

## Автономні сонячні інвертори та їх класифікація

### Автономні інвертори напруги

АІ - пристрої, що перетворюють постійний струм у змінний з незмінною або регулюючої частотою які працюють на автономне навантаження. У цьому відмінність автономних інверторів від ведених інверторів, які виконують ту ж саму функцію, але працюють на мережу змінного струму. Навантаженням АІ, може бути одиничний споживач (асинхронний двигун та інші навантаження).

Основою АІ є вентильний перемикаючий пристрій, який може бути виконаний за однофазною або 3-х фазною схемами з нольовим виводом або мостовою (рис. 1). У якості ключів у автономних інверторах, служать транзистори, одно - або двоопераційні тиристори. При використанні одноопераційних тиристорів, схему доповнюють елементами, призначеними для комутації тиристорів. Одним з головних елементів є конденсатор С. АІ поділяються на автономні інвертори напруги (АІН), автономні інвертори струму (АІС) та резонансні автономні інвертори (АІР). Роботу АІН розглянемо на прикладі рис.1.

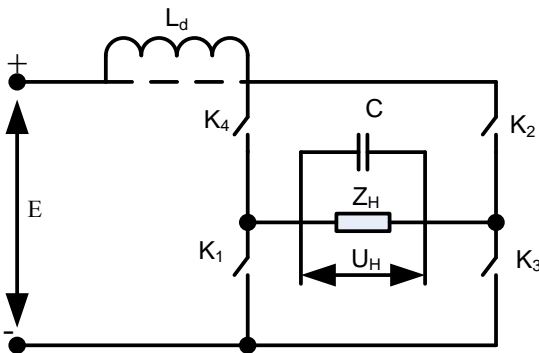


Рисунок 1 – Структурна схема автономних інверторів напруги (струму)

Джерело живлення  $E$  тут працює у режимі джерела напруги. Формування кривої вихідної напруги здійснюється шляхом використання закону перемикання тиристорів.

По черзі перемикаються нахрест розташовані ключі  $K1$ ,  $K2$  потім  $K3$ ,  $K4$ . Крива вихідної напруги складається з послідовності двополярних імпульсів з амплітудою напруги живлення  $E$  (рис. 2). Струм у навантаженні визначається кривою вихідної напруги і характером навантаження.

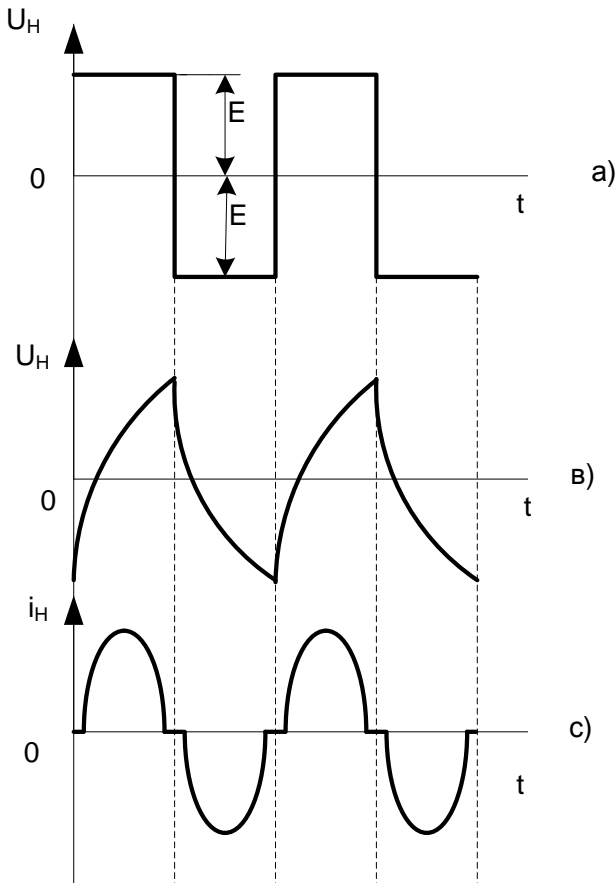


Рисунок 2 - Часові діаграми роботи АН

В АІС, конденсатор підключений паралельно навантаженню, а джерело живлення працює у режимі джерела струму. Такий режим створюється шляхом включення у ланцюг джерела живлення дроселя  $L_d$  великої індуктивності.

Конденсатор, підключений паралельно навантаженню, бере участь у формуванні кривої вихідної напруги і забезпечує замикання тиристорів (рис. 2, б). Інвертори струму виготовляються лише на одноопераційних тиристорах.

