

Лекція 11

Активні інтегратори і перетворювачі напруги на перемикаючих конденсаторах

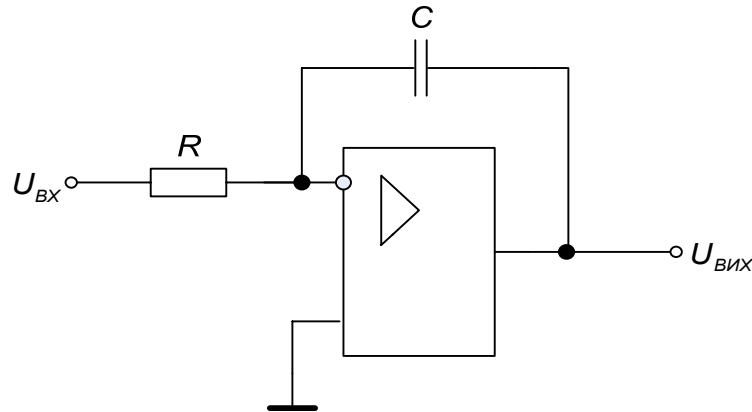
Мета лекції: вивчення побудови та принципів дії схем активних інтеграторів та перетворювачів напруги на перемикаючих конденсаторах (ПК).

План лекції:

- 11.1 Активні інтегратори на перемикаючих конденсаторах.
- 11.2 Перетворювачі напруги на перемикаючих конденсаторах (Зарядовий насос).
- 11.3 Контрольно-навчальний тест до лекції 11.

11.1 Інтегратори на перемикаючих конденсаторах

В активних RC-схемах часто застосовують так званий інтегратор Міллера (мал.11.1), що містить операційний підсилювач (ОП), конденсатор і резистор.



Мал. 11.1. Активний інтегратор на RC елементах.

Така схема виконує функцію інтегрування:

$$U_{ВІХ} = \frac{1}{RC} \int_0^t U_{ВХ} dt, \text{ при } U_{ВХ} = const \text{ і } K_{ОП} \rightarrow \infty \quad U_{ВІХ} = U_{ВХ} \frac{t_{інт}}{RC}.$$

При $K_{ОП} \neq \infty$ виникає похибка нелінійності інтегрування сталої напруги:

$$\gamma_{інт} \approx -50\% \frac{t_{інт}}{K_{ОП} RC}.$$

При коефіцієнті підсилення $K_{ОП} \rightarrow \infty$ передатна функція RC інтегратора

$$K_{RC} = \frac{1/pC}{R} = \frac{1}{p\tau}, \text{ де } \tau = RC.$$

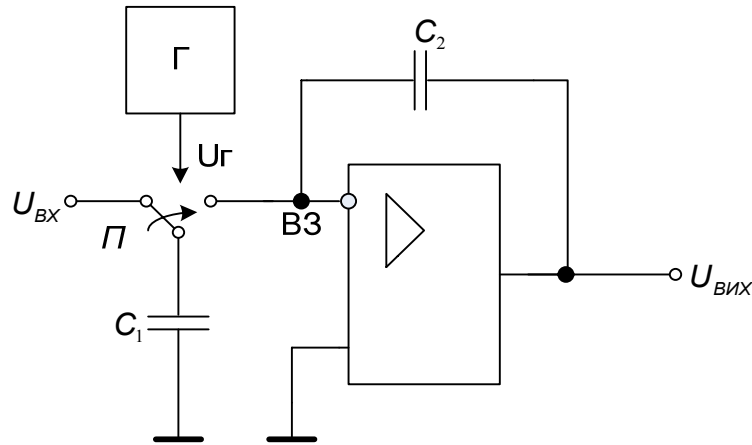
Після підстановки $p = j\omega$ отримаємо:

$$K_{RC}(j\omega) = \frac{U_{ВІХ}(j\omega)}{U_{ВХ}(j\omega)} = -\frac{1}{j\omega RC}.$$

Звідки можна отримати такі АЧХ і ФЧХ:

$$|K_{RC}(j\omega)| = \frac{1}{\omega RC}, \quad \varphi(\omega) = \frac{\pi}{2}.$$

Якщо в інтеграторі Міллера замінити резистор R відповідним блоком з перемикаючими конденсаторами, то отримаємо активний інтегратор на перемикаючих конденсаторах (мал.11.2).



