

## Принцип построения системы управления резонансным инвертором тока тиристорного преобразователя частоты для индукционного нагрева металлов

*Рассматривается принцип построения самонастраиваемой системы управления резонансным инвертором тока путем его самовозбуждения.*

При работе тиристорного преобразователя повышенной частоты (ТПЧ) для питания установок индукционного нагрева металлов и сплавов токами повышенной частоты в большинстве случаев возникает необходимость согласования частоты выходного напряжения инвертора с его индукционной нагрузкой, параметры которой могут изменяться в широких пределах. При пуске ТПЧ необходимое значение частоты инвертора чаще всего заранее неизвестно, оно устанавливается экспериментально в период запуска преобразователя, а затем регулируется при изменении эквивалентных параметров индукционной нагрузки с учетом условий и требований технологического процесса нагрева металлов. Соотношение между рабочей частотой инвертора и частотно-зависимыми параметрами его нагрузочного контура (НК) определяет энергетический режим работы ТПЧ. Поэтому частотное управление используется для регулирования мощности ТПЧ или для нахождения ее максимума, зависящего от параметров нагрузки и частоты инвертора [1, 2].

Обычно, для формирования импульсов управления тиристорами резонансных инверторов применяется задающий генератор с регулируемой частотой выходных импульсов, частота которых, (а, следовательно, и частота инвертора), устанавливается оператором или задается системой управления электротермической установки. Частота импульсов управления тиристорами инвертора зависит от входного сигнала задающего генератора (ЗГ), который осуществляет возбуждение инвертора независимо от проходящих в нем электромагнитных процессов.

Независимое возбуждение может применяться во всех без исключения типах инверторов. Помимо независимого возбуждения инверторов при построении систем управления применяется зависимое возбуждение, называемое самовозбуждением [3], позволяющее производить «самонастройку» ТПЧ с неизвестными и изменяющимися параметрами его нагрузки.

Известен ряд принципов построения и схемных решений для реализации способа самовозбуждения параллельных инверторов тока в источниках питания повышенной частоты электротехнологических установок [3, 4]. В то же время, несмотря на широкое внедрение схем резонансных инверторов тока при создании ТПЧ для питания электротермических установок не уделено должного внимания принципам построения систем управления резонансными инверторами тока с использованием самовозбуждения.

Процессы изменения во времени тока, протекающего через элементы схемы инвертора, представляя собой автоколебания, в процессе которых между моментами подачи импульсов управления на тиристоры инвертора отсутствует управляющее воздействие на колебательные процессы. Период этих колебаний и длительность его отдельных интервалов зависят от параметров реактивных элементов схемы инвертора и эквивалентных параметров НК. Таким образом, момент подачи очередного импульса управления на тиристоры инвертора можно установить по длительности межкоммутационного интервала при автоколебаниях. При этом удается осуществить самовозбуждение (ЗГ), при котором рабочая частота инвертора будет устанавливаться и изменяться автоматически при изменениях параметров нагрузки.

Целью статьи является разработка принципа построения систем управления резонансным инвертором с самовозбуждением, реализация которого позволит осуществлять самонастройку ТПЧ.

Рассмотрим, рис. 1, а одну из наиболее распространенных схем резонансных инверторов удвоения частоты с диодами встречного тока, используемую при построении ТПЧ для питания установок индукционного нагрева металлов [3], и соответствующие ей типовые временные диаграммы токов, протекающих через тиристоры и диоды инвертора для некоторого режима его работы, показанные на рис 1, б. Цифровые значения индексов в обозначениях токов, напряжений и импульсов управления на рис. 1 соответствуют нумерации вентилях на схеме.

Как следует из анализа временных диаграмм токов для вентилях инвертора, в рассматриваемом режиме прерывистого тока ( $\Delta t_{II} > 0$ ) период следования импульсов управления  $T$  складывается из отдельных интервалов времени протекания токов:

$$T = \Delta t_T + \Delta t_D + \Delta t_{II}. \quad (1)$$

через тиристоры  $\Delta t_T$ , диоды  $\Delta t_D$  и межкоммутационной паузы  $\Delta t_{II}$  соответственно).

