

УДК 621.341.572

ББК 31.264.5

Е.Е. МИРГОРОДСКАЯ, Н.П. МИТЯШИН, М.Е. МАМОНЬЧЕВ,  
Ю.Б. ТОМАШЕВСКИЙ, И.И. АРТЮХОВ

## МНОГОУРОВНЕВЫЙ ИНВЕРТОР ДЛЯ ГЕНЕРИРОВАНИЯ НАПРЯЖЕНИЯ СО СЛОЖНЫМ ГАРМОНИЧЕСКИМ СОСТАВОМ

**Ключевые слова:** многочастотный нагрев металлов, многоуровневый инвертор напряжения, спектр, моделирование, показатели качества, силовая схема, уровни напряжения, источник питания.

Статья посвящена проблеме формирования желаемого и управляемого гармонического состава выходной кривой многоуровневого инвертора напряжения. Данная проблема актуальна при создании установок многочастотного индукционного нагрева и плавки металла.

**Цель исследования** – разработка эффективного метода формирования выходного напряжения источников питания для установок многочастотного индукционного нагрева, кривая которого имеет заданный спектр гармоник.

**Материалы и методы.** Теоретическая часть работы проводилась на основе схемотехнической базы многоуровневых инверторов напряжения и импульсных преобразователей постоянного тока с использованием численно-аналитических методов исследования нелинейных электрических цепей, методов решения нелинейных дифференциальных уравнений и приближенного гармонического анализа, а также методов имитационного моделирования с применением математического пакета MATLAB/Simulink. Экспериментальная проверка теоретических результатов проводилась в лабораторных условиях на примере многоуровневого инвертора, генерирующего кривую напряжения с тремя рабочими гармониками. Для фиксации результатов использовались датчики серии ACS758 и четырехканальный цифровой осциллограф RIGOL DS1104Z.

**Результаты исследования.** Достижение цели основано на использовании универсального многоуровневого инвертора напряжения, принципиальная схема которого не зависит от числа уровней генерируемой кривой, что обеспечивает минимальное число силовых элементов при любой сложности спектра кривой. Метод формирования выходной кривой этого инвертора заключается в попеременном подключении транзисторным коммутатором выходных конденсаторов двух импульсных преобразователей постоянного напряжения к выходу однофазного мостового инвертора напряжения. При этом на конденсаторах формируются напряжения уровней разной четности по порядку их следования, в результате чего на входе мостового инвертора образуется знакопостоянное многоуровневое напряжение, соответствующее требуемому знакопеременному многоуровневому напряжению. Закон переключения вентиля мостового инвертора обеспечивает преобразование его входного напряжения в напряжение нагрузки с заданным гармоническим составом. Особенность разработанного метода управления преобразователем состоит в том, что коммутации вентиля мостового инвертора производятся в соответствии с изменением знака генерируемой кривой. Метод содержит алгоритм определения величин уровней, формируемых на конденсаторах импульсных преобразователей, реализующих необходимый спектр выходной кривой инвертора. Эффективность предложенного метода проиллюстрирована результатами компьютерного моделирования преобразователя при генерировании напряжения с четырьмя рабочими гармониками спектра (т.е. требуемыми гармониками спектра). Предложены показатели качества реализованного спектра кривой напряжения и приведены результаты анализа влияния числа уровней на значения этих показателей. Работоспособность предложенных методов продемонстрирована экспериментально на лабораторном макете преобразователя.

**Выводы.** В работе предложен метод формирования выходного напряжения источника питания, кривая которого имеет заданный гармонический состав, эффективность

*которого подтверждена результатами компьютерного моделирования и лабораторного эксперимента. Предлагаемые технические решения позволили достичь возможности генерирования выходного напряжения, спектр кривой которого содержит четыре и более гармоники с заданными амплитудами при минимальном числе силовых элементов схемы. В работе также предложены модели показателей качества реализованного спектра кривой напряжения и приведены результаты анализа влияния числа уровней на значения этих показателей. Разработанная методика допускает развитие в направлении управления спектром генерируемого напряжения в реальном масштабе времени, а также неперiodического знакопеременного напряжения, изменяющегося по заданной программе в соответствии с требованиями технологического процесса.*

**Введение.** Силовые инверторы, в том числе многоуровневые инверторы напряжения (МИН), находят применение в автономных системах общепромышленного электроснабжения [6, 10]. В большинстве случаев эти преобразователи предназначены для создания синусоидального напряжения [2, 4, 7].

В то же время в некоторых технологических процессах существует потребность напряжения с более сложным гармоническим составом. Примерами таких процессов являются многочастотный индукционный нагрев, предъявляющий жесткие требования к формируемому в нагрузке температурному полю, и плавка металлов, при которой необходимо перемешивание с помощью электромагнитного поля расплава для получения его однородных химических свойств [1, 8]. Большинство методов формирования такого напряжения предназначены для генерирования кривых с двумя рабочими гармониками [5, 8].

В работе [9] обсуждается возможность использования МИН для генерирования напряжения с требуемым гармоническим составом для установок двухчастотного индукционного нагрева.

В работе [3] показано, что применение МИН позволяет получить кривую напряжения с числом высших гармоник, равным трем и более. Однако генерирование кривой напряжения с несколькими гармониками заданной величины может потребовать использования значительно большего числа ее уровней, чем при формировании квазисинусоидальной кривой. Необходимо учитывать, что для большинства существующих МИН увеличение числа уровней влечет увеличение количества транзисторов, диодов и конденсаторов в составе силовой схемы инвертора [7, 10]. Это увеличивает стоимость, массу и габариты, снижает надежность преобразователя.