Мал.11.2. Інтегратор на ПК.

На мал. 11.3. показана напруга імпульсного генератора $U_{\Gamma}(t)$, яка подається на перемикач П. При цьому конденсатор C_1 по чергову під'єднується то до вхідної напруги $U_{ВХ}$, то до точки віртуальної землі ОП. В наслідок чого відбувається перекидання зарядів з конденсатора C_1 на конденсатор C_2 тому що від'ємний зворотній зв'язок миттєво зрівноважує будь-який заряд, що з'являється в точці ВЗ віртуальної землі ОП.

При $U_{ВХ} = \text{const}$ і $K_{\text{оп}} \rightarrow \infty$ вихідна напруга інтегратора зростає стрибкоподібно і лінійно.

При заряді C_1 від $U_{ВХ}$ заряд $q_{C1} = C_1 \cdot U_{ВХ}$.

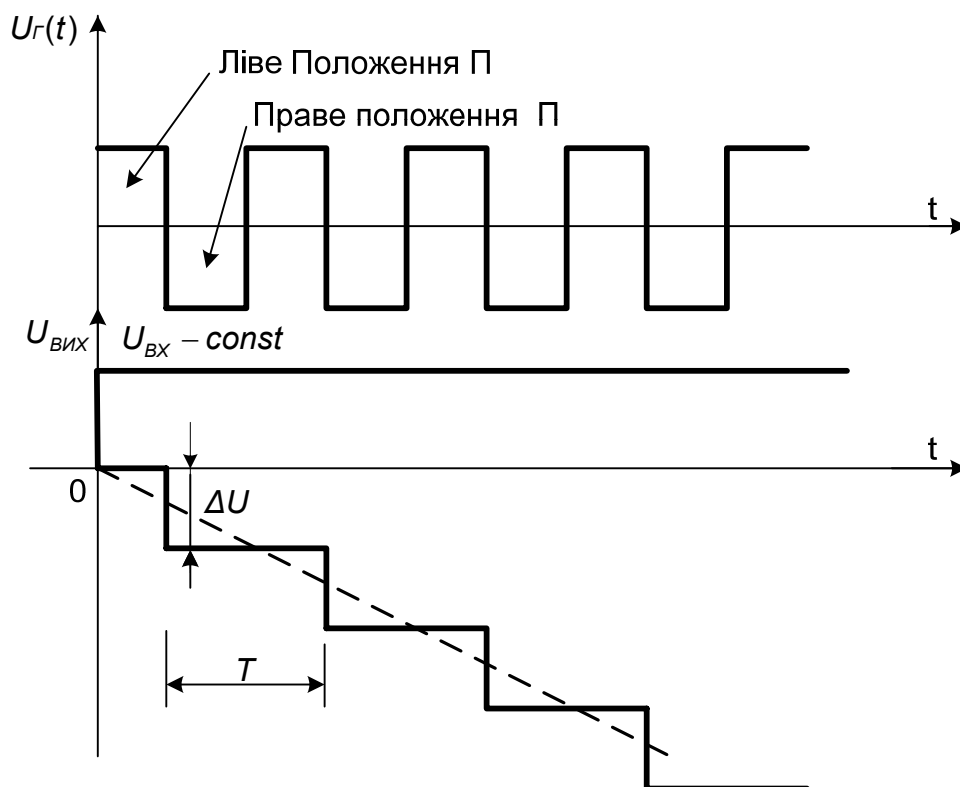
Коли перемикач П займе праве положення конденсатор C_1 миттєво розрядиться через ВЗ і одночасно ОП збільшить вихідну напругу на величину ΔU , щоб через від'ємний зворотній зв'язок дозарядити конденсатор C_2 компенсуючи стрибок напруги в точці ВЗ. Заряд q_{C2} , на яку збільшиться заряд конденсатора C_2 буде протилежний за знаком і рівний заряду q_{C1} конденсатора

C_1 за попередній півперіод управляючого сигналу генератора Г. Тобто

$C_1 U_{ВХ} = -\Delta U C_2$, тобто стрибок вихідної напруги ОП $\Delta U = -\frac{C_1}{C_2} U_{ВХ}$. Протягом

наступного періоду конденсатор C_1 знов отримає заряд $q_{C1} = C_1 \cdot U_{ВХ}$. Протягом цього півперіода заряду конденсатора C_1 конденсатор C_2 тримає заряд отриманий в попередній період. При перемиканні П в праве положення ОП знов підвищить вихідну напругу, компенсуючи заряд на ВЗ і т.д. Для n -тактів:

$$U_{ВИХ} = n \cdot \Delta U = -\frac{C_1}{C_2} U_{ВХ} \cdot n.$$



Мал. 11.3- Зростання напруги на виході інтегратора на ПК.

