

УДК 621.314

## РЕЗОНАНСНІ ІНВЕРТОРИ НАПРУГИ ДЛЯ УСТАНОВОК ІНДУКЦІЙНОГО НАГРІВУ З МОДУЛЬНОЮ СТРУКТУРОЮ ПОБУДОВИ ТА СИСТЕМОЮ КЕРУВАННЯ НА ОСНОВІ НЧ ІМПУЛЬСНОЇ МОДУЛЯЦІЇ

**В.Я. Гуцалюк**, канд. техн. наук, **П.Ю. Герасименко**, канд. техн. наук

Інститут електродинаміки НАН України,  
пр. Перемоги, 56, Київ-57, 03680, Україна  
e-mail: [alfa@ied.org.ua](mailto:alfa@ied.org.ua)

*Представлено результати наукових досліджень співробітників відділу транзисторних перетворювачів, спрямовані на розробку високочастотних транзисторних перетворювачів з модульною структурою побудови для установок індукційних технологій, отримані у 2014 році. Показано, що використання несинфазного керування інверторними модулями при НЧ імпульсній модуляції дає змогу зменшити розмах пульсації амплітуди вихідного струму, що особливо важливо при низькій добротності вихідного коливального контура та необхідності забезпечення широкого діапазону регулювання вихідного струму. Отримано математичну модель резонансного інвертора напруги з модульною структурою побудови, яка дає змогу проводити розрахунки вихідного струму при несинфазному керуванні модулями та різних параметрах НЧ імпульсної модуляції. Бібл. 2, рис. 4.*

**Ключові слова:** індукційний нагрів, транзисторний резонансний інвертор напруги.

Для установок високочастотного індукційного нагріву широко застосовують схеми транзисторних перетворювачів, вихідні каскади яких побудовані на основі резонансного інвертора напруги. Актуальною є розробка перетворювачів з модульною структурою побудови, що дає змогу збільшити їх потужність.

Проведено дослідження резонансних інверторів напруги мостового типу з модульною структурою побудови та системою керування на основі НЧ імпульсної модуляції (*PDM-pulse density modulation*). Розглянуто структуру побудови інверторів на основі модулів, з'єднаних по входу паралельно, а по виходу – послідовно [2]. Така структура забезпечує однаковий струм у вихідних ланцюгах модулів. На рис. 1 показана структурна схема перетворювача, що складається з  $N$  однакових інверторних модулів мостового типу та схеми керування (СК) модулями, яка формує напругу керування транзисторами та забезпечує автоматичне підстроювання частоти (АПЧ) згідно з сигналом давача струму. Кожний модуль складається з мостового інвертора І, схеми керування (драйвера) транзисторами інвертора СКІ, яка перетворює малопотужний зовнішній сигнал керування модулем в гальванічно розв'язані сигнали керування окремими транзисторами, та вихідного трансформатора Т. Послідовно з'єднані вторинні обмотки трансформаторів, навантажені на конденсатор коливального контура С та індуктор. Еквівалентна схема індуктора представлена у вигляді послідовно з'єднаних  $L$  і  $R$ . Перетворювач підключено до джерела постійної напруги  $E$ .