У АІР конденсатор можна включити послідовно з навантаженням або паралельно йому. Характер процесу обумовлюється коливальним процесом перезарядження конденсатора у ланцюзі з джерелом живлення і індуктивністю, спеціально введеної або наявної у складі навантаження. У зв'язку з цим, струм у ланцюзі навантаження, наближається за формою до синусоїди (рис. 2, в).

АІР зазвичай, виконують на одноопераційних тиристорах. Крім формування кривої струму (напруги) навантаження, конденсатори тут здійснюють операцію запирання тиристорів.

### **Основні області застосування АІ:**

- живлення споживачів змінного струму (АІН, АІС) у пристроях, де джерелом енергії є акумуляторна батарея, резервне живлення при можливому відключенні мережі змінного струму (електрозв'язок, обчислювальна техніка);

- електротранспорт (АІН, АІС), який живляться від джерела постійного струму, де у якості тягових електродвигунів, використовують короткозамкнені асинхронні двигуни;

- електропривід з асинхронним і синхронними двигунами (АІН, АІС), де інвертор служить джерелом регулювання напруги і частоти;

- перетворювачі постійної напруги однієї величини у постійну напругу іншої величини (АІН, АІС, АІР);

- електротермія (АІС, АІР) для отримання змінного струму підвищеної частоти (плавка металу, нагрівання і загартування виробів).

До АІ пред'являються вимоги які стосуються не тільки прямої передачі енергії від джерела живлення у навантаження, але і зворотної передачі енергії від навантаження у джерело живлення, що необхідно для реалізації рекуперативного гальмування асинхронних двигунів.

### Формування та регулювання вихідної напруги однофазних АІН

АІН найчастіше виконують по мостовій схемі (рис. 3). Навантаження зазвичай активно - індуктивне, включається у діагональ моста, утвореного тиристорами Т1 і Т4 і зворотними діодами Д1 - Д4. Діоди призначені для пропускання струму активно-індуктивного навантаження на інтервалах часу, коли струм має напрямок, зворотний для тиристорів (діоди зворотного, зустрічного або реактивного струму).

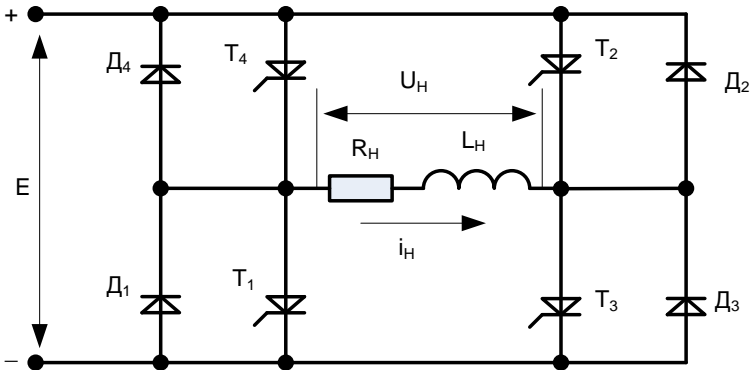


Рисунок 3 - Однофазний АІН із зворотними діодами

Формування кривої  $U_n$  (рис. 4) вимагає почергового відмикання навхрест лежачих тиристорів Т1, Т2, Т3 і Т4, так що кожен з них відкритий у перебігу  $\varphi = 180^\circ$  (рис. 4 а).

Крива струму  $I_n$  активно - індуктивного навантаження, симетрична і складається з ділянок експонент з постійною часу  $\tau = L_n / R_n$ . На інтервалі  $t_0 - t_1$ , проводять струм тиристори Т3 і Т4. Напряга на навантаженні дорівнює  $E$  і має полярність,

указану на (рис. 3), без дужок. У момент часу  $t_1$ , тиристори Т3 і Т4 запираються, а Т1 Т2 відпираються.

За рахунок наявності індуктивності у ланцюзі навантаження, струм  $I_H$  під дією е.р.с. самоіндукції зберігає на інтервалі  $t_1$ -  $t_2$  прямий напрямок. Оскільки тиристори Т3 і Т4 заперті, а тиристори Т1 Т2 у такому напрямку проводити струм не можуть, струм навантаження на цьому інтервалі проводять діоди Д1 і Д2.