Тоді для довільного i -ого такту напруга на виході активного інтегратора на ПК:

$$U_{ВИХ i} = -\frac{C_1}{C_2} i \cdot U_{ВХ}, \text{ де } i=0,1,2,\dots$$

Запишемо сигнал $U_{ВИХ}$ в опера- торній формі, для цього врахуємо, що

стрибок вхідної напруги за Лапласом: $U_{BX} \cdot 1(t) \rightarrow \frac{U_{BX}}{s}$. Зображення наступного

стрибка з зсувом на період T відповідно до теореми зміщення: $\frac{U_{BX}}{s} e^{-sT}$ і т.д.

Тобто можна записати, що

$$U_{ВИХ}(s) = -\frac{C_1}{C_2} U_{BX} \frac{1}{s} (1 + e^{-sT} + e^{-2sT} + \dots + e^{-isT} \dots)$$

Аналогічно, як і для пасивного інтегратора, застосовуючи підрахунок суми n членів геометричної регресії, отримаємо:

$$U_{ВИХ}(s) = -\frac{C_1}{C_2} U_{BX} \frac{1}{s \cdot (1 - e^{-sT})}$$

Коефіцієнт передачі в операторній формі:

$$K(s) = \frac{U_{ВИХ}(s)}{U_{BX}(s)} = -\frac{C_1}{C_2} \frac{1}{1 - e^{-sT}}$$

Підставивши $s = j\omega$ отримаємо:

$$K(j\omega) = -\frac{C_1}{C_2} \frac{1}{1 - e^{-sT}} = -\frac{C_1}{C_2} \frac{1}{(1 - \cos \omega T + j \sin \omega T)}$$

Модуль передачі (амплітудно-частотна характеристика АЧХ) активного інтегратора на ПК:

$$|K(j\omega)| = \frac{C_1}{C_2} \frac{1}{\sqrt{(1 - 2 \cos \omega T + \cos^2 \omega T + \sin^2 \omega T)}} = \frac{C_1}{C_2} \frac{1}{\sqrt{(1 - 2 \cos \omega T + 1)}}$$

