

Министерство образования Российской Федерации



**Таганрогский государственный
радиотехнический университет**

**КАФЕДРА РАДИОТЕХНИЧЕСКИХ И
ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННЫХ СИСТЕМ**

**АНАЛИЗ И МОДЕЛИРОВАНИЕ ЛИНЕЙНЫХ ЦЕПЕЙ
С ПОСТОЯННЫМИ ПАРАМЕТРАМИ**

Методические указания к лабораторно-практическим занятиям
для студентов специальностей 2012, 2016 по дистанционной
форме обучения

Р Т Ф

Дятлов А. П., Дятлов П. А.

Анализ и моделирование линейных цепей с постоянными параметрами: методические указания к лабораторно-практическим занятиям Таганрог: ТРТУ, 2001. 56 с.

Разработаны методические указания к практическим занятиям, контрольным и лабораторным работам, посвященные анализу и моделированию амплитудно- и фазочастотных характеристик линейных цепей и прохождению видеосигналов через RC-цепи.

Методические указания предназначены для студентов специальностей 2012, 2016 дневной, заочной и дистанционной форм обучения, а также специалистов на курсах переподготовки повышения квалификации.

Табл. 5. Ил. 20. Библиогр. 5 назв.

Рецензент В. Г. Сердюков, канд. техн. наук, доцент кафедры РТС ТРТУ.

ПРЕДИСЛОВИЕ

Настоящие методические указания представляют собой электронную версию раздела “Анализ и моделирование линейных цепей с постоянными параметрами” дисциплин “Основы теории цепей”, “Прикладная информатика” и предназначены для дневной, заочной и дистанционной форм обучения студентов радиотехнических специальностей.

Бурный прогресс науки и техники вызывает потребность широких слоев населения в непрерывном образовании, что делает актуальным развитие не только традиционных (контактных), но и дистанционных форм обучения.

В настоящее время имеется целый ряд учебных пособий [1, 2, 3], посвященных анализу линейных цепей с постоянными параметрами. Однако эти указания предназначены в основном для контактного вида обучения. Основной проблемой при дистанционном обучении является процесс контроля и тестирования обучаемого преподавателем и выполнение лабораторного практикума.

Для решения указанной проблемы дистанционного обучения предлагается электронное учебное пособие, состоящее из краткого теоретического базиса, методических указаний к практическим занятиям, контрольным и лабораторным работам. Для моделирования линейных цепей в процессе выполнения лабораторных работ предлагается использовать демонстрационную версию системы схемотехнического моделирования на персональных компьютерах “Micro-Cap V” (или “Micro-Cap VI”) [4, 5], с помощью которой выполняется графический ввод редактируемой схемы, анализ характеристик аналоговых, цифровых и смешанных аналого-цифровых устройств. В программе “Micro-Cap V(VI)” проводится анализ схем по постоянному току, расчет переходных процессов и частотных характеристик.

Данные методические указания обеспечивают процесс самостоятельного, но при этом управляемого и контролируемого, освоения студентами определенного объема знаний и умений по наиболее важным разделам базовых дисциплин.

Возможность дистанционного осуществления как практических занятий, так и лабораторных работ сокращает сроки и стоимость обучения по сравнению с так

называемой “кейсовой” технологией обучения, что позволяет рекомендовать использование указаний не только для студентов дневной и заочной форм обучения, но и для специалистов со средним и высшим образованием, повышающих квалификацию в центрах переподготовки кадров.

ВВЕДЕНИЕ

Радиоинженеры-системотехники, подготавливаемые в рамках специальностей 2012 и 2016, должны иметь глубокие знания по гуманитарным, естественно-научным, общетехническим и специальным аспектам проектирования и эксплуатации радиоэлектронных и телекоммуникационных систем различного назначения.

Информационные радиосистемы (РС)* по назначению подразделяются на радиолокационные, радионавигационные, передачи, извлечения и разрушения информации радиопередачи; по структуре на одно- и многоканальные; по пространственному размещению технических средств – на одно- и многопозиционные.

Радиоканалы (РК)* соответствуют одноканальным РС и состоят из совокупности различных радиоустройств (РУ)* (антенных, передающих, приемных, модемов, кодеков, ЦВМ и т. д.).

Для реализации РУ используются функциональные звенья (ФЗ)*, которые обеспечивают выполнение усилительных, фильтрующих, нормирующих, модулирующих, демодулирующих, кодирующих, декодирующих, логических и др. преобразований сигналов.

Процесс проектирования РС состоит из трех этапов:

- системотехнического;
- схемотехнического;
- конструкторско-технологического.

На системотехническом этапе проектирования определяются принципы, методы, алгоритмы функционирования и структура РС, РК, РУ.

На схемотехническом этапе проектирования выбирается элементная база* и обосновывается принципиальная схема ФЗ, РУ и РС в целом.

На конструкторско-технологическом этапе проектирования производится оптимизация системы по технико-эксплуатационным и экономическим показателям и составляется техническая документация, необходимая для производства РС.

* Термины со знаком * описаны в приложении 1.

На этапах системотехнического и схемотехнического проектирования РС широко используются математические методы анализа и синтеза, а также моделирование.

Ограниченные возможности современного математического аппарата и громоздкость аналитических математических описаний большинства РС приводит к тому, что метод имитационного моделирования становится жизненно необходимым, поскольку позволяет справиться с проблемой сложности.

Другим важным достоинством метода моделирования является возможность замены экспериментальных исследований и обеспечения приобретения практических навыков студентов при существенной экономии материальных и временных ресурсов.

Существенную роль в схемотехнической и системотехнической подготовке радиоинженеров играет курс “Основы теории цепей”, поскольку методы теории цепей являются базисными для всех специальных дисциплин.

В рамках данных методических указаний рассматриваются методы анализа и моделирования линейных цепей (ЛЦ) * с постоянными параметрами, которые можно распространить не только на проектирование ФЗ усилительного и фильтрующего типа, но и на устройства спектрального и корреляционного анализа в приемниках различного назначения. При анализе ЛЦ широкое применение получили методы временного и частотного анализа.

Метод временного анализа реализуется на основе использования интеграла Дюамеля *.

Метод частотного анализа реализуется на основе преобразования Лапласа или преобразования Фурье. ЛЦ характеризуются временными параметрами (переходной $H(t)$ * и импульсной $h(t)$ * характеристиками) и частотными параметрами (комплексной частотной характеристикой $\dot{K}(\omega)$ *, амплитудно-частотной характеристикой $K(\omega)$ * и фазочастотной характеристикой $\varphi(\omega)$ *).

Анализ ЛЦ базируется на положениях курса физики “Электричество и магнетизм”, алгебре комплексных чисел, разделах курса “Высшая математика” (матричное исчисление, теории функций комплексного переменного и дифференциальных уравнений), на законах Ома * и Кирхгофа *, на свойствах пассивных и ак-

тивных двухполюсников* и четырехполюсников* с использованием общезфизического принципа суперпозиции*.

Для изучения методов анализа и моделирования ЛЦ в данных методических указаниях приводятся материалы по выполнению практических занятий, контрольных работ и лабораторных практикумов по двум темам:

- 1) анализ амплитудно- (АЧХ) и фазочастотных (ФЧХ) характеристик ЛЦ;
- 2) анализ прохождения видеосигналов через RC-цепи.

1. МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ К ПРАКТИЧЕСКОМУ ЗАНЯТИЮ НА ТЕМУ: “АНАЛИЗ АМПЛИТУДНО- И ФАЗОЧАСТОТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ЛИНЕЙНЫХ ЦЕПЕЙ С ПОСТОЯННЫМИ ПАРАМЕТРАМИ”

1.1. Цель занятий

Изучить методы анализа АЧХ и ФЧХ линейной цепи (частотный метод), закрепить теоретический материал на основе расчета конкретной ЛЦ и выполнение контрольной и лабораторной работ.

1.2. Методика анализа АЧХ и ФЧХ двухзвенной ЛЦ

Эквивалентная структура двухзвенной ЛЦ приведена на рис. 1, где ГС – генератор гармонического напряжения

$$E(t) = E \cos \omega t,$$

где E , ω – амплитуда и угловая частота; \dot{z}_1 , \dot{z}_2 , \dot{z}_3 , \dot{z}_4 – комплексные сопротивления; (1), (2), (3) – точки съема напряжений \dot{U}_1 , \dot{U}_2 , \dot{U}_3 .

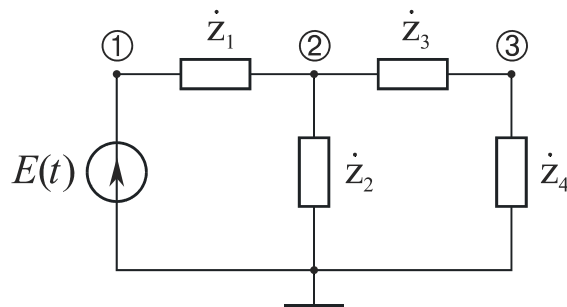


Рис. 1

Параметры ЛЦ заданы в табл. 1

Таблица 1

E, (В)	\dot{z}_1		\dot{z}_2		\dot{z}_3	\dot{z}_4
	R ₁ , (Ом)	C ₁ , (Ф)	R ₂ , (Ом)	C ₂ , (Ф)	R ₃ , (Ом)	C ₃ , (Ф)
1	10 ²	10 ⁻⁶	10 ³	10 ⁻⁷	10 ⁴	10 ⁻⁸

В соответствии с заданными структурой и параметрами схема электрическая ЛЦ имеет вид, приведенный на рис. 2.

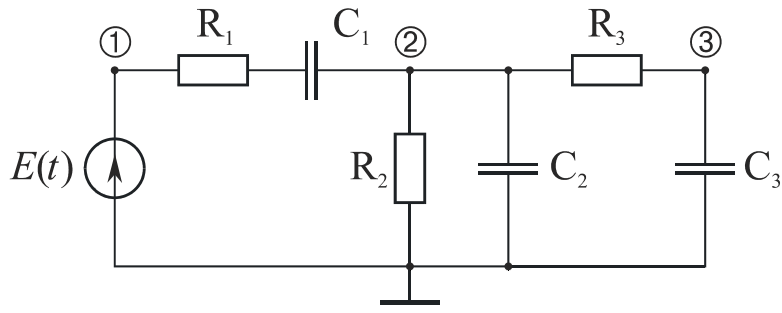


Рис. 2

Выражения для комплексных сопротивлений \dot{z}_i при $i \in [1, 4]$, их модулей z_i и аргументов φ_{zi} с учетом их особенностей и правил комплексного исчисления, приведенного в приложении 2, имеют следующий вид:

$$\dot{z}_i = z_i \exp(j\varphi_{zi}), \quad z_i = \sqrt{(\operatorname{Re} \dot{z}_i)^2 + (\operatorname{Im} \dot{z}_i)^2}, \quad \varphi_{zi} = \operatorname{arctg} \frac{\operatorname{Im} \dot{z}_i}{\operatorname{Re} \dot{z}_i};$$

$$\dot{z}_1 = R_1 + \frac{1}{j\omega C_1} = \frac{1 + j\omega R_1 C_1}{j\omega C_1} = \frac{\omega R_1 C_1 - j}{\omega C_1},$$

$$z_1 = |\dot{z}_1| = \frac{\sqrt{1 + \omega^2 R_1^2 C_1^2}}{\omega C_1};$$

$$\varphi_{z_1} = -\operatorname{arctg} \left(\frac{1}{\omega R_1 C_1} \right) = \operatorname{arctg}(\omega R_1 C_1) - \pi/2;$$

$$\dot{z}_2 = \frac{\frac{R_2}{j\omega C_2}}{R_2 + \frac{1}{j\omega C_2}} = \frac{R_2}{1 + j\omega R_2 C_2} = \frac{R_2 - j\omega R_2^2 C_2}{1 - \omega^2 R_2^2 C_2^2},$$

$$z_2 = |\dot{z}_2| = \frac{R_2}{\sqrt{1 + \omega^2 R_2 C_2}};$$

$$\varphi_{z_2} = -\operatorname{arctg}(\omega R_2 C_2) = \operatorname{arctg}(\omega R_2 C_2) - \pi/2;$$

$$\dot{z}_3 = z_3 = R_3; \quad \varphi_{z_3} = 0; \quad \dot{z}_4 = \frac{1}{j\omega C_3} = -\frac{j}{\omega C_3}; \quad z_4 = \frac{1}{\omega C_3}; \quad \varphi_{z_4} = -\pi/2.$$

С целью упрощения дальнейшего анализа определим выражения для последовательного соединения комплексных сопротивлений \dot{z}_3 и \dot{z}_4 , представляемого соотношением $\dot{z}_{34} = \dot{z}_3 + \dot{z}_4$, и параллельного соединения комплексных сопротивлений \dot{z}_2 и \dot{z}_{34} , представляемого соотношением $\dot{z}_{234} = \frac{\dot{z}_2 \cdot \dot{z}_{34}}{\dot{z}_2 + \dot{z}_{34}}$:

$$\dot{z}_{34} = \dot{z}_3 + \dot{z}_4;$$

$$\dot{z}_{34} = R_3 + \frac{1}{j\omega C_3} = \frac{\omega R_3 C_3}{\omega C_3};$$

$$z_{34} = |\dot{z}_{34}| = \frac{\sqrt{1 + \omega^2 R_3^2 C_3^2}}{\omega C_3};$$

$$\varphi_{z_{34}} = -\arctg\left(\frac{1}{\omega R_3 C_3}\right) = \arctg(\omega R_3 C_3) - \pi/2;$$

$$\dot{z}_{234} = \frac{\dot{z}_2 \cdot \dot{z}_{34}}{\dot{z}_2 + \dot{z}_{34}}; \quad \dot{z}_2 = \frac{R_2 - j\omega R_2^2 C_2}{1 - \omega^2 R_2^2 C_2^2}; \quad \dot{z}_{34} = \frac{\omega R_3 C_3 - j}{\omega C_3};$$

$$\dot{z}_{234} = \frac{\omega(R_2 R_3 C_3 - R_2^2 C_2) - j(R_2 + \omega^2 R_2^2 C_2 R_3 C_3)}{\omega(R_2 C_3 + R_3 C_3 - \omega^2 R_2^2 C_2 R_3 C_3) + j(1 - \omega^2 R_2^2 C_2^2 - \omega^2 R_2^2 C_2 C_3)};$$

$$z_{234} = \sqrt{\frac{\omega^2(R_2 R_3 C_3 - R_2^2 C_2)^2 + (R_2 + \omega^2 R_2^2 C_2 R_3 C_3)^2}{\omega^2(R_2 C_3 + R_3 C_3 - \omega^2 R_2^2 C_2 R_3 C_3)^2 + (1 - \omega^2 R_2^2 C_2^2 - \omega^2 R_2^2 C_2 C_3)^2}};$$

$$\varphi_{z_{234}} = -\arctg \frac{A}{B} = \arctg \frac{B}{A} - \pi/2;$$

$$A = \text{Im}(\dot{z}_{234}) = -j\omega[(R_2 R_3 C_3 - R_2^2 C_2)(1 - \omega^2 R_2^2 C_2^2 - \omega^2 R_2^2 C_2 C_3) + (R_2 + \omega^2 R_2^2 C_2 R_3 C_3) \times (R_2 C_3 + R_3 C_3 - \omega^2 R_2^2 C_2 R_3 C_3)]/c; \quad c = d^2 - e^2;$$

$$B = \text{Re}(\dot{z}_{234}) = \omega^2(R_2 R_3 C_3 - R_2^2 C_2)(R_2 C_3 + R_3 C_3 - \omega^2 R_2^2 C_2 R_3 C_3) + (R_2 + \omega^2 R_2^2 C_2 R_3 C_3)(1 - \omega^2 R_2^2 C_2^2 - \omega^2 R_2^2 C_2 C_3);$$

$$c = 1 - \omega^2 R_2^2 C_2^2 - \omega^2 R_2^2 C_2 C_3;$$

$$d = \omega(R_2 C_3 + R_3 C_3 - \omega^2 R_2^2 C_2 R_3 C_3).$$

Переходим к анализу передаточной функции первого звена ЛЦ на основе использования законов Ома* и Кирхгофа*:

$$\dot{K}_{12}(\omega) = \frac{\dot{U}_2}{\dot{U}_1}, \quad \dot{U}_1 = E = U_m \cos \omega t, \quad \dot{U}_2 = \dot{I}_1 \dot{z}_{234}, \quad \dot{I}_1 = \frac{E}{\dot{z}_1 + \dot{z}_{234}};$$

$$\dot{K}_{12}(\omega) = \frac{\dot{z}_{234}}{\dot{z}_1 + \dot{z}_{234}}, \quad K_{12}(\omega) = \sqrt{[\text{Re} \dot{K}_{12}(\omega)]^2 + [\text{Im} \dot{K}_{12}(\omega)]^2},$$

$$\varphi_{12}(\omega) = \arctg \frac{\text{Im} \dot{K}_{12}(\omega)}{\text{Re} \dot{K}_{12}(\omega)}, \quad K_{12}(\omega) = \frac{z_{234}}{z_1 + z_{234}}, \quad \varphi_{12}(\omega) = \varphi_{z_{234}} - \varphi_{z_{1234}},$$

где $\dot{K}_{12}(\omega)$ – комплексная частотная характеристика первого звена ЛЦ; \dot{U}_1, \dot{U}_2 – комплексное напряжение на входе и выходе 1-го звена ЛЦ; \dot{I}_1 – комплексный ток, протекающий через 1-е звено ЛЦ; $K_{12}(\omega), \varphi_{12}(\omega)$ – амплитудно- и фазочастотная характеристика 1-го звена ЛЦ; $\text{Re}[\dot{K}_{12}(\omega)], \text{Im}[\dot{K}_{12}(\omega)]$ – действительная и мнимая части $\dot{K}_{12}(\omega)$; $\varphi_{z_{234}}, \varphi_{z_{1234}}$ – аргументы комплексных сопротивлений \dot{z}_{234} и $\dot{z}_{1234} = \dot{z}_1 + \dot{z}_{234}$.

Полученные выражения можно упростить при условии выполнения для 1-го звена ЛЦ режима холостого хода, т. е. когда влиянием 2-го звена ЛЦ на передаточные свойства 1-го звена можно пренебречь.

Для заданных в примере исходных данных требуемое условие выполняется, и при этом $z_2 \leq 0,1 z_{34}$, т.е. $z_{234} = z_2$:

$$\dot{K}_{12}(\omega) = \frac{\dot{z}_2}{\dot{z}_1 + \dot{z}_2}, \quad K_{12}(\omega) = \frac{z_2}{z_1 + z_2}; \quad \varphi_{12}(\omega) = \varphi_{z_2} - \varphi_{z_{12}}.$$

В общем случае, когда влиянием 2-го звена ЛЦ на передаточные свойства 1-го звена нельзя пренебречь, анализ передаточной функции ЛЦ в целом выполняется на основе использования законов Ома и Кирхгофа в следующей последовательности:

$$\dot{K}_{13}(\omega) = \frac{\dot{U}_3}{\dot{U}_1}, \quad \dot{U}_3 = \dot{I}_{34} \dot{z}_4, \quad \dot{I}_2 = \frac{\dot{U}_2}{\dot{z}_2}, \quad \dot{U}_2 = \dot{I}_1 \dot{z}_{234}, \quad \dot{I}_{34} = \dot{I}_1 - \dot{I}_2, \quad \dot{I}_1 = \frac{E}{\dot{z}_1 + \dot{z}_{234}},$$

$$\dot{I}_{34} = \dot{I}_1 \frac{\dot{z}_2}{\dot{z}_2 + \dot{z}_{34}}, \quad \dot{U}_3 = \frac{E}{(\dot{z}_1 + \dot{z}_{234})(\dot{z}_2 + \dot{z}_{34})} \frac{\dot{z}_2 \cdot \dot{z}_4}{(\dot{z}_1 + \dot{z}_{34})(\dot{z}_2 + \dot{z}_{34})}, \quad \dot{z}_{34} = \dot{z}_3 + \dot{z}_4,$$

где $\dot{K}_{13}(\omega)$ – комплексная частотная характеристика ЛЦ; \dot{U}_3 – комплексное напряжение на выходе 2-го звена (ЛЦ в целом); $\dot{I}_1, \dot{I}_2, \dot{I}_{34}$ – комплексный ток, протекающий через сопротивления \dot{z}_1, \dot{z}_2 и \dot{z}_{34} .