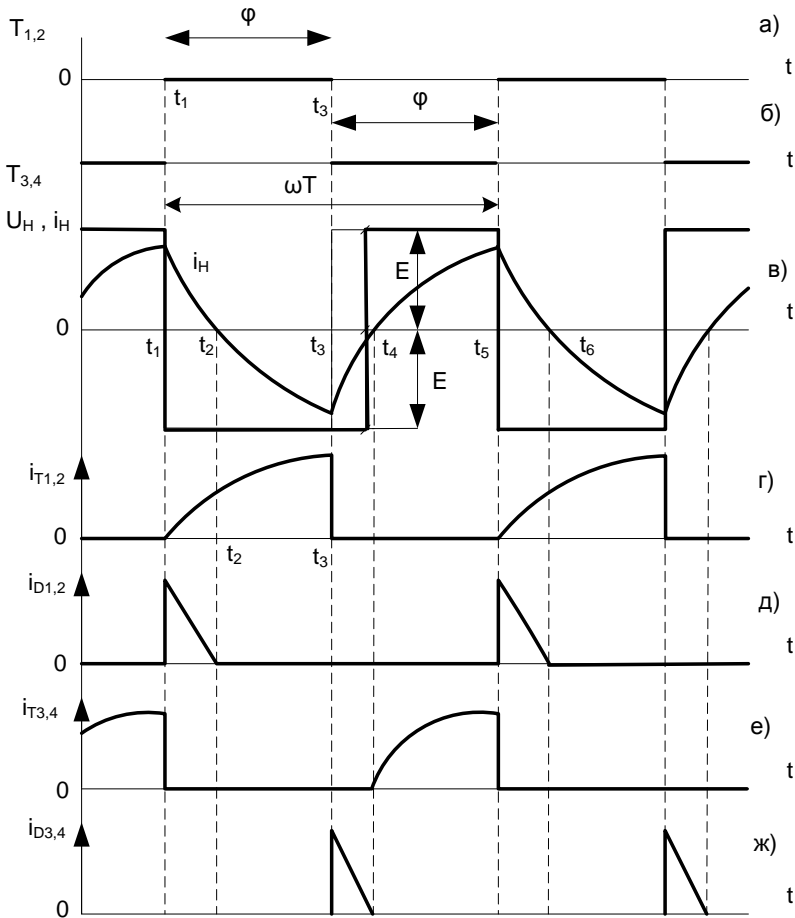


Рисунок 4 - Тимчасові діаграми напруг та струмів АН

Відкриванням діодів, викликається зміною полярності вихідної напруги на навантаженні. Енергія, яка була запасена у індуктивності  $L_H$ , віддається у ланцюг джерела живлення і навантаження. Таким чином, роль зворотних діодів зводиться до пропускання реактивного струму навантаження після перемикання тиристорів.

У момент часу  $t_2$  струм  $I_H$  дорівнює нулю, діоди  $D_1$  і  $D_2$  закриваються (рис. 4, б, г). Тиристри  $T_1$  і  $T_2$  з моменту часу  $t_2$ , підключають навантаження до джерела живлення. Струм у навантаженні, після переходу через ноль, змінює напрямок. Збіг, після моменту часу  $t_2$ , знаків напруги  $U_H$  і струму  $I_H$ , означає, що навантаження споживає енергію від джерела живлення.

У момент часу  $t_3$  відбувається чергове перемикання тиристорів  $T_1$   $T_2$  і відкривання тиристорів  $T_3$   $T_4$ . Далі процеси протікають аналогічно. На інтервалі  $t_3 - t_4$  струм навантаження проводять діоди  $D_3$ ,  $D_4$ , а на інтервалі  $t_4 - t_5$  тиристри  $T_3$ ,  $T_4$ . Криві струмів показані на (рис. 4е).

### Однофазний напівмостовий АІН з паралельної комутацією.

Комутаційні процеси у полумостового АІН, відбуваються послідовними перезарядками комутуючого конденсатора у контурі або з тиристором  $T_{K1}$ , або з тиристором  $T_{K2}$  (рис. 5).

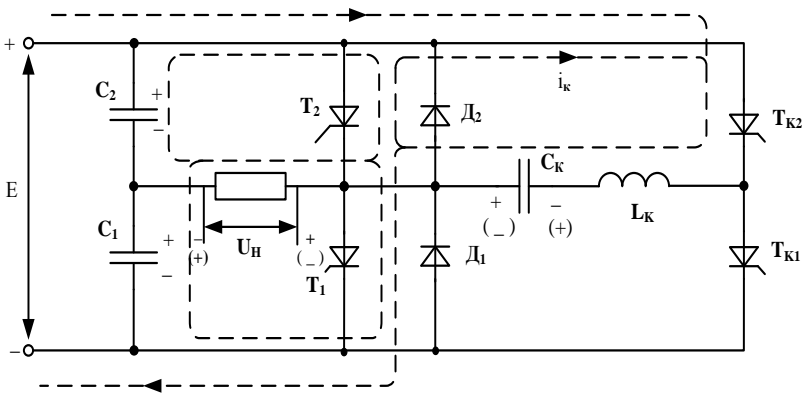


Рисунок 5 - Однофазний напівмостовий АІН з паралельною комутацією

## Однофазний напівмостовий АІН з паралельною комутацією

На відміну від мостового інвертора, амплітуда вихідних імпульсів у полумостовому інверторі (рис. 1), виявляється вдвічі меншою. Це пов'язано з тим, що при відкритому тиристорі, навантаження тут підключається не на повну напругу джерела живлення  $E$ , а на напругу  $0,5E$  конденсатора  $C_1$  або  $C_2$ , які створюють штучну середню точку джерела живлення.

