

УДК 621.314.57

## ПРОЦЕСИ ФОРМУВАННЯ ТРАЕКТОРІЇ ПЕРЕМИКАНЬ В ЕЛЕКТРИЧНИХ КОЛАХ З КЛЮЧОВИМИ ЕЛЕМЕНТАМИ

О.О. ГОЛОВКО, А.Ю. БУЛАТОВ

Київський національний університет технологій та дизайну

*У статті розглянуті питання щодо формування безпечного перемикання ключових елементів, які використовуються у силовій електроніці, за допомогою примусової комутації. Проаналізовано схему формування траєкторії перемикань та надані рекомендації щодо їх удосконалення*

У силовій електроніці набули поширення слідуючі транзисторні інвертори з високочастотною імпульсною модуляцією, що забезпечують формування миттєвого значення вихідного струму пропорційного еталонному сигналу. Такі перетворювачі знайшли застосування у джерелах з вихідною напругою синусоїдальної форми, перетворювачах частоти для електроприводу, агрегатах безперебійного електроживлення та інших пристроях силовій електроніки.

В даний час у якості ключових елементів подібних пристроїв застосовуються силові модулі MOSFET або IGBT [1]. Ефективність і експлуатаційну надійність слідкуючих інверторів визначають головним чином процеси перемикань ключових елементів, тому завдання поліпшення комутаційних процесів, що направлене на зниження як амплітудної, так і середньої втрати потужності при перемиканні, залишається актуальним.

Існує два типи перетворювачів – з жорсткою і м'якою комутацією [1,2]. При цьому для створення умов м'якої комутації схема ключа ускладнюється за рахунок включення додаткових кіл. Хоча провідні фірми-виробники силових транзисторів (International Rectifier, SEMIKRON, Mitsubishi й ін.) допускають режим жорсткої комутації, але при цьому під час перемикань виникають значні перевантаження по струму і напрузі (у 2, а то і 3 рази більші, ніж максимально допустимі), що погіршує умови комутації. Одним зі шляхів рішення задачі забезпечення надійної комутації транзисторних ключів є формування безпечної траєкторії перемикань, при якій робоча точка рухається по вихідній характеристиці поблизу осей струмів і напруги.

### **Об'єкти та методи дослідження**

Об'єктом дослідження є кола примусового формування траєкторії перемикань ключового елемента. Вибір кола зумовлено тим, що для реалізації примусового формування траєкторії необхідно: забезпечити ємнісний характер кола при виключенні транзистора та індуктивний характер при його включенні [2]. Однак, при цьому, як правило, під час комутації більша частина енергії, що накопичується в реактивних елементах, розсіюється на активному опорі кола формування. Мета даної роботи є пошук шляхів поліпшення комутаційних процесів та енергетичних показників в автономних інверторах. Один із варіантів побудови слідкуючого інвертора з колами формування траєкторії перемикань наведено на рис.1. Особливістю даної схеми є наявність додаткових джерел  $E_d$  у якості яких використовуються відносно малопотужні перетворювачі, що забезпечують повернення енергії, накопиченою елементами кіл формування в джерело живлення  $E$ .

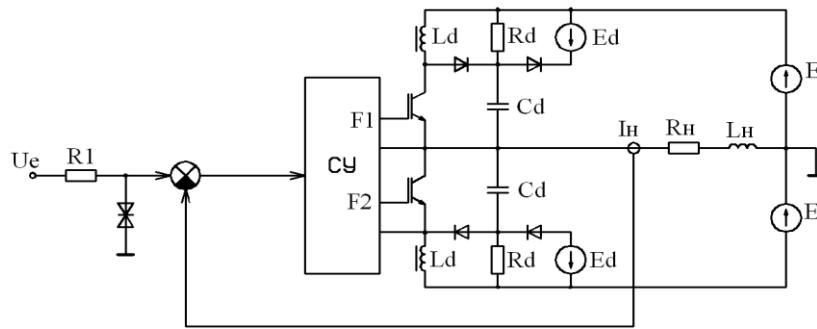


Рис. 1. Схема автономного інвертора з колами примусового формування процесу комутації

При використанні кіл формування траєкторії перемикачів транзисторів на роботу інвертора накладається додаткове обмеження. Після чергової комутації необхідний час для відновлення початкових умов реактивних елементів, тобто час між сусідніми комутаціями повинен бути більше деякої заданої величини, яка визначається параметрами кола формування траєкторії перемикачів. У інверторах струму це умова просто забезпечується при застосуванні релейного несинхронізованого способу управління.

