



АНАЛОГОВА СХЕМОТЕХНИКА

ДЕМОНСТРАТОР КЪМ МОДУЛ 13

Цел

Целта на демонстратора е да се затвърдят теоретичните познания и да се подпомогне самоподготовката.

Линейни операционни схеми

Дейности

На фиг. 12.1а е дадена основната схема на интегратор с операционен усилвател. За нея изходното напрежение при допускането, че ОУ е идеален, има вида

$$(12.1) u_o(t) = -\frac{1}{RC} \int u_i(t) dt .$$

Ако се отчете влиянието на входното напрежение на несиметрия и входния поляризиращ ток изходното напрежение е

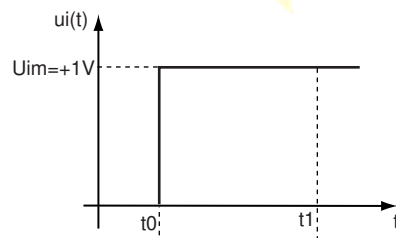
$$(12.2) u_o(t) = -\frac{1}{RC} \int u_i(t) dt + U_{o\varepsilon} ,$$

където

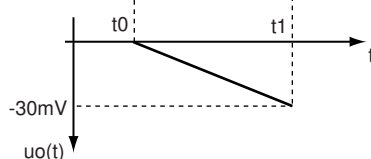
$$(12.3) U_{o\varepsilon} = \pm \frac{1}{RC} \int U_{i_o} dt + \frac{1}{C} \int I_{iB}^- dt \pm U_{i_o} .$$

Ако към неинвертиращия вход на ОУ се включи резистор $R' = R$ към маса (фиг. 12.1б), тогава I_{iB} се компенсира и (12.3) добива вида:

$$(12.4) U_{o\varepsilon} = \pm \frac{1}{RC} \int U_{i_o} dt + \frac{1}{C} \int I_{i_o} dt \pm U_{i_o} .$$



Фиг. 12.2а



Фиг. 12.2б

Пример 12.1

Начертайте зависимостта $u_o(t)$ на интегратор, на входа на който е подаден стъпаловиден сигнал с амплитуда $U_{im}=1V$ (фиг. 12.2а). Каква ще бъде амплитудата на изходния сигнал, ако $R = 1M\Omega$ и $C = 0,1\mu F$, след време $t=3ms$.

Решение:

Записваме входния сигнал във функция от времето:



МИНИСТЕРСТВО НА ОБРАЗОВАНИЕТО И НАУКАТА

Проект BG051PO001-3.1.07-0048 „Актуализиране на учебните планове и програми на специалностите във ФЕТТ, ФТК и МТФ на ТУ-София и създаване на нова съвместна магистърска специалност в съответствие с потребностите на пазара на труда”

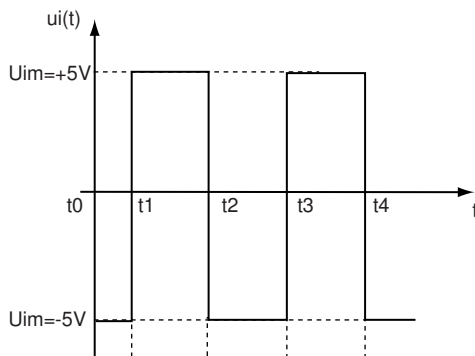
- при $t < t_0$, $u_i = 0V$;
- при $t \geq t_0$, $u_i = U_{im} = 1V$.

От уравнение (12.1) за изходната реакция се получава

$$u_o(t) = -\frac{1}{RC} \int u_i(t) dt = -\frac{1}{RC} \int U_{im} dt = -\frac{1}{RC} \cdot 1V \cdot t \quad \text{- линейно изменящо се}$$

изходно напрежение.

За да се намери амплитудата на изходния сигнал U_{om} в момента t_1 (приема се, че в началния момент t_0 кондензаторът C не се е заредил и изходното напрежение е нула), интегрирането се извършва в границите от $t_0=0$ до $t_1=3ms$



Фиг. 12.3а

$$u_o(t) = -\frac{1}{RC} \int_{t_0}^{t_1} U_{im} dt = -\frac{1}{RC} \cdot 1V \cdot t \Big|_{t_0=0}^{t_1=3ms} = -30mV$$

,или $U_{om} = -30mV$ (фиг. 12.2б).

