

## МЕТОД ВИЗНАЧЕННЯ ПАРАМЕТРІВ НЧ ІМПУЛЬСНОЇ МОДУЛЯЦІЇ ДЛЯ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ТРАНЗИСТОРНИХ ІНВЕРТОРІВ НАПРУГИ УСТАНОВОК ІНДУКЦІЙНОГО НАГРІВАННЯ

О.М. Юрченко<sup>1</sup>, докт. техн. наук, В.Я. Гуцалюк<sup>2</sup>, канд. техн. наук, П.Ю. Герасименко<sup>3</sup>,  
канд. техн. наук, І.О. Слесаревський<sup>4</sup>, пров. інж.

1–4 – Ін-т електродинаміки НАН України  
пр. Перемоги, 56, Київ-57, 03680, Україна

*Розглянуто транзисторний інвертор напруги для установки індукційного нагрівання з низькочастотною (НЧ) імпульсною модуляцією, проведено аналіз вибору параметрів НЧ імпульсної модуляції. Встановлено критерії вибору та запропоновано метод визначення параметрів НЧ імпульсної модуляції. Бібл. 7, рис. 9, таблиця.*

**Ключові слова:** транзисторний перетворювач, інвертор напруги, низькочастотна імпульсна модуляція, установки індукційного нагріву, метод визначення параметрів.

**Вступ.** Транзисторні перетворювачі мають низку переваг і успішно витісняють лампові генератори, що донедавна були єдиним типом джерел живлення індукційних установок у діапазоні частот 18...440 кГц і вище на потужності до сотень кіловат. Одним із пріоритетних напрямків удосконалення цих перетворювачів є розробка ефективних систем та алгоритмів керування.

Розглянемо схему інвертора напруги мостового типу, до виходу якого через погоджувальний трансформатор підключено індуктор з тілом, яке нагрівають, та компенсуючий конденсатор [6]. Схему заміщення навантаження інвертора можна представити як послідовний резонансний контур, що складається з індуктивності  $L$ , ємності  $C$  та активного опору  $R$ .

В [4, 6, 7] розглянуто НЧ способи регулювання та стабілізації вихідного струму інвертора напруги. Невеликі динамічні втрати потужності є значною перевагою інверторів з НЧ регулюванням порівняно з іншими способами регулювання. Вони досягаються за рахунок перемикання транзисторів при струмі, близькому до нуля, що відповідає режиму роботи на частоті, близькій до резонансної. Для забезпечення цього використовується система фазового автопідстроювання частоти (ФАПЧ).

На рис. 1 зображено діаграми напруги керування  $u_s$ , вихідних напруги  $u$  та струму  $i$  інвертора при НЧ імпульсній модуляції. При НЧ модуляції час модуляції  $T_M$  та час ввімкненого  $t_{ON}$  чи вимкненого  $t_{OFF}$  стану зручно характеризувати цілими числами, що кратні періоду вихідної напруги інвертора  $T_0$ :  $T_M = sT_0$ ;  $t_{ON} = mT_0$ ;  $t_{OFF} = nT_0$ , де  $n = s - m$  – кількість періодів за час вимкненого стану  $t_{OFF}$ ;  $m$  – кількість періодів за час ввімкненого стану  $t_{ON}$ ;  $s$  – кількість періодів  $T_0$  за час модуляції  $T_M$ .

У більшості випадків, характерних для реальних технологічних навантажень, середнє значення струму по модулю при НЧ регулюванні можна визначити за формулою [6]

$$I_{сep} = \frac{2U_{m(1)}\gamma}{\pi R}, \quad (1)$$

де  $U_{m(1)}$  – амплітуда першої гармоніки вихідної напруги;  $\gamma = \frac{t_{ON}}{T_M} = \frac{m}{s} \leq 1$  – коефіцієнт заповнення модульованої напруги.