Для пояснення процесів перемикачів наведеного кола формування траєкторії розглянемо спрощену модель з одним ідеальним ключем (рис. 2).

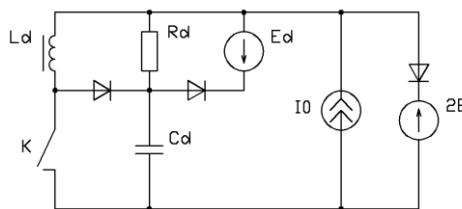


Рис. 2. Схема моделі ідеального ключа з колами формування траєкторії перемикачів

**Постановка завдання**

Для аналізу впливу параметрів кіл формування на процеси перемикачів необхідно визначити мінімальний час між сусідніми комутаціями.

Припустимо, що струм навантаження позитивний і пульсації струму істотно менші струму навантаження, тоді напруга на індуктивності  $L_H$  (рис. 1) визначається виразом:

$$U_L = \begin{cases} E - I_n \cdot R_n & \text{при } F_1 = 1; \\ -E - I_n \cdot R_n & \text{при } F_1 = 0, \end{cases}$$

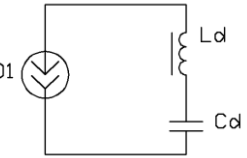
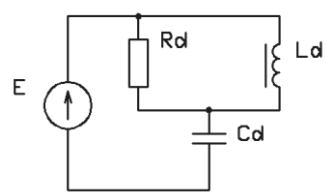
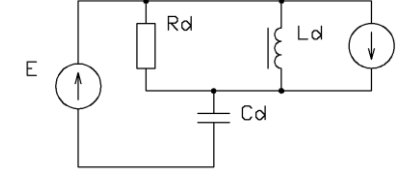
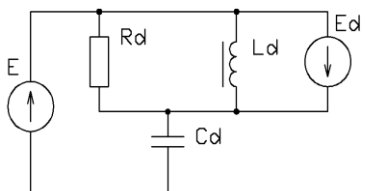
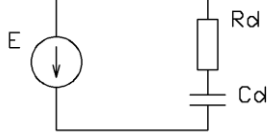
де  $F_1$  – стан сигналу управління транзистором ( $F_1=1$ – при відкритому стані,  $F_1=0$  – при закритому).

Оскільки величина вихідної напруги не може перевищувати величини напруги джерела живлення  $E$ , то мінімальний час між сусідніми комутаціями  $T_{min}$  дорівнює:

$$T_{min} = \frac{L_H \cdot \Delta I}{2 \cdot E}.$$

Аналітичний опис процесів на різних стадіях, що відбуваються в колах формування траєкторії, як при замиканні ключового елемента  $K$ , так і при його розмиканні наведено у табл.1 і табл.2.

Таблиця 1. Аналіз процесів при замиканні ключа

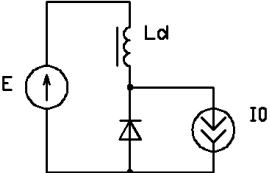
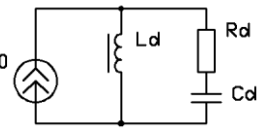
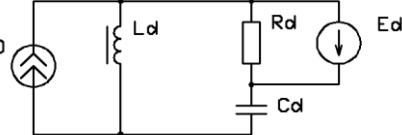
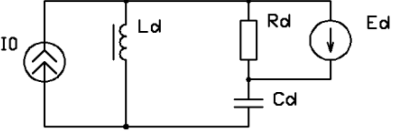
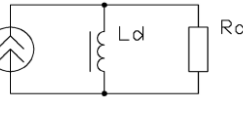
№ стадії	Схема заміщення та вирази для струму індуктивності та напруги ємності	Короткий опис стадії
1	 $I_L(t) = I_0$ $U_C(t) = I_0 \cdot \frac{t}{Cd}$	Заряд конденсатора $Cd$ до величини джерела живлення $E$
2	 <p>Якщо <math>R_d &gt; \sqrt{\frac{Ld}{Cd}}</math></p> $I_L(t) = \frac{I_0 \cdot (p_2 \cdot e^{p_1 t} - p_1 \cdot e^{p_2 t})}{p_2 - p_1}$ $U_C(t) = E + \frac{I_0 \cdot (e^{p_2 t} - e^{p_1 t})}{Cd \cdot (p_1 - p_2)}$ <p>Якщо <math>R_d &lt; \sqrt{\frac{Ld}{Cd}}</math>, то</p> $I_L(t) = I_0 \cdot (\cos wt - \frac{a}{w} \cdot \sin wt) \cdot e^{at}$ $U_C(t) = E + \frac{I_0}{w \cdot Cd} \cdot \sin wt \cdot e^{at}$	Продовжується розряд дроселя на ємність. Заряд конденсатору заряджається до величини $E+Ed$ , якщо на цій стадії струм в індуктивності досягає нульового значення, то 3 і 4 стадії пропускаються, і одразу наступає 5-а стадія.
3	 $I_L(t) = I_{03} - \frac{Ed}{Ld} \cdot t$ $U_C(t) = E + Ed$	Розряд дроселя на джерело $Ed$ до значення $Ed/Rd$ .
4	 <p>Якщо <math>R_d &gt; \sqrt{\frac{Ld}{Cd}}</math>, то</p> $I_L(t) = \frac{Ed}{Rd} \cdot \frac{(d + p_1) \cdot e^{p_1 t} - (d + p_2) \cdot e^{p_2 t}}{p_2 - p_1}$ $U_C(t) = E + Ed \cdot \frac{p_2 \cdot e^{p_1 t} - p_1 \cdot e^{p_2 t}}{p_1 - p_2}$ <p>Якщо <math>R_d &lt; \sqrt{\frac{Ld}{Cd}}</math>, то</p> $I_L(t) = \frac{Ed}{Rd} \cdot (\cos wt + \frac{d+a}{w} \cdot \sin wt) \cdot e^{at}$ $U_C(t) = E + Ed \cdot (\cos wt - \frac{a}{w} \cdot \sin wt) \cdot e^{at}$	Розряд дроселя до нуля.
5	 $I_L(t) = 0$ $U_C(t) = U_{05} \cdot e^{-\frac{t}{Rd \cdot Cd}} + E \cdot (1 - e^{-\frac{t}{Rd \cdot Cd}})$ $T_5 = 3 \cdot Rd \cdot Cd$	Розряд ємності від значення $E+Ed$ до величини $E$ .