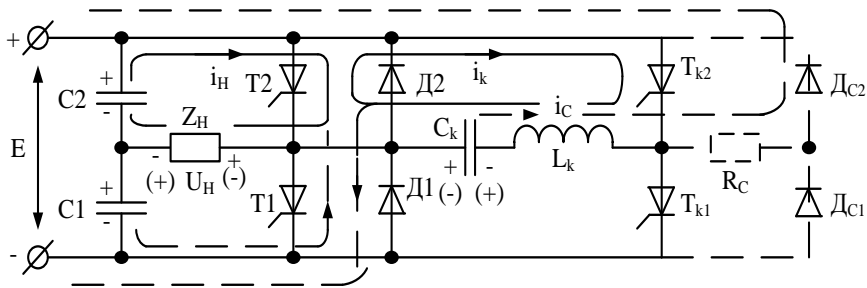


Рисунок 1- Однофазний напівмостовий АІН

Процеси комутації у схемі відбуваються за рахунок почергового перезаряду комутуючого конденсатора у контурі або з тиристором  $T_{k1}$ , або з тиристором  $T_{k2}$ .

Розглянемо процеси, що протікають у схемі рис. 1. Припустимо, що до моменту часу  $t_1$ , проводить струм тиристор  $T_2$ . До навантаження прикладена напруга  $0,5 E$ , а конденсатор заряджений до напруги  $U$  (рис. 2). Полярність напруг  $U_H$  і  $U_C$ , указані на рис. 1 без дужок.

Через відкритий тиристор  $T_2$  у навантаження протікає струм  $i_H$ . У момент часу  $t_1$  від системи управління надходить отпирающий імпульс на тиристор  $T_{k2}$ . При цьому тиристори  $T_{k2}$ ,  $T_2$  і діод  $D_2$  утворюють контур коливального перезаряду конденсатора  $C_k$ . На інтервалі  $t_1 - t_2$ , струм  $i_C$  протікає через тиристор  $T_2$  назустріч струму  $i_H$ , у результаті чого струм тиристора зменшується до нуля.