НЧ-ШІМ та НЧ-ЧІМ мають свої переваги та недоліки. Тому стоїть задача розробки оптимальних способів регулювання та стабілізації струму інвертора при змінних параметрах регулювання  $n$ ,  $m$ ,  $s$ , що дасть змогу покращити характеристику регулювання вихідного струму інвертора при широкому діапазоні зміни параметрів навантаження [4, 6, 7].



$$I_{a \min}^* (m, s) = \frac{I_{a \min}}{U_{m(1)}/R} = \frac{1 - e^{-\frac{\pi}{Q}m}}{1 - e^{-\frac{\pi}{Q}s}} e^{-\frac{\pi}{Q}(s-m-1/4)}; \quad (2)$$

$$I_{a \max}^* (m, s) = \frac{I_{a \max}}{U_{m(1)}/R} = 1 - \left( \frac{1 - e^{-\frac{\pi}{Q}(s-m)}}{1 - e^{-\frac{\pi}{Q}s}} \right) e^{-\frac{\pi}{Q}(m-1/4)}; \quad (3)$$

$$\square I_a^* (m, s) = 1 - \frac{e^{-\frac{\pi}{Q}m} - 2e^{-\frac{\pi}{Q}s} + e^{-\frac{\pi}{Q}(s-m)}}{1 - e^{-\frac{\pi}{Q}s}} e^{\frac{\pi}{4Q}}, \quad (4)$$

побудуємо залежності відносних максимальної  $I_{a \max}^*$ , мінімальної  $I_{a \min}^*$  амплітуди струму та різниці між ними  $\square I_a^*$  для  $\gamma_{\text{дозв}}$  при  $R = \text{const}$ ,  $Q = \frac{\sqrt{L/C}}{R} = 5$ ,  $s \in [0 \dots 10]$ ,  $m \in [0 \dots s]$  (рис. 2–4 відповідно).

З рис. 2–4 видно, що для одного значення  $\gamma$  можливі різні значення  $I_{a \max}^*$ ,  $I_{a \min}^*$  та  $\square I_a^*$ . Як було зазначено вище, для одного значення  $\gamma$  при різних комбінаціях  $(m, s)$  слід вибирати таку комбінацію, при якій  $n$  буде меншим, оскільки у такому випадку буде меншим значення амплітуди НЧ пульсації струму  $\square I_a^*$ .

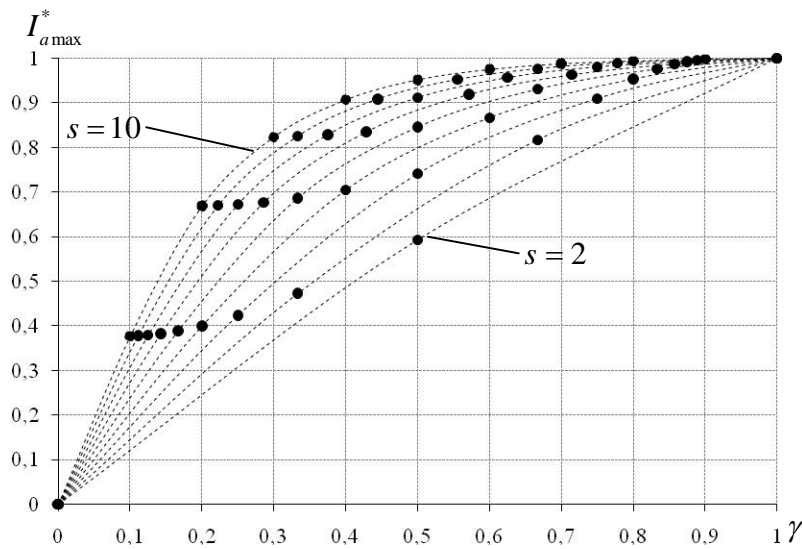


Рис. 2

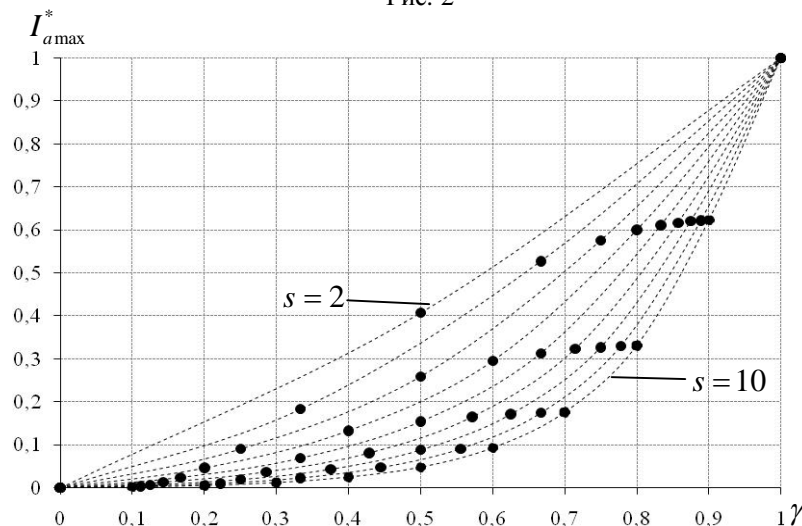


Рис. 3

На рис. 5 показано графіки залежності  $I_{a \max}^*$ ,  $I_{a \min}^*$  та  $\square I_a^*$  від  $\gamma$  у режимі регулювання вихідного струму інвертора, коли при можливих різних комбінаціях  $m, s$  для одного і того ж значення  $\gamma$  перевага надавалась комбінації з меншим значенням  $n$ .