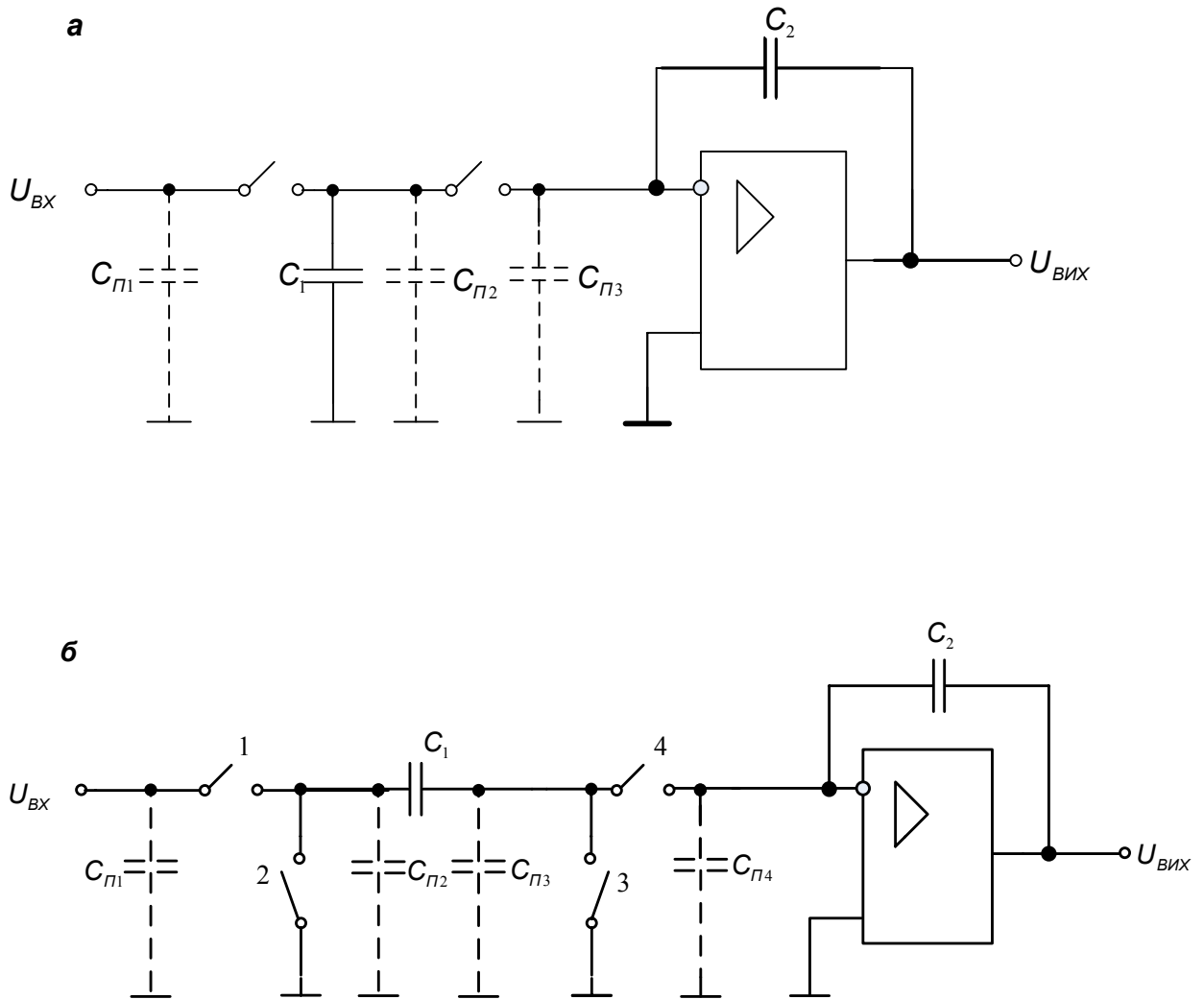
$$|K(j\omega)| = \frac{C_1}{C_2} \frac{1}{\sqrt{2(1 - \cos \omega T)}}, \text{ тобто АЧХ є періодичною функцією.}$$

У активного RC- інтегратора (мал.11.1) АЧХ має гіперболічну залежність:

$$|K(j\omega)| = \frac{1}{\omega \tau}$$

$$\text{Похибка інтегрування: } \gamma_{\text{инт}} \approx -50\% \frac{C_1}{K_{\text{оп}} C_2} \cdot i$$

Розглянемо тепер вплив паразитних ємностей на властивості інтеграторів на перемикаючих конденсаторах. З цією метою проаналізуємо дві структурні схеми інтеграторів наведених на мал.11.4 а. Перший з інтеграторів це схема мал.11.4 б, де штрихованими лініями позначені найбільш суттєві паразитичні ємності.



Мал.11.4. Паразитні ємності в монолітній мікросхемі інтегратора з ПК:

а- схема чутлива до впливу паразитних ємностей;

б- схема не чутлива до впливу паразитних ємностей.

Зазначимо спочатку, що ємності $C_{п1}, C_{п3}$ не впливають на похибку інтегратора мал.11.4 а, оскільки вони підключені паралельно до джерела напруги або до віртуального заземлення (інвертуючий вхід ОП). Істотним зате є вплив ємності $C_{п2}$, оскільки вона підключена паралельно C_1 .

Передатна функція в цьому випадку:

$$K(s) = \frac{C_1 + C_{п2}}{C_2} \frac{1}{1 - e^{-sT}} = -\frac{C_1}{C_2} \left(1 + \frac{C_{п2}}{C_1} \right) \frac{1}{1 - e^{-sT}}$$

Таким чином, виникає похибка, величина якої визначається

відношенням $\frac{C_{п2}}{C_1}$.