де параметри:  $p_{1,2} = -\frac{1}{2 \cdot Rd \cdot Cd} \pm \sqrt{\left(\frac{1}{2 \cdot Rd \cdot Cd}\right)^2 - \frac{1}{Ld \cdot Cd}}$ ;  $a = \frac{1}{2 \cdot Rd \cdot Cd}$ ;  $d = \frac{1}{Rd \cdot Cd} - \frac{Rd}{Ld}$ ;

$$w = \sqrt{\frac{1}{Ld \cdot Cd} - \left(\frac{1}{2 \cdot Rd \cdot Cd}\right)^2}$$

$I_{03}$ ,  $U_{05}$  – початкове значення струму індуктивності і напруги на ємності на інтервалах 3 та 5.

Таблиця 2. Аналіз процесів при розмиканні ключа

№ ста-дії	Схема заміщення та вирази для струму індуктивності та напруги ємності	Короткий опис стадії
1	 $U_C(t) = E$ $I_L(t) = \frac{E}{Ld} \cdot t$	Заряд індуктивності до значення $I_0$ .
2	 <p>Якщо <math>R_d &gt; 2 \cdot \sqrt{\frac{Ld}{Cd}}</math></p> $U_C(t) = E \cdot \frac{p_2 \cdot e^{p_1 t} - p_1 \cdot e^{p_2 t}}{p_2 - p_1}$ $I_L(t) = I_0 + \frac{E \cdot (e^{p_1 t} - e^{p_2 t})}{Ld \cdot (p_1 - p_2)}$ <p>Якщо <math>R_d &lt; 2 \cdot \sqrt{\frac{Ld}{Cd}}</math>, то</p> $U_C(t) = E \cdot (\cos wt - \frac{a}{w} \cdot \sin wt) \cdot e^{at}$ $I_L(t) = I_0 + \frac{E}{w \cdot Ld} \cdot \sin wt \cdot e^{at}$	Заряд індуктивності до значення $I_0 + Ed/Rd$ .
3	 $U_C(t) = \frac{U_{03} \cdot \cos w_0 t + Ed \cdot (1 - \cos w_0 t - \sin w_0 t)}{Rd \cdot a_0}$ $I_L(t) = I_0 + U_{03} \cdot a_0 \cdot \sin w_0 t + \frac{Ed}{Rd} \cdot (\cos w_0 t - Rd \cdot a_0 \cdot \sin w_0 t)$	Розряд ємності $Cd$ , при цьому дросель заряджається до максимуму і розряджається до величини $I_0 + Ed/Rd$ .
4	 $U_C(t) = U_{04} - \frac{Ed}{Rd \cdot Cd} \cdot \left( \frac{d + p_1}{p_1 \cdot (p_1 - p_2)} \cdot e^{p_1 t} + \frac{d + p_2}{p_2 \cdot (p_2 - p_1)} \cdot e^{p_2 t} \right)$ $I_L(t) = I_0 + \frac{Ed}{Rd \cdot (p_1 - p_2)} \cdot \left( (d + p_1) \cdot e^{p_1 t} - (d + p_2) \cdot e^{p_2 t} \right)$	Розряд ємності $Cd$ до нуля.
5	 $U_C(t) = 0$ $I_L(t) = I_0 \cdot \left( 1 - e^{-\frac{t \cdot Rd}{Cd}} \right) + I_{05} \cdot e^{-\frac{t \cdot Rd}{Cd}}, \quad T_5 = 3 \cdot \frac{Rd}{Ld}$	Розряд дроселя до значення $I_0$ .

