

ДИСКРЕТНИ МОДЕЛ НА МОЩНИ ПОЛУПРОВОДНИКОВ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛ

доц.ктн. Мария Любенова Ђобчева
Технически университет – София

Създаването на дискретни модели на мощни полупроводникови преобразуватели се обуславя от самата същност на електромагнитните процеси в тях [1,2]. Основното предимство на дискретния модел пред непрекъснатия е, че допуска аналитично решение, като позволява пълно и бързо изследване на преходните и установените процеси в преобразувателя.

В настоящата работа се описва дискретен модел на паралелно-последователния инвертор ПШИ, показан на фиг. 1 а. Той е един от тиристорните преобразуватели, чието изследване представлява интерес както от гледна точка на използването му в практиката като мощен източник на високочестотна енергия, така и от теоретична гледна точка поради особеностите му, разглеждан като импулсна система. Предложеният модел във вид на дискретни функции е подходящ за изследването както на ПШИ, така и на паралелните инвертори ПИ, работещи с непрекъснат входен ток. От тази гледна точка моделът има известна универсалност.

Дискретният модел е създаден на базата на теорията на импулсните системи [3], като инверторната схема, работеща в режим на непрекъснат ток, е представена като отворена импулсна система от първи род. Основание за това дава самият принцип на действие на ПШИ с безкрайно голяма стойност на входния дросел L_d , а именно токът i в диагонала АВ на тиристорния мост при последователното превключване на тиристорните двойки 1,3 и 2,4 се получава с правоъгълна форма и амплитуда I_d , равна на постоянния входен ток /фиг. 1 б/, а периодът T се задава от системата за управление. Следователно анализът при пускане на инвертора може да се проведе, като се определи реакцията на веригата в диагонала на моста /кондензаторът C_1 и паралелно свързаните товар Z_T и комутиращ кондензатор C_2 / на въздействието на ток i с правоъгълна форма и честота $\omega = 2\pi/T$. За целта схемата на инвертора може да се представи като импулсна система, както е показано на фиг.2а. Отделните олокове имат следното предназначение:

ВВ - входно въздействие - представлява токът $i(t)$ с право - ъгълна форма, амплитуда I_d и честота ω ;

ФЕ - формиращ елемент - идеален импулсен елемент, който преобразува ВВ в последователност от мигновени импулси с относителен период на повторение, равен на 1 ;

НЧ - непрекъснатата част - електрическата верига в диагонала на инверторния мост, върху която въздействуват импулсите от ФЕ.

Реакцията $Z[n, \varepsilon]$ характеризира процеса в системата в дискретни моменти от време $n / n = 0, 1, 2, \dots /$, а при изменение на ε от 0 до 1 - и във всеки необходим момент от времето. $Z[n, \varepsilon]$ може да представлява $u[n, \varepsilon]$, $u_2[n, \varepsilon]$, $i_T[n, \varepsilon]$.

Входното въздействие е правоъгълно, поради което се поставя с дискретна косинусоидална функция:

$$/1/ \quad x[n] = I_d \cdot \cos \bar{\omega} n = I_d \cdot \cos \pi n = I_d \cdot (-1)^n,$$

където $\bar{\omega} = \omega T_0 = \omega T / 2$ е относителната честота на управление на тиристорния инвертор, а $T_0 = T / 2$ е тактът на дискретизация. При правоъгълна форма на ВВ, каквато е в случая, $\bar{\omega} = \pi$.

За определянето на изходната величина $Z[n, \varepsilon]$ се използва дискретното преобразуване на Лаплас. Съгласно теорията на импулсните системи образът $Z^*(q, \varepsilon)$ на $Z[n, \varepsilon]$ е равен на:

$$/2/ \quad Z^*(q, \varepsilon) = X^*(q) \cdot K^*(q, \varepsilon).$$

В /2/ $X^*(q)$ е образът на $x[n]$; $K^*(q, \varepsilon)$ е предавателната функция на импулсната система; $q = pT_0 = pT / 2$ е параметърът на дискретното преобразуване на Лаплас.

Образът на $x[n]$ се определя от израза:

$$/3/ \quad X^*(q) = I_d \frac{e^q}{1 + e^q}.$$

За определяне на предавателната функция на импулсната система $K^*(q, \varepsilon)$ е необходимо да се определи коефициентът на непрекъснатата част $K(q)$. В ШМ непрекъснатата част представлява пасивна електрическа верига /фиг. 2 а/. За случая, когато $Z_T = R$, за коефициента на предаване по отношение на напрежението u се намира, че

$$/4/ \quad K(q) = \frac{P(q)}{Q(q)} = \frac{R \frac{\pi B}{\pi} \left(1 + \frac{1 + \pi}{\pi B} q\right)}{q \cdot \left(1 + \frac{q}{\pi B}\right)} = \frac{P(q)}{q \cdot Q_1(q)},$$

където $B = 1/\omega CR$ е коефициент на товара - характерен параметър на инверторите на ток; $\alpha = \frac{C_1}{C_2}$; $Q_1(q) = 1 + \frac{q}{\pi B}$.