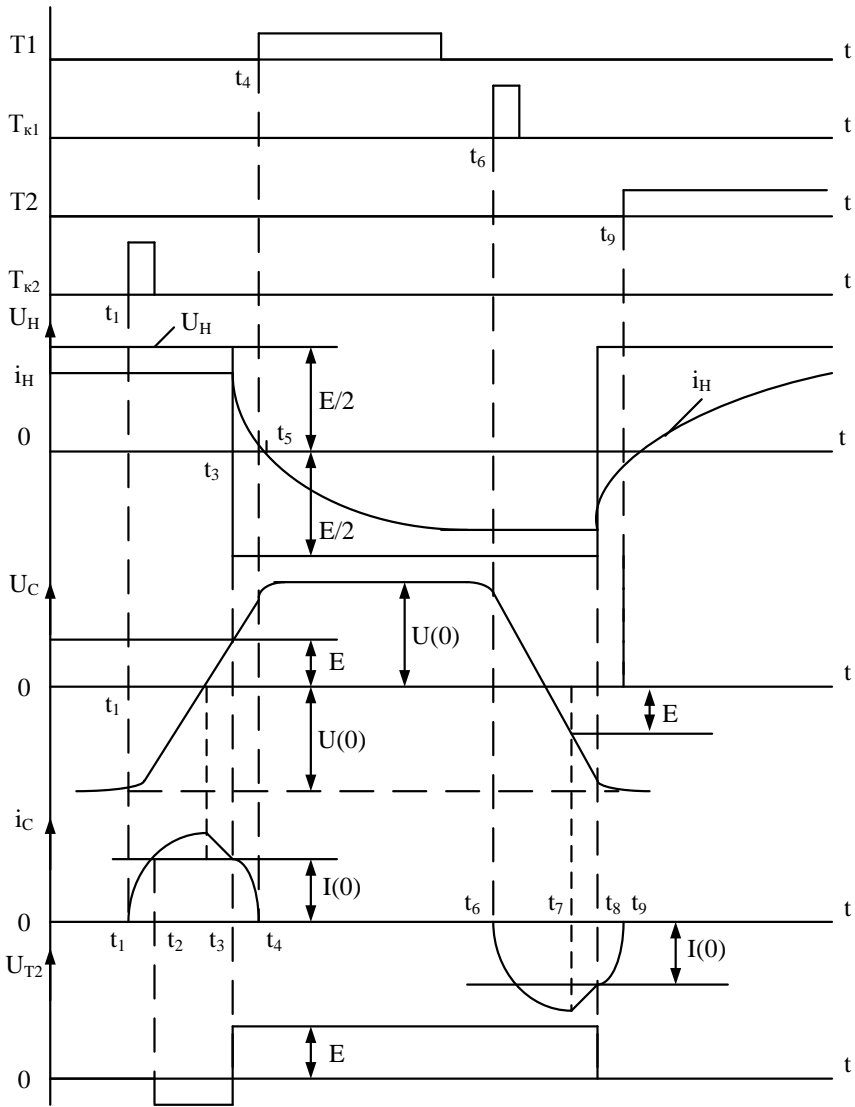


Рисунок 2 – Часові діаграми роботи АІН

У разі рівного розподілу струмів  $i_H = i_C = I(0)$ , струм  $i_C$  продовжує протікати у тому ж контурі, але вже через діод  $D_2$ . На інтервалі  $t_2 - t_3$  до тиристора  $T_2$  прикладається зворотна напруга,



яка дорівнює падінню напруги на діоді від протікання через нього різниці струмів  $i_C - I_H$ . У момент часу  $t_3$  струм діода  $D_2$  дорівнює нулю і діод закривається.

У момент часу  $t_3$  напруга на конденсаторі  $C_K$  більша  $E$  і має зворотну полярність, діод  $D_1$  відкривається. При відкриванні діода  $D_1$  полярність напруги на навантаженні змінюється (рис. 2) і утворюється контур протікання струму  $i_H$  активно-індуктивного навантаження, а також контур перезарядження конденсатора  $C_K$  на інтервалі  $t_3 - t_4$ . Після закінчення перезарядження, напруга  $U(0)$  на конденсаторі має зворотну полярність.

У момент  $t_4$  подається сигнал управління на відкривання тиристора  $T_1$ . Струм навантаження  $i_H$ , через наявність у ній індуктивності, з моменту часу  $t_3$  зменшується з постійною часу  $\tau = L_H / R_H$ . Енергія, яка запаслася в індуктивності навантаження на етапі провідності тиристора  $T_2$ , віддається у ланцюг джерела живлення (конденсатор  $C_1$ ) і активний опір навантаження.

Через тиристор  $T_1$  струм  $i_H$  починає протікати з моменту часу  $t_5$ , коли струм навантаження, що протікає через діод  $D_1$ , дорівнює нулю. З моменту часу  $t_5$ , напрямок струму  $i_H$  змінюється і навантаження знову починає споживати енергію від джерела живлення (конденсатор  $C_1$ ).

У момент часу  $t_6$  відмикається тиристор  $T_{K1}$ . Процеси, що протікають у схемі, аналогічні розглянутим і пов'язані з замиканням тиристора  $T_1$  і формуванням напруги позитивної полярності на навантаженні.

**Недоліком напівмостового АІН з паралельної комутацією є порівняно висока напруга  $U(0)$  на комутуючих конденсаторах, що призводить до підвищення прямої і зворотної напруги на комутуючих тиристорах  $T_{K1}$  і  $T_{K2}$  до  $2,5E$ . Максимальна напруга на силових тиристорах  $T_1$  і  $T_2$  не перевищує значення  $E$ .**

Для зменшення напруги на конденсаторі  $C_K$  у схемі (рис.1), додатково вводять елементи  $R_C$ ,  $D_{C1}$  і  $D_{C2}$ , призначені для відводу (скидання) надлишкової енергії від конденсатора. Відведення надлишкової енергії здійснюється після кожного

такту перезарядження конденсатора шляхом його розряду до напруги  $E$ , через резистор  $R_C$  і джерело живлення (рис. 1 пунктиром).

Напруга на комутуючих конденсаторах  $U_{Cm}$  при цьому, лежить у межах від  $1,2E$  до  $1,8E$ . Потужність втрат у резисторі  $R_C$  визначається зі співвідношення:

$$P_{RC} = \frac{f_k C_k}{2} (U_{Cm} - E)^2,$$

де  $f_k$  - частота проходження комутаційних процесів.