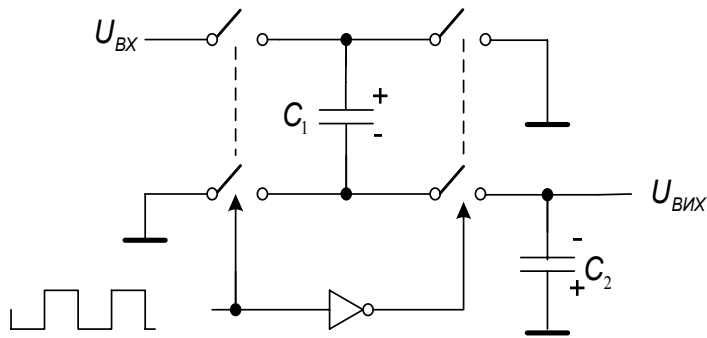
Відмінність іншого інтегратора (мал. 11.4 б) в тому, що обидві обкладки конденсатора C_1 є перемикаючими. У першому такті ключі 1, 3 замкнені, а 2, 4 розімкнені і ємності $C_{п1}$, $C_{п2}$ і C_1 ввімкнені до джерела напруги $U_{вх}$, а ємність $C_{п3}$ замкнена на землю і, отже, повністю розряджена. В свою чергу, у другому такті ключі 1, 3 розімкнені, а 2, 4 - замкнені і ємність $C_{п2}$ розряджена до потенціалу землі, а $C_{п3}$ ввімкнена до віртуальної землі, завдяки чому обидві обкладки $C_{п3}$ мають рівний потенціал.

Таким чином, заряд, накопичений на C_1 , повністю переходить на конденсатор C_2 . Це означає, що паразитні ємності не впливають на роботу цього інтегратора. Він також залишиться нечутливим до впливу паразитних ємностей, якщо змінити порядок управління ключами.

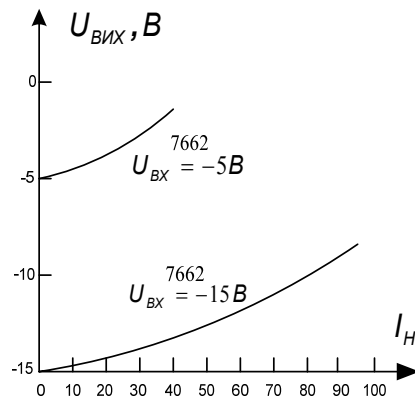
11.2. Перетворювачі напруги на перемикаючих конденсаторах (Зарядовий насос).

Перетворювачі напруги на комутаційних конденсаторах здатні створювати вихідну постійну напругу, більшу ніж вхідну або навіть протилежної полярності.

На мал. 11.5 показана спрощена схема КМОН IC 7662 фірми Intersil з розширеною вторинною частиною (обв'язкою). Вона має внутрішній генератор і декілька ключів КМОН; для її роботи необхідні два зовнішніх конденсатора. Якщо вхідна пара ключів замкнена (в провідному стані) C_1 , заряджається до $U_{вх}$; після цього під час другого напівциклу C_1 відмикається від входу і під'єднується в перевернутому стані до виходу. Таким чином, він передає свій заряд на C_2 (і навантаження), забезпечуючи на виході напругу, рівну приблизно $-U_{вх}$. З іншого боку, ви можете використати 7662 для формування напруги $2U_{вх}$, організувавши схему таким чином, що C_1 буде заряджуватись так, як і раніше, але після цього на другій половині циклу буде вмикатись послідовно з $U_{вх}$.

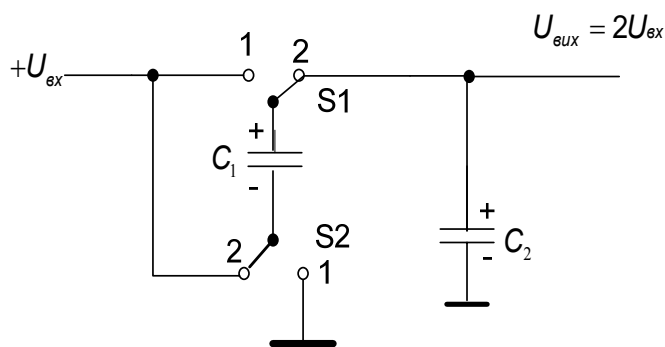


Мал.11.5- Інвертор напруги на ПК. C_1 і C_2 зовнішні танталові конденсатори ємністю 10 мкФ.