Выражение для $\dot{K}_{13}(\omega)$ можно упростить при взаимной развязке звеньев ЛЦ, т. е. когда для 1-го звена ЛЦ выполняется условие холостого хода.

При $z_2 \leq 0,1 z_{34}$ имеем $\dot{z}_{234} = \dot{z}_2$; $\dot{z}_2 + \dot{z}_{34} \approx \dot{z}_{34}$;

$$\dot{K}_{13}(\omega) = \frac{\dot{z}_2 \cdot \dot{z}_4}{(\dot{z}_1 + \dot{z}_{34})(\dot{z}_2 + \dot{z}_{34})}, \quad \dot{K}_{23}(\omega) = \frac{\dot{U}_3}{\dot{U}_2} = \frac{\dot{z}_4}{\dot{z}_3 + \dot{z}_4},$$

$$K_{13}(\omega) = K_{12}(\omega)K_{23}(\omega), \quad \varphi_{13}(\omega) = \varphi_{12}(\omega) + \varphi_{23}(\omega),$$

$$K_{12}(\omega) = \frac{z_2}{z_1 + z_2}, \quad K_{23}(\omega) = \frac{z_4}{z_3 + z_4}; \quad \varphi_{12}(\omega) = \varphi_{z_2} - \varphi_{z_{12}}; \quad \varphi_{23}(\omega) = \varphi_{z_4} - \varphi_{z_{34}}.$$

Передаточная функция ЛЦ в соответствии с правилом каскадного соединения четырехполосников определяется из соотношения

$$\dot{K}_{13}(\omega) = \dot{K}_{12}(\omega)\dot{K}_{23}(\omega), \quad \dot{K}_{23}(\omega) = \frac{\dot{U}_3}{\dot{U}_2},$$

где $\dot{K}_{23}(\omega)$ – комплексная частотная характеристика 2-го звена ЛЦ; \dot{U}_2 – комплексное напряжение на входе 2-го звена ЛЦ.

Для исследуемой ЛЦ $z_2 \leq 0,1 z_{34}$, и поэтому имеем

$$\begin{aligned} \dot{K}_{12}(\omega) &= \frac{\operatorname{Re}}{(1 + j\omega R_2 C_2)} \left/ \left[\frac{(1 + j\omega R_1 C_1)}{j\omega C_1} + \frac{R_2}{(1 + j\omega R_2 C_2)} \right] \right. = \\ &= \frac{j\omega R_2 C_1 (1 + j\omega R_2 C_2)}{(1 + j\omega R_2 C_2) [(1 + j\omega R_1 C_1)(1 + j\omega R_2 C_2) + j\omega R_2 C_1]} = \\ &= \frac{j\omega R_2 C_1}{[1 - \omega^2 R_1 C_1 R_2 C_2] + j\omega [R_1 C_1 + R_2 C_2 + R_2 C_1]}; \end{aligned}$$

$$K_{12}(\omega) = \frac{\omega R_2 C_1}{\sqrt{[1 - \omega^2 R_1 C_1 R_2 C_2]^2 + \omega^2 [R_1 C_1 + R_2 C_2 + R_2 C_1]^2}};$$

$$\varphi_{12}(\omega) = \pi/2 - \operatorname{arctg} \frac{\omega [R_1 C_1 + R_2 C_2 + R_2 C_1]}{1 - \omega^2 R_1 C_1 R_2 C_2},$$

$$\dot{K}_{23}(\omega) = \frac{1/j\omega C_3}{R_3 + \frac{1}{j\omega C_3}} = \frac{1}{1 + j\omega R_3 C_3}; \quad K_{23}(\omega) = \frac{1}{\sqrt{1 + \omega^2 R_3^2 C_3^2}}; \quad \varphi_{23}(\omega) = -\operatorname{arctg}(\omega R_3 C_3);$$

$$K_{13}(\omega) = \frac{\omega R_2 C_2}{\sqrt{[(1 - \omega^2 R_1 C_1 R_2 C_2)^2 + \omega^2 (R_1 C_1 + R_2 C_2 + R_2 C_1)^2] (1 + \omega^2 R_3^2 C_3^2)}};$$

$$\varphi_{13}(\omega) = \pi/2 - \operatorname{arctg} \left[\frac{\omega (R_1 C_1 + R_2 C_2 + R_2 C_1)}{1 - \omega^2 R_1 C_1 R_2 C_2} \right] - \operatorname{arctg}(\omega R_3 C_3).$$

Подставив исходные условия в полученные соотношения, получаем выраже-

ния, пригодные для расчета АЧХ и ФЧХ как отдельных звеньев, так и ЛЦ в целом:

$$K_{12}(\omega) = \frac{10^{-3} \omega}{\sqrt{(1 - 10^{-8} \omega^2)^2 + 1,44 \cdot 10^{-6} \omega^2}}; \quad \varphi_{12}(\omega) = \pi/2 - \operatorname{arctg}\left(\frac{1,2 \cdot 10^{-3} \cdot \omega}{1 - 10^{-8} \omega^2}\right);$$

$$K_{23}(\omega) = \frac{1}{\sqrt{1 + 10^{-8} \omega^2}}; \quad \varphi_{23}(\omega) = -\operatorname{arctg}(10^{-4} \omega);$$

$$K_{13}(\omega) = \frac{10^{-3} \omega}{\sqrt{\left[(1 - 10^{-8} \omega^2)^2 + 1,44 \cdot 10^{-6} \omega^2 \right] (1 + 10^{-8} \omega^2)}};$$

$$\varphi_{13}(\omega) = \pi/2 - \operatorname{arctg}\left(\frac{1,2 \cdot 10^{-3} \omega}{1 - 10^{-8} \omega^2}\right) - \operatorname{arctg}(10^{-4} \omega).$$

Далее проводим расчет и построение АЧХ и ФЧХ ЛЦ в целом.

Набор частот, для которых рассчитываются $K_{13}(\omega)$ и $\varphi_{13}(\omega)$, целесообразно увязать с набором постоянных времени используемых в ЛЦ элементов. В нашем случае $\tau_{21} = R_2 C_1 = 10^{-3} \text{ с}$; $\tau_{12} = R_1 C_2 = 10^{-5} \text{ с}$; $\tau_{33} = R_3 C_3 = 10^{-9} \text{ с}$. При этом, поскольку качественный анализ структуры ЛЦ позволяет сделать вывод о том, что 1-е звено представляет собой полосовой фильтр, а 2-е звено – фильтр нижних частот, целесообразно значения контрольных частот выбрать из следующих условий:

$$\omega_1 = \frac{1}{10\tau_{21}} = 10^2 \text{ рад/с}; \quad \omega_2 = \frac{1}{\tau_{21}} = 10^3 \text{ рад/с}; \quad \omega_3 = \frac{1}{\sqrt{\tau_{21}\tau_{33}}} = 3,1 \cdot 10^3 \text{ рад/с};$$

$$\omega_4 = \frac{1}{\tau_{33}} = 10^4 \text{ рад/с}; \quad \omega_5 > \frac{10}{\tau_{33}} = 10^5 \text{ рад/с}.$$

Результаты расчета АЧХ $K_{13}(f)$ и ФЧХ $\varphi_{13}(f)$ ЛЦ приведены на рис. 3, а и б.

По построенному графику $K_{13}(\omega)$ или из соотношения $\frac{dK_{13}(\omega)}{d\omega} = 0$ определяется максимальное значение коэффициента передачи ЛЦ K_m . В нашем случае $K_m = 0,77 (-2,4 \text{ дБ})$ при $\omega_m = 2340 \text{ рад/с}$ ($f_m = 372 \text{ Гц}$). Нижняя ω_n и верхняя частоты ω_b ЛЦ определяются из условия $K_{13}(\omega_n) = K_{13}(\omega_b) = 0,7K_m = 0,54$ ($-5,4 \text{ дБ}$). В нашем случае $\omega_b = 1150 \text{ рад/с}$ ($f_b = 1830 \text{ Гц}$). Средняя частота f_{cp} (f_0) и полоса пропускания Δf ЛЦ определяются из соотношения

$$\omega_0 = \frac{\omega_H + \omega_B}{2} = 6104 \text{ рад/с}; \quad f_0 = \frac{\omega_0}{2\pi} = 972 \text{ Гц};$$

$$\Delta\omega = \omega_B - \omega_H = 1077 \text{ рад/с}; \quad \Delta f = \frac{\Delta\omega}{2\pi} = 1715 \text{ Гц}.$$

Групповое время запаздывания* $t_{\text{гр}}$, вносимое ЛЦ, определяется из соотношения

$$t_{\text{гр}} = \frac{\Delta\varphi}{\Delta\omega}; \quad \Delta\varphi = \varphi_{13}(\omega_H) - \varphi_{13}(\omega_B),$$

где $\Delta\varphi$ – фазовый сдвиг, вносимый ЛЦ в полосе $\Delta\omega$; $\varphi_{13}(\omega_H)$, $\varphi_{13}(\omega_B)$ – фазовые сдвиги, вносимые ЛЦ на частотах ω_H , ω_B .

В нашем случае $\varphi_{13}(\omega_H) = 45^\circ$, $\varphi_{13}(\omega_B) = -50^\circ$ и $t_{\text{гр}} = 1,45 \text{ мс}$.

Полученные результаты характеризуют АЧХ и ФЧХ ЛЦ в целом, а также их основные параметры.

Для закрепления теоретического материала по методу частотного анализа ЛЦ необходимо выполнить контрольную работу и лабораторную работу № 1 “Моделирование ЛЦ с использованием режима частотного анализа”.

При выполнении контрольной работы № 1 “Анализ АЧХ и ФЧХ ЛЦ” следует воспользоваться приложением 3, в котором приводится содержание контрольной работы и варианты исходных данных (номер варианта задается преподавателем).

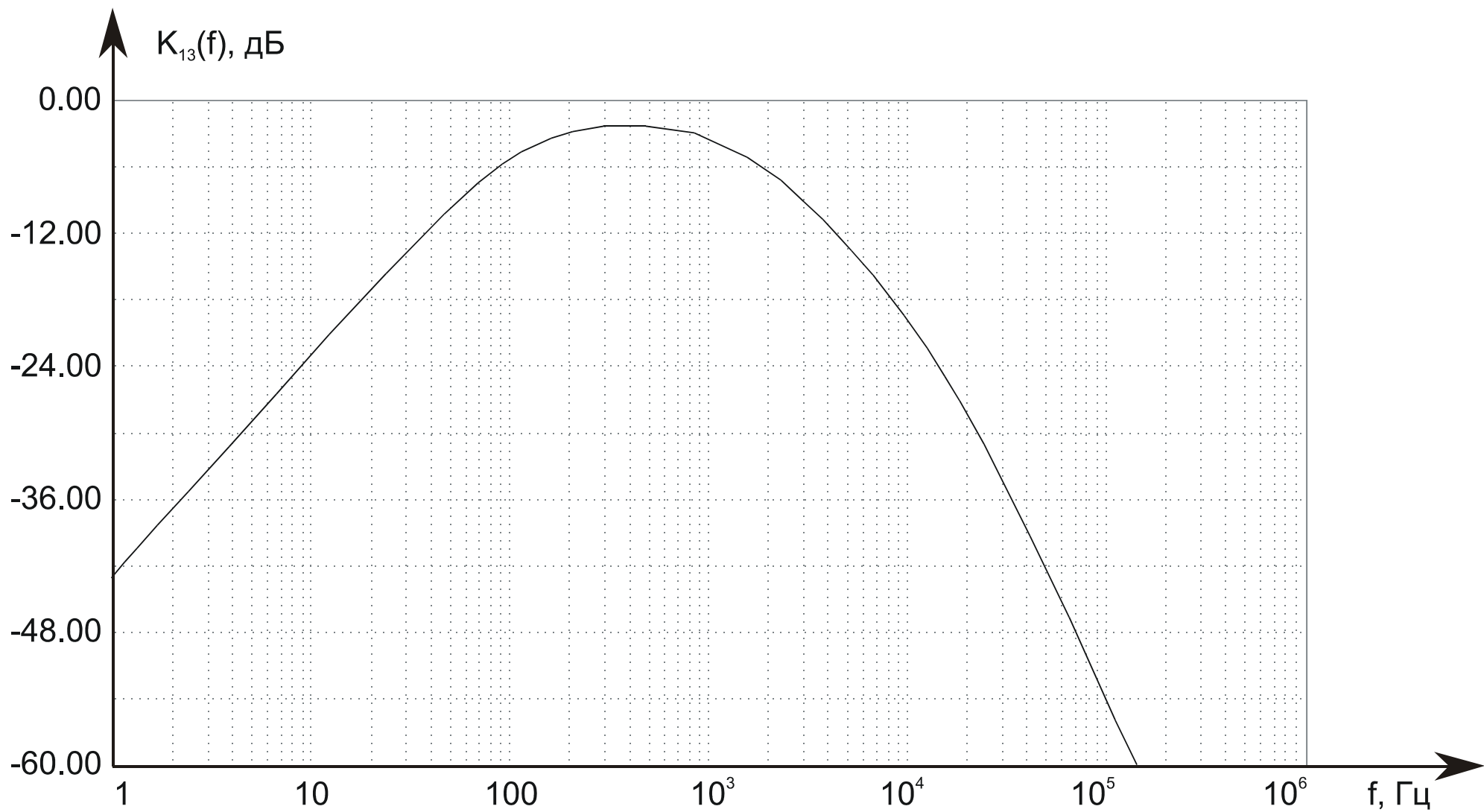


Рис. 3 а

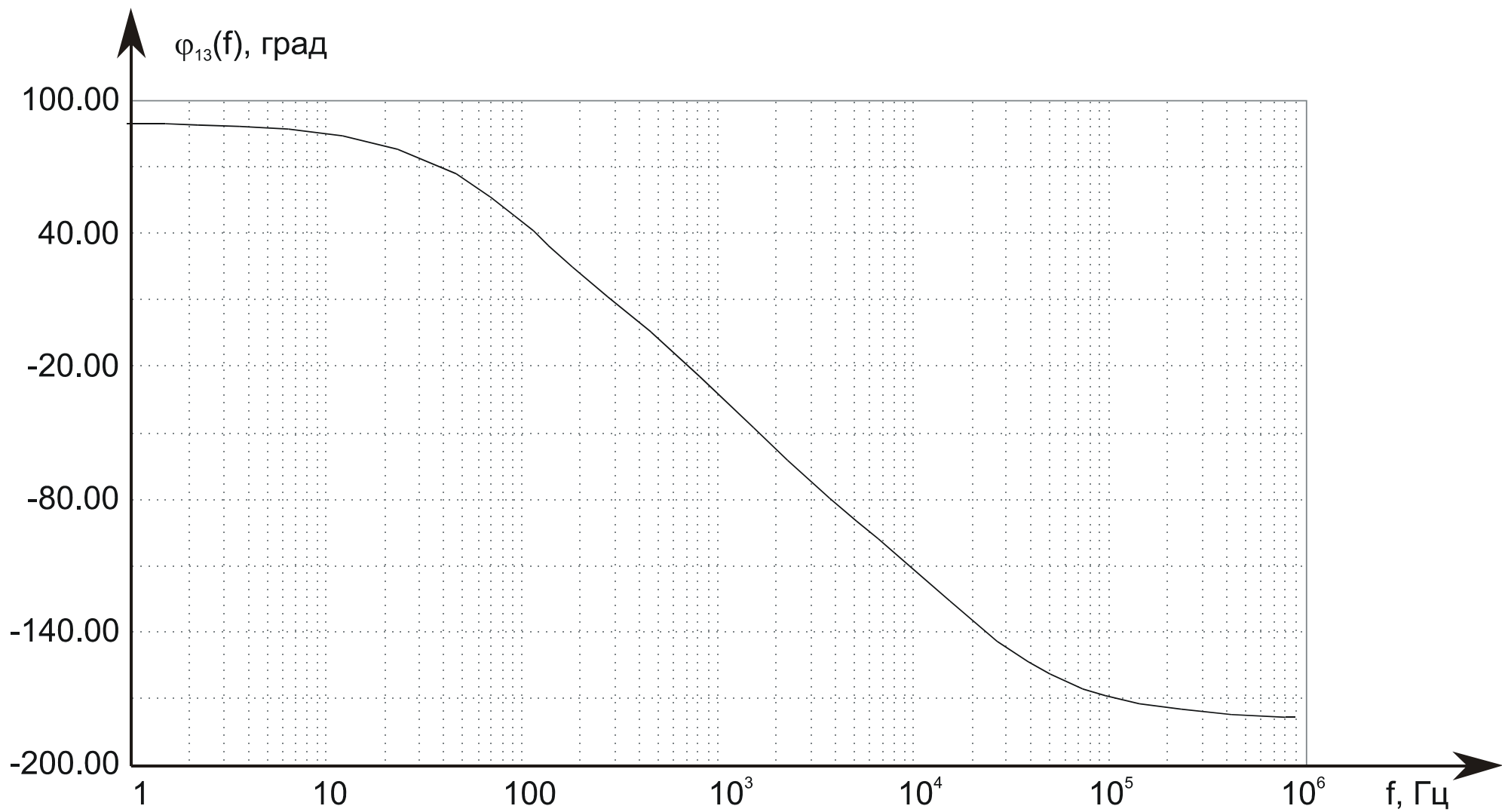


Рис. 3 б

2. МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ К ПРАКТИЧЕСКОМУ ЗАНЯТИЮ НА ТЕМУ: ”АНАЛИЗ ПРОХОЖДЕНИЯ ВИДЕОСИГНАЛОВ ЧЕРЕЗ RC-ЦЕПИ”

2.1. Цель занятия

Изучить методы анализа прохождения видеосигналов через дифференцирующие и интегрирующие ЛЦ (временной метод), реализованные на основе RC-элементов, закрепить теоретический материал на основе расчета конкретного примера RC-цепи и выполнения контрольной и лабораторной работ.

2.2. Временной метод анализа

При построении усилительных и фильтрующих функциональных звеньев в приемных и передающих устройствах широкое применение находят RC-цепи в качестве разделительных, дифференцирующих, а также интегрирующих (фильтрующих и накопительных) звеньев.

Для анализа прохождения видеосигналов через RC-цепи используется временной метод, основанный на принципе суперпозиций*. Напряжения на выходе RC-цепи $U(t) \in [U_R(t), U_C(t)]$, где $U_R(t)$ – напряжение на выходе дифференцирующей цепи; $U_C(t)$ – напряжение на выходе интегрирующей цепи, определяются как сумма реакций на входные воздействия $e_i(t)$, соответствующие видеосигналам различной формы как в виде импульсов, так и в виде пачки импульсов с различными временными параметрами:

$$U(t) = \sum_{i=1}^n U_i(t); \quad U_i(t) = \int_0^t e_i(x) h(t-x) dt,$$

где $U_i(t)$ – реакция RC-цепи на воздействие $e_i(t)$; $h(t)$ – импульсная реакция RC-цепи; n – количество импульсов в пачке.