Наприклад, при  $f_k = 200$  Гц,  $C_k = 20$  мкФ,  $E = 200$  В і  $U_{Cm} = 1,8 E$ , потужність втрат складає 51,2 Вт.

## Автономний інвертор струму

Схема автономного інвертора струму (АІС) приведена на рис 1.

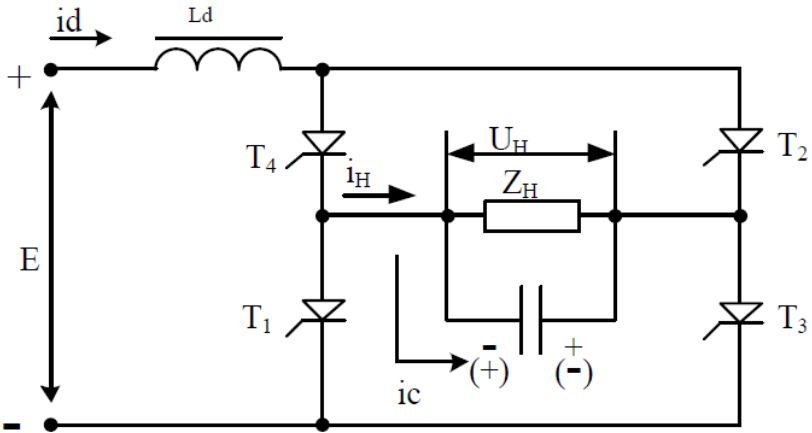


Рисунок 1 - Автономний інвертор струму

У схему однофазного АІТ входить інверторний міст на тиристорах  $T_1$ - $T_4$ , активно індуктивне навантаження  $Z_H$ , конденсатор  $C$  і дросель  $L_d$  з великою індуктивністю.

Вихідна напруга  $U_H = U_C$ , формується перезарядженням конденсатора  $C$  при почерговому відкриванні навхрест лежачих тиристорів інвертора. Конденсатор  $C$ , здійснює запирання проводящої пари тиристорів при відкриванні іншої пари.

При відкритих тиристорах  $T_1$  і  $T_2$ , напруга на конденсаторі має полярність (у дужках). У момент часу  $t_1$  відкриваються тиристри  $T_3$  і  $T_4$ , у результаті чого конденсатор  $C$  підключається паралельно тиристорам  $T_1$  і  $T_2$ . Під дією тимчасового струму конденсатора, струми тиристорів  $T_1$  і  $T_2$  швидко спадають до нуля, до тиристорів прикладається зворотна напруга, яка визначається напругою конденсатора (рис. 2) і вони переводяться у непровідний стан. Інтервал перезарядження конденсатора визначається кутом  $\theta = t_n * b * w$ .

Аналогічно здійснюється відкривання тиристорів  $T_3$  і  $T_4$  при замиранні тиристорів  $T_1, T_2$ .