де параметри:  $p_{1,2} = -\frac{Rd}{2 \cdot Ld} \pm \sqrt{\left(\frac{Rd}{2 \cdot Ld}\right)^2 - \frac{1}{Ld \cdot Cd}}$ ;  $a = \frac{Rd}{2 \cdot Ld}$ ;  $w = \sqrt{\frac{1}{Ld \cdot Cd} - \left(\frac{Rd}{2 \cdot Ld}\right)^2}$ ;

$$d = \frac{Ld}{Rd}; w_0 = \frac{1}{\sqrt{Ld \cdot Cd}}; a_0 = \sqrt{\frac{Cd}{Ld}}$$

**Результати та їх обговорення**

Епюри процесів замикання і розмикання ключа, розраховані для випадку:  $E=700\text{В}$ ,  $I_0=10\text{А}$ ,  $Ed=100\text{В}$ ,  $Rd=200\text{Ом}$ ,  $Cd=10\text{нФ}$ ,  $Ld=50\text{мкГн}$ , наведені на рис. 3, а та 3, б.

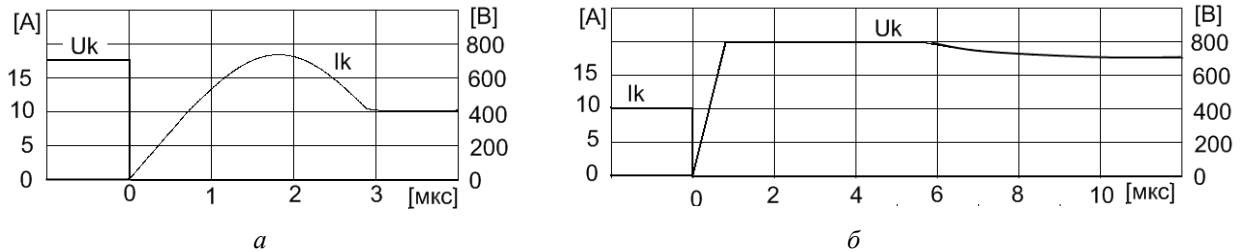


Рис.3. Епюри процесів замикання (а) та розмикання (б) ключа

З приведених епюр видно, що швидкість наростання струму ключа  $di/dt$  при замиканні і швидкість наростання напруги на ключі  $du/dt$  при його розмиканні обмежена параметрами кола формування, що забезпечує зниження імпульсної потужності і потужності динамічних втрат. Позитивний результат від застосування даних кіл формування траєкторії перемикачів тим більше, чим менше час включення ( $T_0$ ) і час виключення ( $T_B$ ) реального транзистора. Ефективність використання вказаних кіл формування можна оцінити за допомогою коефіцієнтів  $K_1$  і  $K_2$ :

$$K_1 = \frac{T_0 \cdot \frac{di}{dt}}{I_0};$$

$$K_2 = \frac{T_B \cdot \frac{du}{dt}}{2 \cdot E}.$$

При цьому, чим менше значення цих коефіцієнтів, тим вище ефективність кіл формування.

Більшість інверторів, як правило, працюють в широкому діапазоні струмів навантаження. Тому необхідно обрати таке значення ширини гістерезису  $\Delta I$ , щоб допоміжні елементи в колі встигали відновлювати початковий стан при різних струмах навантаження. Для визначення мінімального значення часу між сусідніми комутаціями та потужністю втрат при зміні струму навантаження виконане моделювання процесів замикання і розмикання ключа при  $E=700\text{В}$ ,  $Ed=100\text{В}$ ,  $Rd=200\text{Ом}$ ,  $Cd=10\text{нФ}$ ,  $Ld=50\text{мкГн}$  і різних значеннях струму. Результати моделювання наведені в табл. 3 та табл.4.