От /4/ следва, че коефициентът на предаване има един прост корен $q_1 = -\pi B$ и един нулев корен $q_2 = 0$. Това води до особености в определянето на $K^*(q, \varepsilon)$ и чрез него на $Z[n, \varepsilon]$. Като се използват съотношенията за този особен случай, разгледан в теорията на импулсните системи [3], за $Z[n, \varepsilon]$ се получава:

$$/5/ \quad z[n, \varepsilon] = I_d \left[K^*(j\pi, \varepsilon) e^{j\pi n} + \left(\frac{C_{01}}{2} - C_{10} \frac{1 - e^{-\pi B}}{1 + e^{-\pi B}} \right) e^{-\pi B(n+\varepsilon)} \right];$$

$$/6/ \quad K^*(j\pi, \varepsilon) = K^*(q, \varepsilon) q = j\pi;$$

$$/7/ \quad C_{01} = \frac{\pi B}{\alpha} R; \quad C_{10} = R.$$

След извършване на някои математически преобразувания в /5/ за изходното напрежение в относителни единици се получава:

$$/8/ \quad u'[n, \varepsilon] = \frac{u[n, \varepsilon]}{U_d} = A_1 (-1)^n \left(1 - \frac{\pi B}{2\alpha} + \frac{\pi B}{\alpha} \varepsilon - A_2 e^{-\pi B \varepsilon} \right) + A_1 \left(\frac{\pi B}{2\alpha} + A_3 \right) e^{-\pi B(n+\varepsilon)} = u'_{уст}[n, \varepsilon] + u'_{пр}[n, \varepsilon],$$

където $A_1 = \frac{1}{1 - \frac{2}{\pi B} A_3}$; $A_2 = \frac{2}{1 + e^{-\pi B}}$; $A_3 = th \frac{\pi B}{2}$.

Израз /8/ нагледно показва развитието на процеса след пускането на инвертора чрез двете съставки на напрежението $u'[n, \varepsilon]$ - установената $u'_{уст}[n, \varepsilon]$ и преходната $u'_{пр}[n, \varepsilon]$. Поради факта, че НЧ представлява пасивна електрическа верига, преходната съставка на $u'[n, \varepsilon]$ клони към 0 с нарастването на n , а установеният процес се определя от първата част на израз /8/ при $n \rightarrow \infty$:

$$/9/ \quad |u'_{уст}[n, \varepsilon]| = |u'[\infty, \varepsilon]| = A_1 \left(1 - \frac{\pi B}{2\alpha} + \frac{\pi B}{\alpha} \varepsilon - A_2 e^{-\pi B \varepsilon} \right).$$

Напрежението u' при $\varepsilon = 1$ определя за всеки полупериод големината на максималното право u'_{Dm} и обратно напрежение u'_{Rm} върху тиристорите:

$$/10/ \quad u'_{Dm} = u'_{Rm} = |u'[n, 1]| = A_1 \left[1 + \frac{\pi B}{2\alpha} - A_2 e^{-\pi B} + \left(\frac{\pi B}{2\alpha} + A_3 \right) e^{-\pi B n} \right].$$

За нормалната работа на тиристорите е необходимо да се осигурява схемно време за изключване t_{qs} . Това, както е известно от теорията на автономните инвертори [4], се постига благодарение

ние на капацитивния характер на НЧ /осигурява се ъгъл на изпреварване/. Определянето на t_{qs} за всеки полупериод от работата на инвертора става чрез решаването на трансцедентното уравнение:

$$/11/ \quad u' [n, \varepsilon_{qs}] = 0 \quad \text{за} \quad n = 1, 2, 3 \dots$$

Между времето за изключване в относителни единици t'_{qs} , реалното време t_{qs} и намерената от уравнение /11/ стойност на ε_{qs} съществува връзката:

$$/12/ \quad t'_{qs} = \frac{t_{qs}}{T/2} = \varepsilon_{qs}.$$

За напрежението върху товара u_2 / и върху кондензатора C_2 / в относителни единици е намерен изразът:

$$/13/ \quad u_2' [n, \varepsilon] = \frac{u_2 [n, \varepsilon]}{U_d} = A_1 [(-1)^n (1 - A_2 \cdot e^{-\pi B \varepsilon}) + A_3 \cdot e^{-\pi B (n + \varepsilon)}].$$

За установения режим / $n \rightarrow \infty$ / е в сила изразът:

$$/14/ \quad |u_{2уст}' [n, \varepsilon]| = |u_2' [\infty, \varepsilon]| = A_1 (1 - A_2 \cdot e^{-\pi B \varepsilon}).$$

Максималната стойност на u_2' се определя от израза:

$$/15/ \quad |u_{2max}' [n, \varepsilon]| = |u_2' [n, 1]| = A_1 (1 - A_2 \cdot e^{-\pi B} + A_3 \cdot e^{-\pi B n}).$$

Изрази /13/, /14/ и /15/ са в сила и за изследването на паралелния инвертор на ток, при който липсва последователният кондензатор C_1 /на фиг. 1 а това е показано с пунктир над C_1 и надпис III/. Ясно е, че те могат да се получат от /8/, /9/ и /10/, като се елиминират членовете, съдържащи коефициента ε .