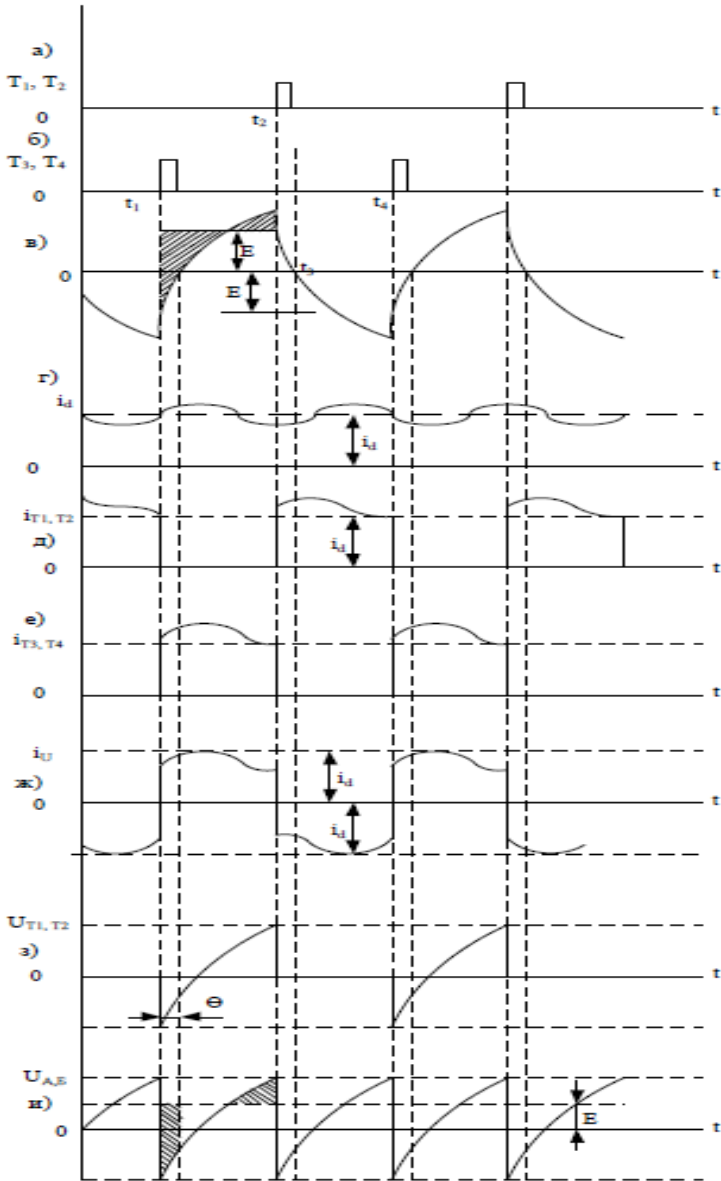


Рисунок 2 - Тимчасові діаграми однофазного мостового АИТ

Крива змінної напруги на навантаженні (рис. 2, в) складається з ділянок відповідних кожному такту перезарядження конденсатора.

Струм  $I_d$  (рис. 2, г) завдяки великій індуктивності дроселя  $L_d$ , добре згладжений. Протікаючи через тиристори, він визначає форму кривих їх анодних струмів (рис. 2 б, е), а також форму струму інвертора  $i_i$  (рис. 2, ж), який дорівнює сумі струмів навантаження  $i_n$  і конденсатора  $i_c$ . Напруга на дроселі  $L_d$  дорівнює різниці  $U_{a\delta} - E$  (рис. 1). У АІТ індуктивність вхідного дроселя  $L_d$  зазвичай досить велика.

Для даної схеми інвертора неприпустимий режим холостого ходу і є межа збільшення струму навантаження.

### Схема АІТ з трансформаторним включенням навантаження

Використання трансформатора (рис. 3) необхідно для отримання необхідної величини вихідної напруги при заданій напрузі  $E$ . Процеси, що протікають у схемі, аналогічні розглянутим вище.

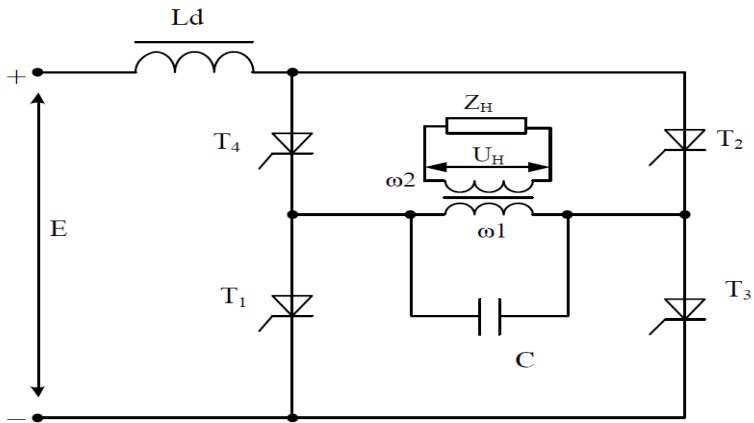


Рисунок 3 - АІТ з вихідним трансформатором

Опір навантаження  $Z^1_H = Z_H \cdot n^2$ , а також  $I^1_H = I_H \cdot n$ ,

$U_H^1 = n \cdot U_H$ , де  $n = w_1 / w_2$  - коефіцієнт трансформації трансформатора.

**Схема однофазного АІТ з нульовим виводом**

Навантаження  $Z_H$  (рис. 4) підключено до другої обмотки, що має коефіцієнт трансформації

$$N = w_{1-1} + w_{1-2} / w_2 = 2w_1 / w_2.$$

При почерговому відкриванні тиристорів  $T_1, T_2$  відбуваються перезарядка конденсатора у ланцюзі з джерелом живлення і відкритим тиристором. При відкриванні одного з тиристорів, конденсатор підключається паралельно іншому тиристору з полярністю напруги необхідної для замикання останнього. Напруги на обмотках і навантаженні, визначаються кривою напруги на конденсаторі

$$U_H = U_C / n.$$

Вид кривої  $U_C$  залежить від ємності конденсатора і опору навантаження. Схема трифазного паралельного АІТ, виконується за принципом однофазного.