Пример 12.2

В интегратор $R = 10k\Omega$ и $C = 0,1\mu F$.

Входният сигнал е правоъгълно напрежение с честота $f=1kHz$ амплитуда $5,0V$ (размах $10V$ от връх до връх). Определете формата и амплитудата на изходния сигнал.

Решение:

Входният сигнал (фиг. 12.3а) може да се опише по следния начин

$$u_i(t) = \begin{cases} -5V, & \text{за } 0 < t < t_1 \\ +5V, & \text{за } t_1 < t < t_2 \\ -5V, & \text{за } t_2 < t < t_3. \end{cases}$$

Тъй като сигналът е периодичен, за да се намери формата и амплитудата на изходния сигнал е достатъчно да се разгледа един пълен период, в случая от t_1 до t_3 .

Ислучай. Интегрирането на входния сигнал започва в момента t_0 , когато $U_{im} = -5V$ и $t_1 - t_0 = 0,25ms$ (първоначалното напрежение върху C е нула), $t_2 - t_1 = 0,5ms$ и $t_3 - t_2 = 0,5ms$.

- при интегриране в интеграла $t_0 \div t_1$ се получава

$$u_o(t) = -\frac{1}{RC} \int_{t_0}^{t_1} (-5V) dt = -\frac{1}{10 \cdot 10^3 \cdot 0,1 \cdot 10^{-6}} (-5V) \cdot (t_1 - t_0) = 10^3 \cdot 5 \cdot 0,25 \cdot 10^{-3} = +1,25V$$

;



МИНИСТЕРСТВО НА ОБРАЗОВАНИЕТО И НАУКАТА

Проект BG051PO001-3.1.07-0048 „Актуализиране на учебните планове и програми на специалностите във ФЕТТ, ФТК и МТФ на ТУ-София и създаване на нова съвместна магистърска специалност в съответствие с потребностите на пазара на труда”

- при интегриране в интервала $t_1 \div t_2$

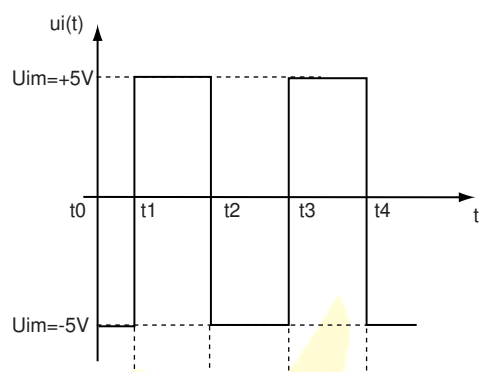
$$u_o(t) = -\frac{1}{RC} \int_{t_1}^{t_2} (+5V) dt + \underbrace{1,25V}_{u_o(t_1)} = -\frac{1}{RC} \cdot 5V \cdot (t_2 - t_1) + 1,25V = -2,5V + 1,25V = -1,25V$$

;

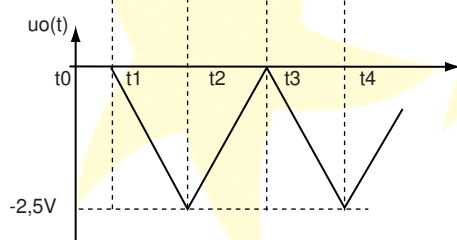
- при интегриране за интервала $t_2 \div t_3$ се получава

$$u_o(t) = -\frac{1}{RC} \int_{t_2}^{t_3} (-5V) dt + \underbrace{(-1,25V)}_{u_o(t_2)} = 2,5V - 1,25V = +1,25V.$$

Формата на изходното напрежение в графичен вид е показана на фиг. 12.3б. Вижда се, че сигналът е с триъгълна форма и амплитуда $\pm 1,25V$.



Фиг. 12.4а



Фиг. 12.4б

и амплитуда $-2,5V$ до $0V$.