Мал. 11.6. Вихідна напруга з інвертора на ПК під на-вантаженням значно зменшується.

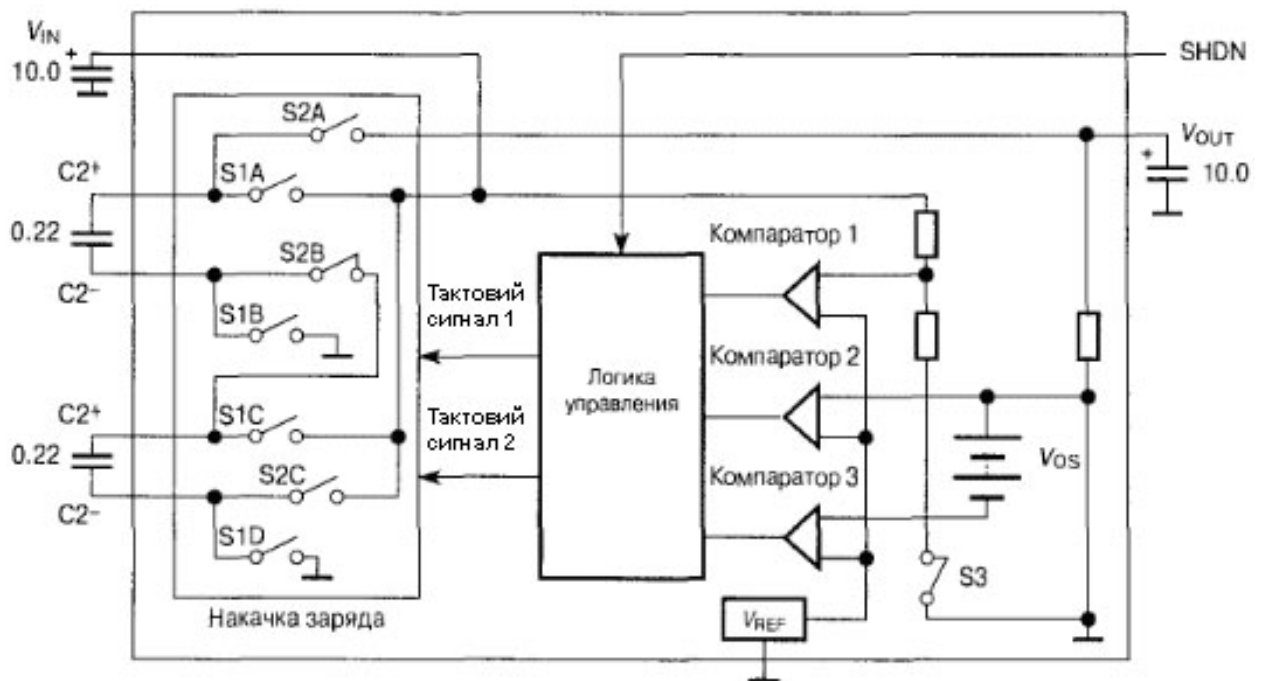
На мал.11.7. показана схема подвоєння напруги на ПК.



Мал. 11.7. Схема подвоєння на ПК.

Конденсатор C_1 , комутація якого в схему здійснюється за допомогою двох ключів S_1 і S_2 , називається «літаючим». Спочатку «літаючий» C_1 конденсатор заряджається через ключі S_1 (положення 1) S_2 (положення 1), а потім він комутується в ланцюг навантаження послідовно з джерелом живлення S_1 (положення 2), S_2 (положення 2), щоб отримати вихідну напругу, що в два рази перевищує вхідну.

На мал. 11.8. показана схема подвоєння та потроєння напруги на ПК.



Мал. 11.8. Схема подвоєння та потроєння напруги на ПК (LT1516).

Вихідна напруга через подільник надходить на компаратор 2 і порівнюється з внутрішньою опорною напругою. Якщо напруга, що знімається з підільника нижче порога спрацьовування, то активізуються ключі накачування заряду, і заряд передається від входу до виходу до тих пір, поки вихідна напруга не зросте до точки спрацьовування компаратора 2. При такому «пакетному» режимі роботи з'являються низькочастотні пульсації вихідної напруги, амплітуда яких дорівнює величині гістерезису компаратора 2. Наявні також і виникаючі у процесі заряду вихідного конденсатора високочастотні пульсації вихідної напруги з частотою комутації схеми накачування заряду.

