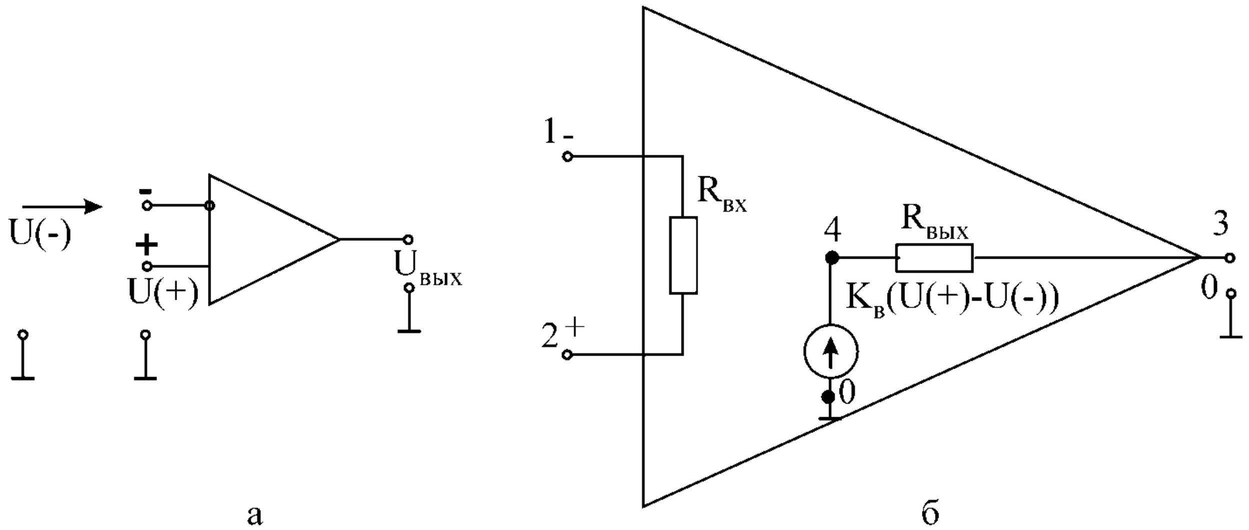
Лабораторная работа №6

ТИПОВЫЕ ЗВЕНЬЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЕЙ

Целью работы является исследование динамических характеристик типовых звеньев электрических цепей с помощью пакета прикладных программ ORCAD PSPICE.

Краткое описание работы операционного усилителя

Операционным усилителем (ОУ) принято называть усилитель постоянного тока с дифференциальным входом и однотактным выходом, характеризующийся высоким коэффициентом усиления, а также большим входным и малым выходным сопротивлениями. Он почти всегда используется с внешней глубокой отрицательной обратной связью, определяющей его результирующие характеристики. На (рис.5.1,а) показано условное графическое обозначение ОУ.



а б

Рис. 5.1

Анализ схем устройств, в которые входит ОУ, значительно упрощается, если использовать представление об идеальном операционном усилителе. Идеальным называется ОУ с входным сопротивлением для разностного сигнала $R_{вх} = \infty$, внутренним коэффициентом усиления напряжения $К_{в} = \infty$ и выходным сопротивлением $R_{вых} = 0$.

Анализ схем включения операционного усилителя упрощается также и потому, что идеальный усилитель за счёт бесконечно большого внутреннего коэффициента усиления и выходного сопротивления, равного нулю, развивает конечное напряжение на любой выходной нагрузке, отличной от нуля, при входном напряжении, равном нулю. Это даёт возможность при анализе схем полагать напряжение между зажимами (+) и (-) равным нулю. Также равным нулю считают ток, ответвляющийся в бесконечно большое входное сопротивление.

Схема замещения операционного усилителя

Эквивалентная схема ОУ показана на (рис.5.1,б). Входная цепь ОУ представлена одним сопротивлением $R_{вх}$. Выходная цепь представлена выходным эквивалентным генератором, развивающим напряжение, пропорциональное внутреннему коэффициенту усиления $к_в$ и разности напряжений на неинвертирующем и инвертирующем входах. Выходной генератор имеет сопротивление $R_{вых}$.