Реакция RC-цепи на ограниченные по длительности видеосигналы состоит из вынужденной и собственной составляющей

$$U_i(t) = U_{iB}(t) + U_{iCB}(t).$$

Первое слагаемое $U_{iB}(t)$ отвечает процессу заряда конденсатора через резистор от источника напряжения на интервале существования i -го видеоимпульса, а

второе слагаемое $U_{iCB}(t)$ соответствует процессу разряда конденсатора после окончания i -го видеоимпульса. В тех случаях, когда в момент начала $(i + 1)$ -го видеоимпульса $U_{iCB}(t) > 0$, необходимо учитывать характер начальных условий

$$U_{(i+1)}(t) = U_{iCB}(t) + U_{(i+1)B}(t) + U_{(i+1)CB}(t),$$

где $U_{(i+1)}(t)$ – реакция RC-цепи на i -й и $(i + 1)$ -й видеоимпульсы; $U_{iCB}(t)$, $U_{(i+1)CB}(t)$ – свободные составляющие реакции RC-цепи от воздействия i -го и $(i + 1)$ -го видеоимпульсов; $U_{(i+1)B}(t)$ – вынужденная составляющая реакции RC-цепи на воздействие $(i + 1)$ -го видеоимпульса.

Соотношения, описывающие реакцию RC-цепей на воздействие одиночных видеоимпульсов типовой формы, приведены в приложении 6.

При воздействии на RC-цепи видеосигналов сложной формы и с пачечной временной структурой для определения реакции необходимо использовать соотношения, приведенные в приложении 6, и принцип конструирования видеоимпульсов сложной формы на основе видеоимпульсов с типовыми формами в соответствии с принципом суперпозиции.

Для освоения временного метода анализа рассмотрим два примера с использованием различных типовых форм видеосигналов.

2.3. Пример первый

Определим реакцию дифференцирующей и интегрирующей RC-цепи при воздействии на них линейно-ступенчатого видеосигнала, параметры которого указаны в табл. 2.

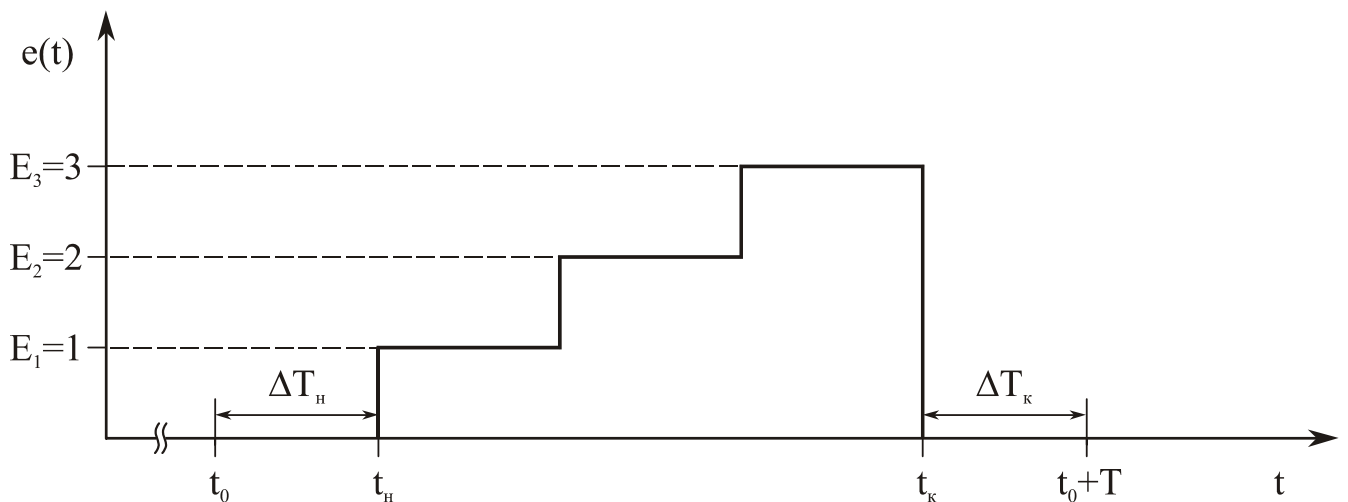
Таблица 2

№	$E_i, В$	$t_0, с$	$t_{ин}, с$	$\tau_{ui}, с$	$\Delta T_i, с$	$\Delta T_k, с$	$C, Ф$	$R, Ом$
$e_1(t)$	1	0	$2 \cdot 10^{-3}$	10^{-3}	0	$2 \cdot 10^{-3}$	10^{-7}	10^3
$e_2(t)$	2	0	$3 \cdot 10^{-3}$	10^{-3}	0			
$e_3(t)$	3	0	$4 \cdot 10^{-3}$	10^{-3}	0			

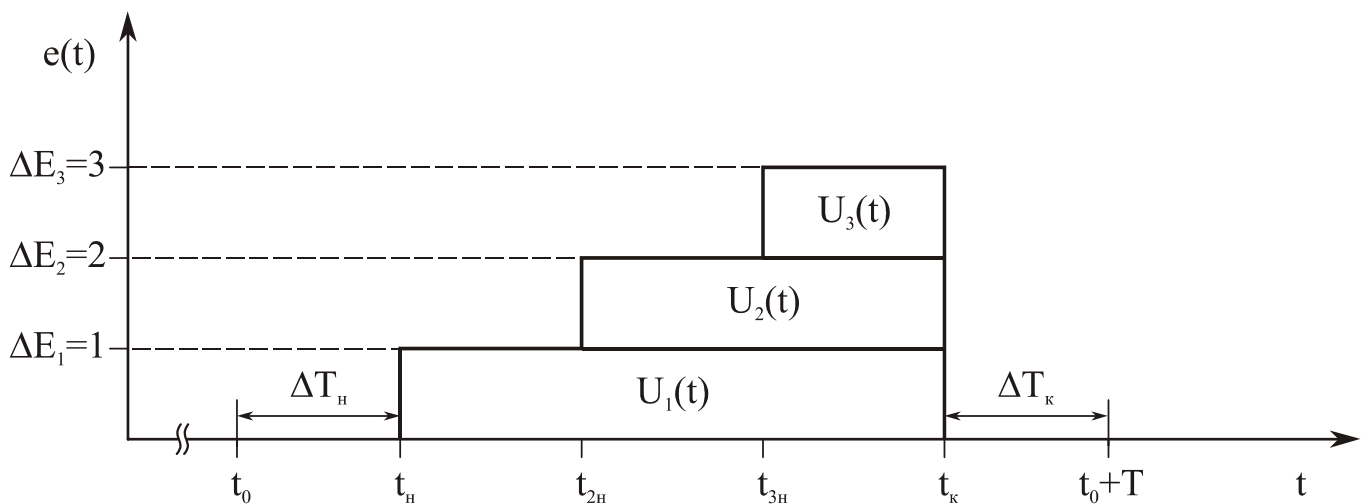
где $e_1(t)$, $e_2(t)$, $e_3(t)$ – функции, описывающие фрагменты видеосигнала $e(t)$; $E_i(B)$ – амплитуда i -го фрагмента видеосигнала $e_i(t)$; t_0 – момент начала сеанса моделирования; $t_{1н}$ – момент начала видеосигнала $e_i(t)$; τ_{wi} – длительность i -го фрагмента $e_i(t)$; ΔT_i – интервал времени между i -м и $(i+1)$ -м фрагментами видеосигнала $e(t)$; ΔT_n – интервал времени между началом сеанса моделирования t_0 и моментом появления первого фрагмента видеосигнала $t_{1н}$; ΔT_k – интервал времени между моментом окончания сеанса моделирования $(t_0 + T)$ и моментом окончания последнего (n) фрагмента видеосигнала $t_{нк}$.

На основе исходных данных видеосигнала, приведенных в табл. 2, строим его графическое представление, которое приведено на рис. 4, а.

С целью упрощения анализа в данном случае видеосигнал $e(t)$ представляется совокупностью ступенчатых функций (рис. 4, б):



а



б

Рис. 4

$$e(t) = \sum_{i=1}^{n=3} e_i(t), \quad \Delta E_i = E_i - E_{(i-1)},$$

$$e_i(t) = \Delta E_i \sigma(t_0 - t_{iH}) \text{ при } t_0 - t_{iH} < t < t_0 + t_{iK};$$

$$T = \Delta T_H + (t_K - t_H) + \Delta T_K, \quad \Delta T_H = t_{iH} - t_0, \quad T_i = t_{iK} - t_{iH},$$

$$\Delta T_K = t_0 + T - t_K, \quad t_H = t_{iH}, \quad t_K = t_{nK} = t_{3K},$$

$$t_K - t_H = n \cdot \tau_{ui}, \quad \tau_u = \tau_{ui}, \quad \Delta T_i = 0,$$

где $\sigma(t)$ – ступенчатая функция; $e_i(t)$ – i -е ступенчатое напряжение ограниченной длительности T_i ; t_{iH}, t_{iK} – моменты начала и окончания $e_i(t)$; t_0, T – момент начала и длительность сеанса моделирования, соответственно; E_i – амплитуда i -го фрагмента видеосигнала $e(t)$; ΔE_i – амплитуда i -го ступенчатого фрагмента $e_i(t)$; ΔT_H – интервал времени между началом сеанса t_0 и началом видеосигнала t_H ; ΔT_K – интервал времени между моментом окончания сеанса $(t_0 + T)$ и моментом окончания видеосигнала t_K ; τ_{ui} – длительность i -го фрагмента видеосигнала; ΔT_i – интервал времени между i -м и $(i + 1)$ -м фрагментами видеосигнала $e(t)$.

Длительность сеанса моделирования определяется из соотношения

$$T = \Delta T_H + \Delta T_K + \sum_{i=1}^{n=3} (\tau_{ui} + \Delta T_i) .$$

В рассматриваемом примере $T = 7$ мс.

При анализе реакции RC-цепи на исследуемый видеосигнал $e(t)$ необходимо учитывать, что выходной эффект определяется не только совокупностью ступенчатых напряжений $e_i(t)$, характеризующих закон изменения переднего фронта видеосигнала $e(t)$, но также ступенчатой функцией $U_4(t) = -E_3 \sigma(t_K - t)$ при $t \geq t_K$, характеризующей закон изменения заднего фронта видеосигнала $e(t)$.

Реакция интегрирующей RC-цепи $U_C(t)$ определяется соотношениями

$$U_C(t) = \sum_{i=1}^{n=3} U_{ci}(t) + \Delta U_C(t), \quad t_0 < t < t_0 + T;$$

$$U_{ci}(t) = \int_{t_{iH}}^{t_{iH} + \tau_{ui}} e_i(x) h(t - x) dt, \quad t_0 + \Delta T_H + (i - 1) \tau_u < t < t_0 + \Delta T_H + i \tau_u, \quad t_{iH} = t_0 + \Delta T_H + \tau_u;$$

$$U_{C1}(t) = \Delta E_1 [1 - \exp(-t/\tau)] , \quad t_0 + \Delta T_H < t < t_0 + \Delta T_H + \tau_u;$$

$$U_{C2}(t) = \Delta E_2 [1 - \exp(-t/\tau)] , \quad t_0 + \Delta T_H + \tau_u < t < t_0 + \Delta T_H + 2\tau_u ;$$

$$U_{C3}(t) = \Delta E_3 [1 - \exp(-t/\tau)] , \quad t_0 + \Delta T_H + 2\tau_u < t < t_0 + \Delta T_H + 3\tau_u ;$$

$$\Delta U_C(t) = E_3 \exp(-t/\tau) , \quad t_0 + \Delta T_H + 3\tau_u < t < t_0 + T , \quad \tau = RC .$$

Реакция дифференцирующей RC-цепи $U_R(t)$ определяется соотношениями

$$U_R(t) = \sum_{i=1}^{n=3} U_{Ri}(t) + \Delta U_R(t) ; \quad U_{Ri}(t) = \Delta E_i - U_{Ci}(t) ;$$

$$U_{R1}(t) = \Delta E_1 [1 - \exp(-t/\tau)] , \quad t_0 + \Delta T_H < t < t_0 + \Delta T_H + \tau_u ;$$

$$U_{R2}(t) = \Delta E_2 [1 - \exp(-t/\tau)] , \quad t_0 + \Delta T_H + \tau_u < t < t_0 + \Delta T_H + 2\tau_u ;$$

$$U_{R3}(t) = \Delta E_3 [1 - \exp(-t/\tau)] , \quad t_0 + \Delta T_H + 2\tau_u < t < t_0 + \Delta T_H + 3\tau_u ;$$

$$\Delta U_R(t) = -E_3 \exp(-t/\tau) , \quad t_0 + \Delta T_H + 3\tau_u < t < t_0 + T ,$$

где $\Delta U_C(t)$, $\Delta U_R(t)$ – реакция интегрирующей и дифференцирующей RC-цепей на задний фронт видеосигнала $e(t)$.

Поскольку в рассматриваемом примере выполняется условие $\tau_u/\tau \gg 1$, то при этом длительность переходного процесса в RC-цепи оказывается существенно меньше длительности фрагментов видеосигнала, что приводит к отсутствию межсимвольных искажений*.

При анализе напряжений $U_C(t)$ и $U_R(t)$ для приведенных в табл. 2 исходных данных достаточно произвести расчеты для следующих моментов времени:

$$t_0 ; t_{1H} ; (t_{1H} + \tau) ; (t_{1H} + t_y) ; (t_{1H} + 2t_y) ; (t_{1H} + \tau_u) ;$$

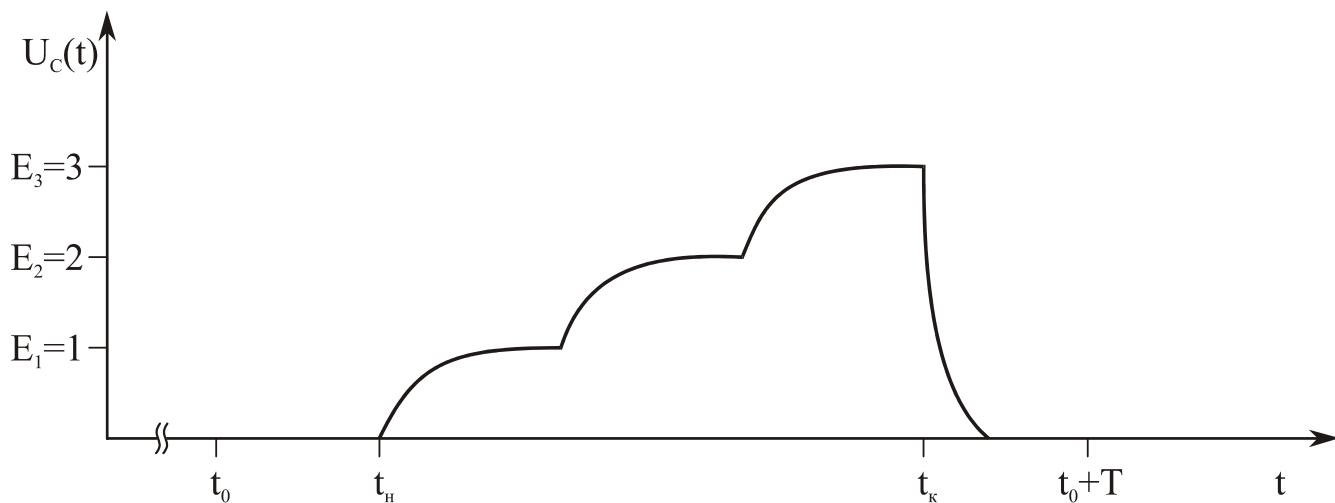
$$(t_{2H} + \tau) ; (t_{2H} + t_y) ; (t_{2H} + 2t_y) ; (t_{2H} + \tau_u) ;$$

$$(t_{3H} + \tau) ; (t_{3H} + t_y) ; (t_{3H} + 2t_y) ; (t_{3H} + \tau_u) ;$$

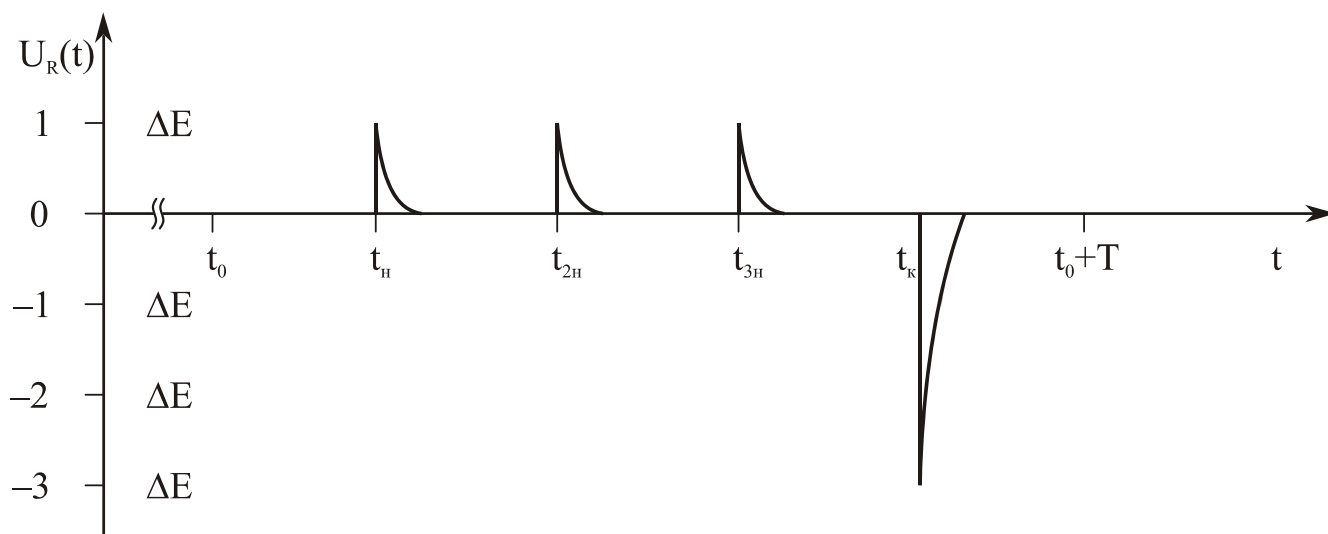
$$(t_{кH} + \tau) ; (t_{кH} + t_y) ; (t_{кH} + 2t_y) ; (t_{кH} + \tau_u) ; (t_0 + T) .$$

При таком наборе временных отсчетов напряжений $U_{Ci}(t)$ и $U_{Ri}(t)$ обеспечивается погрешность их вычислений меньше 10^{-2} .

Результаты расчета напряжений $U_C(t)$ и $U_R(t)$ приведены на рис. 4, в и г.



б



в

Рис. 4

2.4. Пример второй

Определим реакцию интегрирующей и дифференцирующей RC-цепей при воздействии на них видеосигнала $e(t)$ в виде хаотической импульсной помехи, которая представляет собой пачку прямоугольных импульсов с параметрами, приведенными в табл. 3.

Отличительная особенность данного примера состоит в наличии в реакции RC-цепи межсимвольных искажений* из-за того, что $\tau_u/\tau \leq 1$.