В связи с этим **целью статьи** является разработка эффективного метода формирования выходного напряжения источников питания для установок многочастотного индукционного нагрева, кривая которого имеет заданный спектр гармоник.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

- 1) выбрать инвертор, обеспечивающий генерирование напряжения с заданным спектром кривой при минимальном числе силовых элементов схемы;
- 2) разработать алгоритм управления вентилями инвертора, обеспечивающий формирование кривой выходного напряжения с заданным гармоническим составом;
- 3) провести компьютерное моделирование и макетные исследования для подтверждения эффективности предлагаемого метода.

Актуальность цели заключается в потребности в источниках питания с заданным сложным спектром кривой питающего напряжения при реализации технологических процессов, перечисленных выше.

**Материалы и методы.** Теоретическая часть работы проводилась на основе схмотехнической базы многоуровневых инверторов напряжения и импульсных преобразователей постоянного тока с использованием численно-аналитических методов исследования нелинейных электрических цепей, методов решения нелинейных дифференциальных уравнений и приближенного гармонического анализа, а также методов имитационного моделирования с применением математического пакета MATLAB/Simulink.

Экспериментальная проверка теоретических результатов проводилась в лабораторных условиях на примере многоуровневого инвертора, генерирующего кривую напряжения с тремя рабочими гармониками. Для фиксации результатов использовались датчики серии ACS758 и четырехканальный цифровой осциллограф RIGOL DS1104Z.

**Результаты исследования.** При выборе инвертора целесообразно рассмотреть однофазный многоуровневый инвертор, упрощенная принципиальная схема<sup>1</sup> которого показана на рис. 1.

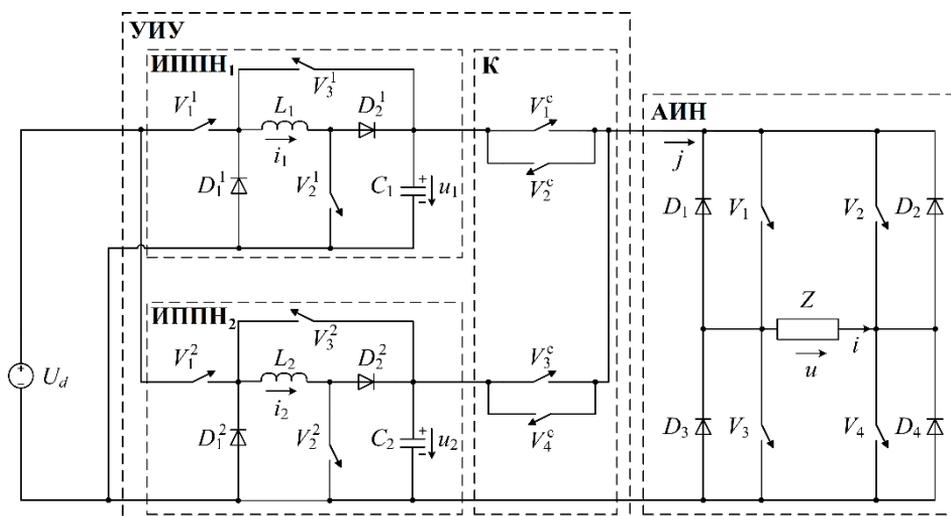


Рис. 1. Упрощенная принципиальная схема универсального многоуровневого преобразователя

Преимущество этого МИН перед существующими схемами состоит в том, что его принципиальная схема сохраняет структуру при увеличении числа

<sup>1</sup> Результаты исследования инвертора в простейших режимах работы в основном при генерировании синусоидального питающего напряжения см. в работе: *Mirgorodskaya E.E., Mityashin N.P., Tomashevskiy Yu. al. Multi-level voltage inverter with structure invariant to the number of levels of the output curve.* In: Proc. of Int. Conf. of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices (EDM), 2020, pp. 346–351. DOI: 10.1109/EDM49804.2020.9153476.

уровней генерируемой кривой, что дает основание называть его в настоящей работе универсальным многоуровневым преобразователем (УМП). Указанное свойство УМП соответствует приведенному выше требованию минимизации числа силовых элементов схемы при генерировании кривой с произвольным числом рабочих гармоник. Принципиальная схема УМП (рис. 1) состоит из универсального источника уровней (УИУ), образованного двумя импульсными преобразователями ИППН<sub>1</sub> и ИППН<sub>2</sub>, коммутатора К и автономного инвертора напряжения (АИН).

Пусть  $\tau$  – длительность одного такта требуемой многоуровневой аппроксимации кривой  $u(t)$ , т.е. промежутка времени, в течение которого выходное напряжение принимает значение очередного уровня. Величину  $\tau$  необходимо выбирать из соображения точности аппроксимации требуемой кривой многоуровневой кривой, генерируемой преобразователем

$$\tau = \frac{T}{N},$$

где  $T$  – период основной гармоники генерируемой кривой;  $N$  – число уровней на периоде.

УМП формирует на нагрузке периодическую многоуровневую кривую напряжения  $u^*(t)$ , аппроксимирующую непрерывную кривую  $u(t)$ . Кривая  $u^*(t)$  сохраняет постоянные значения  $u_m^*$ ,  $m = \overline{1, N}$  на указанных тактах длительностью  $\tau$ . Такт, на котором  $u^*(t) = u_m^*$ , обозначим через  $\theta_m$ . На этом такте

$$(m-1)\tau \leq t < m\tau.$$

Значение  $u_m^*$  на такте  $\theta_m$  определяется по формуле

$$u_m^* = u((m-1/2)\tau), m = \overline{1, N}.$$

Импульсные преобразователи ИППН<sub>1</sub> и ИППН<sub>2</sub> на конденсаторах  $C_1$  и  $C_2$  формируют только неотрицательные напряжения. Поэтому УИУ формирует не напряжения  $u_m^*$ , а их абсолютные значения

$$v_m = |u_m^*|, m = \overline{1, N}.$$

При этом ИППН<sub>1</sub> поддерживает значение напряжения  $v_m$  только на нечетных тактах  $\theta_m$ , сформированное на предыдущих тактах  $\theta_{m-1}$ . Для этого коммутатор К подключает конденсатор  $C_1$  к входу АИН на всех нечетных тактах и отключает его от входа АИН на всех четных тактах.