Широкому спектру практических расчётов удовлетворяют параметры схемы $R_{вх} = 0{,}4 \cdot 10^6$ Ом; $R_{вых} = 566$ Ом; $К_в = 4{,}17 \cdot 10^5$. При этом описание на входном языке PSPICE схемы (рис.5.1,б) имеет вид:

```
R1   2   1   4E5
EOY   4   0   4.17E5   VR1
R2   4   3   566
```

Если в моделируемой схеме присутствуют несколько операционных усилителей, то их описание может быть осуществлено отдельной моделью, например:

```
. SUBCKT   OU   1  2  3
R1   2   1   4E5
R2   4   3   0.4MEG
EOY   4   0   2   1   417K
. ENDS
```

Усилительное или масштабное звено

На (рис.5.2,а) показана инвертирующая схема включения ОУ. $I_{вх} = U_{вх}/Z_1$, а выходное напряжение $U_{вых} = - I_{вх} \ Z_{св}$, откуда коэффициент передачи напряжения $К = U_{вых}/U_{вх} = -Z_{св}/Z_1$.

Входное сопротивление инвертирующей схемы $Z_{вх}=Z_1$. Выходное сопротивление ввиду отрицательной обратной связи по напряжению уменьшается в $(1+\beta К)$ раз:

$$Z_{вых} = R_{вых}/(1+\beta К), \text{ где } \beta = Z_1/(Z_{св}+Z_1); \ Z_1 = (Z_1+R_г)/R_{вх}.$$

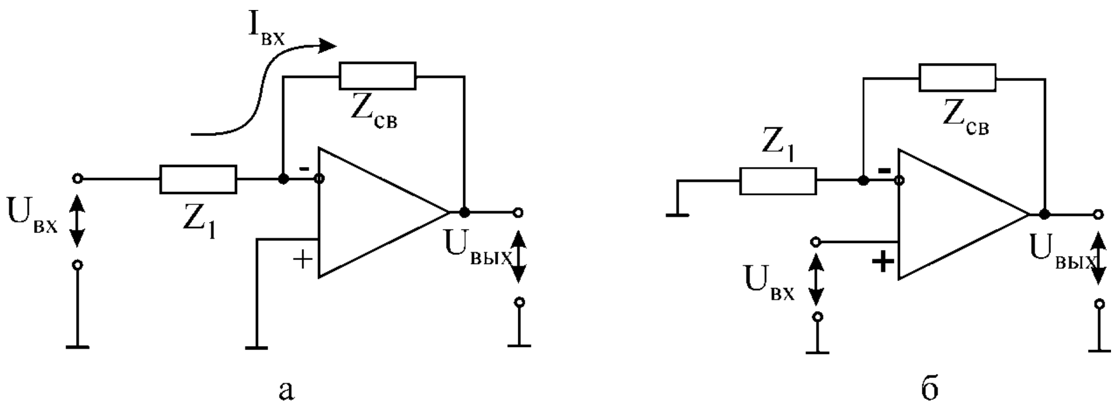


Рис. 5.2

Инвертирующую схему включения можно использовать в качестве преобразователя источника тока в источник напряжения. Для этого в качестве Z_1 и $Z_{СВ}$ включают резисторы, имеющие активные сопротивления R_1 и $R_{СВ}$, а ко входу схемы подключают источник тока. Очевидно, что в этом случае $Z_1=R_{ВХ}$; $\beta\approx1$; $Z_{ВЫХ}=R_{ВЫХ}/(1+K_{В})$; $U_{ВЫХ}= -i_{ВХ}\cdot R_{СВ}$. Так как выходное напряжение пропорционально входному току, а выходное сопротивление очень мало, схему называют преобразователем тока в напряжение.

Неинвертирующая схема включения операционного усилителя показана на (рис.5.2,б). Напряжение с выхода усилителя подаётся на инвертирующий вход усилителя. Это напряжение обратной связи относительно земли.

$U_{(-)}=\beta U_{ВЫХ}$, где $\beta=Z_1/(Z_1+Z_{СВ})$.