С целью упрощения анализа исследуемый видеосигнал $e(t)$ представляется в виде совокупности прямоугольных видеоимпульсов (рис. 5, а):

$$e(t) = \sum_{i=1}^{n=5} e_i(t) \text{ при } t_0 < t < t_0 + T, e_i(t) = E_i[\sigma(t - t_{iH}) - \sigma(t - t_{iK})] \text{ при } t_{iH} \leq t < t_{iK};$$

$$t_{iK} - t_{iH} = \tau_{ui}, \Delta T_{iH} = t_{iH} - t_0, \Delta T_{iK} = t_0 - T - t_{iK}.$$

Длительность сеанса моделирования равна $T = 20$ мс. В связи с тем, что длительность переходных процессов значительно превосходит длительность отдельных видеоимпульсов, результирующее выходное напряжение для фиксированного момента времени определяется вкладом от нескольких видеоимпульсов.

С целью снижения погрешности при определении выходного напряжения временной интервал, на котором необходимо вычислять реакцию RC-цепи на каждый видеоимпульс, выбирается из условия $t_{iH} < t < t_{iK} + 2t_y$, где $t_y = 2,3\tau$.

Таблица 3

№	$E_i, \text{В}$	$t_{iH}, \text{с}$	$\tau_{ui}, \text{с}$	$\Delta T_{iH}, \text{с}$	$\Delta T_{iK}, \text{с}$	$C, \text{Ф}$	$R, \text{Ом}$	$t_0, \text{с}$
$e_1(t)$	2	10^{-8}	10^{-3}	10^{-3}	$2 \cdot 10^{-3}$	10^{-7}	$3 \cdot 10^3$	0
$e_2(t)$	3	$3 \cdot 10^{-3}$	$2 \cdot 10^{-3}$	10^{-3}	$2 \cdot 10^{-3}$	10^{-7}	$3 \cdot 10^3$	0
$e_3(t)$	1	$6 \cdot 10^{-8}$	$3 \cdot 10^{-3}$	$2 \cdot 10^{-3}$	$2 \cdot 10^{-3}$	10^{-7}	$3 \cdot 10^3$	0
$e_4(t)$	5	$11 \cdot 10^{-3}$	$4 \cdot 10^{-3}$	$2 \cdot 10^{-3}$	$2 \cdot 10^{-3}$	10^{-7}	$3 \cdot 10^3$	0
$e_5(t)$	4	$17 \cdot 10^{-3}$	10^{-3}	0	$2 \cdot 10^{-3}$	10^{-7}	$3 \cdot 10^3$	0

Реакция интегрирующей RC-цепи $U_C(t)$ на видеосигнал $e(t)$ определяются соотношениями

$$U_C(t) = \sum_{i=1}^{n=5} U_{Ci}(t) \text{ при } t_0 < t < t_0 + T, U_{Ci}(t) = \int_{t_{iH}}^{t_{iK} + 2t_y} e_i(x) h(t-x) dt \text{ при } t_{iH} < t < t_{iK} + 2t_y,$$

$$U_{Ci}(t) = \begin{cases} E_i[1 - \exp(-t/\tau)] \text{ при } t_{iH} < t < t_{iH} + \tau_{ui}, \\ E_i[1 - \exp(-\tau_{ui}/\tau)] \exp\left(-\frac{t - \tau_{ui}}{\tau}\right) \text{ при } t_{iK} < t < t_{iK} + 2t_y. \end{cases}$$

Реакция дифференцирующей RC-цепи $U_R(t)$ на видеосигнал $e(t)$ определяется соотношениями

$$U_R(t) = \sum_{i=1}^{n=5} U_{Ri}(t) \text{ при } t_0 < t < t_0 + T,$$

$$U_{Ri}(t) = \begin{cases} E_i \exp(-t/\tau) & \text{при } t_{iH} < t < t_{iH} + \tau_{ui}, \\ E_i [\exp(-\tau_{ui}/\tau) - 1] \exp\left(-\frac{t - \tau_{ui}}{\tau}\right) & \text{при } t_{iK} < t < t_{iK} + 2t_y. \end{cases}$$

При анализе напряжений $U_C(t)$ и $U_R(t)$ для приведенных в табл. 2 исходных данных достаточно произвести расчеты для следующих моментов времени:

$$\begin{aligned} & t_0; t_{1H}; (t_{1K} + \tau); (t_{1K} + t_y); (t_{1K} + 2t_y); \\ & t_{2H}; t_{2K}; (t_{2K} + \tau); (t_{2K} + t_y); (t_{2K} + 2t_y); \\ & t_{3H}; t_{3K}; (t_{3K} + \tau); (t_{3K} + t_y); (t_{3K} + 2t_y); \\ & t_{4H}; t_{4K}; (t_{4H} + \tau); (t_{4K} + \tau); t_{5H}; t_{5K}; (t_0 + T). \end{aligned}$$

При таком наборе временных отсчетов напряжений $U_{Ci}(t)$ и $U_{Ri}(t)$ обеспечивается погрешность их вычислений меньше 10^{-2} .

Результаты расчета напряжений $U_C(t)$ и $U_R(t)$ приведены на рис. 5, б и в.

Приведенные примеры обеспечивают возможность анализа прохождения через RC-цепи видеосигналов $e(t)$ произвольной формы, для которых приемлема ступенчатая аппроксимация*.

В тех случаях, когда необходима линейная аппроксимация*, следует наряду с рассмотренными в примерах 1 и 2 тестовыми воздействиями в виде ступенчатых функций и прямоугольных видеоимпульсов, использовать треугольные видеоимпульсы, рассмотренные в приложении 6.

Для закрепления теоретического материала по временному методу анализа ЛЦ необходимо выполнить контрольную работу № 2 и лабораторную работу № 2.

При выполнении контрольной работы № 2 “Анализ прохождения видеосигналов через RC-цепи” следует воспользоваться приложением 6, в котором приводится содержание контрольной работы и варианты исходных данных (номер варианта задается преподавателем).

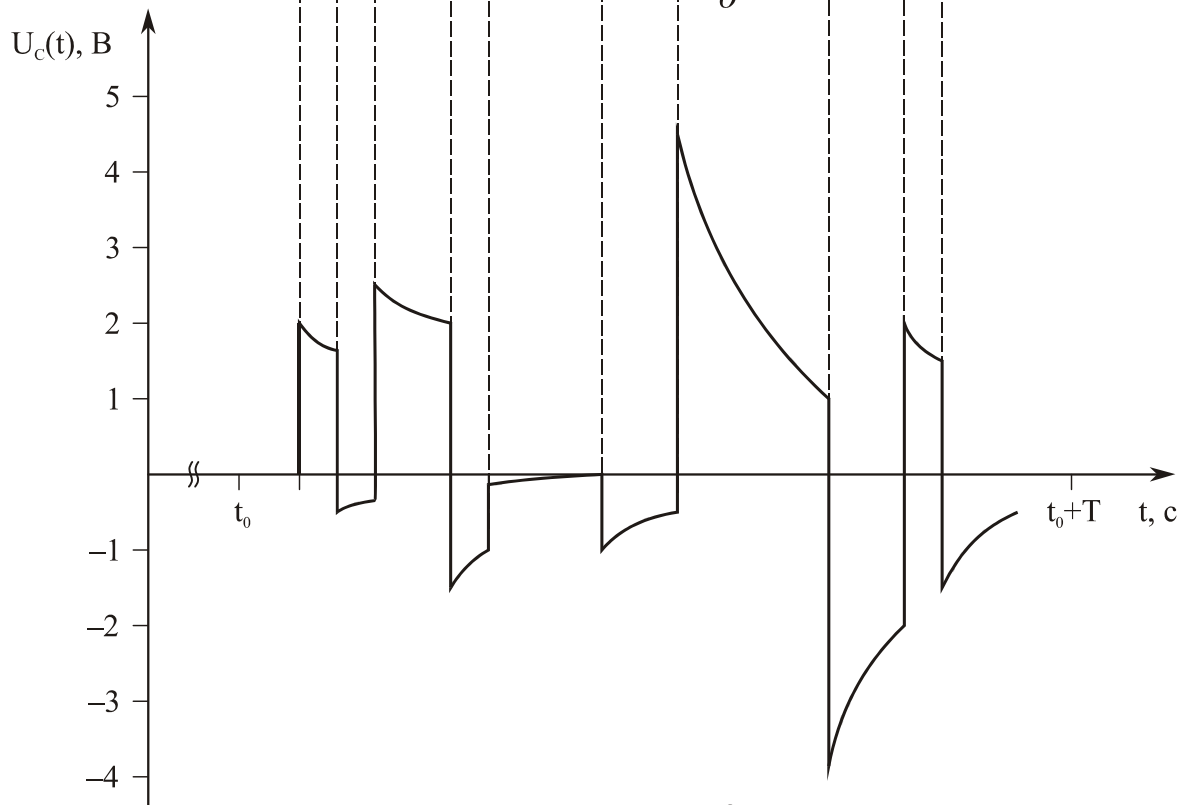
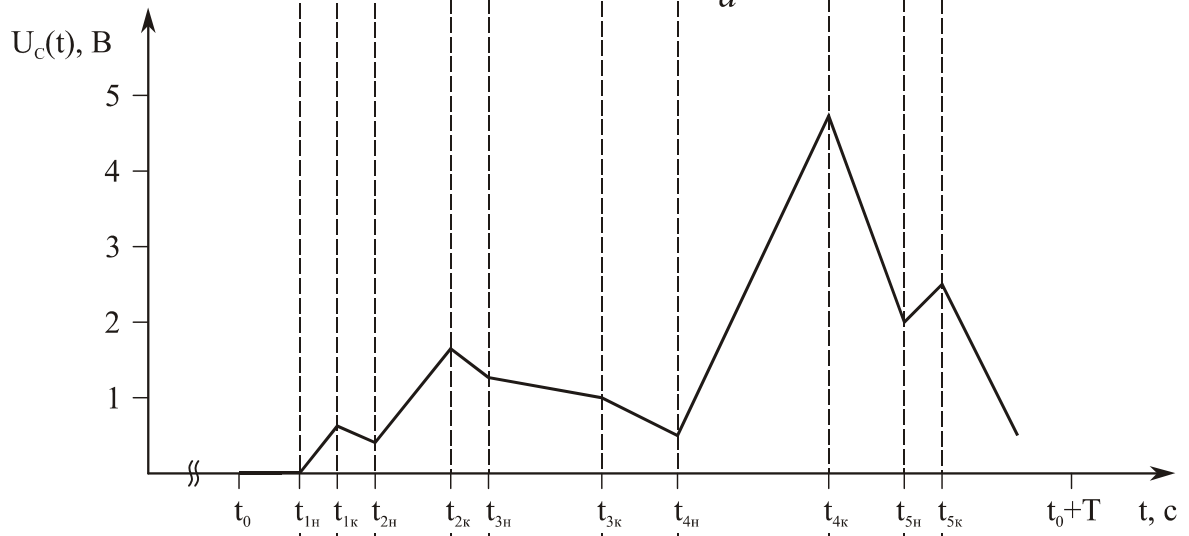
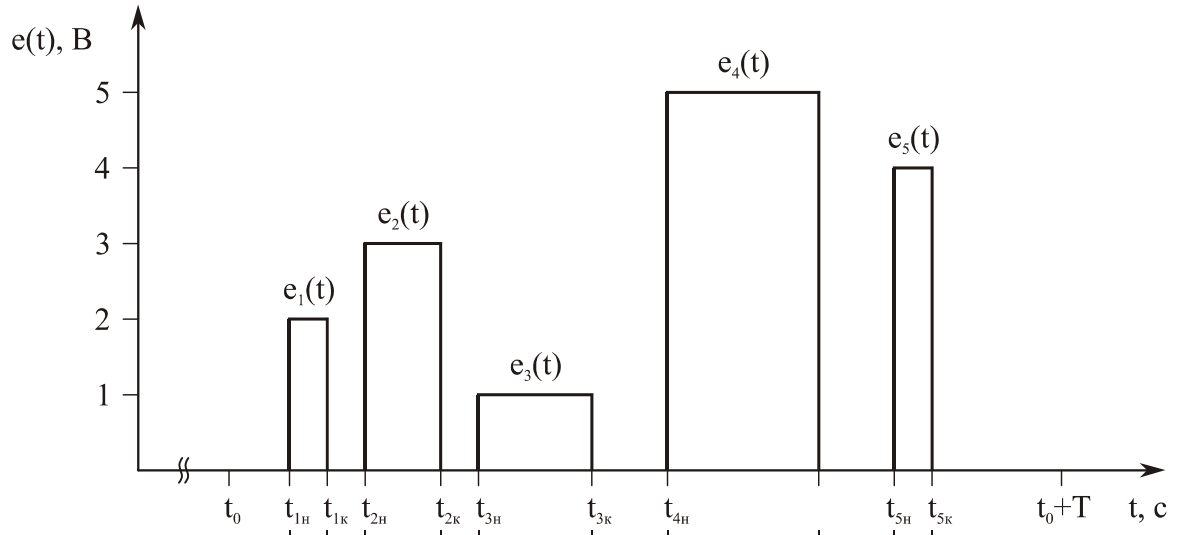


Рис. 5

в

3. СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЕТА

Отчет по данному разделу курса “Теория цепей” должен содержать: результаты выполнения контрольных и лабораторных работ № 1 и 2.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОАТТЕСТАЦИИ

1. Идеализированные элементы электрических цепей.
2. Законы Кирхгофа.
3. Основные понятия топологии цепей.
4. Гармонические функции. Основы метода комплексных амплитуд.
5. Частотные и фазовые характеристики простейших цепей.
6. Последовательный колебательный контур.
7. Параллельный колебательный контур.
8. Классический метод анализа переходных процессов.
9. Операторный метод анализа переходных процессов.
10. Единичные функции и их свойства.
11. Переходные и импульсные характеристики.
12. Применение интеграла Дюамеля к анализу неустановившихся и переходных процессов.
13. Переходные процессы в RC-цепях.
14. Переходные процессы в RL-цепях.
15. Переходные процессы в цепях второго порядка.
16. Пассивные четырехполюсники.
17. Фильтры нижних частот.
18. Полосовые фильтры.
19. Заграждающие (режекторные) фильтры.
20. Каскадное (многозвенное соединение) линейных цепей.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Крылов В.В., Корсаков С.Я.* Основы теории цепей для системотехников. М.: Высш. школа, 1990. 224 с.
2. *Баскаков С.И.* Лекции по теории цепей. М.: Изд-во МЭИ, 1991. 224 с.
3. *Попов В.П.* Основы теории цепей. М.: Высшая школа, 1985. 320 с.
4. *Разевиг В.Д.* Система схемотехнического моделирования “MicroCAP – 5”. М.: Изд-во “Солон”, 1997. 273 с.
5. *Разевиг В.Д.* Система схемотехнического моделирования “MicroCAP – 6”. М.: Изд-во “Горячая линия – Телеком”, 2001. 344 с.

П1. ОСНОВНЫЕ ОПРЕДЕЛЕНИЯ

Генератор сигналов (ГС) — источник формирования сигналов на основе использования источников напряжений (ИН) или источников токов (ИТ).

Групповое время запаздывания цепи $t_{гр}(\omega)$ — временной сдвиг сигнала на выходе цепи, определяемый как производная фазочастотной характеристики цепи

$$t_{гр}(\omega) = \frac{d\varphi(\omega)}{d\omega}.$$

Двухполюсник (Дв) — элемент цепи с двумя выводами (полюсами).

Дельта-функция $\delta(t)$ — модель бесконечно короткого импульса, возникающего в момент времени $t = 0$, равного нулю всюду, за исключением этой точки, но,

тем не менее, имеющего единичную площадь: $\int_{-\infty}^{\infty} \delta(t) dt = 1$.

Закон Кирхгофа (первый) — алгебраическая сумма токов в ветвях, которые подходят к любому узлу цепи, равна нулю.

Закон Кирхгофа (второй) — алгебраическая сумма напряжений в контуре цепи равна алгебраической сумме напряжений источников напряжений с учетом произвольно выбранного напряжения обхода.

Закон Ома — взаимосвязь между током, протекающим через компонент ЛЦ и напряжением на его выводах.

Импульсная характеристика цепи $h(t)$ — реакция цепи на входное воздействие вида дельта-функции, возникающее в момент времени $t = 0$ при нулевых начальных условиях.

Интеграл Дюамеля — реакция цепи $y(t)$ при воздействии произвольной возбуждающей функции $f(t)$, соответствующая интегралу свертки

$$y(t) = \int_0^t f(x)h(t-x)dx.$$

Источник напряжения (ИН) — элемент цепи, на выходных зажимах которого создается напряжение, величина которого не зависит от тока, протекающего через него. Внутреннее сопротивление ИН пренебрежимо мало по сравнению с входным сопротивлением цепи.

Источник тока (ИТ) — элемент цепи, который создает ток, величина которого не зависит от напряжения на его выходных зажимах. Внутреннее сопротивление ИТ значительно больше сопротивления цепи.

Комплексный коэффициент передачи цепи $K(j\omega)$ — функция, описывающая частотную зависимость комплексных напряжений на выходе $\dot{U}_{\text{ВЫХ}}$ и входе $\dot{U}_{\text{ВХ}}$ цепи:

$$K(j\omega) = \dot{U}_{\text{ВЫХ}} / \dot{U}_{\text{ВХ}} = |K(j\omega)| \exp[\varphi(j\omega)],$$

где $|K(j\omega)|$ — модуль комплексного коэффициента передачи цепи, соответствующий АЧХ цепи; $\varphi(j\omega)$ — аргумент комплексного коэффициента передачи цепи, соответствующий ФЧХ цепи.

Компонент (К) — пассивный или активный элемент, в котором осуществляется преобразование электромагнитных волн.

Контур (Кон) — множество узлов цепи, соединенных ветвями.

Линейная цепь (ЛЦ) — совокупность пассивных и активных компонентов, объединенных СхЭ в ФЗ, в которых в случае преобразования электромагнитных волн выполняется принцип суперпозиции, т.е. зависимость между входным и выходным эффектами имеет линейный характер.

Межсимвольные искажения — искажения видеосигнала, обусловленные наложением в выходном эффекте реакций от воздействия последовательно размещаемых на оси времени видеоимпульсов.

Переходная функция цепи $H(t)$ — реакция цепи на входное воздействие вида функции включения (функция Хэвисайда) $\sigma(t) = \begin{cases} 0, & t < 0, \\ 1, & t > 0. \end{cases}$

Принцип суперпозиции (ПрСуп) — допущение, согласно которому результирующий эффект при сложном воздействии на цепь представляет собой сумму откликов, вызываемых отдельными воздействиями.

Радиоканал (РК) — одна или несколько радиолиний, обеспечивающих передачу информации между пространственно разнесенными абонентами.

Радиолиния (РЛ) — совокупность радиоустройств, реализующих алгоритм по передаче информации между пространственно разнесенными абонентами.

Радиосистема (РС) — совокупность радиоустройств, предназначенных для решения комплекса технических задач в соответствии с единым алгоритмом и заданным критерием эффективности.

Радиоустройство (РУ) — совокупность функциональных звеньев, реализующих техническую задачу, связанную со сбором, передачей и обработкой информации.

Радиоэлектроника (Р) — отрасль науки и техники, связанная с обработкой, сбором и хранением информации на основе использования электромагнитных волн.