Аналогично ИППН<sub>2</sub> поддерживает значения напряжения  $v_m$  только на четных тактах  $\theta_m$ , сформированное на предыдущих нечетных тактах, для чего коммутатор К подключает конденсатор  $C_2$  к входу АИН на всех четных тактах и отключает его от входа АИН на всех нечетных тактах.

В результате на входе мостового инвертора образуется знакопостоянное многоуровневое напряжение, соответствующее требуемому знакопеременному многоуровневому напряжению  $v_m = |u_m^*|$ ,  $m = \overline{1, N}$ .

Роль АИН при генерировании квазисинусоидальной кривой состоит в преобразовании этого знакопостоянного многоуровневого напряжения в требуемую знакопеременную кривую требуемой частоты.

УМП может генерировать кривые напряжения, содержащие помимо основной гармоники две или три высшие гармоники<sup>1</sup>. Однако алгоритм управления транзисторами не позволяет построить кривую, которая на полупериоде основной гармоники меняет знак. Такая ситуация возникает, например, если одна из высших гармоник имеет достаточно большую амплитуду. Это ограничение может быть снято применением метода, описанного ниже.

При генерировании синусоидального напряжения на первом полупериоде кривой  $v_m = u_m^*$ , так как здесь  $u(t) > 0$ . Следовательно, в схеме на рис. 1 управляемые ключи  $V_1$  и  $V_4$  мостового инвертора должны быть замкнуты, а управляемые ключи  $V_2$  и  $V_3$  – разомкнуты.

На втором полупериоде  $u(t) \leq 0$  и, следовательно,  $u_m^* = -v_m$ , для чего необходимо, чтобы замкнутыми были ключи  $V_2$  и  $V_3$ , а ключи  $V_1$  и  $V_4$  – разомкнуты.

Следовательно, коммутации в АИН при создании синусоидальной кривой производятся с частотой требуемого напряжения, в результате чего на нагрузке формируется квазисинусоидальное напряжение.

При генерировании периодического напряжения со сложным гармоническим составом кривая может менять знак более одного раза за период. Поэтому коммутации управляемых ключей должны происходить каждый раз, когда меняется знак требуемой кривой, т.е. при  $m$ , для которых выполняется неравенство

$$u_m^* u_{m+1}^* < 0.$$

Помимо поддержания частоты выходной кривой АИН, как модуль рассматриваемого МИН, обеспечивает знак генерируемого напряжения в соответствии с изменением знака требуемой кривой. При формировании синусоидальной кривой оба способа коммутации инвертора совпадают, но в случае произвольной кривой они дадут разные результаты.

Для установления эффективности предлагаемого метода генерирования периодического напряжения с заданным гармоническим составом кривой была составлена компьютерная модель УМП с описанным способом управления вентилей АИН.

Рассмотрим формирование напряжения с заданным спектром на УМП. В общем случае модель позволяет формировать кривую вида

$$f_u(t) = U_{m_1} \sin(\omega_1 t) + \sum_{i=1}^k U_{m_i} \sin(k_i \omega_i t + \varphi_i),$$

где  $U_{m_1}$ ,  $\omega_1$  – амплитуда, круговая частота основной гармоники кривой;  $k$  – кратность высшей гармоники,  $k_i$  – кратности промежуточных гармоник ( $k_i < k$ ).

Величину  $\tau$  в данном случае необходимо выбирать так, чтобы для высшей гармоники, имеющей кратность  $k$  по отношению к основной, она соответствовала длительности такта ее  $n$ -уровневой аппроксимации, обеспечивающей

<sup>1</sup> Подробнее см. в статье: Влияние уровней напряжения и углов их включения в многоуровневом инверторе на структуру спектра его выходного напряжения / Е.Е. Миргородская, Н.П. Митяшин, Ю.Б. Томашевский, А.Ю. Мирошниченко // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Сер. Энергетика. 2019. Т. 19, № 4. С. 120–131. DOI: 10.14529/power190414.

достаточно точную ее реализацию. Здесь  $n$  – число уровней кривой на четверти периода высшей гармоники. Следовательно, число тактов на периоде кривой  $N$  и длительность одного такта  $\tau$  должны быть равными соответственно

$$N = 4nk; \tau = \frac{T}{N}, \quad (1)$$

где  $T$  – период основной гармоники генерируемой кривой.

В рассматриваемом ниже примере синтезируется кривая, желаемый спектр которой содержит первую, вторую, третью и шестую гармоники с амплитудами, равными соответственно 10 В, 10 В, 30 В и 35 В. Очевидно, что в этом случае  $k = 6$ .

Для удобства моделирования принято  $T = 2\pi$ . В соответствии с рекомендациями, сделанными выше, выбираем число уровней  $n = 6$ , достаточно хорошо аппроксимирующее высшую, т.е. в данном примере 6-ю, гармонику. Следовательно,  $N = 144$ .

Находим длительность такта аппроксимирующей многоуровневой кривой по формуле (1)

$$\tau = \frac{\pi}{72}.$$

С учетом этого получаем значения квантованных значений уставок  $u_m$  для системы управления УМП.

Значения уровней напряжения  $u(t)$ , которые необходимо реализовать для этих тактов, равны

$$u_m^* = u((m - 1/2)\tau), m = \overline{1, 144}.$$

В соответствии с принципом работы УМП импульсные преобразователи формируют на выходных конденсаторах только знакопостоянную кривую. Поэтому на выходе УМП формируется аппроксимация кривой

$$v_m = |u_m^*|, m = \overline{1, 144}.$$

Для того чтобы при этом на выходе АИН была сформирована аппроксимация кривой  $u(t)$ , необходимо выполнить следующее.