Напряжение на выходе усилителя $U_{ВЫХ}=K(U_{(+)} - U_{(-)}) = K(U_{ВХ} - \beta U_{ВЫХ})$, откуда $U_{ВЫХ}=KU_{ВХ}/(1+\beta K)$.

Следовательно, коэффициент усиления неинвертирующей схемы включения

$$K=\frac{U_{вых}}{U_{вх}}=\frac{1}{\beta+1/K}=\frac{1}{\beta}\cdot\frac{1}{1+1/\beta K}$$

При $\|\beta K\|>>1$ $K\approx1/\beta=1+Z_{СВ}/Z_1$.

Из (рис.5.2,б) видно, что в схеме имеет место последовательная обратная связь по напряжению, при которой входное сопротивление $R_{ВХ}\approx(1+\beta K)R_{ВХ}$, где $\beta\approx Z_1/(Z_1+Z_{СВ})$.

Интегратор

Схема интегратора показана на (рис.5.3). При приложении ко входу напряжения $U_{ВХ}$ можно считать, что ток через резистор R равен $U_{ВХ}/R$. Этот ток заряжает конденсатор C и создаёт на нём напряжение, одновременно являющееся выходным:

$$U_{вых} = -\frac{1}{RC}\int U_{вх}dt.$$

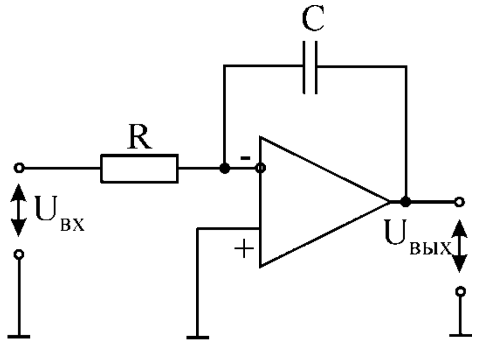


Рис. 5.3

Дифференциатор

Схема дифференциатора показана на (рис.5.4). Напряжение на входе является напряжением на конденсаторе. Ток заряжающий конденсатор $i=CdU_{вх}/dt$, полностью проходит через сопротивление R и создает на нём напряжение, являющееся выходным: $U_{вых} = -RCdU_{ВХ}/dt$.

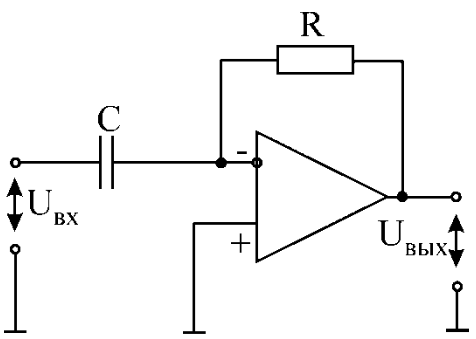
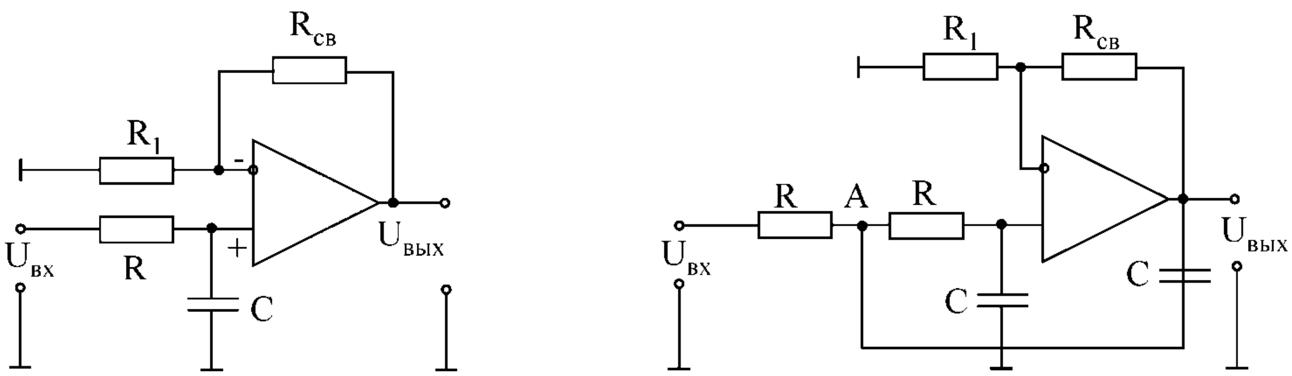