Радиоэлектронные средства (РСр) — варианты технической реализации радиоэлектронной и телекоммуникационной аппаратуры.

Схема структурная (СхС) — схема соединения РУ, соответствующая конкретным РУ, РЛ и РС.

Схема функциональная (СхФ) — схема соединения ФЗ, соответствующих конкретным РУ, РЛ и РС.

Схема электрическая (СхЭ) — схема соединения компонент, соответствующая конкретным ФЗ, РУс, РЛ и РС.

Узел (У) — точка, в которой выводы (полюсы) двух или более элементов цепи соединяются вместе.

Телекоммуникации (Т) — отрасль науки и техники, связанная с передачей информации на большие расстояния.

Четырехполюсник (Ч) — элемент цепи с четырьмя выводами (полюсами).

Функциональное звено (ФЗ) — совокупность компонентов, реализующих функциональное преобразование электромагнитных волн.

Элементная база (ЭБ) — компоненты, используемые при реализации электрических схем радиоэлектронных и телекоммуникационных средств.

П2. КОМПЛЕКСНЫЕ ЧИСЛА И ФУНКЦИИ КОМПЛЕКСНОГО ПЕРЕМЕННОГО

П2.1. Комплексные числа

П2.1.1. Алгебраическая (декартова) форма записи комплексных чисел:

$$z = x + iy \quad (i^2 = -1);$$

$\operatorname{Re} z = x$ — действительная часть комплексного числа,

$\operatorname{Im} z = y$ — мнимая часть комплексного числа.

Комплексное число $\bar{z} = a - ib$ комплексно сопряжено с числом z .

Арифметические действия:

$$z_1 + z_2 = (x_1 + x_2) + i(y_1 + y_2);$$

$$z_1 - z_2 = (x_1 - x_2) + i(y_1 - y_2);$$

$$z_1 \cdot z_2 = (x_1 x_2 - y_1 y_2) + i(x_1 y_2 - x_2 y_1);$$

$$\frac{z_1}{z_2} = \frac{x_1 x_2 + y_1 y_2}{x_2^2 + y_2^2} + i \frac{x_2 y_1 - x_1 y_2}{x_2^2 + y_2^2}, \quad z_2 \neq 0.$$

П2.1.2. Тригонометрическая форма записи комплексных чисел (определена для комплексного числа z , отличного от нуля):

$$z = r (\cos \varphi + i \sin \varphi);$$

модуль комплексного числа:

$$|z| = r = \sqrt{x^2 + y^2};$$

аргумент комплексного числа:

$$\operatorname{Arg} z = \arg z + 2\pi k \quad (k = 0, 1, \dots),$$

где $\arg z = \varphi$ — главное значение аргумента.

П2.1.3. Показательная форма записи комплексных чисел:

$$z = r e^{i\varphi}.$$

Формула Эйлера:

$$e^{i\varphi} = \cos \varphi + i \sin \varphi.$$

Произведение и частное комплексных чисел в показательной и тригонометрической формах записи:

$$z_1 \cdot z_2 = r_1 r_2 e^{i(\varphi_1 + \varphi_2)} = r_1 r_2 [\cos(\varphi_1 + \varphi_2) + i \sin(\varphi_1 + \varphi_2)];$$

$$\frac{z_1}{z_2} = \frac{r_1}{r_2} e^{i(\varphi_1 - \varphi_2)} = \frac{r_1}{r_2} [\cos(\varphi_1 - \varphi_2) + i \sin(\varphi_1 - \varphi_2)] \quad (z_2 \neq 0).$$

П2.2. Формулы Муавра

$$z^n = r^n e^{in\varphi} = r^n (\cos n\varphi + i \sin n\varphi),$$

$$\sqrt[n]{z} = \sqrt[n]{r} \exp\left\{i \frac{\varphi + 2\pi k}{n}\right\} = \sqrt[n]{r} \left(\cos \frac{\varphi + 2\pi k}{n} + i \sin \frac{\varphi + 2\pi k}{n} \right) \quad (k = 0, 1, \dots, n-1).$$

П2.3. Степень с произвольным рациональным показателем

$$z^{m/n} = \left(\sqrt[n]{r}\right)^m.$$

ПЗ. ФИЛЬТРЫ

ПЗ.1. Фильтр нижних частот (ФНЧ)

ПЗ.1.1. Структура ФНЧ приведена на рис. ПЗ.1, *а* и *б*, где ИН – источник напряжения; $e(t) = E \cos(\omega t + \varphi)$ — гармоническое напряжение с амплитудой E , угловой частотой ω и начальной фазой φ ; τ — постоянная времени ФНЧ, $\tau = RC = L/R$.

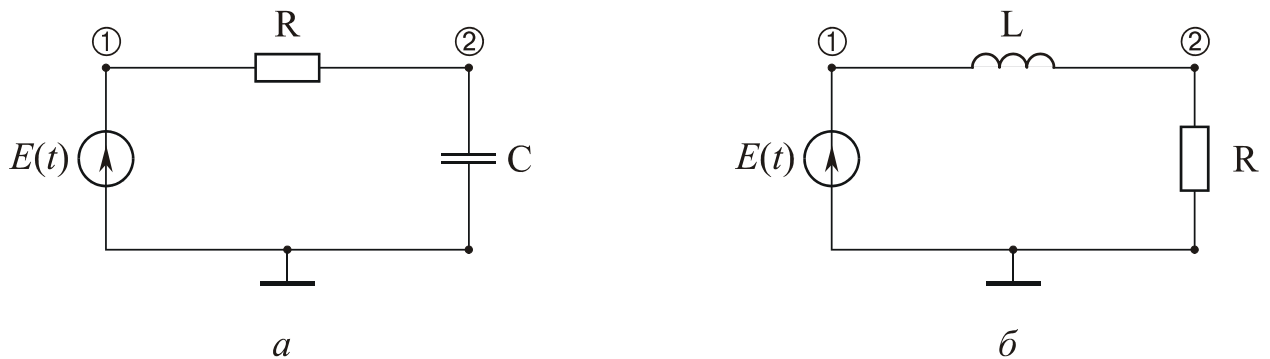


Рис. ПЗ.1

ПЗ.1.2. Соотношения для ФНЧ, характеризующие комплексную частотную характеристику АЧХ $\dot{K}_1(\omega)$ и ФЧХ $\varphi_1(\omega)$:

$$\dot{K}_1(\omega) = \frac{1}{1 + j\omega\tau}; \quad K_1(\omega) = \frac{1}{\sqrt{1 + \omega^2\tau^2}};$$

$$\varphi_1(\omega) = -\operatorname{arctg}(\omega\tau); \quad \omega_{г1} = 1/\tau,$$

где $\omega_{г1}$ — граничная частота ФНЧ.

ПЗ.1.3. Графические представления АЧХ $K_1(\omega)$ и ФЧХ $\varphi_1(\omega)$ приведены на рис. ПЗ.2, *а* и *б*.

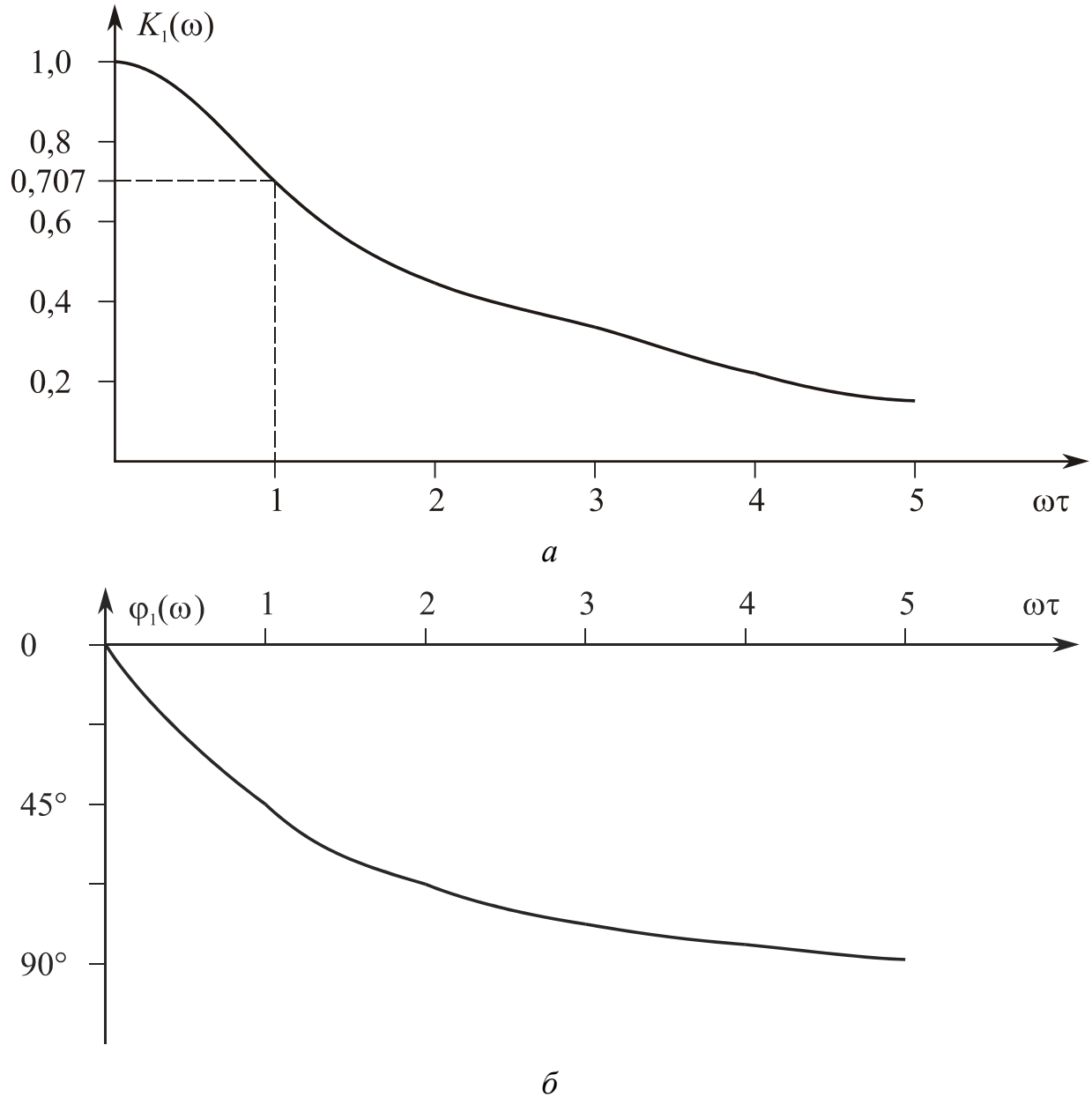


Рис. П3.2

П3.1.4. Напряжение на выходе ФНЧ имеет вид

$$U_2(t) = EK_1(\omega) \cos[\omega(t - t_{\text{гр1}}) + \varphi], \quad t_{\text{гр1}} = \frac{\varphi_{\text{фнч}}}{\omega},$$

где $t_{\text{гр1}}$ — групповое время запаздывания, вносимого ФНЧ; $\varphi_{\text{фнч}}$ — фазовый сдвиг, вносимый ФНЧ на частоте ω .

ПЗ.2. Фильтр верхних частот (ФВЧ)

ПЗ.2.1. Структура ФВЧ приведена на рис. ПЗ.3, *а* и *б*.

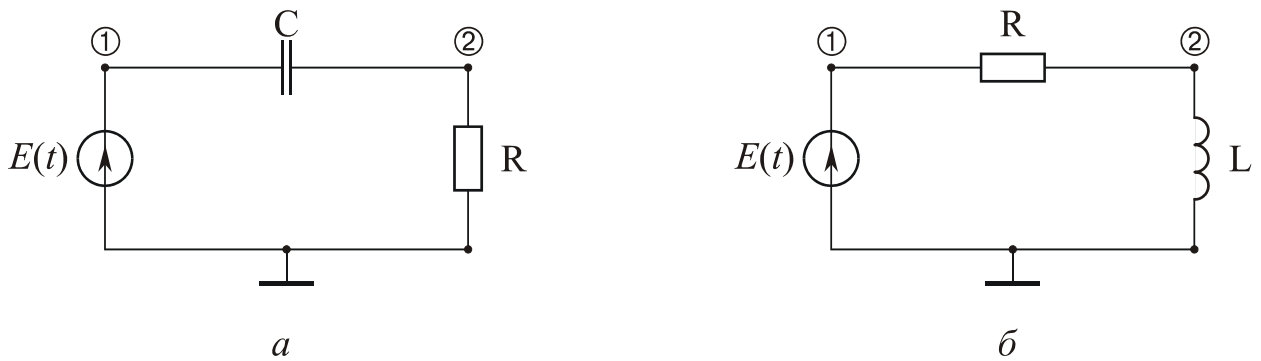


Рис. ПЗ.3

ПЗ.2.2. Соотношения для ФВЧ:

$$\dot{K}_2(\omega) = \frac{j\omega\tau}{1 + j\omega\tau}; \quad K_2(\omega) = \frac{\omega\tau}{\sqrt{1 + \omega^2\tau^2}};$$

$$\varphi_2(\omega) = \arctg\left(\frac{1}{\omega\tau}\right); \quad \omega_{r2} = 1/\tau,$$

где ω_{r2} — граничная частота ФВЧ.

ПЗ.2.3. Графические представления АЧХ $K_2(\omega)$ и ФЧХ $\varphi_2(\omega)$ приведены на рис. ПЗ.4, *а* и *б*.

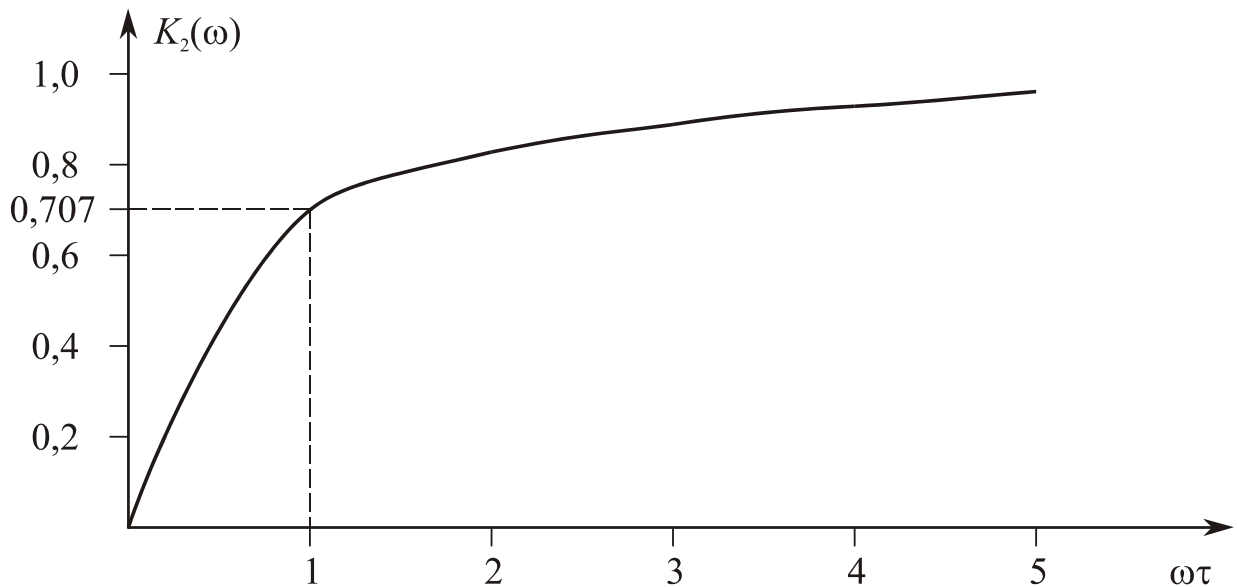


Рис. ПЗ.4, *а*

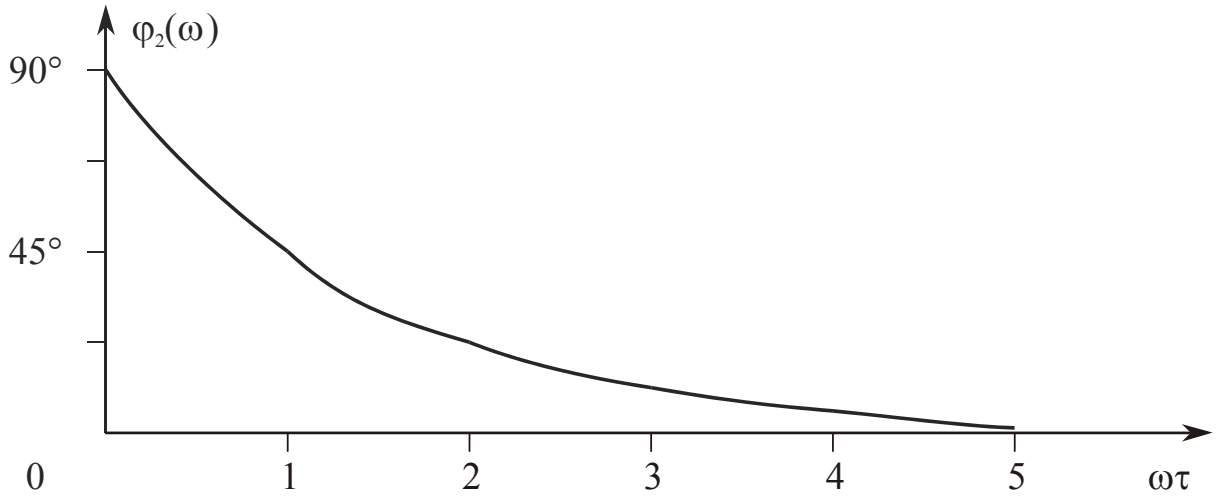


Рис. ПЗ.4, б

ПЗ.2.4. Напряжения на выходе ФВЧ имеет вид:

$$U_2(t) = E K_2(\omega) \cos[\omega(t - t_{\text{гр2}}) + \varphi], \quad t_{\text{гр2}} = \frac{\varphi_{\text{ФВЧ}}}{\omega},$$

где $t_{\text{гр2}}$ — групповое время запаздывания, вносимого ФВЧ; $\varphi_{\text{ФВЧ}}$ — фазовый сдвиг, вносимый ФВЧ на частоте ω .

ПЗ.3. Полосовой фильтр (ПФ) на основе параллельного резонансного контура

ПЗ.3.1. Структура ПФ приведена на рис. ПЗ.5, где R_p — активное резонансное сопротивление.

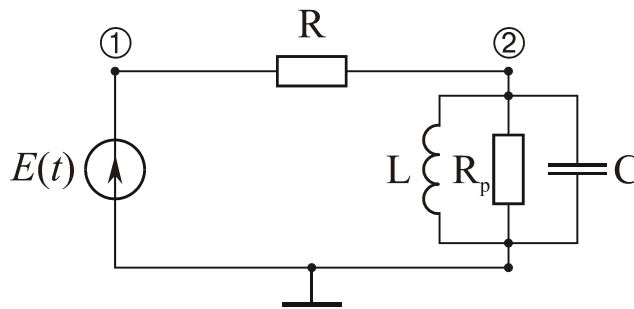


Рис. ПЗ.5

ПЗ.3.2. Соотношение для ПФ при $R \ll R_p$:

$$\dot{K}_3(\omega) = \frac{1}{1 + j\xi(\omega)}, \quad K_3(\omega) = \frac{1}{\sqrt{1 + \xi^2(\omega)}},$$

$$\varphi_3(\omega) = \arctg[\xi(\omega)], \quad \xi(\omega) = R_p \left[\omega C - \frac{1}{\omega L} \right] \approx \frac{2Q\Delta\omega}{\omega_0};$$

$$R_p = \rho Q, \Delta\omega = \omega - \omega_0, \omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}};$$

$$Q = \frac{\omega_0}{\Delta\omega_{0,7}}, \rho = \omega_0 L = \frac{1}{\omega_0 C} = \sqrt{\frac{L}{C}},$$

где $\xi(\omega)$ — обобщенная расстройка контура; $\Delta\omega$ — расстройка частоты воздействия ω от резонансной частоты ω_0 ; Q — добротность контура; ρ — характеристическое сопротивление контура; $\Delta\omega_{0,7}$ — полоса пропускания контура по уровню 0,707 (или спаду полосового фильтра на 3 дБ).