Пример 12.3

Изчислете грешката U_{oe} след $t=1ms$ на интегратор с $R=100k\Omega$ и $C=0,1\mu F$. Операционният усилвател е с параметри $U_{io}=1mV$, $I_{iB}=100nA$ и $I_{io}=1nA$.

Решение: Съгласно (12.3) се получава $U_{oe}=1,101V$.

Пример 12.4

За пример 12.3 изчислете U_{oe} ако към неинвертиращия вход е включен резистор R и ако $I_{io}=1nA$.

2 случай. Интегрирането на входния сигнал (фиг. 12.4а) започва в момента t_1 (първоначалното напрежение върху C е нула)

- при интегриране в интервала от $t_1 \div t_2$ се получава

$$u_o(t) = -\frac{1}{RC} \int_{t_1}^{t_2} (+5V) dt = -\frac{1}{RC} \cdot 5V \cdot (t_2 - t_1) = -2,5V$$

;

- при интегриране в интервала $t_2 \div t_3$ се получава

$$u_o(t) = -\frac{1}{RC} \int_{t_2}^{t_3} (-5V) dt + (-2,5V) = 2,5V - 2,5V = 0V$$

Формата на изходното напрежение в графичен вид е показана на фиг. 12.4б. Вижда се, че сигналът е с триъгълна форма



Проект BG051PO001-3.1.07-0048 „Актуализиране на учебните планове и програми на специалностите във ФЕТТ, ФТК и МТФ на ТУ-София и създаване на нова съвместна магистърска специалност в съответствие с потребностите на пазара на труда“

Решение: Съгласно (12.4) се получава

$$U_{o\varepsilon} = 101mV + \frac{1}{0,1 \cdot 10^{-6}} \cdot 1 \cdot 10^{-9} \cdot 1s = 101mV + 10mV = 111mV.$$

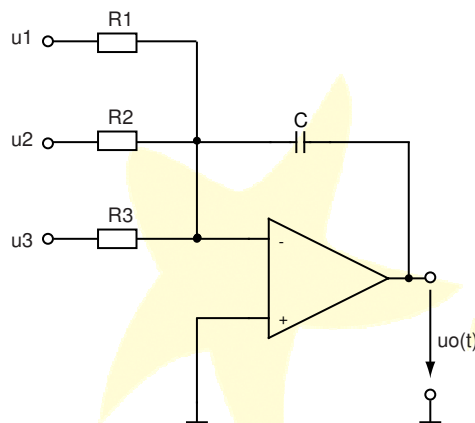
Пример 12.5

За схемата триходовия интегратор (фиг. 12.5), чиято функция на изходното напрежение има вида $U_o(t) = -\int_0^t (U_1 + 2U_2 + 10U_3) dt$, определете стойностите на резисторите, ако $C = 1\mu F$ и при допускането, че ОУ е идеален.

Решение:

От анализа на схемата от фиг. 12.5 по метода с възловите напрежения и принципа на суперпозицията за изходното напрежение се получава

$$u_o(t) = -\frac{1}{R_1 C} \int_0^t u_1 dt - \frac{1}{R_2 C} \int_0^t u_2 dt - \frac{1}{R_3 C} \int_0^t u_3 dt = -\int_0^t u_1 dt - 2 \int_0^t u_2 dt - 10 \int_0^t u_3 dt.$$



Фиг. 12.5

От сравняването на левите и десните страни на горното равенство се получават

$$\frac{1}{R_1 C} = 1s^{-1}, \quad R_1 = \frac{1}{C} = \frac{1}{1 \cdot 10^{-6}} = 1M\Omega;$$

$$\frac{1}{R_2 C} = 2s^{-1}, \quad R_2 = \frac{1}{2 \cdot 1 \cdot 10^{-6}} = 500k\Omega;$$

$$\frac{1}{R_3 C} = 10s^{-1}, \quad R_3 = \frac{1}{10 \cdot 1 \cdot 10^{-6}} = 100k\Omega.$$