Розглянемо режим обмеження максимального  $I_{\text{сеп}}$  при зменшенні опору навантаження від  $R_{\text{л}}$  до  $R_{\text{к}}$ . Для прикладу приймемо такі значення параметрів еквівалентної схеми заміщення навантаження інвертора:  $R_{\text{л}} = 0,04 \text{ Ом}$ ,  $L = 0,485 \text{ мкГн}$ ,  $C = 12 \text{ мкФ}$ ,  $Q_{\text{л}} = 5$ , частота роботи інвертора  $f = 66 \text{ кГц}$ . Вважатимемо, що початковий активний опір схеми заміщення навантаження інвертора  $R_{\text{л}}$ , якому буде відповідати  $\gamma = 1$ , у процесі технологічного нагріву зменшується до кінцевого опору  $R_{\text{к}}$ .

Формули (2)–(4) для цього режиму матимуть такий вигляд:

$$I_{a \min}^*(m, s) = \frac{s}{m} \left[ \frac{1 - e^{-\frac{\pi m^2}{Q_n s}} e^{-\frac{\pi m}{Q_n s} \left(s - m - \frac{1}{4}\right)}}{1 - e^{-\frac{\pi}{Q_n} m}} \right]; \quad (5)$$

$$I_{a \max}^*(m, s) = \frac{s}{m} \left[ 1 - \frac{\left(1 - e^{-\frac{\pi m}{Q_n s} (s-m)}\right) e^{-\frac{\pi m}{Q_n s} \left(m - \frac{1}{4}\right)}}{1 - e^{-\frac{\pi}{Q_n} m}} \right]; \quad (6)$$

$$\square I_a^*(m, s) = \frac{s}{m} \left[ 1 - \frac{\left( e^{-\frac{\pi m^2}{Q_n s}} - 2e^{-\frac{\pi m}{Q_n} m} + e^{-\frac{\pi m}{Q_n s} (s-m)} \right) e^{-\frac{\pi m}{Q_n s} \left(\frac{1}{4}\right)}}{1 - e^{-\frac{\pi}{Q_n} m}} \right]. \quad (7)$$

На рис. 6 зображено графіки залежності  $I_{a \max}^*$ ,  $I_{a \min}^*$  та  $\square I_a^*$  у режимі обмеження максимального  $I_{сеп}$  від відносного опору навантаження  $R^* = \frac{R}{R_{II}}$ , коли при можливих різних

комбінаціях  $m$ ,  $s$  для одного і того ж значення  $\gamma$  перевага надавалась комбінації з меншим значенням  $n$ .

З рис. 5 та 6 видно, що мінімальна та максимальна амплітуди струмів можуть суттєво відрізнятись від амплітуди при  $R_{II}$  (чому відповідає  $R^* = 1$ ). Так, максимальна амплітуда струму буде в режимі обмеження максимального значення  $I_{сеп}$ , мінімальна – у режимі регулювання, а при відсутності необхідності в регулюванні струму навантаження – у режимі обмеження максимального  $I_{сеп}$ .