ПЗ.3.3. Графические представления АЧХ $K_3(\omega)$ и ФЧХ $\varphi_3(\omega)$ приведены на рис. ПЗ.6, *а* и *б*.

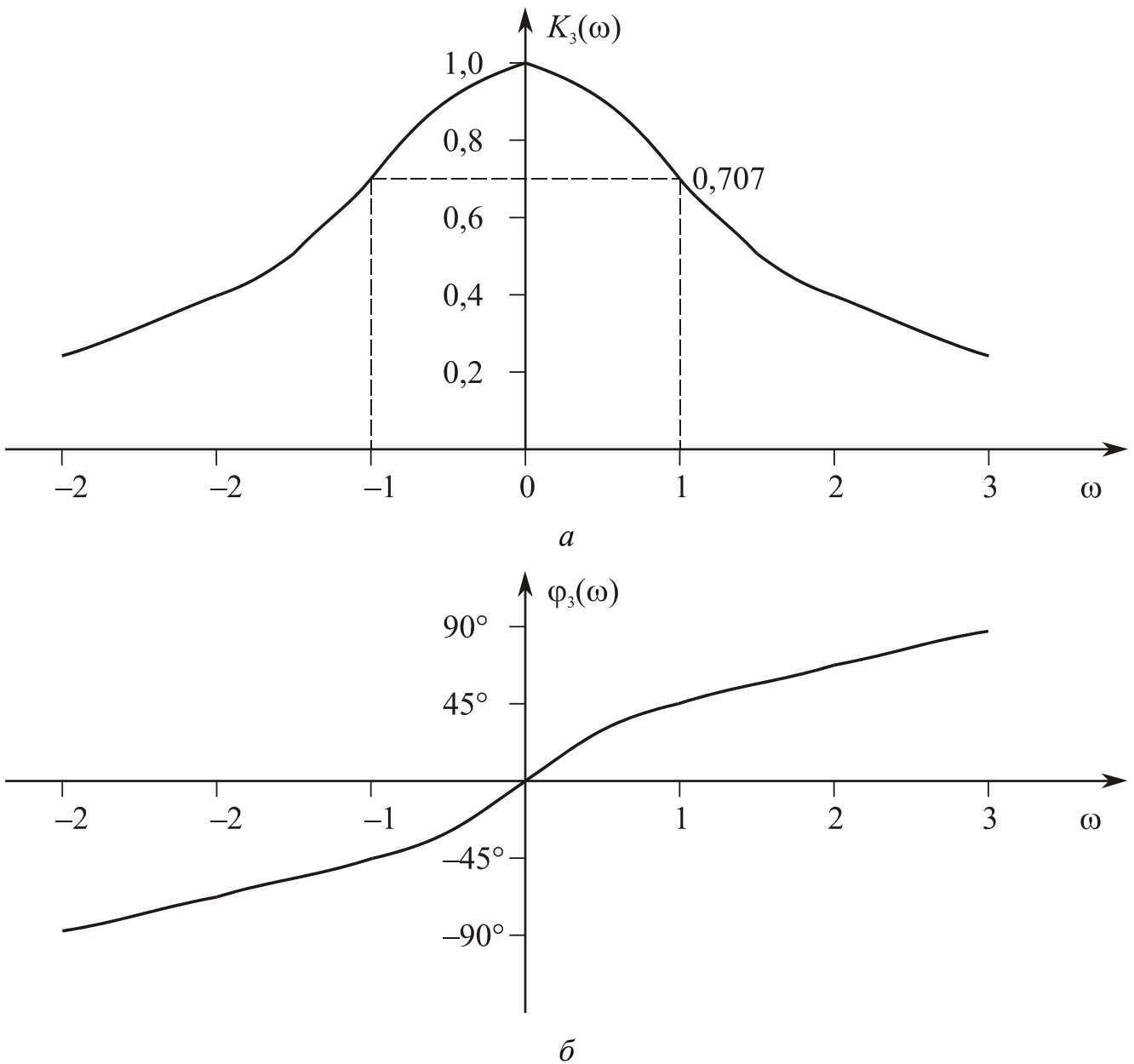


Рис. ПЗ.6

ПЗ.3.4. Напряжение на выходе ПФ имеет вид

$$U_2(t) = E K_3(\omega) \cos[\omega(t - t_{\text{гpз}}) + \varphi], \quad t_{\text{гpз}} = \frac{\varphi_{\text{пф}}}{\omega_{0,707}},$$

$$\Delta\varphi_{\text{пф}} = \varphi(\omega_{\text{в}}) - \varphi(\omega_{\text{н}}); \quad \omega_{\text{в}} = \omega_0 + \frac{\Delta\omega_{0,707}}{2}; \quad \omega_{\text{н}} = \omega_0 - \frac{\Delta\omega_{0,707}}{2},$$

где $t_{\text{гpз}}$ — групповое время запаздывания, вносимого ПФ; $\varphi(\omega_{\text{н}})$, $\varphi(\omega_{\text{в}})$ — фазовые сдвиги, вносимые ПФ на нижней $\omega_{\text{н}}$ и верхней $\omega_{\text{в}}$ граничных частотах; $\Delta\varphi_{\text{пф}}$ — разность фаз.

ПЗ.4. Заграждающий (режекторный) фильтр (ЗФ) на основе последовательного резонансного контура

ПЗ.4.1. Структура ЗФ приведена на рис. ПЗ.7, где $R_{\text{п}}$ — сопротивление потерь.

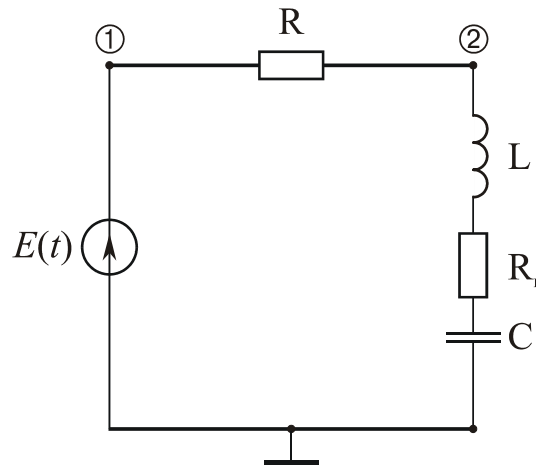


Рис. ПЗ.7

ПЗ.4.2. Соотношения для ЗФ:

$$\dot{K}_4(\omega) = \left(\frac{R_{\text{п}}}{R + R_{\text{п}}} \right) [1 + j\xi(\omega)];$$

$$K_4(\omega) = \frac{R_{\text{п}} \sqrt{1 + \xi^2(\omega)}}{R + R_{\text{п}}}; \quad \varphi_4(\omega) = -\text{arctg}[\xi(\omega)];$$

$$\xi(\omega) = \frac{\left(\omega L - \frac{1}{\omega C} \right)}{R_{\text{п}}}; \quad R_{\text{п}} = \frac{\rho}{Q}; \quad K_4(\omega_0) = \frac{R_{\text{п}}}{R + R_{\text{п}}}.$$

ПЗ.4.3. Графические представления АЧХ $K_4(\omega)$ и ФЧХ $\varphi_4(\omega)$ приведены на рис. ПЗ.8, а и б

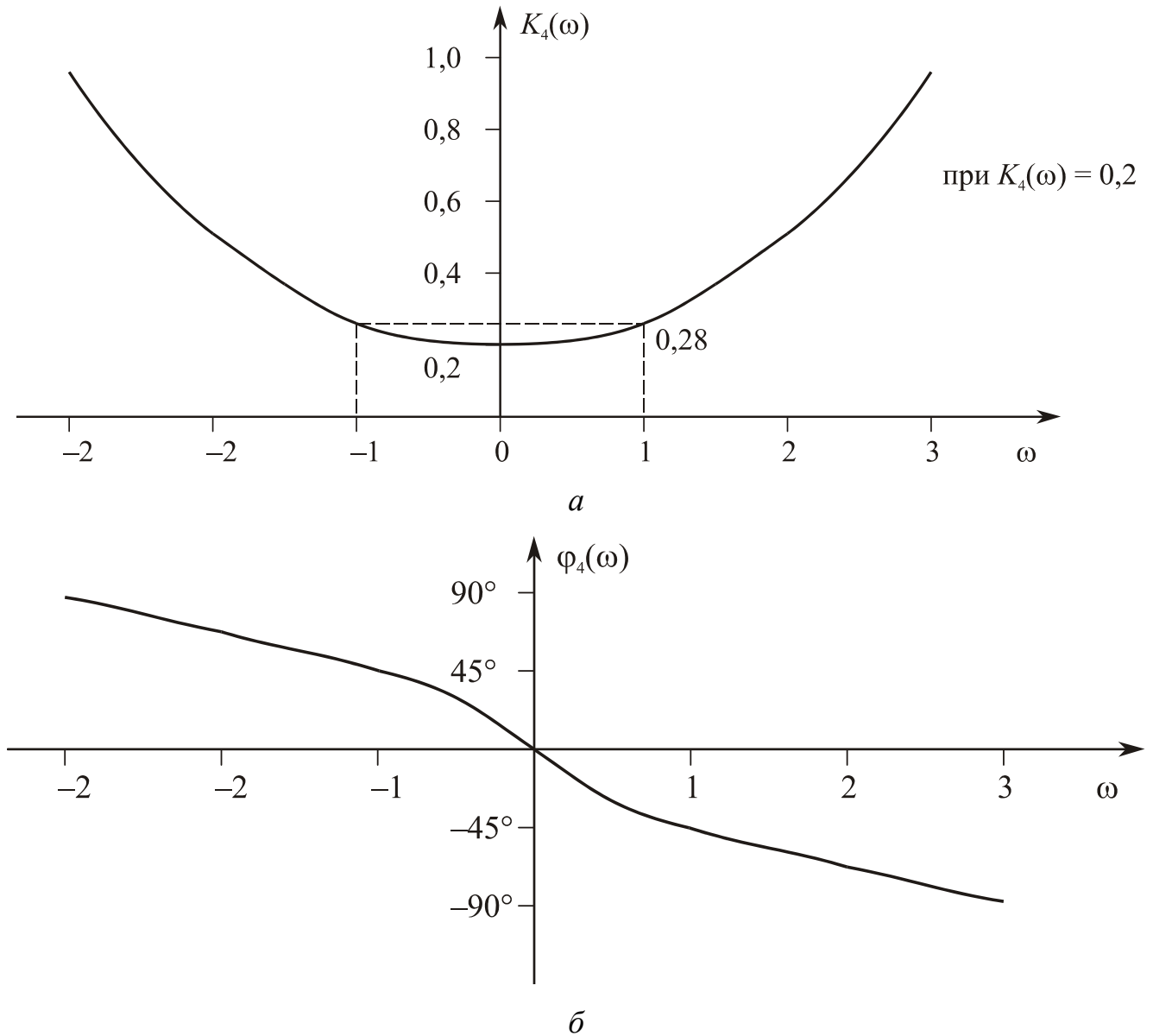


Рис. ПЗ.8

ПЗ.4.4. Напряжение на выходе ЗФ имеет вид

$$U_2(t) = E K_4(\omega) \cos[\omega(t - t_{\text{гр4}}) + \varphi], \quad t_{\text{гр4}} = \frac{\Delta\varphi_{\text{зф}}}{\Delta\omega_{0,7p}},$$

$$\Delta\varphi_{\text{зф}} = \varphi(\omega_{\text{в}}) - \varphi(\omega_{\text{н}}),$$

где $t_{\text{гр4}}$ — групповое время запаздывания, вносимого ЗФ; $\Delta\varphi_{\text{зф}}$ — разность фаз;

$\Delta\omega_{0,707p}$ — полоса режекции.

П4. РЕАКЦИЯ RC-ЦЕПЕЙ НА ВОЗДЕЙСТВИЕ ВИДЕОСИГНАЛОВ ТИПОВОЙ ФОРМЫ

П4.1. Структуры RC-цепей

На рис. П4.1, *a* и *б* приведены структуры исследования дифференцирующей и интегрирующей RC-цепей; где $e_i(t)$ — “*i*” видеосигнал; $U_R(t)$ — реакция дифференцирующей цепи; $U_C(t)$ — реакция интегрирующей цепи.

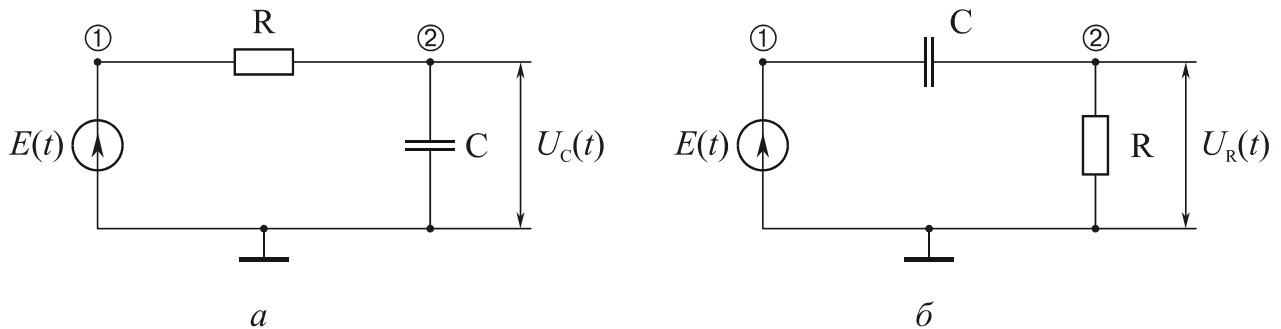


Рис. П4.1

П4.2. Реакция RC-цепей на видеосигналы

П4.2.1. Реакция RC-цепей на видеосигнал $e_1(t)$ в виде ступенчатой функции $\sigma(t)$:

$$e_1(t) = E\sigma(t - t_0); \quad \sigma(t - t_0) = \begin{cases} 0, & t < t_0, \\ 1, & t > t_0; \end{cases}$$

$$\sigma(t) = \frac{1}{2} + \frac{1}{\pi} \int_0^{\infty} \frac{\sin \omega t}{\omega} dt; \quad \int_0^x \frac{\sin y}{y} dy = Si(x);$$

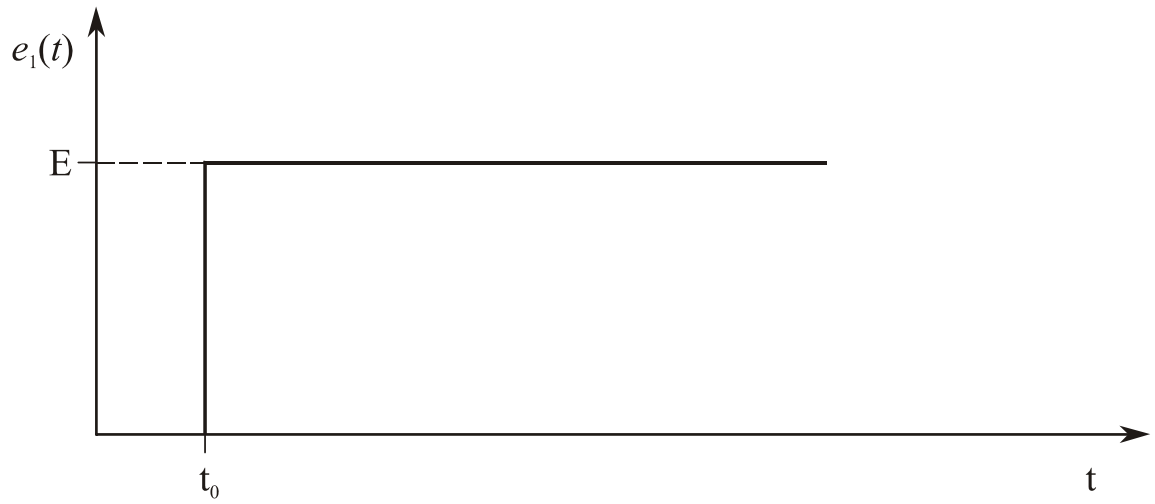
$$Si(x) \approx X \quad \text{при } X < 1; \quad Si(x) = \frac{\pi}{2} \quad \text{при } X > 1;$$

$$U_R(t) = E \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right); \quad \tau = RC; \quad H(t) = \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right);$$

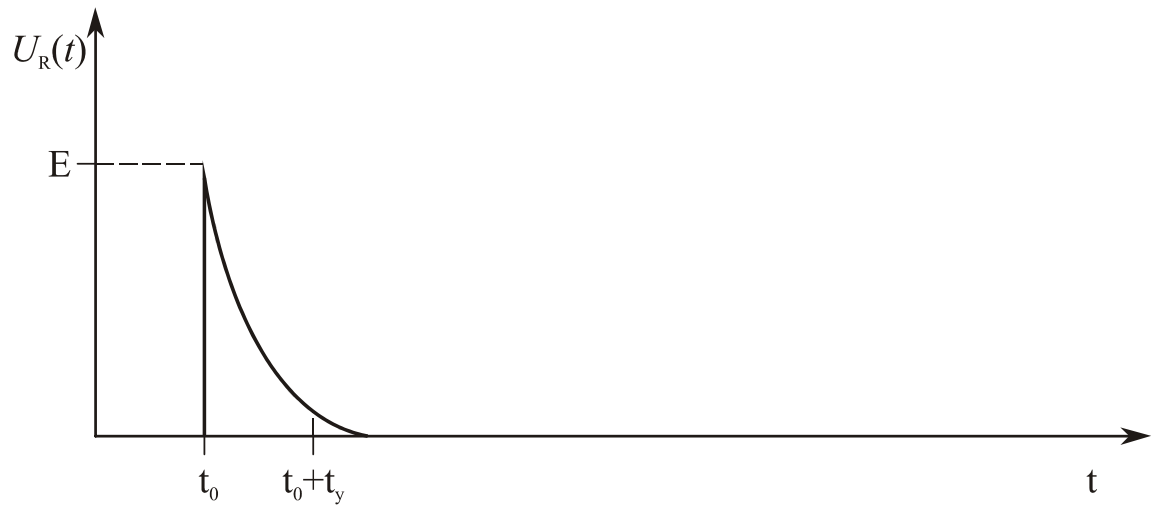
$$U_C(t) = E \left[1 - \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right) \right]; \quad t_y = (-\ln(0,1) \times \tau) = 2,3\tau,$$

где $Si(X)$ — интегральный синус; t_y — время установления реакции (длительность переходного процесса); $H(t)$ — переходная функция RC-цепи.