2. ДИФЕРЕНЦИАТОРИ С ОПЕРАЦИОННИ УСИЛВАТЕЛИ

Основната схема на диференциатор с ОУ е показана на фиг. 12.6. От анализа на схемата по метода с възловите напрежения и при идеален ОУ за изходното напрежение се получава

$$(12.5) u_o = -RC \frac{du_i}{dt}.$$

Ако се отчете влиянието на входното напрежение на несиметрия и входния

поляризиращ ток (фиг. 12.7) изходното напрежение при $R' = 0$ е

$$(12.6) U_o = -RC \frac{du_i}{dt} + U_{o\varepsilon},$$

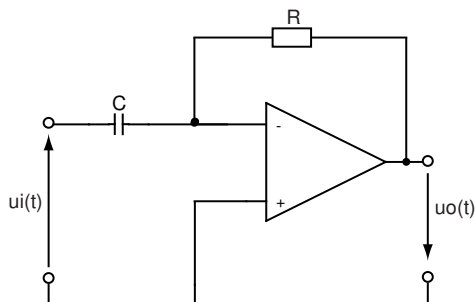


МИНИСТЕРСТВО НА ОБРАЗОВАНИЕТО И НАУКАТА

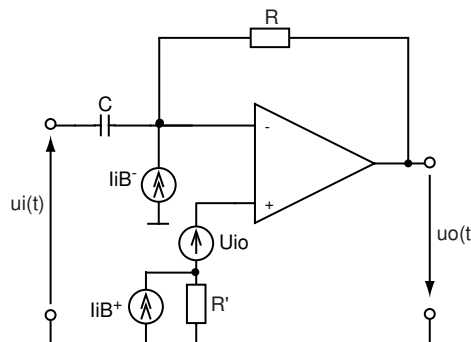
Проект BG051PO001-3.1.07-0048 „Актуализиране на учебните планове и програми на специалностите във ФЕТТ, ФТК и МТФ на ТУ-София и създаване на нова съвместна магистърска специалност в съответствие с потребностите на пазара на труда“

КЪДЕТО

$$(12.7) U_{oo\varepsilon} = I_{iB}^- R \pm U_{io} .$$



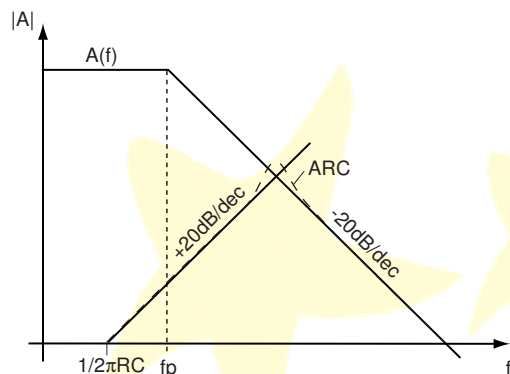
Фиг. 12.7



Фиг. 12.6

Ако към неинвертиращия вход на ОУ се включи резистор R' към маса (фиг. 12.7), тогава (12.7) добива вида:

(12.8) $U_{oo\varepsilon} = \pm U_{io} - I_{iB}^- R + R' I_{iB}^+$. Ако $R' = R$ входният поляризиращ ток се компенсира и изходната реакция се получава $U_{oo\varepsilon} = \pm U_{io} + I_{io} R$.



Фиг. 12.8

Амплитудно-честотната характеристика на диференциатор с операционен усилвател без корекция е показана на фиг. 12.8. Както се вижда от графиката изменението на АЧХ на диференциатора е $40dB/dec$. в точката на пресичане с АЧХ на ОУ. В тази област усилвателят може да се самовъзбуди, при което се насища по напрежение. За да се избегна това в инженерната практика е

намерила приложение схемата от фиг. 12.9а. В нея е добавена корекция реализирана чрез R_k и C_k . Новата АЧХ с корекция е дадена на фиг. 12.9б. Предавателна функция по напрежение се получава

$$(12.9) A_{RC}(j\omega) = -\frac{R}{R_k} \cdot \frac{1}{(1 + j\omega RC_k) \left(1 + \frac{1}{j\omega CR_k}\right)} \text{ или}$$