Таблиця 3. Тривалість стадії та втрати потужності під час замикання ключа

$I_0, \text{А}$	$T_1, \text{мкс}$	$T_2, \text{мкс}$	$P_{2rd}, \text{мВт}$	$T_3, \text{мкс}$	$P_{3rd}, \text{Вт}$	$P_{3ed}, \text{Вт}$	$T_4, \text{нс}$	$P_{4rd}, \text{мВт}$	$P_{4ed}, \text{мкВт}$	$T_5, \text{мкс}$	$P_{5rd}, \text{мВт}$	$\Sigma T, \text{мкс}$	$\Sigma P_{rd}, \text{Вт}$	$\Sigma P_{ed}, \text{Вт}$
1	0,07	0,04	8,8	2,14	1,07	10,91	5	5	4,95	0,75	63,7	3,00	1,15	10,91
5	0,36	0,04	8,8	2,14	1,07	10,91	5	5	4,95	0,75	63,7	3,29	1,15	10,91
10	0,715	0,04	8,8	2,14	1,07	10,91	5	5	4,95	0,75	63,7	3,65	1,15	10,91
20	1,43	0,04	8,8	2,14	1,07	10,91	5	5	4,95	0,75	63,7	4,36	1,15	10,91
50	3,57	0,04	8,8	2,14	1,07	10,91	5	5	4,95	0,75	63,7	6,50	1,15	10,91

Таблиця 4. Тривалість стадії та втрати потужності під час розмикання ключа

$I_0, A$	$T_1, \text{мкс}$	$T_2, \text{мкс}$	$P_{2nd}, \text{мВт}$	$T_3, \text{мкс}$	$P_{3rd}, \text{Вт}$	$P_{3ed}, \text{Вт}$	$T_4, \text{нс}$	$P_{4rd}, \text{мВт}$	$P_{4ed}, \text{мкВт}$	$T_5, \text{мкс}$	$P_{5rd}, \text{мВт}$	$\Sigma T, \text{мкс}$	$\Sigma P_{rd}, \text{Вт}$	$\Sigma P_{ed}, \text{Вт}$
1	7	1,25	120	0	0	0	0	0	0	6	0,13	14,25	0,25	0
5	1,4	0,21	37,8	2,14	1,07	4,58	0,26	0,13	65	6	0,44	10,01	1,68	4,5
10	0,7	0,1	17,7	4,7	2,35	22,08	0,26	0,13	65	6	0,44	11,76	2,9	22,02
20	0,35	0,051	8,9	9,7	4,86	94,6	0,26	0,13	65	6	0,44	16,36	5,44	94,5
50	0,14	0,021	4,1	24,7	12,4	611,9	0,26	0,13	65	6	0,44	31,12	12,9	611,9

**Висновки**

З даних таблиць виходить, що при п'ятидесятикратній зміні струму навантаження сумарний час перехідних процесів змінюється в достатньо вузьких межах. Значення сумарного часу при менших струмах не має істотного впливу на величину динамічних втрат. Таким чином, при побудові слідкуючих інверторів струму при релейному несинхронізованому способі модуляції вдається забезпечити умови перезаряду елементів кіл формування траєкторії до початкових значень.

Під час замикання ключа:

1. Зі збільшенням струму навантаження збільшується час наростання струму  $di/dt$  що покращує формування траєкторії.

2. Енергія яка виділяється на активних елементах і переходить у джерело напруги не залежить від величини струму навантаження.

3. Енергія, що передається у зовнішнє джерело при даних параметрах кола в 9,5 разів більша енергії, що розсіюється на активному опорі.

Під час розмикання ключа:

1. Зі збільшенням струму навантаження, навпаки, зменшується час наростання напруги  $du/dt$  що погіршує формування траєкторії.

2. При збільшенні струму навантаження енергія, що розсіюється на активному опорі та переходить у зовнішнє джерело збільшується, що позитивно позначається на роботі кола формування траєкторії, та силового ключа.

3. При низьких значеннях струму ( $I_0 < 0,1 I_n$ ) схема формування траєкторії перемикань перестає ефективно працювати, проте потужності стають значно меншими, і це не впливає на роботу перетворювача.

## ЛІТЕРАТУРА

1. Б.Ю. Семенов «Силовая электроника: от простого к сложному.» – М.: СОЛОН-Прес. –2005. – 416 с.
2. О.А. Коссов «Усилители мощности на транзисторах в режиме переключений.» – М.: Энергия. –1971. – 432 с.
3. Бономарский О., Воронин П., Куканов В., Щепкин Н. Исследование запириания комбинированных транзисторов. Силовая Электроника. –№ 2. –2004. – С. 27–30.