У LT1516 використовуються два «літаючих» конденсатора, щоб виконувати

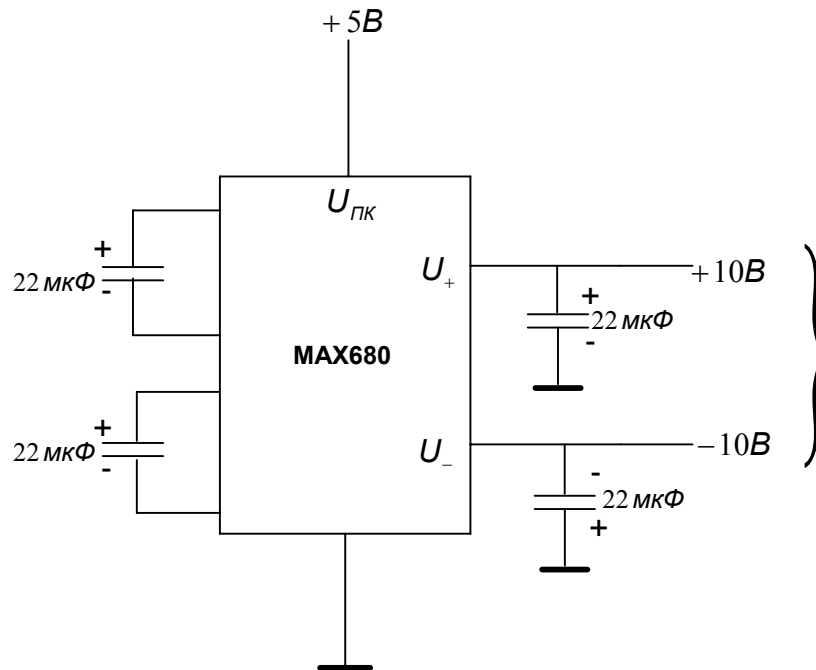
як подвоєння, так і потроєння напруги. Коли $U_{вх}$ нижче 2.55 В, сигнал з виходу компаратора 1 змушує логічну схему управління перевести контролер у режим потроєння напруги. Під час фази заряду за допомогою ключів обидва «літаючі» конденсатори комутуються так, що виявляються підключеними між джерелом вхідної напруги і землею. У фазі розряду «літаючий» конденсатор C_1 включається послідовно з конденсатором C_2 , і обидва вони комутуються послідовно з джерелом вхідної напруги. Як тільки $U_{вх}$ перевищує 2.55 В, мікросхема перемикається в режим подвоєння напруги і в якості «літаючого» конденсатора використовується тільки C_2 . Вхід компаратора 3 має зсув 50 мВ від напруги зворотного зв'язку на компараторі 2. Якщо вхідна напруга падає на 50 мВ або більше, компаратор 3 переводить мікросхему знову в режим потроєння до тих пір, поки це напруга не зросте до точки спрацьовування компаратора 3.

Вхідний і вихідний конденсатори в схемі з LT1516 можуть бути танталовими або електролітичними, тому що тут ми маємо справу з компараторним управлінням (двопозиційним), а не з управлінням з використанням підсилювача сигналу помилки (пропорційне керування), і тому немає контуру зворотного зв'язку, який може збудитися. ЕПС конденсаторів не впливає на стійкість управління, його вплив позначається тільки на напрузі пульсацій. Оптимальним є паралельне з'єднання керамічного конденсатора з малим ЕПС (близько 1 мкФ) і електролітичного або танталового конденсатора великої ємності (близько 10 мкФ). Керамічний конденсатор знижує пульсації частоти 600 кГц від пачок зарядних імпульсів, а електролітичний знижує пульсації на частоті управління.

Такі способи побудови прості і ефективні. Для їх реалізації необхідно усього декілька компонентів (індуктивності не потрібні). Однак вихідна напруга схем не стабілізована, тому істотно падає при струмах навантаження більше декількох міліампер (мал. 11.6). Крім того, більшість таких КМОН-приладів мають обмежений діапазон напруг живлення. Нарешті, на відміну від індуктивних та інвертуючих схем, що можуть генерувати будь-яку напругу, перетворювачі напруги на перемикаючих конденсаторах можуть формувати напруги тільки кратні $U_{вх}$. Незважаючи на ці недоліки, перетворювачі на конденсаторах за певних умов дуже зручні, наприклад, для того щоб забезпечити живлення біполярних операційних підси-

лювачів або послідовного порта (+12В, -12В) на схемній платі, що має живлення тільки +5 В.