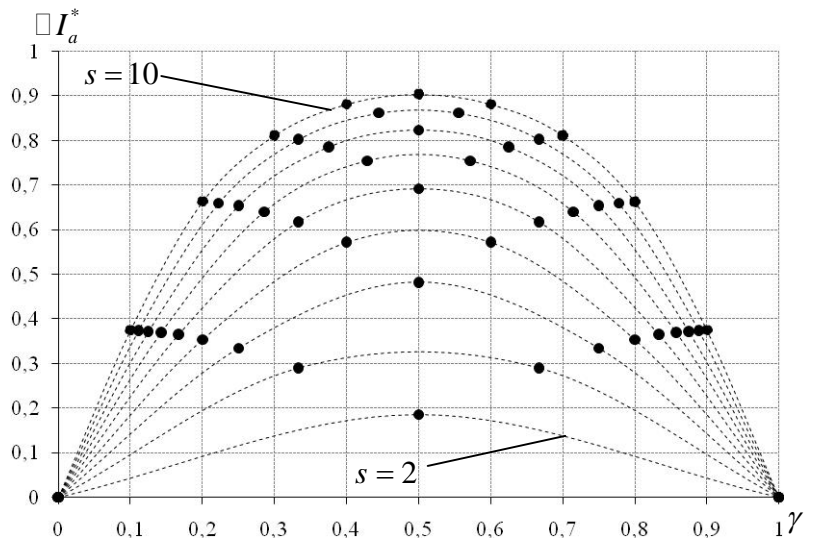


Рис. 4

Обмежимося мінімальною амплітудою струму на рівні  $I_{a \min}^* \geq 0,3$  та максимальною амплітудою на рівні  $I_{a \max}^* \leq 1,5$ .

Для обмеження мінімальної амплітуди струму на рівні  $I_{a \min}^* \geq 0,3$  при необхідності регулювання струму навантаження можна скористатися виразом (2), а у випадку, коли не потрібне регулювання струму навантаження, – виразом (5). Підставляючи у вирази (5) комбінації  $m$  та  $s$ , можна визначити  $I_{a \min}^*$ . Якщо значення амплітуд для певної комбінації  $m$  та  $s$  не задовольняє прийнятому обмеженню, таку комбінацію слід виключити. Такий спосіб перевірки комбінацій  $m$  та  $s$  вимагає багато математичних обчислень, оскільки кожен комбінацію  $m$  та  $s$  потрібно перевірити.

Використовуючи вираз (2), можна отримати залежність максимально допустимого значення  $n$  від заданих допустимих мінімальної амплітуди струму  $I_{a \min}^*$  та максимального значення  $s$ :

$$n(I_{a \min}^*, s) \leq -\frac{Q_{\min}}{\pi} \ln \left[ I_{a \min}^* \left( 1 - e^{-\frac{\pi}{Q_{\min}} s} \right) e^{-\frac{\pi}{Q_{\min}} \left(\frac{1}{4}\right)} + e^{-\frac{\pi}{Q_{\min}} s} \right]. \quad (8)$$