Длительность интервала прохождения тока через тиристоры  $\Delta t_T$  зависит от значений элементов контура коммутации, в который (помимо элементов схемы инвертора  $C_K$ ,  $C_P$  и  $C_{K1}$ , и  $C_{K2}$ ) входит НК, образованный элементами индукционной нагрузки  $R_H$ ,  $L_H$  (с па-

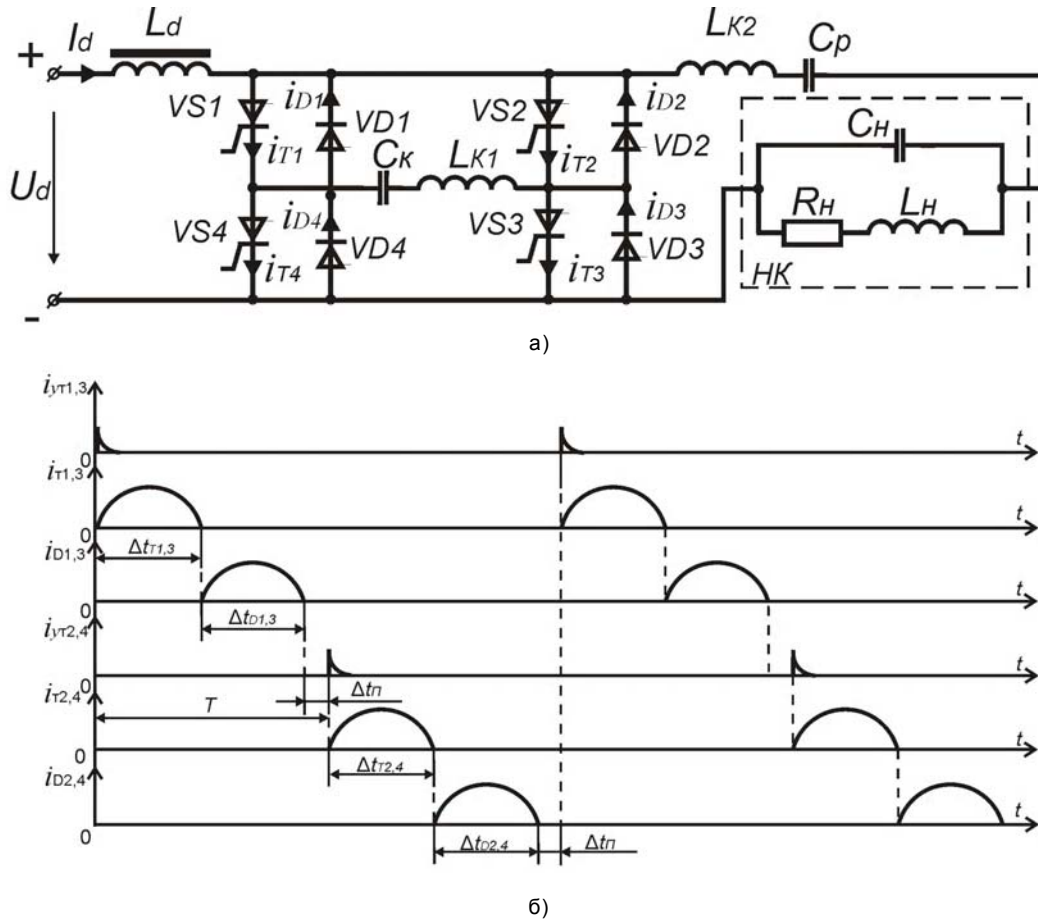


Рис. 1. Схема резонансного инвертора с удвоением частоты и диодами встроенного тока (а) и временные диаграммы токов, протекающих через вентили (б)

раллельно подключенной к ней компенсирующей емкостью  $C_H$ ). Очевидно, что нагрузка индуктора электротермической установки определяется свойствами нагреваемого металла. Изменение эквивалентных параметров нагрузки в период нагрева металла будет приводить к изменению длительности интервала  $\Delta t_T$  (а, следовательно, – периода  $T$ ).