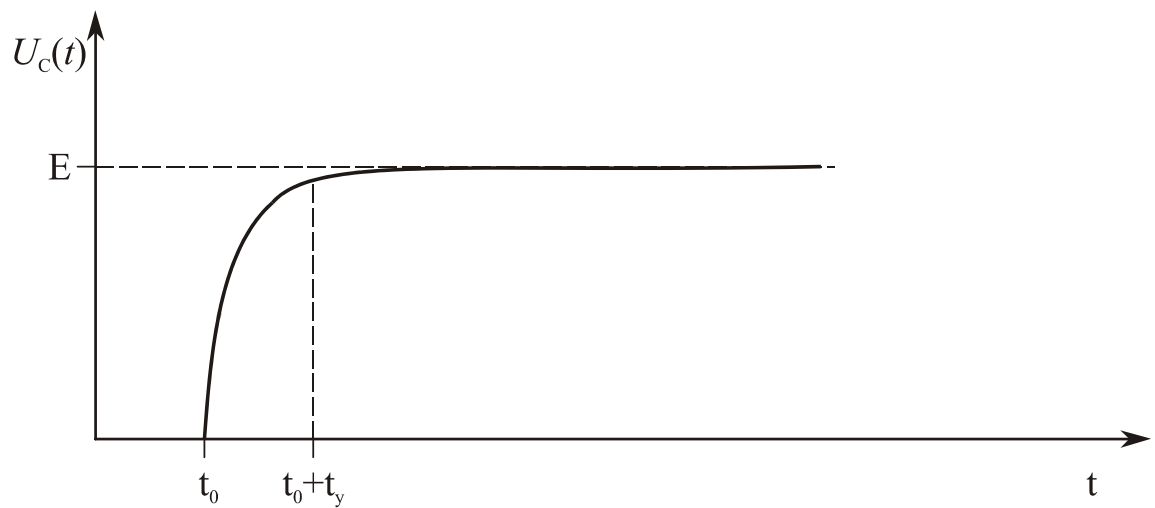
Графическое представление соотношений показано на рис. П4.2.



a



б



в

Рис. П4.2

П4.2.2. Реакция RC-цепи на видеосигнал $e_2(t)$ в виде прямоугольного импульса длительностью τ_u :

$$e_2(t) = E[\sigma(t - t_0) - \sigma(t - t_0 - \tau_u)];$$

$$U_R(t) = \begin{cases} E \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right), & t_0 \leq t \leq t_0 + \tau_u, \\ E \left[\exp\left(-\frac{\tau_u}{t}\right) - 1 \right] \exp\left(-\frac{(t - \tau_u)}{\tau}\right), & t > t_0 + \tau_u. \end{cases}$$

$$U_C(t) = \begin{cases} E \left[1 - \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right) \right], & t_0 \leq t \leq t_0 + \tau_u, \\ E \left[\exp\left(-\frac{\tau_u}{t}\right) \right] \exp\left(-\frac{(t - \tau_u)}{\tau}\right), & t > t_0 + \tau_u. \end{cases}$$

Графическое представление соотношений приведено на рис. П4.3 для случая, когда $\tau_u \gg \tau$.

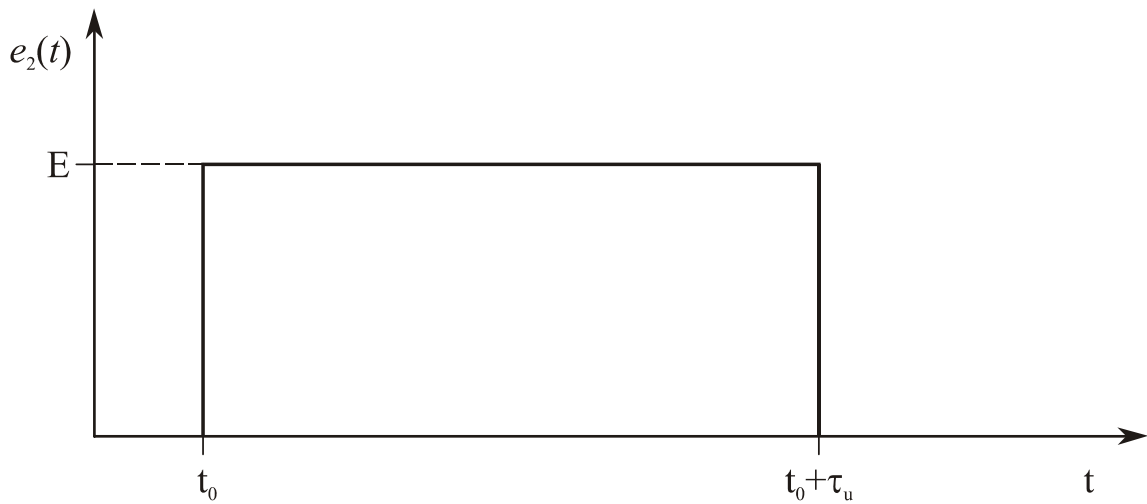


Рис. П4.3, а

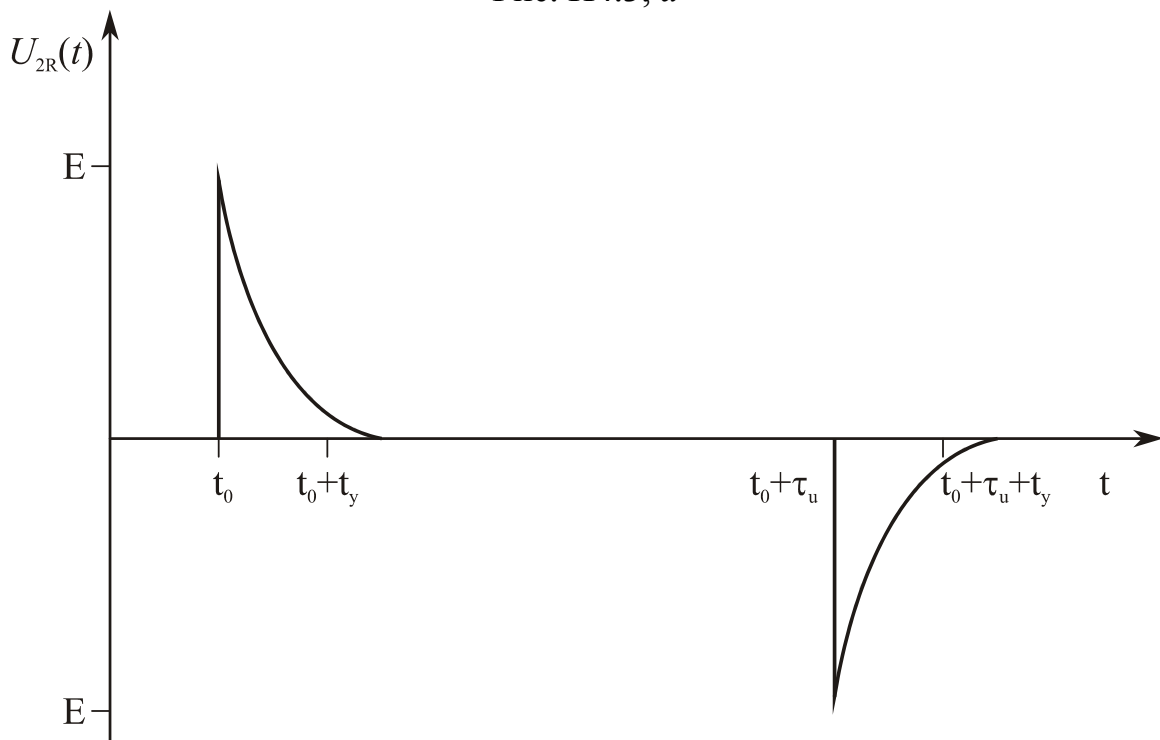


Рис. П4.3, б

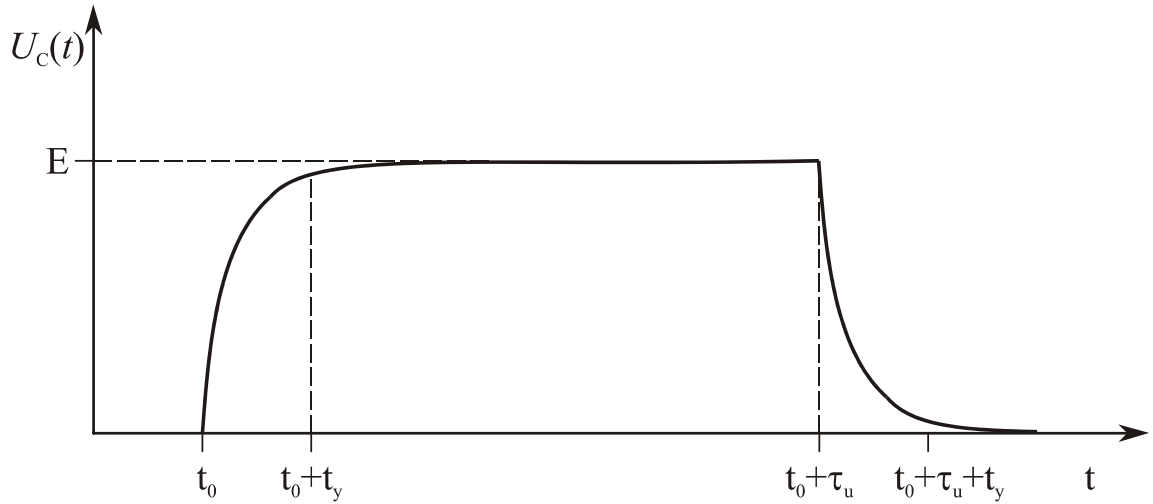


Рис. П4.3, в

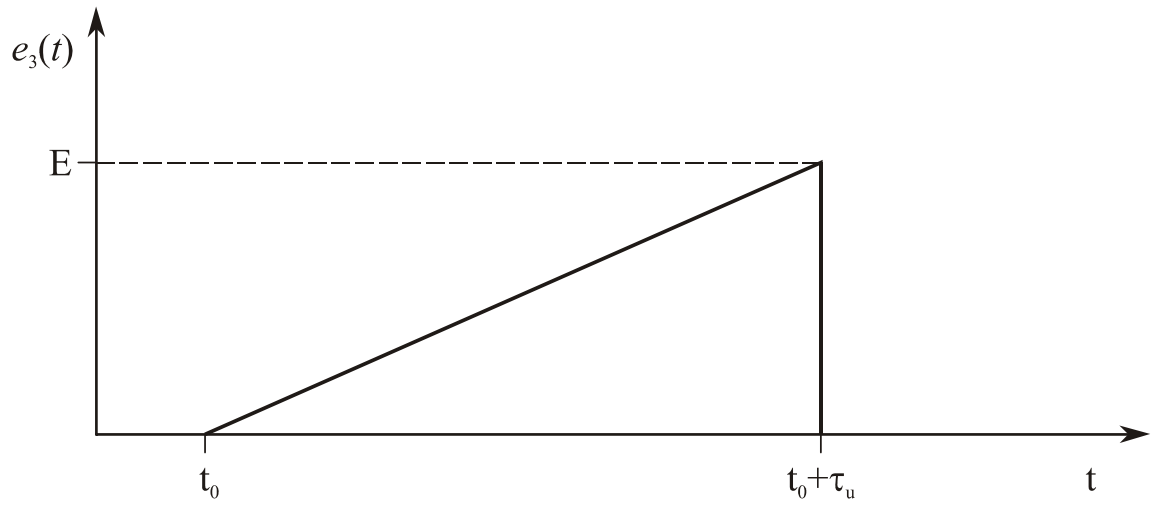
П4.2.3. Реакция RC-цепи на видеосигнал $e_3(t)$ в виде импульса длительностью τ_u с огибающей в виде прямоугольного треугольника с передним фронтом, нарастающим по линейному закону:

$$e_3(t) = \begin{cases} 0, & t < t_0, \\ E \frac{t}{\tau_u}, & t_0 < t \leq t_0 + \tau_u, \\ 0, & t > t_0 + \tau_u; \end{cases}$$

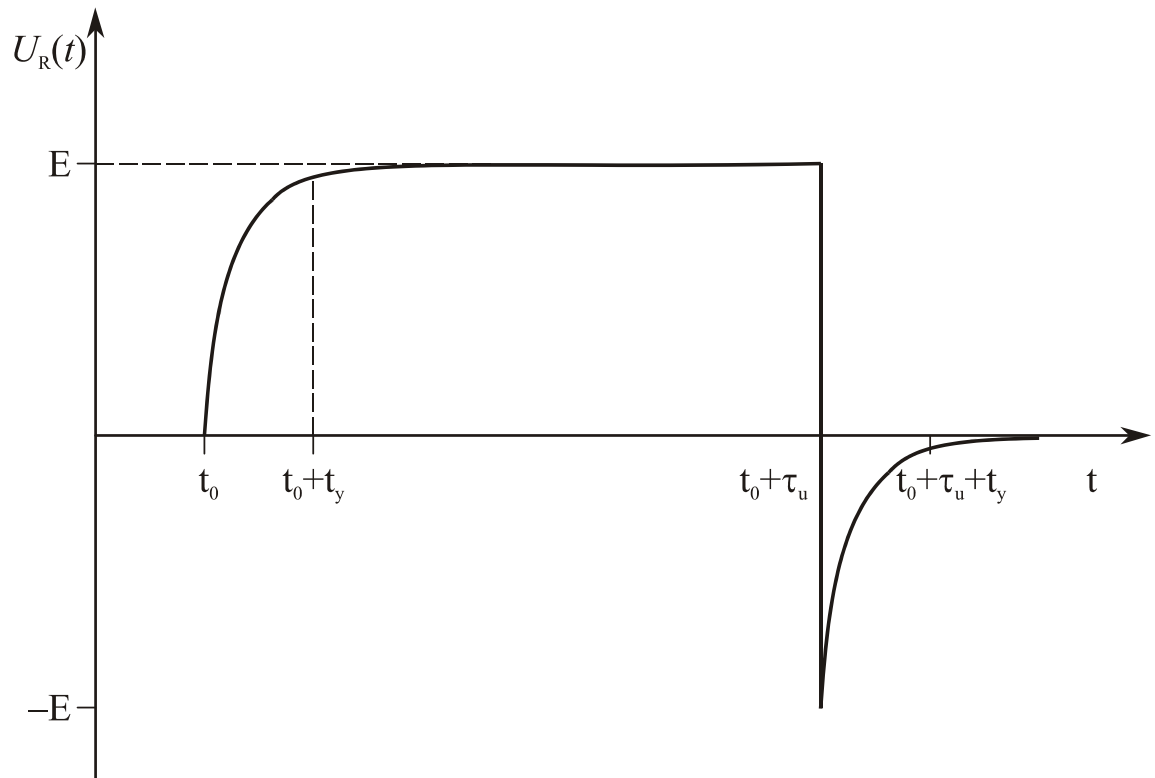
$$U_R(t) = \begin{cases} E\tau \left[1 - \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right) \right], & t_0 < t \leq t_0 + \tau_u, \\ E \left[\tau \left[1 - \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right) \right] - 1 \right] \exp\left(-\frac{(t - \tau_u)}{\tau}\right), & t > t_0 + \tau_u; \end{cases}$$

$$U_C(t) = \begin{cases} E\tau \left[\frac{t}{\tau} - 1 + \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right) \right], & t_0 < t \leq t_0 + \tau_u, \\ E\tau \left[\frac{\tau_u}{t} - 1 + \exp\left(-\frac{\tau_u}{t}\right) \right] \exp\left(-\frac{(t - \tau_u)}{\tau}\right), & t > t_0 + \tau_u. \end{cases}$$

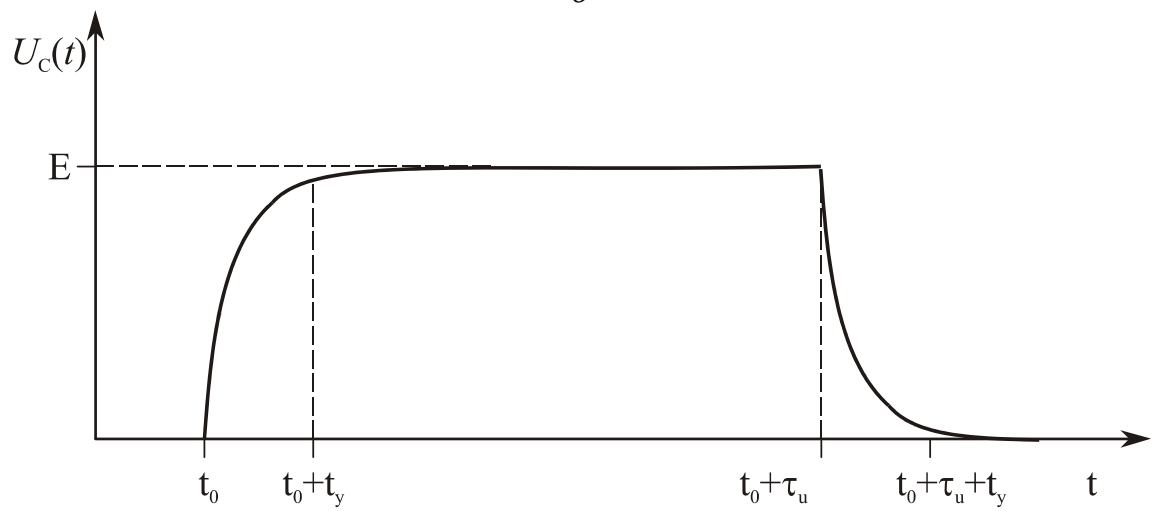
Графическое представление соотношений приведено на рис. П4.4 для случая, когда $\tau_u \gg \tau$.



a



б



в

Рис. П4.4

П4.2.4. Реакция RC-цепи на видеосигнал $e_4(t)$ в виде импульса длительностью τ_u с огибающей в виде прямоугольного треугольника, задний фронт которого спадает по линейному закону:

$$e_4(t) = \begin{cases} 0, & t < t_0, \\ E \left(1 - \frac{t - t_0}{\tau_u} \right), & t_0 \leq t < t_0 + \tau_u, \\ 0, & t > t_0 + \tau_u. \end{cases}$$

$$U_C(t) = \begin{cases} E \left[1 + \frac{\tau}{\tau_u} - \frac{t - t_0}{\tau_u} - \left(1 + \frac{\tau}{\tau_u} \right) \exp\left(-\frac{t - t_0}{\tau}\right) \right], & t_0 \leq t < t_0 + \tau_u, \\ E \left[\frac{\tau}{\tau_u} \left[\exp\left(-\frac{\tau_u}{\tau}\right) - 1 \right] - 1 \right] \exp\left(-\frac{t - t_0}{\tau}\right), & t > t_0 + \tau_u. \end{cases}$$

$$U_R(t) = \begin{cases} E \left[(1 + \tau) \exp\left(-\frac{t - t_0}{\tau}\right) - \tau \right], & t_0 \leq t < t_0 + \tau_u, \\ E \left[(1 + \tau) \exp\left(-\frac{t - t_0}{\tau}\right) - \tau \right], & t > t_0 + \tau_u. \end{cases}$$

Графическое представление соотношений приведено на рис. П4.5 для случая, когда $\tau_u \gg \tau$.