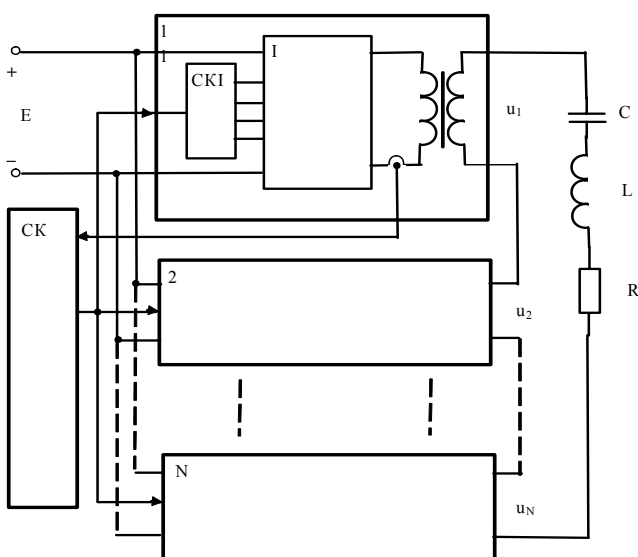


Рис. 1

Розглянуто варіанти з синфазним та несинфазним керуванням модулями. У роботі [1] наведені математичні моделі та результати досліджень інверторів з керуванням на основі НЧ імпульсної модуляції, які можуть використовуватись для аналізу модульних структур побудови при синхронному та синфазному керуванні модулями. Для несинфазного керування необхідно розробити нові математичні моделі.

Якщо використовувати принцип керування з НЧ імпульсною модуляцією та на кожний модуль подавати однакові послідовності імпульсів керування, які зсунуті по фазі (несинфазне керування), то сумарна напруга інверторів  $u_{\Sigma}$  буде мати ступеневу форму. Максимальне значення амплітуди напруги

$$U_{\Sigma} = NU_{\text{вих}}, \quad (1)$$

де  $U_{\text{вих}}$  – амплітуда напруги на виході кожного модуля. Послідовності повинні бути зсунуті між собою на час, кратний  $T_0$ , при цьому перемикання транзисторів у модулях буде здійснюватися при мінімальному струмі та відповідно мінімальних втратах потужності, а модулі матимуть однакову завантаженість.

Для  $N$  модулів мінімальні пульсації вихідного струму спостерігаються при фазовому зсуві між вихідними напругами модулів, якому відповідає натуральне число:

$$k = \text{round}\left(\frac{s}{N}\right) - \text{round}\left(\frac{s}{nN+s}\right) \left( \text{round}\left(\frac{s}{N} - \text{floor}\left(\frac{s}{N}\right)\right) - \text{round}\left(1 - \frac{s}{N} + \text{floor}\left(\frac{s}{N}\right)\right) \right). \quad (2)$$

Було запропоновано наступний підхід для аналізу такої системи. Якщо проаналізувати різні комбінації параметрів модуляції та фазового зсуву, то можна зазначити, що при виконанні виразу (2) напругу  $u_{\Sigma}(t)$  можна представити у вигляді

$$u_{\Sigma}(t) = u_{\text{const}}(t) + u_{\text{mod}}(t), \quad (3)$$

де  $u_{\text{const}}(t)$  – напруга з рівнем  $iU_{\text{вих}}$  форми меандр,  $i \in [0, N-1]$ ;  $u_{\text{mod}}(t)$  – напруга форми меандр з рівнем  $U_{\text{вих}}$  та НЧ імпульсною модуляцією.

На рис. 2 зображена схема заміщення цієї системи. Такий підхід дасть змогу визначити складові струму окремо для кожного з джерел напруги, сума яких визначить струм у навантаженні.

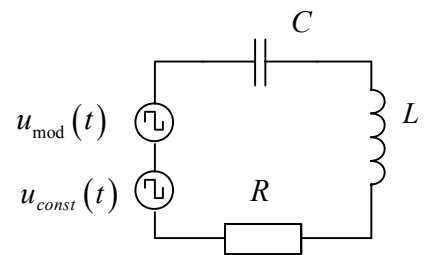


Рис. 2

Напруга  $u_{\Sigma}(t)$  залежно від параметрів модуляції та фазового зсуву  $m, n, s, k$  може знаходитись у діапазоні від 0 до  $NU_{\text{вих}}$ . На рис. 3 наведено приклад діаграми вихідних напруги  $u_{\Sigma}$  та струму  $i$  інвертора. При цьому спостерігається

один чи два періоди повторюваності, останній наведено на рис. 3. У деяких випадках простежується декілька підряд однакових періодів повторюваності, які чергуються з іншим періодом повторюваності.