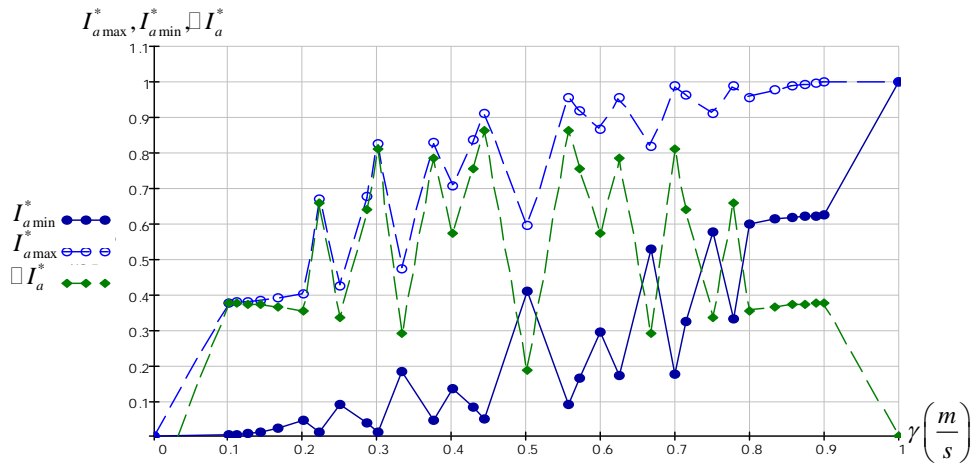


Рис. 5

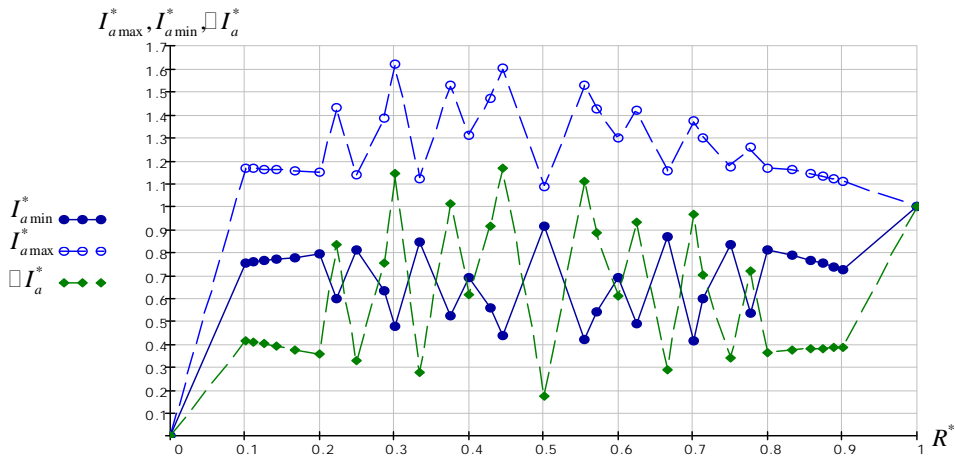


Рис. 6

Вираз (8) дає змогу спростити ряд математичних обчислень.

Підставляючи у вираз (6) вибрані комбінації  $m$  та  $s$ , визначаємо  $I_{a\max}^*$ . Якщо значення амплітуд для певної комбінації  $m$  та  $s$  не задовольняють прийнятим обмеженням, таку комбінацію слід виключити.

Залежність максимально допустимого значення  $n$  від заданих  $I_{a\min}^*$ ,  $I_{a\max}^*$  та максимального значення  $s$  у режимі обмеження максимального струму навантаження є трансцендентною, що не дає змоги спростити ряд математичних операцій.

На рис. 7 та 8 показано залежність  $I_{a\min}^*$  від коефіцієнта заповнення модульованої напруги  $\gamma$  у режимі регулювання  $I_{сер}$  та залежність  $I_{a\max}^*$  від  $R^*$  у режимі обмеження максимального середнього за модулем вихідного струму інвертора з урахуванням прийнятих обмежень щодо рівня мінімальної та максимальної амплітуд.

З рис. 7, 8 видно, що мінімальна та максимальна амплітуди струму обмежені на певних рівнях. Для такого обмеження деякі комбінації  $m$  та  $s$  було виключено. Всі спільні комбінації  $m$  та  $s$  для  $I_{a\min}^*$  у режимі регулювання  $I_{сер}$  та  $I_{a\max}^*$  у режимі обмеження максимального значення  $I_{сер}$  – є дозволеними точками  $\gamma_{дозв}$  характеристики регулювання, які можливо використовувати при вказаних параметрах еквівалентної схеми заміщення навантаження інвертора.

Характеристику регулювання відносного значення  $I_{сер}^*$  від  $\gamma_{дозв}$  наведено на рис. 9.

Для забезпечення більш рівномірного кроку дискретизації деякі комбінації  $m$  та  $s$  можна виключити, а комбінуванням двох сусідніх  $\gamma_{дозв}$  отримати нові точки характеристики