Схемното време за изключване на тиристорите в схемата на III се определя чрез трансцедентното уравнение:

$$/16/ \quad u_2' [n, \varepsilon_{qs}] = 0 \quad \text{за} \quad n = 1, 2 \dots,$$

като за определянето на t'_{qs} се използва съотношение /12/.

На базата на получените по-горе изрази и зависимости във вид на дискретни функции са създадени алгоритъм и програма за ЕИМ и е извършено изследване на преходните и установените процеси в мостов паралелно-последователен инвертор при различни стойности на коефициентите B и ε . Някои от получените резултати са онагледени с графиките, показани на фиг. 3. От изследването могат да се направят някои по-важни изводи:

1. Качествено характерът на преходния процес за изходното

напрежение $u[n, \epsilon]$ съвпада с показания на фиг. 2 б.

2. При определено съотношение между коефициентите B и α напрежението u' има минимални стойности /фиг. 3 а/ от пускането до установения режим /при $\alpha = 1,6$ и $B = 1,6$ и при $\alpha = 3$ и $B = 2$ /. Лесно може да се установи, че е в сила съотношението $B = \sqrt{1+\alpha}$. При същото съотношение между B и α се получават минимални стойности и на t'_{qs} .

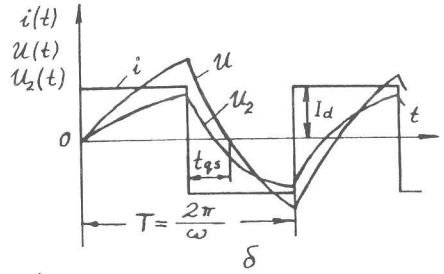
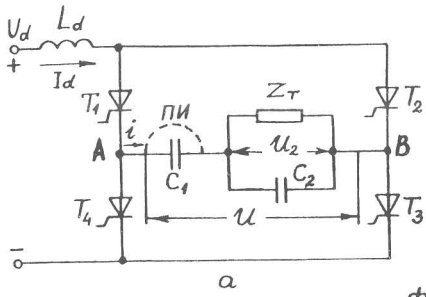
3. Схемното време за изключване се получава най-голямо след първия полупериод, като при III то е доста по-малко /фиг. 3 б/. Следователно се потвърждава предимството на пускането на двата инвертора при начален ток $i(0) = I_d$.

4. Изобрът на тиристорите по напрежение следва да става по стойността на напрежението в края на първия полупериод.

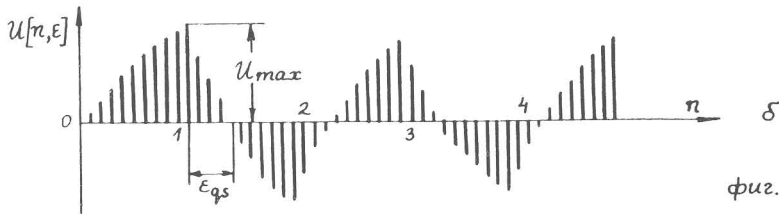
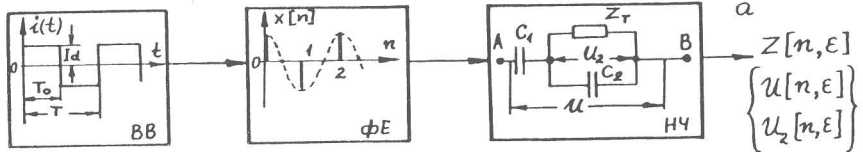
5. При стойности на коефициента $B \geq 2$ преходната съставка е нищожна още след първия полупериод, т.е. може да се счита, че установеният режим настъпва практически мигновено /фиг. 3 а, б/.

Л И Т Е Р А Т У Р А

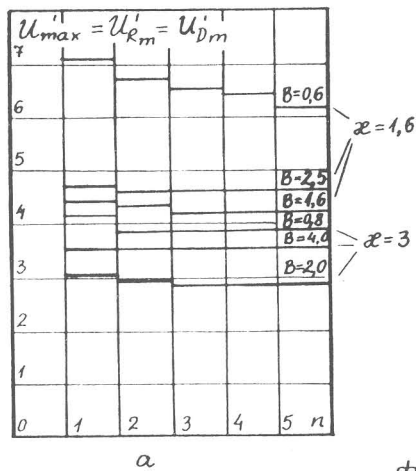
1. Ъобчева М., С. Стоева. Приложение на теорията на импулсните системи за анализ на резонансни тиристорни инвертори. Сп. АИТАС, № 6, 1986
2. Ъобчева М., С. Стоева. Общ дискретен модел на автономни инвертори в непрекъснат режим. Национална конференция с межд. участие СИМБИЕКТРОН '86
3. Zypkin, Ja.S. *Grundlagen der Theorie automatischer Systeme*, VEB Verlag Technik, Berlin, 1981
4. Ъобчева М., С. Табаков. Основи на преобразователната техника, С., Техника, 1988



фиг. 1



фиг. 2



фиг. 3