Рис. 5.4

Активные RC-фильтры

Активные RC-фильтры, часто называемые просто активными фильтрами, отличаются от обычных фильтров тем, что в их состав входят активные элементы: диоды, электронные лампы, транзисторы. В настоящее время в качестве активного элемента обычно используются микросхемы операционных усилителей.



а б

Рис. 5.5

Операционные усилители широко применяются в активных фильтрах благодаря тому, что их высокое входное сопротивление не нагружает частотно-задающие RC-цепи.

Простейший активный фильтр нижних частот показан на (рис.5.5,а). Собственно говоря, этот фильтр является совмещением обычной интегрирующей цепи и не инвертирующего ОУ. Благодаря большому входному сопротивлению ОУ не нагружает интегрирующую цепь и передаточная характеристика фильтра определяется интегрирующей цепью: $W(p) = K_0/(1-p/p_1)$. Данный фильтр является фильтром первого порядка, поскольку многочлен в знаменателе передаточной характеристики имеет первую степень аргумента p.

На (рис.5.5,б) приведена схема активного фильтра второго порядка. На ней частотно-задающие элементы связаны не только со входом, но и с выходом. Найдём передаточную функцию этого фильтра.

Сумма токов в узле А:

$$(U_{вх}-U_{А})/R - (U_{А}-U_{вых})pC - I = 0,$$

где $$U_{А} = I(R+1/pC) = U_{вых}pC/[K(R+1/pC)];$$

$I = U_{вх}pC = U_{вых}pC/K$ – ток, текущий через правое сопротивление R и ёмкость С;

$К=U_{вых}/U_{вх}$ – коэффициент передачи от не инвертирующего входа к выходу с учётом обратной связи через $R_{св}$ и R_1.

Количественная и качественная оценки динамических свойств звеньев электрических цепей осуществляются с помощью переходных и частотных характеристик.

Переходная характеристика h(t) – это реакция цепи на входную единичную функцию 1(t) при нулевых начальных условиях. Если на вход подаётся единичный скачок, то его изображение по Лапласу 1(t) = 1/p. Зная передаточную функцию звена $W(p) = U_{вых}(p)/U_{вх}(p) = F_1(p)/F_2(p)$, находим изображение выходной величины $U_{вых}(p) = W(p)/p$.

По теореме разложения:

$$U_{вых}(t)=h(t) = \frac{F_1(0)}{F_2(0)} + \sum_{i=1}^{n} \frac{F_1(p_i)}{p_i F_2(p_i)} \cdot e^{p_i t},$$

получаем переходную функцию звена. При подаче на вход звена постоянного напряжения, отличного от единичного, происходит простое масштабирование.

Частотные характеристики представляют собой связь параметров установившихся вынужденных колебаний на выходе звена с параметрами входной гармонического воздействия.

К частотным характеристикам относятся: амплитудно-фазовая W(jω), амплитудная W(ω) и фазовая φ(ω)□. Амплитудно-фазовая частотная характеристика получается из передаточной функции подстановкой $p = j\omega$. В результате подстановки частотная передаточная функция $W(j\omega) = F_1(j\omega)F_2(j\omega)$ представляет собой комплексное число, модуль которого равен отношению амплитуды выходной величины к амплитуде входной, а аргумент – сдвиг фаз между выходным и входным сигналами и может быть представлен в виде

$$W(j\omega) = W(\omega)e^{j\varphi(\omega)} = U(\omega) + jV(\omega),$$

где $W(\omega) = \sqrt{U^2(\omega) + V^2(\omega)}$ – амплитудно-частотная характеристика;

$\varphi(\omega) = \mathrm{arctg}\dfrac{V(\omega)}{U(\omega)}$ – фазочастотная характеристика.