МИНИСТЕРСТВО НА ОБРАЗОВАНИЕТО И НАУКАТА

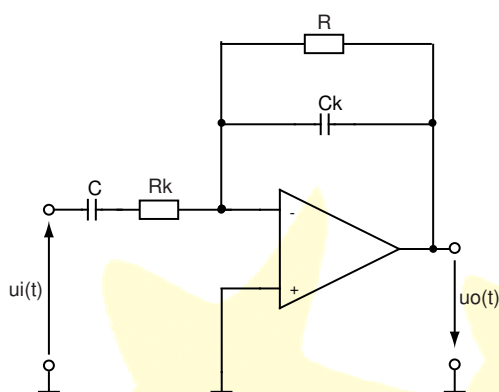
Проект BG051PO001-3.1.07-0048 „Актуализиране на учебните планове и програми на специалностите във ФЕТТ, ФТК и МТФ на ТУ-София и създаване на нова съвместна магистърска специалност в съответствие с потребностите на пазара на труда“

$$(12.10) \quad \left| \dot{A}_{RC}(j\omega) \right| = \frac{R}{R_k} \cdot \frac{1}{\sqrt{\left[1 + \left(\frac{f}{f_p} \right)^2 \right] \left[1 + \left(\frac{f_z}{f} \right)^2 \right]}}, \text{ където } f_z = f_1 = \frac{1}{2\pi R_k C}$$

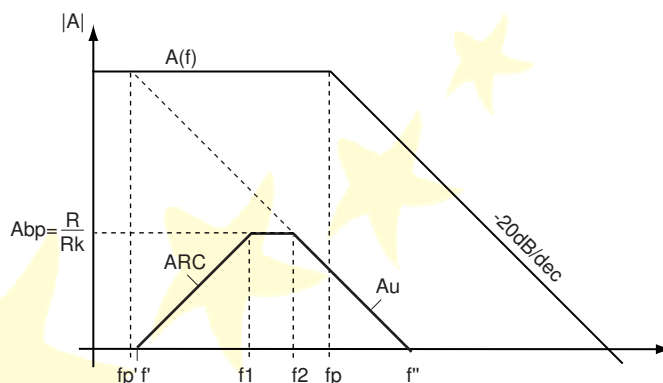
$$\text{и } f_p = f_2 = \frac{1}{2\pi RC_k}$$

Допълнително от графика на фиг. 12.9б се получават следните характерни честоти: $f' = \frac{1}{2\pi RC}$, $f'' \approx \frac{R}{R_k} \cdot \frac{1}{2\pi RC_k} = \frac{1}{2\pi R_k C_k}$,

$$f' = \frac{f_1}{R/R_k} = \frac{1}{2\pi RC} \text{ и } f_p' = \frac{f''}{A_d} = \frac{1}{2\pi R_k C_k A_d}$$



Фиг. 12.9а



Фиг. 12.9б

Следователно в областта:

- от $f' \div f_1$ - схемата работи като диференциатор;
- от $f_z \div f_2$ - схемата работи като инвертиращ усилвател;
- от $f_2 \div f''$ - схемата работи като интегратор.

Таблица 12.1. Зависимост на грешката на диференциатор от честотата f_1 .

f_{imax}^*	f_1	$0,01 f_1$	$0,1 f_1$	$0,33 f_1$
$\varepsilon, \%$	50%	<1%	$\approx 1\%$	$\approx 5\%$

Забележка: f_{imax}^* - най-високата честота на входния сигнал U_i .

Пример 12.6

В диференциатора от фиг. 12.6 $R = 100k\Omega$, $C = 0,1\mu F$, а R_k и C_k са избрани така, че да стабилизират схемата. На входа е подадено синусоидално напрежение с $U_{im} = 3V$ и $f_i = 50Hz$. Каква е формата,



МИНИСТЕРСТВО НА ОБРАЗОВАНИЕТО И НАУКАТА

Проект BG051PO001-3.1.07-0048 „Актуализиране на учебните планове и програми на специалностите във ФЕТТ, ФТК и МТФ на ТУ-София и създаване на нова съвместна магистърска специалност в съответствие с потребностите на пазара на труда“

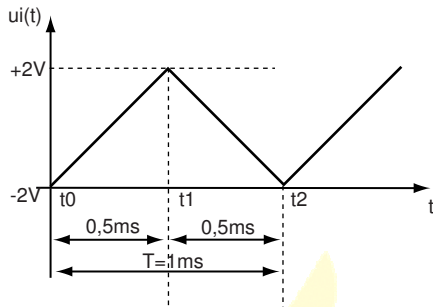
амплитудата и честотата на изходното напрежение, ако се използва идеален ОУ.