Приклади мікросхем на ПК. МАХ680 фірми Махіт-це подвійне джерело, що виробляє ± 10 В (до 10 мА) від +5 В (мал. 11.9).



Мал. 11.9. ІС подвійного джерела напруги на ПК.

Схожа схема LT1026 фірми LTC формує вихід 20 В (до 20 мА) і використовує конденсатори меншої ємності (1 мкФ замість 20 мкФ). Схема LT1054 фірми LTC поєднує перетворювач на перемикаючих конденсаторах з лінійним стабілізатором і виробляє достатньо потужний стабілізований вихід із струмами навантаження 100 мА (при більш низькому коефіцієнті корисної дії, проте). Схеми серії МАХ232 і схема LT1080 об'єднують джерело на перемикаючих конденсаторах ± 10 В і цифровий послідовний порт RS-232С. Деякі ІС з серії МАХ232 містять навіть вбудовані конденсатори. Схема LTC 1043 являє собою незавершений блок на комутаційних конденсаторах, який можна використати для різного призначення.

Схема LTC 1043 являє собою незавершений блок на комутаційних конденсаторах, який можна використати для різного призначення.

11.3 Контрольно-навчальний тест до лекції 11

Питання 11.1

Яка реакція на „стрибок” вхідної напруги ідеального інтегратора на ПК?

Вибір правильної відповіді:

1 – лінійно-зростаюча напруга

$U_{\text{вих}}(t)$;

2 – стрибками лінійно-зростаюча

напруга $U_{\text{вих}}(t)$;

3 – експоненціально зростаюча

напруга $U_{\text{вих}}(t)$;

Питання 11.2

Чим визначається “стрибок” вихідної напруги інтегратора?

Вибір правильної відповіді:

1 – частотою комутації;

2 – конденсаторами C_1 , C_2 і $U_{\text{вх}}$;

3 – кількістю тактів n ;

Питання 11.3

Чим визначається похибка інтегрування в інтеграторах на ПК?

Питання 11.4

Які паразитні ємності впливають і не впливають на передатну характеристику інтегратора мал.11.4 *a*?

Вибір правильної відповіді:

- 1 – значеннями конденсаторів C_1 , C_2 , $K_{оп}$ і кількістю тактів i ;
- 2 – тільки кількістю тактів i ;

Вибір правильної відповіді:

- 1 – $C_{п1}$, $C_{п3}$ впливають, а $C_{п2}$ не впливає на передатну характеристику;
- 2 – $C_{п1}$, $C_{п3}$ не впливають, а $C_{п2}$ впливає на передатну характеристику;

Питання 11.5

Чому схема мал. 11.4 б нечутлива до паразитних ємностей? Бо

Питання 11.6

Як співвідносяться вхідна і вихідна напруги перетворювачів на ПК?

Питання 11.7

Як, маючи $U_{ВХ} = +5В$, отримати $U_{ВИХ} = +10В$ (мал. 11.5)?

Вибір правильної відповіді:

1 – $C_{П1}$, $C_{П4}$ під'єднані до $U_{ВХ}$, а $C_{П2}$, $C_{П3}$ під'єднані до C_1 однією обкладинкою;

2 – $C_{П1}$, $C_{П4}$ під'єднані до $U_{ВХ}$ і „віртуального” входу підсилювача, а $C_{П2}$, $C_{П3}$ розряджаються ключами;

Вибір правильної відповіді:

1 – $U_{ВИХ}$ більша або менша $U_{ВХ}$ залежно від значень конденсаторів C_1 і C_2 ;

2 – $U_{ВИХ}$ кратна $U_{ВХ}$;

Вибір правильної відповіді:

1 – необхідно C_2 з'єднати послідовно з $U_{ВХ}$, а C_1 періодично під'єднувати до $U_{ВХ}$ і до C_2 ;

2 – збільшити C_2 у два рази, відповідно до C_1 .