Пусть  $m_s$  суть значения индексов  $m$ , при которых величины  $u_m^*$  меняют знак, т.е.  $u_{m_s}^* u_{m_s+1}^* < 0$ . Тогда для формирования требуемой аппроксимации на выходе АИН коммутации его транзисторов необходимо осуществлять в моменты времени  $t_s = (m_s - 1/2)\tau$ , что обеспечит реализацию на выходе инвертора значения уровней  $u_m^*$ .

Таким образом, идея предлагаемого метода состоит в том, чтобы АИН осуществлял коммутации не с частотой кривой, а в соответствии с изменением ее знака.

На рис. 2–6 приведены результаты компьютерного моделирования работы УМП при реализации кривой, параметры которой приведены выше.

На рис. 3 для каждого ИППН активные такты, на которых соответствующий конденсатор подключен к входу АИН, отличаются от подготовительных тактов, на которых он заряжается (или разряжается) до следующего уровня, более темным оттенком.

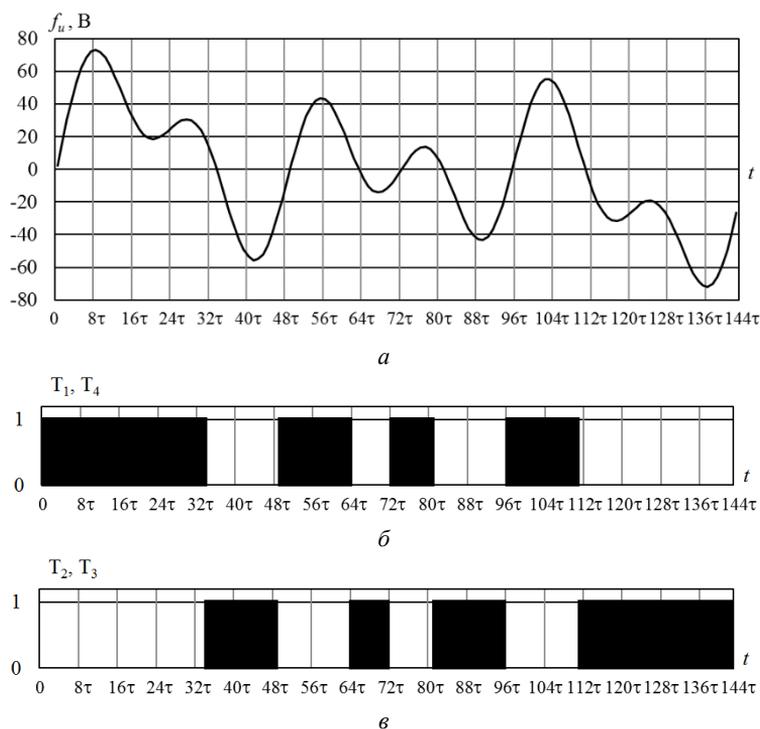


Рис. 2. Закон управления транзисторами АИН:  
 а – кривая требуемого по формуле (1) напряжения  $f_u(t)$  за период;  
 б – интервалы времени проводимости транзисторов  $V_1$  и  $V_4$  АИН, соответствующие положительности значений функции  $f_u(t)$ ;  
 в – интервалы времени проводимости транзисторов  $V_2$  и  $V_3$  АИН, соответствующие отрицательности значений функции  $f_u(t)$

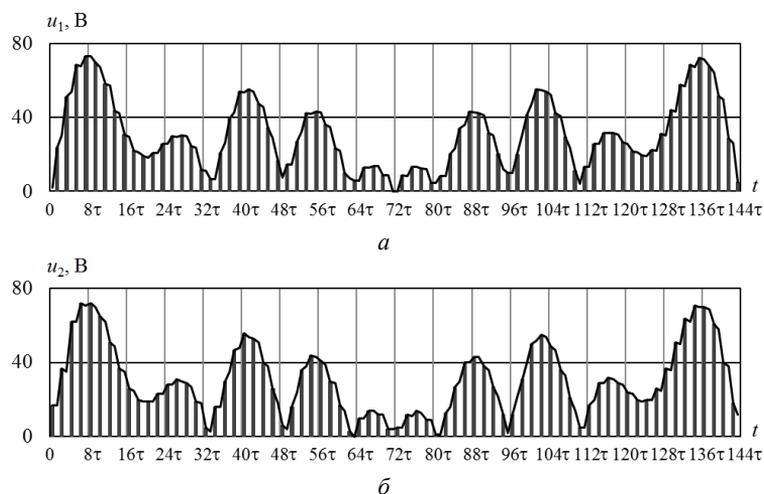
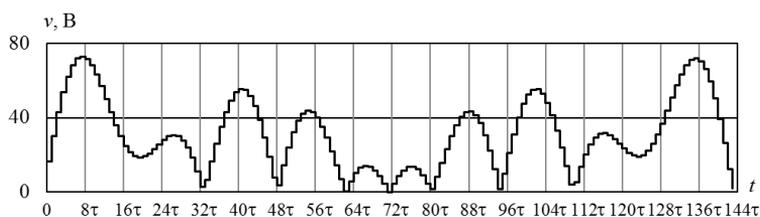
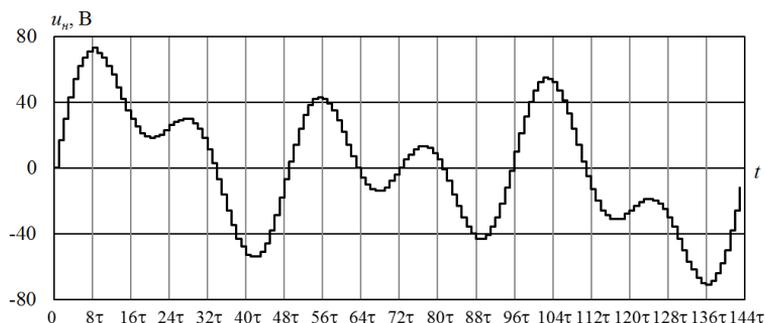
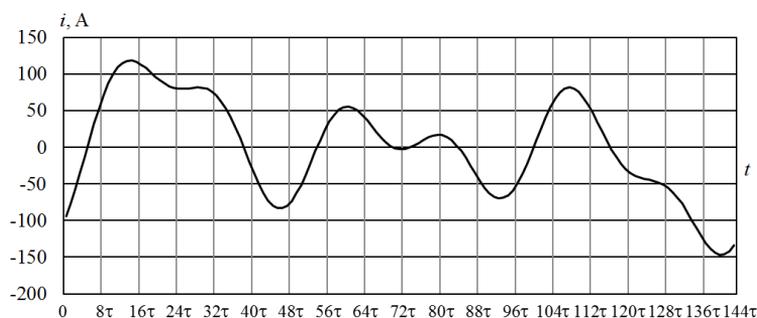