Решение:

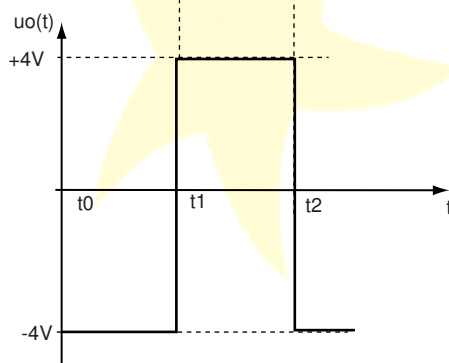
Входният сигнал, подаден към диференциатора се описва със следния израз: $u_i(t) = U_{im} \sin \omega_i t = 3V \sin 2\pi \cdot 50t$. Тогава изходното напрежение

$$\begin{aligned} \text{съгласно (12.5) ще бъде } u_o(t) &= -RC \frac{du_i}{dt} = -RC \omega \cdot \cos \omega_i t = -RC \cdot 2\pi f \cos 2\pi f t = \\ &= -0,1 \cdot 10^{-6} \cdot 0,1 \cdot 10^{-6} \cdot 3 \cdot 2\pi \cdot 50 \cos 2\pi \cdot 50t = \\ &= -9,42V \cdot \cos 2\pi \cdot 50t. \end{aligned}$$

Следователно изходното напрежение е с косинусоидална форма, амплитуда $U_{om} = 9,42V$ и честотата $f_o = 50Hz$.



Фиг. 12.10а



Фиг. 12.10б

Пример 12.7

В диференциатора на фиг. 12.9а $R = 10k\Omega$, $C = 0,1\mu F$, R_k и C_k осигуряват динамичната стабилизация. На входа се подава триъгълно напрежение, показано на фиг. 12.10а, с параметри дадени на фигурата. Определете формата, амплитудата и честотата на изходното напрежение:

Решение:

Тъй като сигналят е периодичен, диференцирането се изпълнява в единия полупериод

$$u_o = -RC \frac{du_i}{dt} = -10 \cdot 10^3 \cdot 0,1 \cdot 10^{-6} \cdot \frac{2}{0,5 \cdot 10^{-3}} = -4V.$$

Следователно изходният сигнал (фиг. 12.10б) има правоъгълна форма с амплитуда $\pm 4V$.

Пример 12.8

Да се изчислят R_k и C_k в диференциатор с $R = 10k\Omega$ и $C = 0,1\mu F$, ако максималният коефициент на усилване $A_F = 1000$ и максималната честота на входния сигнал, който се диференцира $f_{i_{max}} = 10kHz$ при допустима грешка 1%.



МИНИСТЕРСТВО НА ОБРАЗОВАНИЕТО И НАУКАТА

Проект BG051PO001-3.1.07-0048 „Актуализиране на учебните планове и програми на специалностите във ФЕТТ, ФТК и МТФ на ТУ-София и създаване на нова съвместна магистърска специалност в съответствие с потребностите на пазара на труда”

Решение:

От таблица 12.1 при грешка 1% $f_{imax}=0,1f_1$. Тъй като интерес представлява единствено областта на диференциране, то за удобство се полага $f_z=f_p$ или $R_k C = RC_k$.

- Определя се $f_1 = 10f_{imax} = 10 \cdot 10 \cdot 10^3 = 100kHz$.

- Определя се съпротивлението на резистора $R_k = \frac{R}{A_F} = \frac{R}{1000} = 10\Omega$.

- Изпълнява се проверка за така получената стойност на резистора R_k или $f_z = \frac{1}{2\pi R_k C} = 159kHz > 100kHz$ зададено от условието за $\varepsilon \leq 1\%$.

- Определя се капацитета на кондензатора C_k , където $R_k C = RC_k$ -

$$C_k = \frac{R_k C}{R} = \frac{10 \cdot 0,1 \cdot 10^{-6}}{10 \cdot 10^3} = 100pF$$