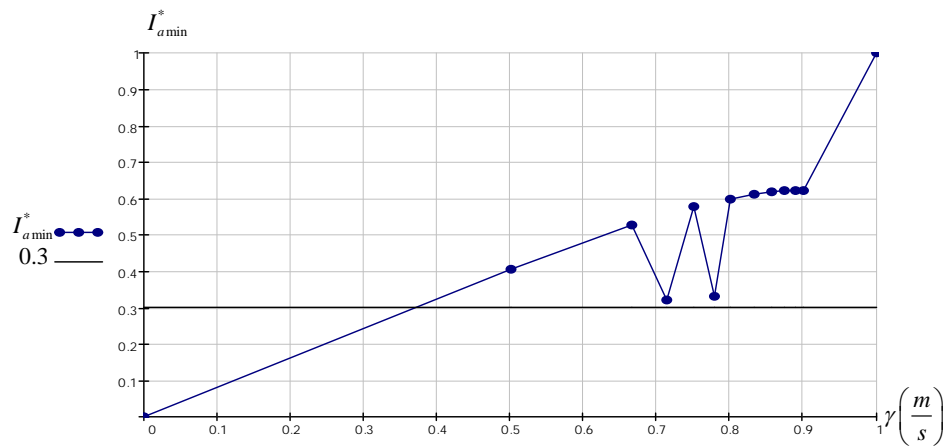


Рис. 7

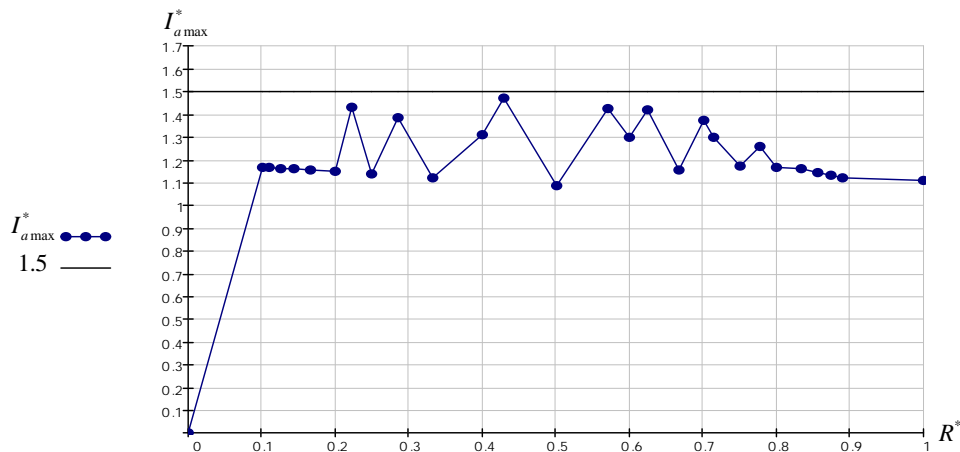


Рис. 8

регулювання. Однак не можна використовувати для комбінування точки характеристики регулювання, сума  $s$  яких буде більшою за  $s_{\max}$ .

Виходячи з попереднього, можна виділити такі критерії вибору параметрів НЧ імпульсної модуляції  $n$ ,  $m$ ,  $s$ :

- збільшення мінімальної та зменшення максимальної амплітуд струму на виході інвертора (максимальне значення струму через транзистори інвертора; амплітуда пульсації напруги на компенсуючих конденсаторах);
- збільшення частоти розмаху пульсації струму;
- зменшення кроку дискретизації та забезпечення його рівномірності.

При виборі параметрів НЧ модуляції  $n, m, s$  треба враховувати необхідність у регулюванні вихідного струму інвертора.

На основі результатів проведеного аналізу розроблено метод визначення параметрів НЧ імпульсної модуляції. Суть його полягає у наступному.

I. Задаються вхідні дані.

1. Параметри еквівалентної схеми заміщення навантаження інвертора ( $R_{\max}$ ,  $L$ ,  $C$ ), де  $R_{\max}$  визначає максимальний активний опір,  $L$  – індуктивність,  $C$  – ємність еквівалентної схеми заміщення навантаження інвертора. Оскільки протягом технологічного процесу індуктивність та ємність еквівалентної схеми заміщення навантаження інвертора в більшості випадків змінюються менше у порівнянні з активним опором, при виборі параметрів НЧ імпульсної модуляції можна вважати  $L=const$ ,  $C=const$ .

2. Відносні мінімальна  $I_{amin}^*$  та максимальна  $I_{amax}^*$  амплітуди струму на виході інвертора, виходячи з технологічних вимог до пульсації вихідного струму інвертора, бажаного макси-

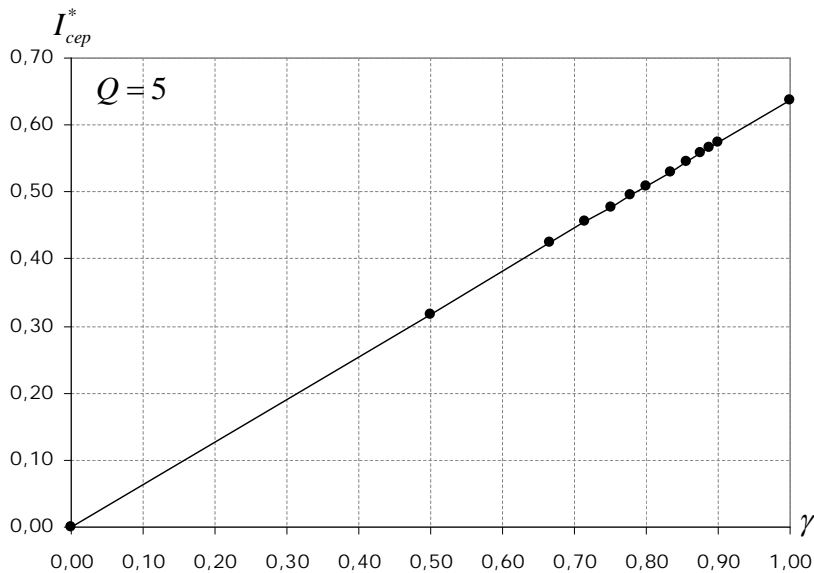


Рис. 9

боти інвертора  $f = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$ .