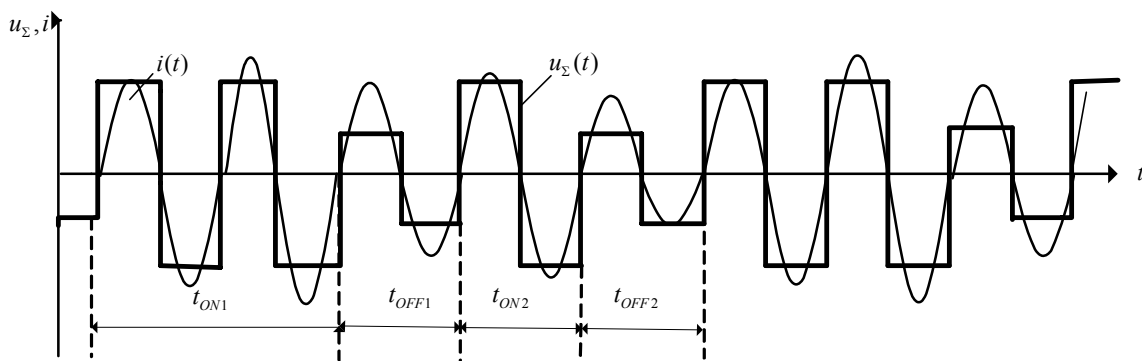


Рис. 3

Для аналізу прийнято такі позначення:

$$t_{\text{ON}1} = m_1 T_0, \quad t_{\text{OFF}1} = n_1 T_0, \quad T_{M1} = s_1 T_0, \quad t_{\text{ON}2} = m_2 T_0, \quad t_{\text{OFF}2} = n_2 T_0, \quad T_{M2} = s_2 T_0, \quad (4)$$

де  $n_1, n_2$  – кількість періодів за час вимкненого стану  $t_{\text{OFF}1}, t_{\text{OFF}2}$ ;  $m_1, m_2$  – кількість періодів за час ввімкненого стану  $t_{\text{ON}1}, t_{\text{ON}2}$ ;  $s_1 = n_1 + m_1$ ,  $s_2 = n_2 + m_2$  – кількість періодів за період повторюваності  $T_{M1}, T_{M2}$ .

Для показаної на рис. 3 діаграми  $m_1 = 2$ ,  $m_2 = 1$ ,  $n_1 = n_2 = 1$ ,  $s_1 = 3$ ,  $s_2 = 2$ ,  $i = 1$ . Для деяких комбінацій параметрів модуляції та фазового зсуву виконуються вирази  $n_1 = n_2$ ,  $m_1 = m_2$  та відповідно  $s_1 = s_2$ .

При високій добротності, характерній для установок індукційного нагріву, можна знехтувати вищими гармоніками у вихідній напрузі інвертора та представити вихідну напругу кожного модуля у вигляді

$$u(t) = U_{m(1)} \sin\left(\frac{2\pi}{T_0} t\right), \quad (5)$$

де  $U_{m(1)} = \frac{4U_{\text{вих}}}{\pi}$  – амплітуда першої гармоніки напруги інвертора на вторинній обмотці трансформатора кожного модуля. Це дасть змогу спростити аналіз електромагнітних процесів.

Вирази для струму навантаження в усталеному режимі можна знайти у вигляді суми струмів, отриманих у результаті аналізу окремо для кожного з джерел напруги  $u_{\text{const}}(t)$  та  $u_{\text{mod}}(t)$ . Результируючий струм описується виразами