Момент подачи очередного импульса управления  $i_{yT}$  рис. 1, б, можно прогнозировать по длительности  $\Delta t_T$  прохождения тока через тиристор после его включения, измеряя этот временной интервал и определяя последующую задержку во времени до подачи очередного импульса. При этом можно формировать режим прерывистого тока инвертора с межкоммутационной паузой  $\Delta t_{\Pi}$  или режим непрерывного тока с повторным отпиранием обратных диодов без паузы [3].

Период  $T$  (определяющий время между моментами подачи импульсов управления на тиристоры инвертора) можно описать функциональной зависимостью:

$$T = f[(1 + K) \cdot \Delta t_T], \quad (2)$$

где  $K$  – коэффициент управления, значение которого определяет (при внешнем регулирующем воздействии) длительность периода  $T$  и режим работы ин-

вертора. При  $K > 1$  инвертор явно будет работать в режиме прерывистого тока (то есть – с появлением межкоммутационной паузы  $\Delta t_{\Pi} > 0$ ). При  $K < 1$  возможен режим непрерывного тока ( $\Delta t_{\Pi} = 0$ ) с повторным отпиранием обратных диодов.

Рассмотрим один из предлагаемых способов построения системы управления тиристорами инвертора с самовозбуждением с регулирующим воздействием, показанный на рис. 2 и названный «наклонным».

В момент времени  $t = 0$  системой управления производится подача импульса управления  $i_{yT1,3}$  на управляющие электроды тиристоров VS1 и VS3 на рис. 1, а, в результате чего протекает полуволна тока  $i_{T1,3}$  через эти тиристоры в течение интервала времени  $\Delta t_{T1,3}$ . Одновременно системой управления инвертором формируется положительная полуволна опорного напряжения стабилизированной амплитуды  $u_{оп1,3}$  (равная длительности полуволны этого тока). Интегрирование опорного напряжения во времени приводит к формированию на выходе интегратора напряжения  $u_{и1,3}$ , которое достигает максимума  $u_{иmax1,3}$  в момент окончания протекания тока через тиристоры VS1, VS3. В этот же момент появляется ток диодов VD1, VD3, а системой управления опорное напряжение устанавливается отрицательным (но такой же по величине стаби-

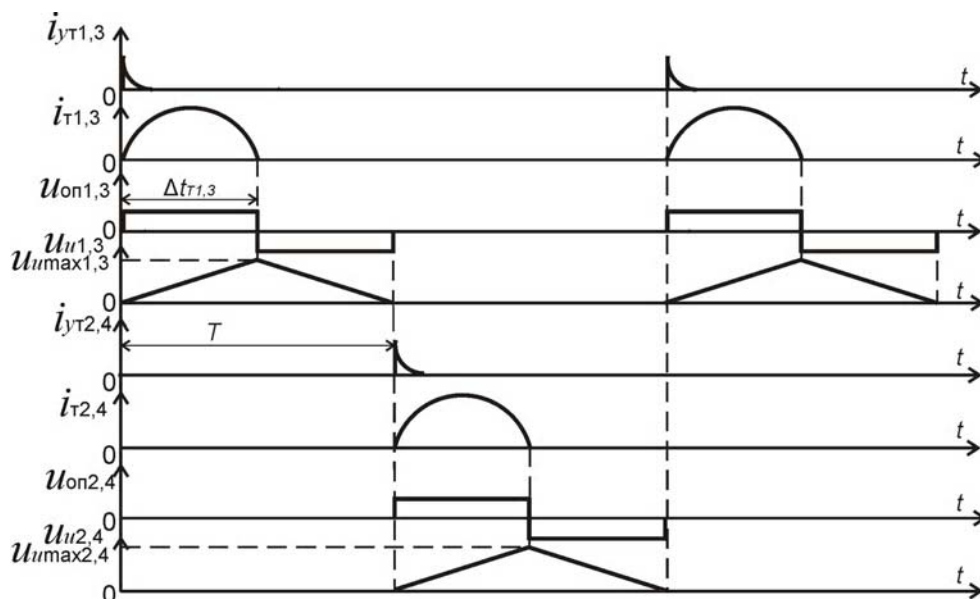


Рис. 2. Временные диаграммы, поясняющие «наклонный способ» формирования импульсов управления тиристорами инвертора при самовозбуждении