Если передаточная функция представлена в виде отношения полиномов числителя и знаменателя, то модуль амплитудно-фазовой характеристики удобно находить как отношение модулей числителя и знаменателя $W(\omega) = |F_1(j\omega)| / |F_2(j\omega)|$, а фазу – как разность аргументов числителя и знаменателя $\varphi(\omega) = \arg F_1(j\omega) - \arg F_2(j\omega)$.

Между передаточными функциями $W(j\omega)$ и дифференциальными уравнениями существует однозначная связь. В частности, записывая дифференциальное уравнение в операторной форме и взяв отношение выходной величины ко входной, получаем передаточную функцию. И наоборот, по передаточной функции с учётом операционных соответствий можно получить дифференциальное уравнение. Коэффициенты дифференциального уравнения представляют собой физический коэффициент передачи (безразмерная величина) и постоянные времени (размерность в секундах).

Передаточная функция интегратора имеет вид

$$W(p) = U_{вых}(p)/U_{вх}(p) = -1/R_1C_2p.$$

Дифференциальное уравнение данной схемы может быть получено из выражения $U_{вх}(p) = -R_1C_2pU_{вых}(p)$ заменой $p = d/dt$; $U_{вх}(t) = -R_1C_2 \dfrac{dU_{вых}(t)}{dt}$.

Для идеальных интегрирующего и дифференцирующего звеньев постоянную передачи называют постоянной интегрирования или дифференцирования соответственно.

Для апериодического звена постоянная времени τ представляет собой время, в течение которого значение свободной составляющей переходного процесса уменьшается в $e = 2{,}72$ раза.

Для колебательного звена период свободных колебаний определяется коэффициентом ω_C при мнимой части корня характеристического уравнения и зависит от параметров цепи $T_c=2\pi/\omega_c$.

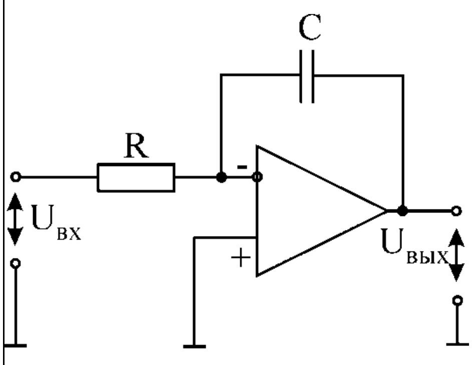
Декрементом колебаний колебательного звена Δ называется отношение двух амплитудных значений напряжений или токов в моменты времени t и t + T_c, а логарифмическим декрементом колебаний – натуральный логарифм этого отношения, т.е. декремент колебаний $\Delta = a_1/a_2 = e^{\delta T_c}$, а логарифмический декремент колебаний $\Theta = \ln(a_1/a_2) = \delta Tc$, где δ – действительная часть корня характеристического уравнения.

Последовательность выполнения работы

1. Нарисовать электрическую схему типовых звеньев, пронумеровав узлы и элементы ветвей. Описать схемы на входном языке PSPICE. Предусмотреть директивы для расчёта АЧХ и ФЧХ **ИНТЕГРИРУЮЩЕГО И ДИФФЕРЕНЦИРУЮЩЕГО звеньев**, расчёта переходного процесса при воздействии на вход источника прямоугольных импульсов с частотой, равной одной десятой частоты свободных колебаний колебательного звена и директивы вывода на экран результатов расчёта.

Пример электрической схемы замещения колебательного звена дан на рис.5.6, а программа моделирования на входном языке PSPICE – ниже.