2. Максимальне допустиме значення  $s_{\max.\text{дон}}$  (кількість періодів  $T_0$  за час модуляції  $T_M$ ).  $s_{\max.\text{дон}}$  визначається виходячи з того, що для високочастотних систем індукційного нагрівання симетричні складові струму, що споживається, низького порядку мають задовольняти вимогам ДСТУ ІЕС 61000-3-2-2004, в якому зазначено, що частота гармоніки має бути не меншою 40-ї гармоніки частоти мережі живлення [1–3]. Тобто для мережі частотою 50 Гц частота НЧ імпульсної модуляції має бути  $f_{\min\text{НЧ}} > 2$  кГц. Тому слід обирати  $s_{\max}$  так, щоб виконувалась умова  $s_{\max} \leq s_{\max.\text{дон}}$ . При великих значеннях  $s_{\max}$  кількість комбінацій параметрів НЧ імпульсної модуляції може призвести до збільшення кількості математичних обчислень, що спричинить зниження швидкодії системи керування. Також при деяких значеннях  $s_{\min\text{НЧ}}$  може знаходитись у звуковому діапазоні. Тому бажано обирати  $s_{\max}$  так, щоб виконувались умови  $f_{\min\text{НЧ}} \geq 20$  кГц. Задатись діапазоном зміни  $s \in [0...s_{\max}]$ .

3. Таблиця значень  $\gamma_{\text{дозв}}$ , які визначаються співвідношеннями  $s \in [0...s_{\max}]$  та  $m \in [0...s]$ .

4. У випадку коли для одного  $\gamma_{\text{дозв}}$  можливі декілька різних комбінацій  $m$  та  $s$ , із побудованої таблиці слід виключити такі комбінації  $(m, s)$ , за яких  $n=s-m$  буде більшим.

III. Проводиться перевірка визначених параметрів НЧ імпульсної модуляції на відповідність прийнятим обмеженням.

1. Якщо немає необхідності у регулюванні струму навантаження, перейти до п. III.2, інакше, використовуючи вираз (8), визначити максимально допустимі значення  $n$  від заданих допустимих  $I_{a\min}^*$  та значення  $s \in [0...s_{\max}]$ . Всі комбінації  $m$  та  $s$ , для яких не буде виконуватись умова виразу (8), слід виключити. Перейти до п. III.3.

2. Підставляючи в (5) комбінації  $m$  та  $s$  п. II визначити  $I_{a\min}^*$ . Якщо значення  $I_{a\min}^*$  для певної комбінації  $m$  та  $s$  не задовольняють прийнятим обмеженням, таку комбінацію слід виключити.

3. Підставляючи в (6) комбінації  $m$  та  $s$ , що задовольняють вимогам щодо обмеження  $I_{a\min}^*$ , визначити  $I_{a\max}^*$ . Якщо значення амплітуд для певної комбінації  $m$  та  $s$  не задовольняє прийнятим обмеженням, таку комбінацію слід виключити.

4. Для отримання більш рівномірного кроку дискретизації деякі комбінації  $m$  та  $s$  можна виключити, а нові точки характеристики регулювання можна отримати комбінуванням двох

мального амплітудного значення струму, що протікає через транзистори інвертора та мінімальної амплітуди струму на виході інвертора, що необхідна для роботи системи ФАПЧ.

3. Наявність чи відсутність необхідності регулювання вихідного струму.

II. Визначаються основні параметри НЧ імпульсної модуляції.

1. Мінімальна добротність коливального контура

$$Q_{\min} = \frac{\sqrt{L/C}}{R_{\max}}$$

та частота ро-

$\gamma_{\text{дозв}}$ . Однак не можна використовувати для комбінування точки характеристики регулювання, сума  $s$  яких буде більшою за  $s_{\text{max}}$ .

Отримані в результаті комбінації  $m$  та  $s$  визначають характеристику регулювання.

**Висновки.** Сформовано критерії вибору параметрів НЧ імпульсної модуляції для забезпечення необхідного технологічного процесу та мінімального розмаху НЧ пульсації струму навантаження.