лизированной амплитуды  $u_{оп1,3}$ ). После этого интегратором производится снижение выходного напряжения  $u_{и1,3}$  с темпом, зависящим от значения коэффициента управления  $K$ . По истечении времени, когда это напряжение станет равным нулю, формируется импульс управления  $i_{yT2,4}$  для включения очередных тиристоров VS2 и VS4. Затем, аналогично предыдущему алгоритму, выполняется формирование импульса управления  $i_{yT1,3}$  тиристорами VS1 и VS3.

После прохождения полуволны тока через тиристоры VS1, VS3 и достижения напряжением на выходе интегратора значения  $u_{иmax1,3}$ , напряжение на его выходе изменяется во времени согласно соотношения:

$$u_{и1,3}(t) = u_{иmax1,3} \left( 1 - \frac{t - \Delta t_T}{K \cdot \Delta t_T} \right), \quad (3)$$

достигая нулевого значения по истечении времени  $T$  (начиная с момента подачи импульса управления  $i_{yT1,3}$ ). Тогда, согласно (3), получим:

$$T = \Delta t_T \cdot (1 + K), \quad (4)$$

что будет соответствовать функциональной зависимости (2).

Изменение периода следования импульсов управления тиристорами инвертора при самовозбуждении с регулированием от внешнего воздействия его длительности может быть также осуществлен «вертикальным способом». Суть способа заключается в добавлении на втором этапе интегрирования к напряжению  $u_{иmax}$  на рис. 3 отрицательного опорного напряжения (соответствующего дополнительному сигналу управления), пропорционального значению  $Ku_{иmax}$ . В этом случае после момента времени  $\Delta t_T$  напряжение на выходе интегратора будет изменяться во времени:

$$u_{и} = u_{иmax} \left( 1 + K - \frac{t - \Delta t_T}{\Delta t_T} \right), \quad (5)$$

достигая нулевого значения в момент времени  $t = T$ . Согласно (5) справедливо:

$$T = \Delta t_T \cdot (2 + K). \quad (6)$$

Таким образом, период подачи импульсов управления (а, следовательно, и рабочая частота инвертора) в обоих случаях определяется длительностью полуволны тока через тиристор и коэффициентом управления  $K$ , изменение которого можно производить непрерывно внешним регулирующим воздействием (за счет соответствующих схемных решений при построении системы управления инвертора).

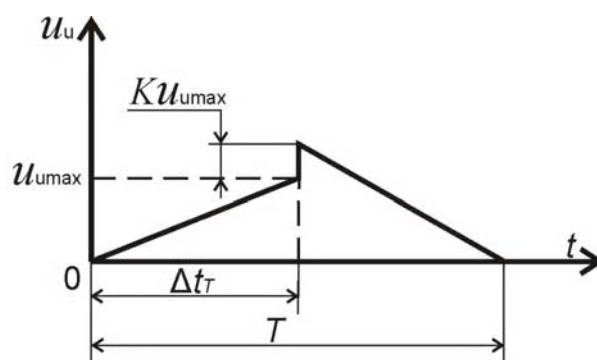


Рис. 3. Временная диаграмма, поясняющая «вертикальный способ» формирования импульсов управления тиристорами инвертора при самовозбуждении

При самовозбудженні існує можливість самонастроїки необхідної робочої частоти інвертора і змінення його режиму роботи (в залежності від контролююваних величин: потужності, напруги на навантаженні, струму в навантаженні, фазового зсуву між струмом і напругою і т. п.). Для цього в систему управління слід ввести зворотні зв'язки по відповідним контролююваним величинам. Фрагмент схеми такої замкнутої системи управління приведений на рис. 4.