$$\left\{ \begin{aligned} i_{\text{ON1}}(t) &= \frac{U_{m(1)}}{R} \left( i + 1 - \frac{1 - e^{-\frac{\pi}{Q} n_2} - e^{-\frac{\pi}{Q} (n_1 + s_2)} + e^{-\frac{\pi}{Q} s_2}}{1 - e^{-\frac{\pi}{Q} (s_1 + s_2)}} \right) e^{-\frac{R}{2L} t} \sin\left(\frac{2\pi}{T_0} t\right); \\ i_{\text{OFF1}}(t) &= \frac{(i+1)U_{m(1)}}{R} \frac{e^{-\frac{\pi}{Q} (n_2 + m_1)} - e^{-\frac{\pi}{Q} (s_2 + m_1)} + 1 - e^{-\frac{\pi}{Q} m_1}}{1 - e^{-\frac{\pi}{Q} (s_1 + s_2)}} e^{-\frac{R}{2L} t} \sin\left(\frac{2\pi}{T_0} t\right); \\ i_{\text{ON2}}(t) &= \frac{U_{m(1)}}{R} \left( i + 1 - \frac{1 - e^{-\frac{\pi}{Q} (n_2 + s_1)} - e^{-\frac{\pi}{Q} m_1} + e^{-\frac{\pi}{Q} s_1}}{1 - e^{-\frac{\pi}{Q} (s_1 + s_2)}} \right) e^{-\frac{R}{2L} t} \sin\left(\frac{2\pi}{T_0} t\right); \\ i_{\text{OFF2}}(t) &= \frac{(i+1)U_{m(1)}}{R} \frac{1 + e^{-\frac{\pi}{Q} (n_1 + m_2)} - e^{-\frac{\pi}{Q} (s_1 + m_2)} - e^{-\frac{\pi}{Q} m_2}}{1 - e^{-\frac{\pi}{Q} (s_1 + s_2)}} e^{-\frac{R}{2L} t} \sin\left(\frac{2\pi}{T_0} t\right). \end{aligned} \right. \quad (6)$$

Вирази (6) дають можливість проводити аналіз роботи транзисторного інвертора напруги модульної структури з НЧ імпульсною модуляцією при різних комбінаціях  $n$ ,  $m$ ,  $s$ ,  $k$  та відповідно  $n_1$ ,  $n_2$ ,  $m_1$ ,  $m_2$ ,  $s_1$ ,  $s_2$ ,  $i$ .

Відносне середнє за модулем значення струму інвертора при НЧ імпульсній модуляції можна записати як

$$I_{\text{cep}}^* = \frac{I_{\text{cep}}(m, s)}{NU_{m(1)}/R} = \frac{2\gamma}{\pi}. \quad (7)$$

Отже, отримано вирази максимальної  $I_{a\text{max}}$  та мінімальної  $I_{a\text{min}}$  амплітуд струму та різниці між ними, що визначає розмах пульсації амплітуди струму:

$$\Delta I_a = \frac{U_{m(1)}}{R} \left( 1 - \frac{e^{-\frac{\pi}{Q} m_2} - 2e^{-\frac{\pi}{Q} (s_2 + s_1)} - e^{-\frac{\pi}{Q} (n_1 + m_2)} + e^{-\frac{\pi}{Q} (s_1 + m_2)} + e^{-\frac{\pi}{Q} n_2} + e^{-\frac{\pi}{Q} (n_1 + s_2)} - e^{-\frac{\pi}{Q} s_2}}{1 - e^{-\frac{\pi}{Q} (s_1 + s_2)}} e^{\frac{\pi}{4Q}} \right). \quad (8)$$

Розроблено методику визначення параметрів  $n_1$ ,  $n_2$ ,  $m_1$ ,  $m_2$ ,  $s_1$ ,  $s_2$ ,  $i$ ,  $k$ , яка враховує кількість модулів  $N$  та задану максимальну кількість періодів за час модуляції  $s_{\text{max}}$ .

Методика полягає у наступному:

1. Визначаються всі можливі комбінації  $n$ ,  $m$ ,  $s$  для  $s \in [2 \dots s_{\max}]$ ,  $m \in [0 \dots s]$ , розраховуються коефіцієнти заповнення  $\gamma_{\text{дозв}}$  та складається таблиця.

2. У випадку, коли для одного  $\gamma_{\text{дозв}}$  можливі декілька різних комбінацій  $m$  та  $s$ , із побудованої таблиці для зменшення розмаху пульсації струму слід виключити такі комбінації  $m$  та  $s$ , при яких  $n = s - m$  буде більшим.

3. За допомогою виразу (2) розраховується число  $k$  для кожного значення  $s$  та додається в таблицю.