Рис. 3. Графики реализованных на модели напряжений:  
 а – напряжение  $u_1$  на конденсаторе  $C_1$ ;  
 б – напряжение  $u_2$  на конденсаторе  $C_2$

Рис. 4. График реализованного на модели напряжения  $v_k$  на входе АИНРис. 5. Реализованная на модели кривая напряжения на выходе преобразователя  $u_n(t)$ Рис. 6. Реализованная на модели кривая тока нагрузки  $i(t)$ 

Моделирование проводилось при следующих параметрах схемы и активно-индуктивной нагрузки:  $L_1 = L_2 = 0,7$  мГн,  $C_1 = C_2 = 500$  мкФ,  $f = 400$  Гц,  $Z = 1$  Ом,  $\cos\varphi = 0,7$ .

По результатам моделирования отклонение мгновенных значений многоуровневой кривой  $u_n(t)$  от мгновенных значений требуемой непрерывной кривой  $f_i(t)$  не превышает 3%.

**Оценка качества реализации требуемого спектра кривой.** Качество реализации требуемого спектра выходной кривой, сформированной описанным методом, также исследовано с помощью компьютерного моделирования.

К показателям качества реализации требуемого спектра выходной кривой следует отнести прежде всего относительные погрешности реализации амплитуд рабочих гармоник, определяемые следующим образом:

$$\delta U_i = 100(U_{im} - U_{im}^*) / U_{im}, \%$$

Кроме того, по аналогии с коэффициентом нелинейных искажений для кривой напряжения системы электроснабжения общего назначения здесь вводится коэффициент искажения требуемого спектра кривой.

Для этого рассчитывается результирующее действующее значение всех рабочих гармоник требуемой кривой

$$U_s = \sqrt{\sum_{i \in I_s} U_i^2},$$

а также результирующее действующее значение всех остальных гармоник

$$U_c = \sqrt{U^2 - U_s^2},$$

где  $I_s$  – множество номеров рабочих гармоник;  $U$  – действующее значение всей кривой.

Тогда коэффициент искажения требуемого спектра кривой определяется по формуле

$$k_c = \frac{U_c}{U_s} 100\%.$$

Такой выбор показателя качества реализации требуемого спектра оправдывается тем, что гармоники кривой, не входящие во множество рабочих, как и все высшие гармоники, при генерировании синусоидального напряжения «засоряют» спектр. Энергия, связанная с этими гармониками, снижает эффективность соответствующего технологического процесса. Следовательно, величина  $k_c$  должна минимизироваться. В случае с генерацией синусоидального напряжения значение коэффициента  $k_c$  совпадает со значением коэффициента нелинейных искажений.

Качество реализации требуемого спектра выходной кривой непосредственно определяется числом уровней. Характер и степень этого влияния иллюстрируются результатами исследования, приведенными в таблице для кривой с рабочими гармониками с номерами 1, 2, 3 и 6, требуемые амплитуды которых соответствуют рассмотренному выше примеру.

Как следует из этих данных, величина амплитуд представленных гармоник достаточно точно реализуется при числе уровней 48. Выбор числа уровней может определяться допустимым значением параметра  $k_c$  для конкретного технологического процесса.

**Зависимость показателей качества реализации требуемого спектра от числа уровней выходной кривой  $N$  на периоде первой гармоники**

$N$	$\delta U_1, \%$	$\delta U_2, \%$	$\delta U_3, \%$	$\delta U_6, \%$	$k_c, \%$
24	0,071	0,282	0,635	2,525	16,428
48	0,031	0,126	0,282	1,127	10,920
96	0,018	0,071	0,159	0,635	8,182
144	0,008	0,031	0,071	0,282	5,451

**Управление величиной токов индуктивностей  $L_1$  и  $L_2$ .** Для управления величиной токов индуктивностей  $L_1$  и  $L_2$  преобразователя (рис. 1) используется краткосрочное прогнозирование тока нагрузки, что необходимо для предотвращения

избыточного нарастания этих токов. При генерировании синусоидального напряжения в случае активно-индуктивной нагрузки прогнозирование возможно на основании всего двух измерений значений токов на такте, предыдущем текущему такту. Этого недостаточно при генерировании несинусоидального напряжения. В этом случае наиболее экономичным является метод параболической экстраполяции на основании трех измерений значения выходного тока УИУ.

В частности, для прогнозирования этого тока  $j$  на  $m$ -м такте кривой напряжения достаточно иметь результаты измерений значений тока  $j$  в начале трех предыдущих тактов значений выходного тока  $j(m-3)\tau$ ,  $j(m-2)\tau$ ,  $j(m-1)\tau$ .

