моментов переключения замена синусоидального опорного сигнала ступенчатым обеспечивает нетрансцендентный характер уравнений, по которым непосредственно с помощью микроконтроллера вычисляются моменты переключений без использования итераций. Это существенно упрощает реализацию схемы управления цифровыми методами. Проверка рассмотренных режимов проведена с помощью моделирования, которое подтвердило правильность полученных теоретических результатов.

### **Библиографический список**

1. Моин В. С. Стабилизированные транзисторные преобразователи. – М.: Энергоатомиздат, 1986. 376 с.

2. *C. Govindaraju, Dr. K. Baskaran.* Optimized Hybrid Phase Disposition PWM Control Method for Multilevel Inverter – International Journal of Recent Trends in Engineering, Vol 1, No. 3, May 2009, pp. 129–134.

3. *R. Seyezhai, Dr. B.L.Mathur.* Performance evaluation of inverted sine pwm technique for an asymmetric cascaded multilevel inverter – Journal of Theoretical and Applied Information Technology, 2009, pp. 91 – 98.

4. *Samir Kouro, Pablo Lezana, Mauricio Angulo and Jose Rodriguez.* Multicarrier PWM with DC-link ripple feed-forward compensation for multilevel inverters. – IEEE Trans. Power Electron. 23(1): pp. 52–59, 2008.

5. *Z. Salam, J. Aziz, S. S. Ahmed.* Digital Implementation of a New PWM Switching Scheme for Modular Structured Multilevel Voltage Source Inverter – Journal of Energy & Environment, Vol. 5, May 2006, pp. 56–76.

### **Сведения об авторах**

АНИСИМОВА Татьяна Викторовна, аспирант Московского авиационного института (национального исследовательского университета).

МАИ, Волоколамское ш., 4, Москва, А-80, ГСП-3, 125993; тел. 8(499)158-45-02; e-mail: acb@mai.ru.

ДАНИЛИНА Анастасия Николаевна, аспирант Московского авиационного института (национального исследовательского университета).

МАИ, Волоколамское ш., 4, Москва, А-80, ГСП-3, 125993; тел. 8(499)158-45-02; e-mail: acb@mai.ru.