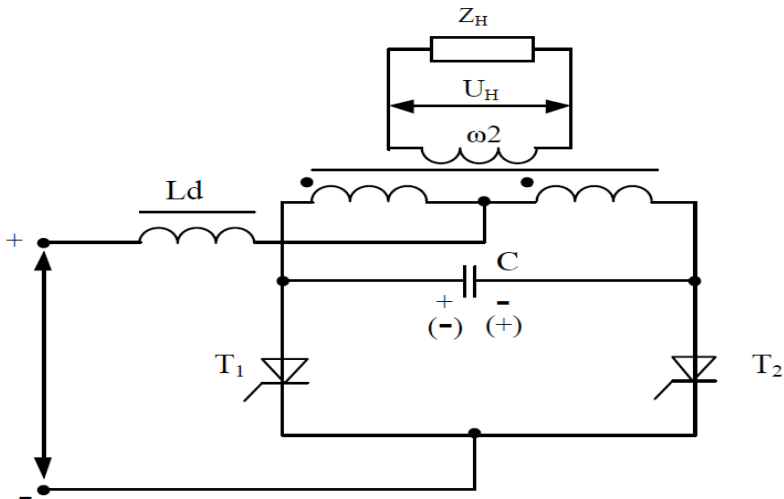


Рисунок 4 - АІТ з нульовим виводом

## Послідовний інвертор струму

У послідовних інверторах струму комутація струму тиристорів відбувається за допомогою послідовного резонансного ланцюжка LC. Мостова схема послідовного інвертора приведена на рис. 5.

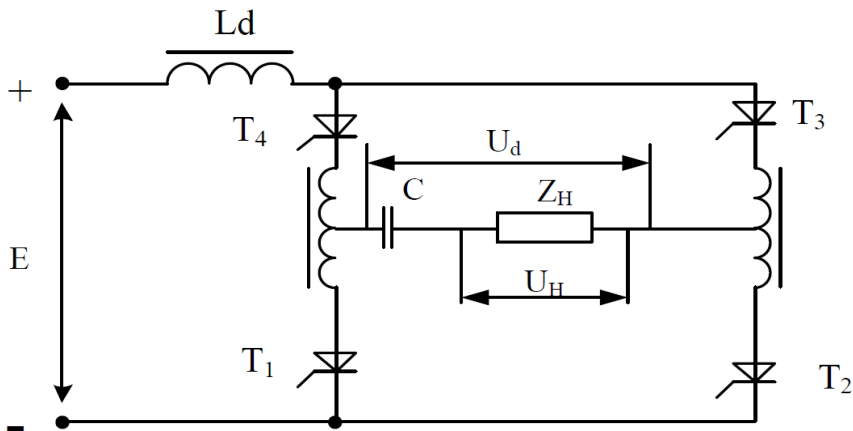


Рисунок 5 - Мостовий послідовний АІТ

Змінна напруга на навантаженні формується шляхом змінного відмикання і замикання за допомогою LC-ланцюжка  $T_1 \div T_4$ . Дроселі  $L$  забезпечують комутацію, відмикання і замикання тиристорів за рахунок магнітного зв'язку між обмотками. Зовнішня характеристика послідовного інвертора жорстка. Форма кривої вихідної напруги інвертора далека від синусоїдальної.

## Послідовно - паралельний інвертор струму

У даному інверторі комутуючі конденсатори  $C_1$  і  $C_2$  включені як послідовно так і паралельно з навантаженням. У режимі холостого ходу і короткого замикання послідовно-паралельний інвертор перетворюється у паралельний. Перевага такого інвертора у забезпеченні працездатності інвертора у широкому діапазоні зміни навантаження.

**Недоліком АІТ** є сильна залежність вихідної напруги від параметрів навантаження. Це явище змушує вживати заходів з управління та стабілізації вихідної напруги. Регулювання і стабілізацію вихідної напруги АІТ виконують у такий спосіб:

- зміна напруги живлення  $E$  шляхом використання у вхідному ланцюзі інвертора керованого випрямляча або імпульсного перетворювача постійної напруги;

- введення у схему інвертора компенсуючого пристрою (компенсатора). Компенсатор включають паралельно вихідному ланцюгу інвертора з метою зміни активної або реактивної потужності АІТ, при зміні параметрів навантаження (струму).

У якості компенсатора у АІТ, використовують некерований або керований випрямляч або індуктивно - тиристорний компенсатор.

Компенсатор є аналогом регульованої індуктивності з метою компенсації реактивності конденсатора при зміні струму навантаження.

Застосування індуктивно - тиристорного компенсатора у АІТ має велику перевагу перед зворотним випрямлячем. Це пов'язано з тим, що при регулюванні і стабілізації вихідної напруги, компенсатор практично не споживає активної потужності.