Тогда прогнозируемые значения выходного тока УИУ на  $m$ -м такте, т.е. для моментов времени  $t$  из интервала  $m\tau < t \leq (m+1)\tau$ , определяются по формуле

$$j^p(t) = a(t - (m-1)\tau)^2 + b(t - (m-1)\tau) + c,$$

где

$$a = \frac{j((m-1)\tau) - j((m-2)\tau)}{\tau};$$

$$b = \frac{j((m-1)\tau) - 2j((m-2)\tau) + j((m-3)\tau)}{2\tau^2};$$

$$c = j(m-1).$$

**Результаты экспериментального исследования.** Работоспособность предлагаемого метода формирования кривой напряжения питания с заданным спектром была проверена на лабораторном макете преобразователя (рис. 1), показанном на рис. 7.



Рис. 7. Лабораторный макет

В эксперименте реализовывалась кривая напряжения

$$u(t) = 10\sin(\omega t) + 30\sin(2\omega t) + 30\sin(3\omega t), \text{ В,}$$

график которой приведен на рис. 8 для частоты  $f = 50$  Гц и следующих параметров схемы и активно-индуктивной нагрузки:  $L_1 = L_2 = 0,7$  мГн,  $C_1 = C_2 = 50$  мкФ,  $Z = 1$  Ом,  $\cos\varphi = 0,8$ . Число уровней на периоде первой гармоники  $N = 48$ .

На рис. 9 приведена осциллограмма выходного напряжения преобразователя и тока нагрузки, на рис. 10 – осциллограмма напряжения на входе АИН.

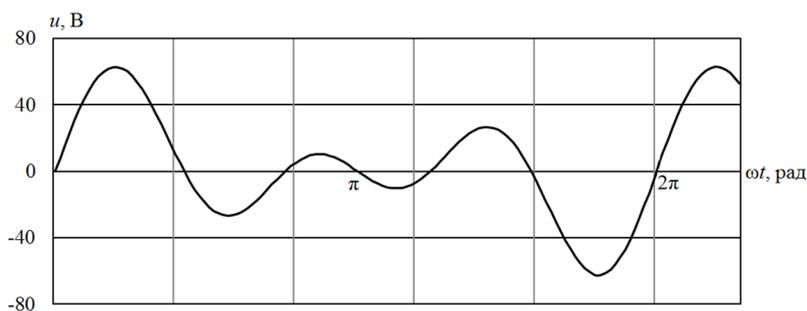
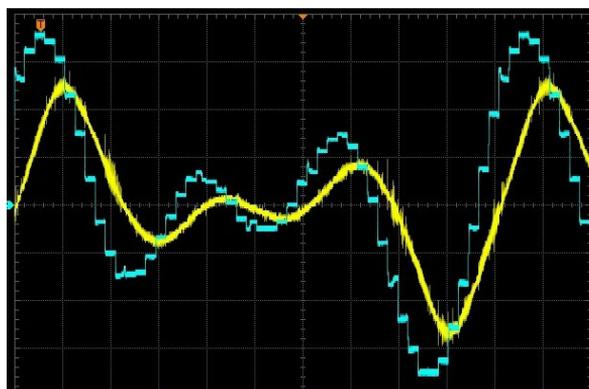
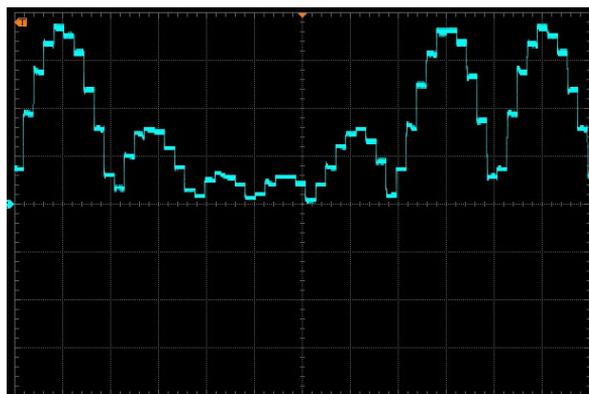
Рис. 8. График требуемой кривой напряжения  $u(t)$ Рис. 9. Осциллограмма реализованной кривой:  
ступенчатая кривая – кривая выходного напряжения преобразователя,  
желтая кривая – кривая тока нагрузки

Рис. 10. Осциллограмма напряжения на входе автономного мостового инвертора

Результаты эксперимента регистрировались с помощью цифрового осциллографа RIGOL DS1104Z Plus, имеющего встроенную функцию гармонического анализа кривых. Результаты гармонического анализа кривой выходного напряжения преобразователя (рис. 9) показали, что относительные погрешности реализации амплитуд рабочих гармоник  $\delta U_i$  для основной, второй и третьей гармоник не превышают 4%.

**Выводы.** В работе предложен метод формирования выходного напряжения источника питания, кривая которого имеет заданный гармонический состав, что соответствует цели исследования.

Решены поставленные задачи: в качестве источника выбран многоуровневый инвертор, построенный на основе универсального источника уровней, предложен способ управления вентилями инвертора, обеспечивающий формирование кривой выходного напряжения с заданным гармоническим составом.

Эффективность метода демонстрируется результатами компьютерного моделирования и лабораторного эксперимента.

Предлагаемые технические решения позволили получить следующие преимущества перед преобразователями, решающими аналогичные задачи:

1. Достигнута возможность генерирования выходного напряжения, спектр кривой которого содержит четыре и более гармоники с заданными амплитудами, тогда как большинство существующих преобразователей аналогичного назначения обеспечивают спектр лишь с двумя требуемыми гармониками.

2. Увеличение числа рабочих гармоник генерируемой кривой не приводит к увеличению силовых элементов схемы, что достигается за счет инвариантности структуры выбранной схемы к числу генерируемых уровней кривой.

В работе также предложены модели показателей качества реализованного спектра кривой напряжения и приведены результаты анализа влияния числа уровней на значения этих показателей.

Разработанная методика допускает развитие в направлении управления спектром генерируемого напряжения в реальном масштабе времени, а также неперiodического знакопеременного напряжения, изменяющегося по заданной программе в соответствии с требованиями технологического процесса.