Запропоновано метод визначення параметрів НЧ імпульсної модуляції для зменшення розмаху та збільшення частоти НЧ пульсації струму навантаження, збільшення мінімальної та зменшення максимальної амплітуд вихідного струму інвертора та забезпечення широкого діапазону регулювання.

1. *Електромагнітна сумісність. Частина 3-2. Норми. Норми на емісію гармонік струму (для сили вхідного струму обладнання не більше 16 А на фазу):* ДСТУ ІЕС 61000-3-2-2008. – [Чинний від 2008-12-01]. — К.: Держспоживстандарт України. – (Національний стандарт України).
2. *ГОСТ Р 51317.3.2-2006. Совместимость технических средств. Электромагнитная эмиссия гармонических составляющих тока техническими средствами с потребляемым током не более 16 А (в одной фазе). Нормы и методы испытаний.*
3. *Electromagnetic compatibility (EMC) – Part 3-2: Limits – Limits for harmonic current emissions (equipment input current Less than or equal to 16 A per phase) – ІЕС 61000-3-2 Harmonics Standards Overview.*
4. *Герасименко П.Ю.* Транзисторний інвертор напруги для установок індукційного нагріву з НЧ імпульсною модуляцією та мікропроцесорною системою // Пр. Ін-ту електродинаміки НАН України: Зб. наук. праць. – К.: ІЕД НАН України. – 2009. – Вип. 24. – С. 105–110.
5. *Гельман М.В., Лохов С.П.* Тиристорные регуляторы переменного напряжения. – М.: Энергия, 1975. – 104 с.
6. *Юрченко М.М., Гуцалюк В.Я., Шевченко П.М., Герасименко П.Ю., Слесаревський І.О.* Низькочастотні способи регулювання струму транзисторних інверторів напруги установок індукційного нагріву // Пр. Ін-ту електродинаміки НАН України: Зб. наук. пр. – К.: ІЕД НАН України. – 2007. – Вип. 18. – С. 108–111.
7. *Юрченко М.М., Гуцалюк В.Я., Шевченко П.М., Герасименко П.Ю.* Транзисторні інвертори напруги установок індукційного нагріву з НЧ імпульсною модуляцією в режимі стабілізації струму навантаження // Техн. електродинаміка. Тем. вип. “Проблеми сучасної електротехніки”. – 2008. – Ч. 2. – С. 109–112.

УДК 621.314

**О.Н. Юрченко<sup>1</sup>**, докт. техн. наук, **В.Я. Гуцалюк<sup>2</sup>**, канд. техн. наук, **П.Ю. Герасименко<sup>3</sup>**, канд. техн. наук, **І.О. Слесаревський<sup>4</sup>**, вед. инж.

1–4 – Ін-т електродинаміки НАН України, пр. Перемоги, 56, Київ-57, 03680, Україна

**Метод определения параметров НЧ импульсной модуляции для системы управления транзисторных инверторов напряжения установок индукционного нагрева**

*Рассмотрен транзисторный инвертор напряжения для установок индукционного нагрева с низкочастотной (НЧ) импульсной модуляцией, проведен анализ выбора параметров НЧ импульсной модуляции. Определены критерии выбора и предложен метод определения параметров НЧ импульсной модуляции.* Библ. 7, рис. 9, таблица.

**Ключевые слова:** транзисторный преобразователь, инвертор напряжения, низкочастотная импульсная модуляция, установки индукционного нагрева, метод определения параметров.

**O.M. Yurchenko<sup>1</sup>, V.Ya. Gutsalyuk<sup>2</sup>, P.Yu. Herasymenko<sup>3</sup>, I.O. Sliesarevskiy<sup>4</sup>**

1–4 – Institute of electrodynamics of NAS of Ukraine, Peremogy, 56, Kyiv-57, 03680, Ukraine

**A method of parameters' defining of LF pulse modulation for a control system of voltage transistor converters for induction heating equipment**

*A voltage transistor converter for induction heating equipment with low frequency (LF) pulse modulation was considered, the analysis of appropriate parameters' selection of LF pulse modulation was carried out. It is defined criterions for selection of said parameters and it is proposed a method for defining parameters of LF pulse modulation.* References 7, figures 9, table.

**Key words:** transistor converter, voltage inverter, low frequency pulse modulation, induction heating equipment, parameters' selecting method.

Надійшла 27.12.2011

Received 27.12.2011