4. Для кожної комбінації та відповідної форми вихідної напруги, отриманої як сума напруги (типу меандр) окремих модулів, визначаються параметри  $n_1$ ,  $n_2$ ,  $m_1$ ,  $m_2$ ,  $s_1$ ,  $s_2$ ,  $i$ . Параметр  $i$  визначається виразом

$$i = \text{floor} \left( \frac{m}{s} N \right). \quad (9)$$

Виходячи з отриманих параметрів  $n_1$ ,  $n_2$ ,  $m_1$ ,  $m_2$ ,  $s_1$ ,  $s_2$ ,  $i$  за допомогою виразів (6) можна провести розрахунок вихідного струму в усталеному режимі. Якщо деякі комбінації параметрів модуляції не задовольняють заданим вимогам, то їх необхідно видалити, у деяких випадках необхідно змінити  $s_{\max}$  та повторити розрахунки.

На рис. 4 представлено результати розрахунку пульсації струму у відносних одиницях  $\Delta I_a^* = \frac{\Delta I_a}{NU_{m(1)}/R}$  для інвер-

тора, який складається з трьох модулів при  $Q=5$  для синфазного та несинфазного варіантів керування модулями.

З рис. 4 видно, що несинфазне керування модулями суттєво зменшило пульсації струму. З графіка слідує, що максимальний розмах пульсації струму зменшився більш ніж у п'ять разів.

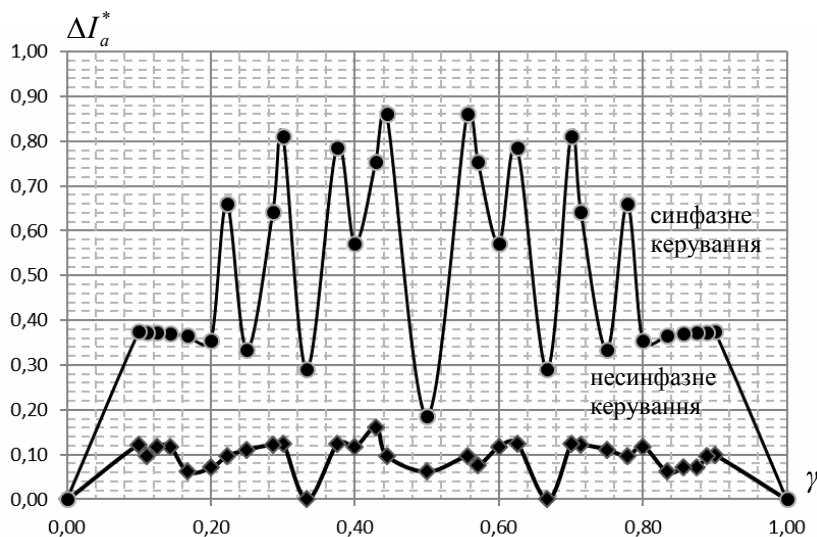


Рис. 4

**Висновки.** У результаті досліджень резонансних інверторів напруги установок індукційного нагріву зі структурою побудови на основі паралельно-послідовного з'єднання модулів та регулюванням вихідного струму за допомогою НЧ імпульсної модуляції показано доцільність використання несинфазного керування модулями, що дає змогу зменшити розмах пульсації амплітуди вихідного струму. Це особливо важливо при низькій добротності вихідного коливального контура та необхідності забезпечення широкого діапазону регулювання вихідного струму інвертора.

Отримано математичну модель резонансного інвертора напруги з модульною структурою побудови, що дає можливість проводити розрахунки вихідного струму при різних параметрах НЧ імпульсної модуляції.

1. Юрченко О.М., Гуцалюк В.Я., Герасименко П.Ю., Слесаревський І.О. Модель резонансного транзисторного інвертора напруги з низькочастотною імпульсною модуляцією // Техн. електродинаміка. – 2011. – № 1. – С. 24–29.
2. Юрченко О.М., Юрченко М.М., Гуцалюк В.Я., Павловський В.О. та ін. Високочастотні транзисторні перетворювачі для високоефективних систем електроживлення технологічних установок // Пр. Ін-ту електродинаміки НАН України: Зб. наук. пр. – К.: ІЕД НАН України, 2014. – Вип. 38. – С. 137–145.