#### Литература

1. Дзиев С.В. Принципы построения систем питания установок индукционной заковки зубчатых колес при двухчастотном нагреве // АРПН 05: материалы междунар. конф. СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2005. С. 193–201.

2. Иванчин И.И. Регулирование сквозным током в модульном многоуровневом преобразователе // Сборник трудов XI Международной (XXII Всероссийской) конференции по автоматизированному электроприводу АЭП 2020 (Санкт-Петербург, 4–7 октября 2020 г.). СПб.: Национальный исследовательский ун-т ИТМО, 2021. С. 24–27.

3. Колчев В.А. Повышение эффективности источников питания на основе многоуровневых инверторов за счет совершенствования топологии звеньев постоянного тока и управления ими: дис. ... канд. техн. наук. Саратов, 2021. 141 с.

4. Охоткин Г.П., Иванчин И.И. Способ векторной широтно-импульсной модуляции в многоуровневом преобразователе напряжения // Вестник Чувашского университета. 2022. № 1. С. 107–114.

5. Синтез двухчастотного тока индуктора на основе суммирования выходных параметров двух разночастотных резонансных преобразователей / С.К. Земан, Ю.М. Казанцев, А.В. Осипов, А.В. Юшков // Известия Томского политехнического университета. 2012. Т. 321, № 4. С. 144–149.

6. Справочник по силовой электронике / Ю.К. Розанов, П.А. Воронин, С.Е. Рывкин, Е.Е. Чаплыгин. М.: ИД МЭИ, 2014. 472 с.

7. Фазел С., Колтаков А. Многоуровневые преобразователи: схемы, особенности применения, алгоритмы управления. Часть 1 // Силовая электроника. 2019. № 1(76). С. 49–54.

8. Юшков А.В. Энергетически эффективные преобразователи частоты для двухчастотной индукционной тигельной плавки: дис. ... канд. техн. наук. Томск, 2012. 131 с.

9. Diong B., Basireddy S., Corzine K. Multilevel converter-based dual-frequency induction heating power supply. In: Industrial Electronics Society, IECON'03: proceedings. Roanoke, VA, USA, 2003, vol. 2, pp. 1992–1997. DOI: 10.1109/IECON.2003.1280366.

10. Rashid M.H. Power Electronics Handbook. Butterworth-Heinemann, 2018, 1522 p.

---

**МИРГОРОДСКАЯ ЕКАТЕРИНА ЕВГЕНЬЕВНА** – кандидат технических наук, доцент кафедры системотехники и управления в технических системах, Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А., Россия, Саратов (mee85@inbox.ru; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4519-6567>).

**МИТЯШИН НИКИТА ПЕТРОВИЧ** – доктор технических наук, профессор кафедры системотехники и управления в технических системах, Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А., Россия, Саратов (mityashinnp@mail.ru; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6696-6455>).

**МАМОНЫЧЕВ МИХАИЛ ЕВГЕНЬЕВИЧ** – аспирант кафедры системотехники и управления в технических системах, Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А., Россия, Саратов (mamonychev@gmail.com).

**ТОМАШЕВСКИЙ ЮРИЙ БОЛЕСЛАВОВИЧ** – доктор технических наук, заведующий кафедрой электроэнергетики и электротехники, Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А., Россия, Саратов (yurytomash@mail.ru; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5393-362X>).

**АРТЮХОВ ИВАН ИВАНОВИЧ** – доктор технических наук, профессор кафедры электроэнергетики и электротехники, Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А., Россия, Саратов (ivart54@mail.ru; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8699-4066>).

---

**Ekaterina E. MIRGORODSKAYA, Nikita P. MITYASHIN,  
Mikhail E. MAMONYCHEV, Yury B. TOMASHEVSKY, Ivan I. ARTYUKHOV**

#### **MULTILEVEL INVERTER TO GENERATE VOLTAGE WITH COMPLEX HARMONIC COMPOSITION**

**Key words:** multi-frequency heating of metals, multi-level voltage inverter, spectrum, modeling, quality indicators, power circuit, voltage levels, power source.

*The paper deals with the problem of forming the desired and controllable harmonic composition of the output curve of a multilevel voltage inverter. The problem is relevant when creating installations for multi-frequency induction heating and metal melting.*

**The purpose of the study** is to develop an effective method to form the output voltage of power sources for multi-frequency induction heating installations, the curve of which has a given harmonic spectrum.

**Materials and methods.** The theoretical part of the work was carried out on the basis of the circuit base of multi-level voltage inverters and switching DC converters using numerical analytical methods of studying nonlinear electrical circuits, methods of solving nonlinear differential equations and approximate harmonic analysis, as well as simulation modeling methods using the MATLAB/Simulink mathematical package. Experimental verification of the theoretical results was carried out in laboratory conditions on the example of a multilevel inverter generating a voltage curve with three operating harmonics. ACS758 series sensors and a four-channel RIGOL DS1104Z digital oscilloscope were used to record the results.

**Research results.** Achieving of the purpose is based on the use of a universal multilevel voltage inverter, the circuit scheme of which does not depend on the levels number of the generated curve, which ensures a minimum number of power elements for any complexity of the curve spectrum. The method of forming of the output curve of this inverter consists in alternately connecting of the output capacitors of two direct voltage impulse converters

to the input of a single-phase bridge voltage inverter using a transistor switch. In this case, voltages of different parity levels are formed by capacitors in the order of their succession, as a result of which a constant-sign multilevel voltage is formed on the input of the bridge inverter, corresponding to the required alternating-sign multilevel voltage. The law of the transistor switching of the bridge inverter ensures the conversion of its input voltage into a load voltage with a given harmonic composition. The peculiarity of the developed converter control method is that the transistor switching of the bridge inverter is carried out in accordance with the change in the sign of the generated curve. The method contains an algorithm to determine levels values formed by capacitors of impulse converters that realizes the required spectrum of the inverter output curve. The efficiency of the proposed method is illustrated by computer modeling of the converter when voltage with four working harmonics of the spectrum (i.e. the required spectrum harmonics) is generated.