Таблица 5.1

№ п/п	Название звена	Модель	Передаточная функция	Параметры звена
1	2	3	4	5
1	Интегрирующее	 Рис. 5.3	$W(p) = k/p$	$K = -1/R_1C_2$, $\tau = R_1C_2$

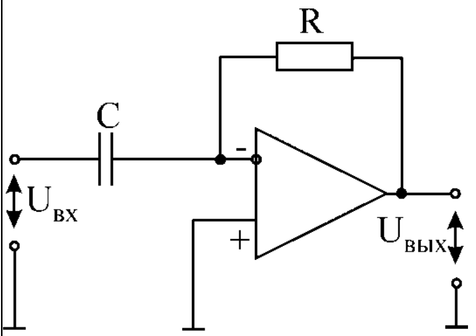
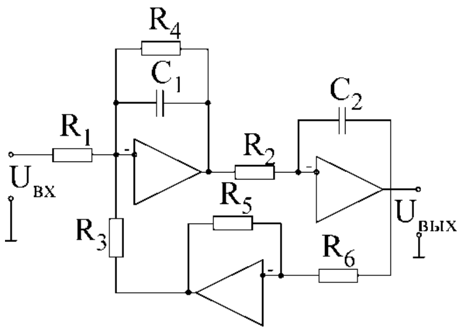
2	Дифференцирующее	 Рис. 5.4	W(p) = kp	$k = -R_2C_1$, $\tau = R_2C_1$
3	Колебательное		$W(p) =$ $= \dfrac{k}{1 + 2\xi Tp + T^2p^2}$	$k = \dfrac{R_3R_6}{R_1R_5}$; $R_2 = \dfrac{R_3R_6}{R_4R_5}$ $T =$ $= \sqrt{\dfrac{R_6R_3R_2C_1C_2}{R_5}}$ $\xi = R_2C_2 / 2T$

Таблица 5.2

Примечание: емкости даны в микрофарадах, а резисторы – в мегаомах.

номер варианта	Н а з в а н и е з в е н а							
	интегрирующее		дифференцирующее		апериодическое	фильтр нижних частот	фильтр второго порядка	колебательное
	№ э л е м е н т а							
	C2	R1	C1	R2				
1	0,4	0,1	0,5	0,1				
2	0,8	0,2	0,6	0,3				
3	0,3	0,3	0,4	0,2				
4	0,9	0,4	0,7	0,4				
5	0,2	0,5	0,3	0,8				
6	1,0	0,6	0,8	0,6				
7	0,1	0,7	0,2	0,7				
8	0,6	0,8	0,9	0,5				
9	0,5	0,9	1,0	0,9				
10	0,7	0,8	1,0	1,1				
11	0,4	0,7	0,2	1,5				
12	0,8	0,6	0,9	0,1				
13	0,5	0,1	0,4	0,1				
14	0,5	0,2	0,5	0,3				
15	0,5	0,3	0,5	0,2				
16	0,9	0,4	0,5	0,4				
17	0,5	0,5	0,5	0,8				
18	1,0	0,6	0,8	0,6				
19	0,1	0,6	0,2	0,7				
20	0,6	0,6	0,9	0,6				
21	0,5	0,9	1,0	0,8				
22	0,7	0,8	1,1	1,1				
23	0,4	0,7	0,3	1,5				
24	0,8	0,5	0,9	0,1				
25	1,0	0,6	0,8	0,6				
26	0,1	0,7	0,2	0,7				
27	0,6	0,8	0,9	0,5				
28	0,5	0,9	1,0	0,9				
29	0,7	0,8	1,0	1,1				
30	0,4	0,7	0,2	1,5				