УДК 621.314

**В.Я. Гуцалюк**, канд. техн. наук, **П.Ю. Герасименко**, канд. техн. наук

Институт электродинамики НАН Украины,  
пр. Победы, 56, Киев-57, 03680, Украина

**Резонансные инверторы напряжения для установок индукционного нагрева с модульной структурой построения и системой управления на основе НЧ импульсной модуляции**

*Представлены результаты научных исследований отдела транзисторных преобразователей, направленные на разработку высокочастотных транзисторных преобразователей с модульной структурой построения для установок индукционных технологий, полученные в 2014 году. Показано, что применение несинфазного управления инверторными модулями при НЧ импульсной модуляции позволяет уменьшить размах пульсации амплитуды выходного тока, что особенно важно при низкой добротности выходного колебательного контура и необходимости обеспечения широкого диапазона регулирования выходного тока. Получена математическая модель резонансного инвертора напряжения с модульной структурой построения, которая позволяет проводить расчеты выходного тока при несинфазном управлении модулями и разных параметрах НЧ импульсной модуляции. Библ. 2, рис. 4.*

**Ключевые слова:** индукционный нагрев, транзисторный резонансный инвертор напряжения.

**V.Ya. Hutsaliuk, P.Yu. Herasymenko**

Institute of Electrodynamics of the National Academy of Sciences of Ukraine,  
Peremohy, 56, Kyiv-57, 03680, Ukraine

**Resonant voltage inverter for induction heating equipment with a modular structure of construction and PDM based control system**

*The results of scientific research department of transistor converter for development of high-frequency transistor converters with a modular structure of construction for installations of induction technology, obtained in 2014, which have not been published are presented. It is shown that the using of non-inphase control of inverter modules at pulse density modulation allows to reduce ripple of output current, which is especially important at low quality factor of output oscillating circuit and the need for a wide control range of output current. The mathematical model of the resonant voltage inverter with a modular structure of construction which allows the calculation of output current at non-inphase management modules on different parameters of pulse density modulation was received. References 2, figures 4.*

**Key words:** induction heating, voltage-source series-resonant inverter.

Надійшла 23.04.2015

Received 23.04.2015

## **№ 16. ВІДДІЛ ЕЛЕКТРОЖИВЛЕННЯ ТЕХНОЛОГІЧНИХ СИСТЕМ**

УДК 621.3.011:621.311

### **ОСОБЕННОСТИ АНАЛИЗА ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ В ЦЕПЯХ РАЗРЯДА НАКОПИТЕЛЬНЫХ КОНДЕНСАТОРОВ ПРИ ЭЛЕКТРОИСКРОВОМ ДИСПЕРГИРОВАНИИ СЛОЯ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ГРАНУЛ**

**Н.И. Супруновская**, канд. техн. наук

Институт электродинамики НАН Украины,  
пр. Победы, 56, Киев-57, 03680, Украина  
e-mail: iednat1@gmail.com

*Представлены новые научные результаты, полученные в отделе электропитания технологических систем Института электродинамики НАН Украины, при исследовании переходных процессов в электрических цепях разряда накопительных конденсаторов на электроискровую нагрузку, которой является слой металлических гранул, расположенных в диэлектрической жидкости между электродами технологического реактора. Показаны особенности протекания переходных процессов разряда конденсаторов на такую нагрузку и разработаны новые математические модели, учитывающие зависимости ее сопротивления от величины разрядного тока, скорости его изменения и длительности временной паузы между разрядными импульсами. Проведен анализ путей повышения энергетических и динамических характеристик импульсных токов в электроискровой нагрузке, возникающих при регулируемом разряде на нее накопительных конденсаторов генераторов разрядных импульсов. Исследования проводились в соответствии с планами НИР "ИМРОЗ". Библ. 16, рис. 6.*