The quality indicators of the realized spectrum of the voltage curve are proposed and the analysis results of the influence of the levels number on values of these indicators are presented. The efficiency of the proposed methods is demonstrated experimentally with a laboratory model of the converter.

**Conclusions.** The paper proposes a method to form the output voltage of a power source, the curve of which has a given harmonic, the efficiency of which is confirmed by the results of computer modeling and laboratory experiments. The proposed technical solutions made it possible to generate an output voltage, the spectrum of the curve of which contains four or more harmonics with specified amplitudes with a minimum number of power elements of the circuit. The paper also proposes models of quality indicators of the realized spectrum of the voltage curve and presents the results of the analysis of the influence of the number of levels on the values of these indicators. The developed methodology allows the development in the direction of controlling the spectrum of the generated voltage in real time, as well as non-periodic alternating voltage that changes according to a given program in accordance with the requirements of the technological process.

#### References

1. Dzljev S.V. *Printsipy postroeniya sistem pitaniya ustanovok induktsionnoi zakalki zubchatykh koles pri dvukhchastotnom nagreve* [Principles of construction of feeding systems for gearwheel induction hardening plants by means of dual frequency treatment]. In: *APIH 05: materialy mezhdunar. konf.* [Proc. of Int. Conf. APIH 05]. St. Petersburg, 2005, pp. 193–201.
2. Ivanchin I.I. *Regulirovanie skvoznyim tokom v modul'nom mnogourovnevnom preobrazovatele* [Through-current regulation in a modular multilevel converter]. In: *Sbornik trudov XI Mezhdunarodnoi (XXII Vserossiiskoi) konferentsii po avtomatiziro-vannomu elektroprivodu AEP 2020* [Proc. of 11<sup>th</sup> Int. (22<sup>th</sup> Rus.) Conf. «Automated electric drive»]. St. Peterburg, 2021, pp. 24–27.
3. Kolchev V.A. *Povyshenie effektivnosti istochnikov pitaniya na osnove mnogourovnevnykh inverterov za schet sovershenstvovaniya topologii zven'ev postoyannogo toka i upravleniya imi: dis. ... kand. tehn. nauk* [Increasing of the efficiency of multilevel inverter power supplies through improved DC link topology and control: Cand. Diss.]. Saratov, 2021, 141 p.
4. Okhotkin G.P., Ivanchin I.I. *Sposob vektornoj shirotno-impul'snoi modulyatsii v mnogourovnevnom preobrazovatele napryazheniya* [Space vector PWM in a multilevel voltage converter]. *Vestnik Chuvashskogo universiteta*, 2022, no. 1, pp. 107–114.
5. Zeman S.K., Kazantsev Yu.M., Osipov A.V., Yushkov A.V. *Sintez dvukhchastotnogo toka induktora na osnove summirovaniya vykhodnykh parametrov dvukh raznochastotnykh rezonansnykh preobrazovatelei* [Synthesis of a dual-frequency inductor current based on the summation of the output parameters of two different-frequency resonant converters]. *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta*, 2012, vol. 321, no. 4, pp. 144–149.
6. Rozanov Yu.K., Voronin P.A., Rvkin S.E., Chaplygin E.E. *Spravochnik po silovoi elektronike* [Handbook of power electronics]. Moscow, MEI Publ., 2014, 472 p.
7. Fazel S., Kolpakov A. *Mnogourovnevnye preobrazovатели: skhemy, osobennosti primeneniya, algoritmy upravleniya. Chast' I* [Multilevel converters: circuits, application features, control algorithms. Part 1]. *Silovaya elektronika*, 2019, no. 1(76), pp. 49–54.

8. Yushkov A.V. *Energeticheski effektivnye preobrazovateli chastoty dlya dvukhchastotnoi induktsionnoi tigel'noi plavki* [Energy efficient frequency converters for dual frequency induction crucible melting]. Tomsk, 2012, 131 p.

9. Diong B., Basireddy S., Corzine K. Multilevel converter-based dual-frequency induction heating power supply. In: Industrial Electronics Society, IECON'03: proceedings. Roanoke, VA, USA, 2003, vol. 2, pp. 1992–1997. DOI: 10.1109/IECON.2003.1280366.

10. Rashid M.H. *Power Electronics Handbook*. Butterworth-Heinemann, 2018, 1522 p.

---

**EKATERINA E. MIRGORODSKAYA** – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Department of Systems Engineering and Control in Technical Systems, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov, Russia, Saratov (mee85@inbox.ru; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4519-6567>).

**NIKITA P. MITYASHIN** – Doctor of Technical Sciences, Professor, Department of Systems Engineering and Control in Technical Systems, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov, Russia, Saratov (mityashinnp@mail.ru; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6696-6455>).

**MIKHAIL E. MAMONYCHEV** – Post-Graduate Student, Department of Systems Engineering and Control in Technical Systems, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov, Russia, Saratov (mamonychev@gmail.com).

**YURY B. TOMASHEVSKY** – Doctor of Technical Sciences, Head of Electric Power and Electrical Engineering Department, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov, Russia, Saratov (yurytomash@mail.ru; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5393-362X>).

**IVAN I. ARTYUKHOV** – Doctor of Technical Sciences, Professor, Department of Electric Power and Electrical Engineering, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov, Russia, Saratov (ivart54@mail.ru; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8699-4066>).

---

**Формат цитирования:** Многоуровневый инвертор для генерирования напряжения со сложным гармоническим составом / *Е.Е. Миргородская, Н.П. Митяшин, М.Е. Мамоньчев и др.* // Вестник Чувашского университета. 2024. № 4. С. 45–59. DOI: 10.47026/1810-1909-2024-4-45-59.