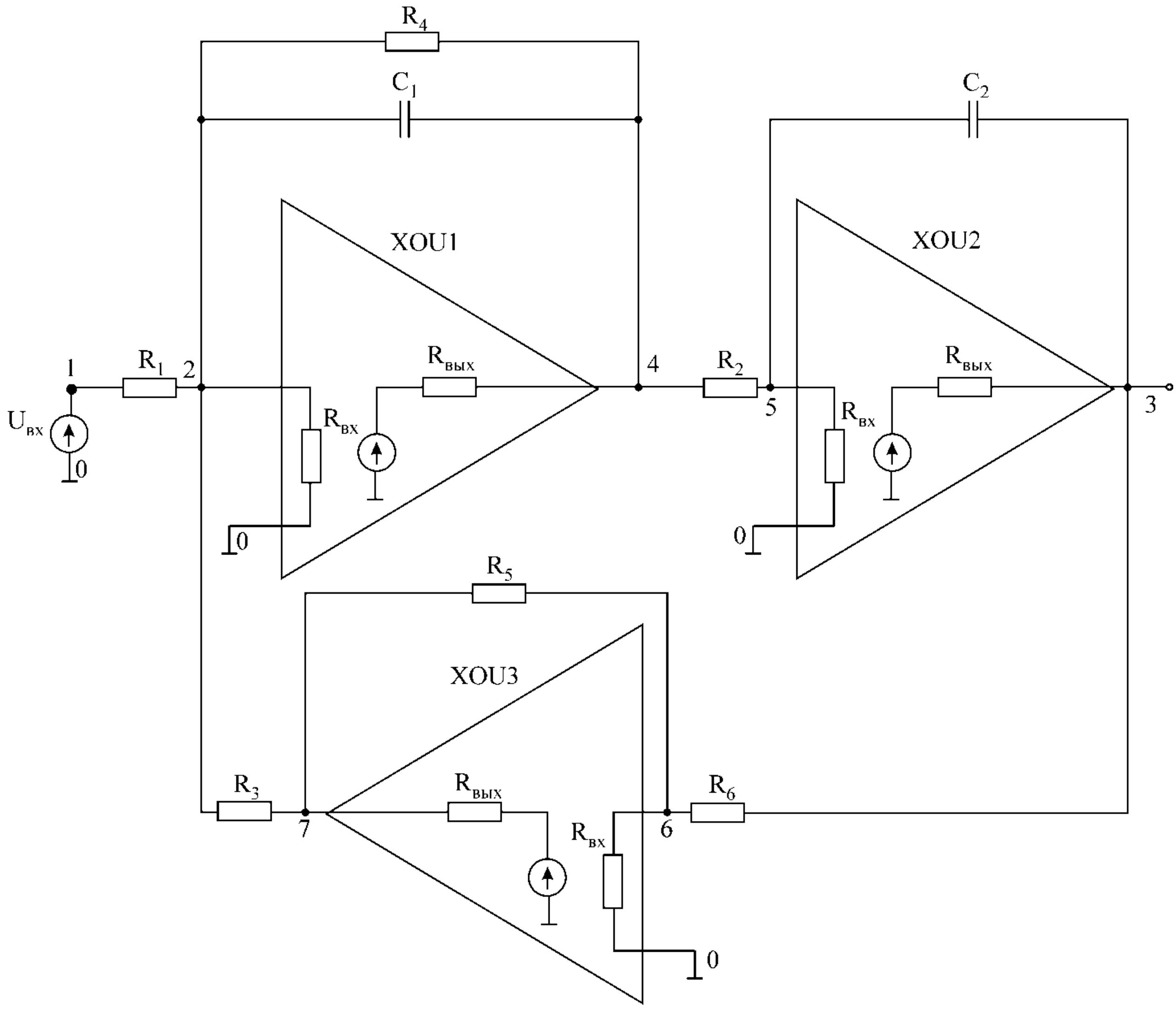


Рис.5.6. Электрическая схема замещения колебательного звена

Программа моделирования колебательного звена на входном языке PSPICE

```
colebatelnoe zveno
R1 1 2 0.5MEG
R2 4 5 1MEG
R3 7 2 1MEG
R4 4 2 1MEG
R5 6 7 1MEG
R6 3 6 1MEG
C1 4 2 0.1UF
C2 3 5 0.01UF
XOU1 2 0 4 OU
XOU2 5 0 3 OU
XOU3 6 0 7 OU
.SUBCKT OU 1 2 3
R1 2 1 4E5
R2 4 3 0.4MEG
EOV 4 0 2 1 417K
.ENDS
*.TRAN 20MS 1S
*VIN 1 0 PULSE(0 1 0 0 0 0.5S 1S)
VIN 1 0 AC 1
.AC DEC 10 1HZ 30HZ
*.PLOT TRAN V(1) V(3)
.PLOT AC VM(3) VP(3)
.PROBE
.END
```