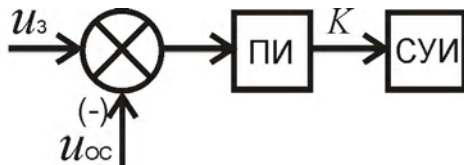


Рис. 4. Фрагмент схеми побудови замкнутої системи управління інвертором з самовозбудженням

Заданий сигнал контролююваної величини  $u_3$  поступає на вхід пристрою, порівнюється з сигналом зворотної зв'язки  $u_{oc}$  контролююваної величини. Сигнал зворотної зв'язки  $u_{oc}$  повинен відповідати рівню заданого сигналу  $u_3$ . Різниця між цими сигналами подається на вхід ПІ-регулятора, який має передаточну функцію:

$$W_P(p) = \frac{1}{T_0 p} + \frac{T_1}{T_0} \quad (7)$$

Так як процес нагріву металу характеризується повільним зміненням еквівалентних параметрів індукційного навантаження в часі (час нагріву становить зазвичай 1 ÷ 40 хв), а перехідні процеси в ТПЧ підвищеної частоти протікають в середньому не довше ніж за (40–60) мс, то к ПІ-регулятору не пред'являються вимоги високого швидкодії. Постійна часу  $T_0$  може бути прийнята з умови:  $T_0 \geq 0,1$  с., а постійна  $T_1$  – співвідношення:

$$T_1 = k_y \cdot T_0, \quad (8)$$

де  $k_y$  – коефіцієнт посилення, який залежить від співвідношення між сигналом задання і входним напругою системи управління інвертором (СУИ)  $u_{вх}$  СУИ, визначаючим необхідне змінення коефіцієнта управління  $K$ ,

$$k_y = \frac{u_{вх} \text{ СУИ}}{u_3} \quad (9)$$

Наявність інтегруючої складової в передаточній функції ПІ-регулятора забезпечує нульову статичну помилку при регулюванні в будь-якому діапазоні змінення коефіцієнта управління  $K$ .

Необхідно відзначити, що змінення коефіцієнта управління  $K$  призводить до змінення не тільки частоти інвертора, але і – комутаційних режимів роботи інвертора, гармонічного складу його вихідних напруг і струму, що може викликати небажані режими роботи ТПЧ в цілому. Тому при побудові системи управління з самовозбудженням необхідно враховувати можливість появи таких режимів роботи інвертора, вводячи в систему управління додаткові ланки, виключаючі їх появу.

**Висновок.** Представлений принцип побудови системи управління резонансним інвертором з самовозбудженням дозволяє створювати самонастроювані частотно-регульовані системи, що спрощує налаштування тиристорних перетворювачів частоти і надає їм адаптивні властивості до змінення параметрів навантаження.

### Перелік посилань

1. Ушаков В. А., Саратовський Р. Н., Глебин А. Г. Сравнительный анализ эффективности введения экстремального регулятора в индукционную плавильную установку с тиристорным преобразователем частоты // Збірник наукових праць. – Миколаїв: НУК. – 2004. – № 3 (396). – С. 155–160.
2. Саратовський Р. Н., Глебин А. Г., Ушаков В. Н. Экстремальный регулятор для управления тиристорным преобразователем частоты при плавке металлов в индукционной печи // Електротехніка і електроенергетика. – 2004. – № 2. – С. 55–60.
3. Тиристорные преобразователи повышенной частоты для электротехнологических установок / Е. И. Беркович, Г. В. Ивенский, Ю. С. Иоффе, В. В. Моргунов. – 2-е изд., перераб. и доп. – Л.: Энергоатомиздат. Ленинград. отд-ние. 1983. – 208 с.
4. Р. Н. Саратовський, А. Г. Глебин, В. И. Ушаков, Т. И. Прончатова. Частотно-независимое фазосдвигающее устройство // Вісник СХУ ім. В. Даля. – 2003. – №6 (64). – С.9–15.

Поступила в редакцію 28.09.07 г.

Після доработки 15.11.07 г.

*Розглядається принцип побудови самонастроюваної системи керування резонансним інвертором струму шляхом його самозбудження.*

*It is considered the principle of the construction of the self-tuning operating system by resonance inverter of the current by means of its self-excitation.*