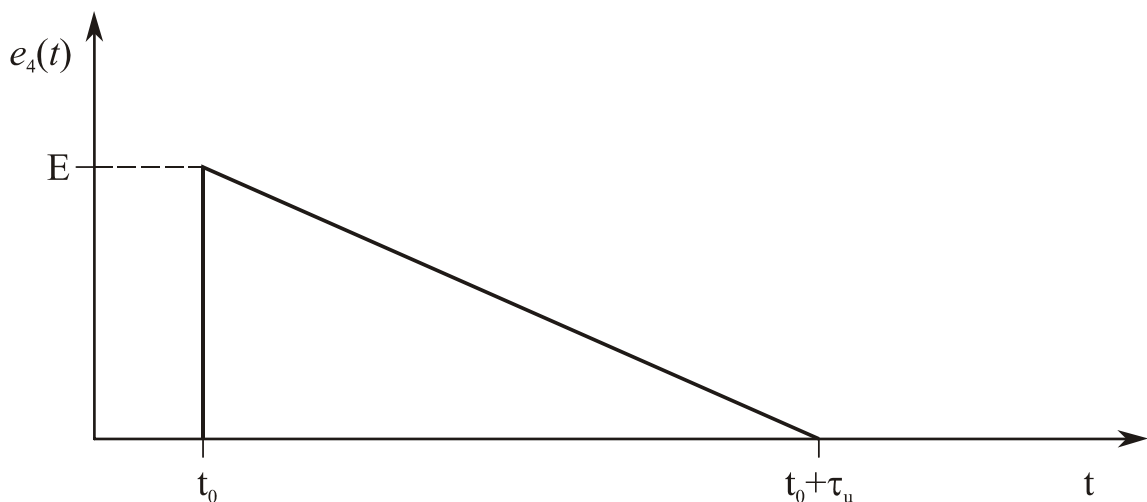


Рис. П4.5, а

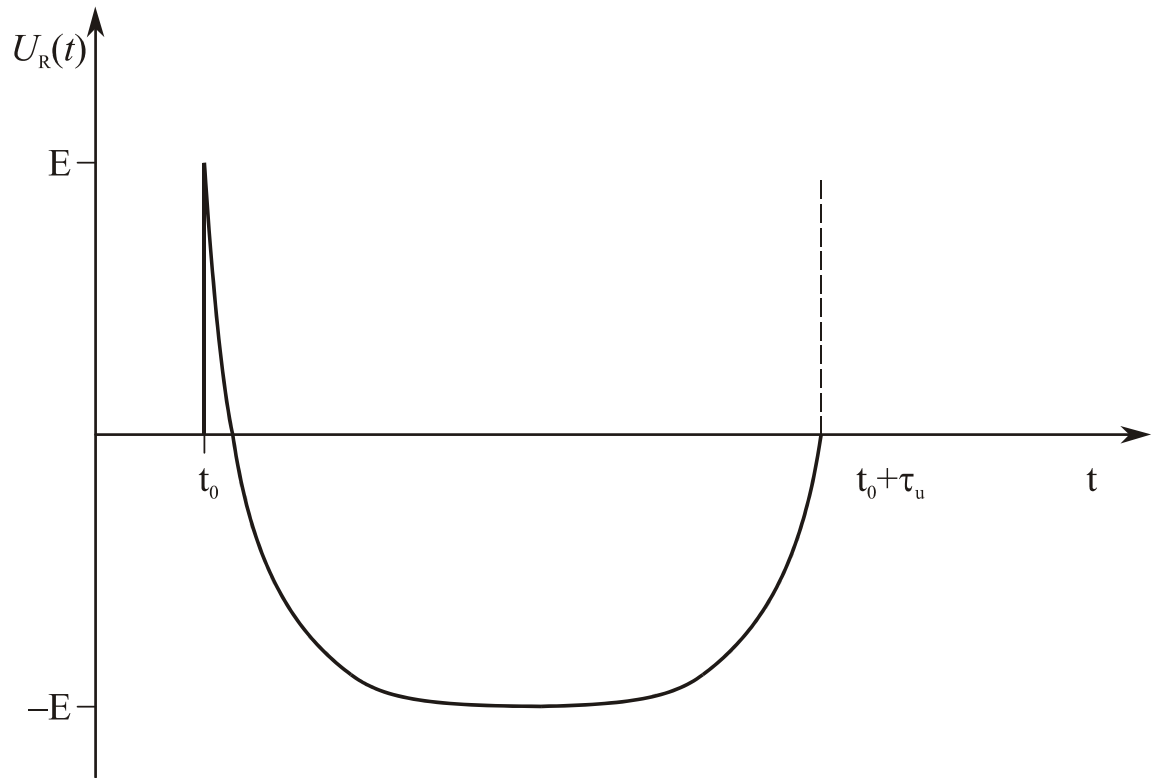


Рис. П4.5, б

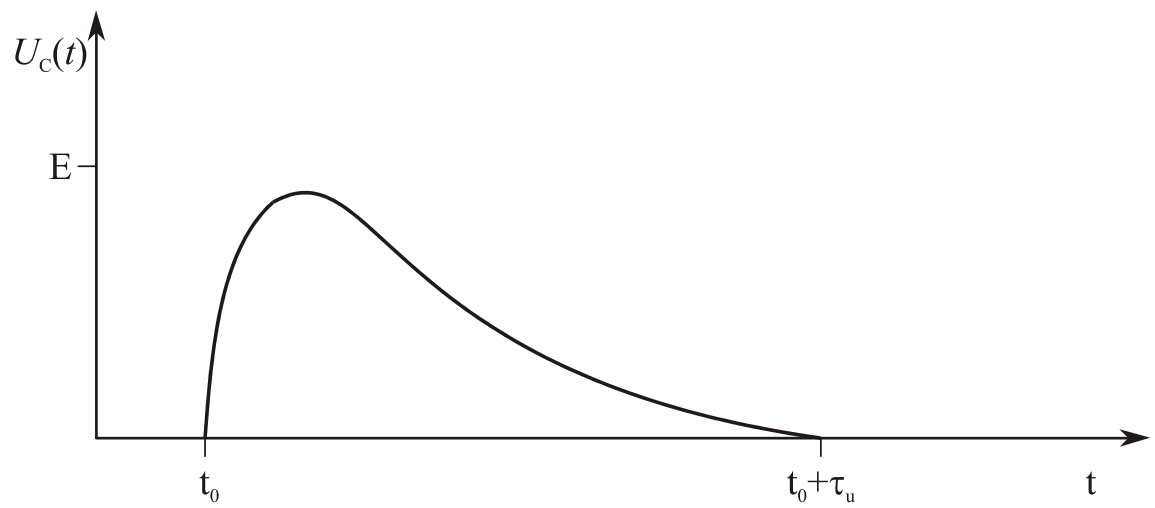


Рис. П4.5, в

П5. КОНТРОЛЬНАЯ РАБОТА № 1

"АНАЛИЗ АЧХ И ФЧХ ЛЦ С ПОСТОЯННЫМИ ПАРАМЕТРАМИ"

П5.1. Содержание контрольной работы

П5.1.1. По известной эквивалентной структуре ЛЦ и по заданным параметрам ЛЦ (в соответствии с номером варианта) построить схему электрическую ЛЦ. Эквивалентная структура ЛЦ изображена на рис. П5.1, где Γ — генератор гармонических сигналов (источник напряжения); $e(t) = E \cos \omega t$ — гармоническое напряжение с амплитудой E и угловой частотой ω .

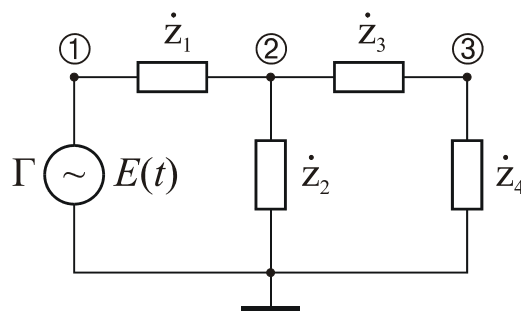


Рис. П5.1

П5.1.2. Произвести расчет АЧХ и ФЧХ для отдельных звеньев и ЛЦ в целом.

Построить графики АЧХ и ФЧХ для ЛЦ в целом и определить следующие характеристики ЛЦ:

- тип фильтра;
- среднюю частоту f_0 (Гц);
- максимальное значение коэффициента передачи по напряжению $K_{\max}(f)$;
- граничные значения частот f_n (Гц), f_v (Гц) и полосу пропускания $\Delta f_{0,707}$ (Гц);
- фазовые сдвиги, вносимые ЛЦ на граничных частотах $\varphi(f_n)$ (град), $\varphi(f_v)$ (град);
- групповое время запаздывания $t_{гр}$ (с).

П5.2. Варианты заданий к контрольной и лабораторной работам №1

Вариант	\dot{z}_1	\dot{z}_2	\dot{z}_3	\dot{z}_4
	$R_1, \text{ Ом}$	$R_2, \text{ Ом}$	$C_1, \text{ Ф}$	$C_2, \text{ Ф}$
1	10	10^4	10^{-6}	10^{-7}
2	10^2	10^5	10^{-7}	10^{-8}
3	10^3	10^6	10^{-8}	10^{-9}
Вариант	\dot{z}_2	\dot{z}_4	\dot{z}_1	\dot{z}_3
	$R_1, \text{ Ом}$	$R_2, \text{ Ом}$	$L_1, \text{ Гн}$	$L_2, \text{ Гн}$
4	10^2	10^3	10^{-3}	10^{-1}
5	10^3	10^4	10^{-2}	10^{-1}
6	10^4	10^5	10^{-1}	10^{-1}
Вариант	\dot{z}_2	\dot{z}_3	\dot{z}_4	\dot{z}_1
	$R_1, \text{ Ом}$	$R_2, \text{ Ом}$	$C_1, \text{ Ф}$	$L_1, \text{ Гн}$
7	10^2	10^4	10^{-7}	10^{-3}
8	10^3	10^4	10^{-7}	10^{-2}
9	10^4	10^5	10^{-8}	10^{-1}
Вариант	\dot{z}_1	\dot{z}_4	\dot{z}_2	\dot{z}_3
	$R_1, \text{ Ом}$	$R_2, \text{ Ом}$	$C_1, \text{ Ф}$	$L_1, \text{ Гн}$
10	10	10^3	10^{-6}	10^{-1}
11	10^2	10^4	10^{-7}	10^{-1}
12	10^3	10^6	10^{-8}	10^{-1}
Вариант	\dot{z}_2	\dot{z}_4	\dot{z}_1	\dot{z}_3
	$R_1, \text{ Ом}$	$R_2, \text{ Ом}$	$C_1, \text{ Ф}$	$C_2, \text{ Ф}$
13	10^2	10^3	10^{-5}	10^{-8}
14	10^3	10^4	10^{-6}	10^{-9}
15	10^4	10^5	10^{-7}	10^{-10}
Вариант	\dot{z}_1	\dot{z}_3	\dot{z}_2	\dot{z}_4
	$R_1, \text{ Ом}$	$R_2, \text{ Ом}$	$L_1, \text{ Гн}$	$L_2, \text{ Гн}$
16	10^2	10^4	10^{-1}	10^{-1}
17	10	10^3	10^{-2}	10^{-2}
18	20	10^3	$0,5 \cdot 10^{-2}$	10^{-2}
Вариант	\dot{z}_2	\dot{z}_3	\dot{z}_1	\dot{z}_4
	$R_1, \text{ Ом}$	$R_2, \text{ Ом}$	$C_1, \text{ Ф}$	$L_1, \text{ Гн}$
19	10^2	10^4	10^{-5}	10^{-1}
20	10^3	10^4	10^{-6}	10^{-1}
21	10^4	10^5	10^{-7}	10^{-3}
Вариант	\dot{z}_1	\dot{z}_4	\dot{z}_3	\dot{z}_2
	$R_1, \text{ Ом}$	$R_2, \text{ Ом}$	$C_1, \text{ Ф}$	$L_1, \text{ Гн}$
22	10	10^3	10^{-8}	10^{-2}
23	20	10^3	10^{-8}	$0,5 \cdot 10^{-2}$
24	10^2	10^4	10^{-9}	10^{-1}

Вариант	\dot{z}_1	\dot{z}_4	\dot{z}_2	\dot{z}_3
	$R_1, \text{ Ом}$	$R_2, \text{ Ом}$	$C_1, \text{ Ф}$	$C_2, \text{ Ф}$
25	10	10^4	10^{-6}	10^{-7}
26	10^2	10^4	10^{-7}	10^{-7}
27	10^3	10^5	10^{-8}	10^{-8}
Вариант	\dot{z}_1	\dot{z}_3	\dot{z}_2	\dot{z}_4
	$R_1, \text{ Ом}$	$R_2, \text{ Ом}$	$C_1, \text{ Ф}$	$L_1, \text{ Гн}$
28	10	10^2	10^{-6}	10^{-1}
29	10^2	10^2	10^{-7}	10^{-1}
30	10^3	10^2	10^{-8}	10^{-1}
Вариант	\dot{z}_2	\dot{z}_4	\dot{z}_3	\dot{z}_1
	$R_1, \text{ Ом}$	$R_2, \text{ Ом}$	$C_1, \text{ Ф}$	$L_1, \text{ Гн}$
31	10	10^4	10^{-7}	10^{-4}
32	10^2	10^4	10^{-7}	10^{-3}
33	10^3	10^5	10^{-8}	10^{-2}
Вариант	\dot{z}_2	\dot{z}_3	\dot{z}_1	\dot{z}_4
	$R_1, \text{ Ом}$	$R_2, \text{ Ом}$	$L_1, \text{ Гн}$	$L_2, \text{ Гн}$
34	10	10^2	10^{-4}	10^{-1}
35	10^2	10^2	10^{-3}	10^{-1}
36	10^3	10^2	10^{-2}	10^{-1}
Вариант	\dot{z}_2	\dot{z}_3	\dot{z}_1	\dot{z}_4
	$R_1, \text{ Ом}$	$R_2, \text{ Ом}$	$C_1, \text{ Ф}$	$C_2, \text{ Ф}$
37	10	10^2	10^{-4}	10^{-7}
38	10^2	10^3	10^{-5}	10^{-8}
39	10^3	10^4	10^{-6}	10^{-9}
Вариант	\dot{z}_2	\dot{z}_4	\dot{z}_1	\dot{z}_3
	$R_1, \text{ Ом}$	$R_2, \text{ Ом}$	$C_1, \text{ Ф}$	$L_1, \text{ Гн}$
40	10^3	10^4	10^{-6}	10^{-1}
41	10^2	10^3	10^{-5}	10^{-2}
42	10	10^2	10^{-4}	10^{-3}
Вариант	\dot{z}_1	\dot{z}_3	\dot{z}_4	\dot{z}_2
	$R_1, \text{ Ом}$	$R_2, \text{ Ом}$	$C_1, \text{ Ф}$	$L_1, \text{ Гн}$
43	10	10^4	10^{-9}	10^{-2}
44	10^2	10^4	10^{-9}	10^{-1}
45	10^2	10^5	10^{-10}	10^{-1}
Вариант	\dot{z}_1	\dot{z}_4	\dot{z}_2	\dot{z}_3
	$R_1, \text{ Ом}$	$R_2, \text{ Ом}$	$L_1, \text{ Гн}$	$L_2, \text{ Гн}$
46	10	10^4	10^{-2}	10^{-1}
47	10^2	10^3	10^{-1}	10^{-2}
48	10^3	10^4	10^{-1}	10^{-1}

П6. КОНТРОЛЬНАЯ РАБОТА № 2

"АНАЛИЗ ПРОХОЖДЕНИЯ ВИДЕОСИГНАЛОВ ЧЕРЕЗ RC-ЦЕПИ "

П6.1. Содержание контрольной работы

П6.1. По известной электрической схеме ЛЦ (рис. П6.1, *a* и *б*) построить графическое представление входного видеосигнала $e(t)$, произвести его расчет и дать графическое представление реакции дифференцирующей $U_R(t)$ и интегрирующей $U_C(t)$ ЛЦ.

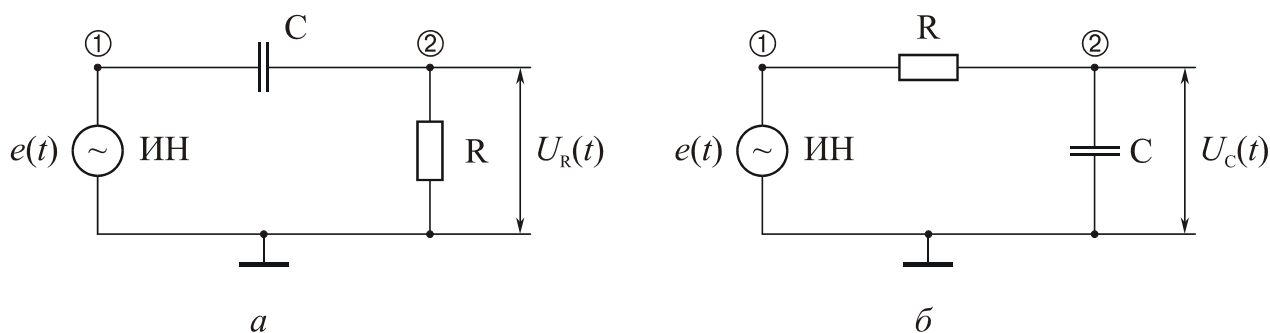


Рис. П6.1

На рис. П6.1 ИН — источник напряжения, формирующий видеосигнал требуемой формы, параметры которого заданы в соответствии с номером варианта.

Сделать заключение о степени согласованности параметров ЛЦ и видеосигнала $e(t)$, о наличии и отсутствии межсимвольных искажений.

П6.2. Варианты заданий к контрольной и лабораторной работам №2

Вариант №	R, (Ом)	C, (Ф)	Общие исходные данные для вариантов 1 – 6					
			i	$E_{i,}$ (В)	$\tau_{ui,}$ (с)	$\Delta T_{i,}$ (с)	$t_0,$ (с)	$\Delta T_{к,}$ (с)
1	10^3	10^{-6}	1	1	10^{-3}	$2 \cdot 10^{-3}$	0	10^{-3}
2	$3 \cdot 10^3$	10^{-6}	2	1	10^{-2}	$5 \cdot 10^{-3}$	0	10^{-3}
3	10^4	$6 \cdot 10^{-7}$	3	1	10^{-4}	$5 \cdot 10^{-3}$	0	10^{-3}
4	10^4	10^{-6}	4	1	10^{-2}	$7 \cdot 10^{-3}$	0	10^{-3}
5	10^5	$1,5 \cdot 10^{-7}$	5	1	10^{-3}	10^{-2}	0	10^{-3}
6	$2 \cdot 10^5$	10^{-7}						

Вариант №	R, (Ом)	C, (Ф)	Общие исходные данные для вариантов 7 – 12					
			i	E_i , (В)	τ_{ui} , (с)	ΔT_i , (с)	t_0 , (с)	$\Delta T_{к}$, (с)
7	10^2	10^{-5}	1	1	$3 \cdot 10^{-3}$	10^{-2}	10^{-3}	10^{-2}
8	$3 \cdot 10^2$	10^{-5}	2	2	$3 \cdot 10^{-3}$	$2 \cdot 10^{-2}$	10^{-3}	10^{-2}
9	10^3	$6 \cdot 10^{-6}$	3	3	$3 \cdot 10^{-3}$	$3 \cdot 10^{-2}$	10^{-3}	10^{-2}
10	10^3	10^{-5}	4	4	$3 \cdot 10^{-3}$	$7 \cdot 10^{-2}$	10^{-3}	10^{-2}
11	10^4	$1,5 \cdot 10^{-6}$	5	5	$3 \cdot 10^{-3}$	$5 \cdot 10^{-2}$	10^{-3}	10^{-2}
12	$2 \cdot 10^4$	10^{-6}						
Вариант №	R, (Ом)	C, (Ф)	Общие исходные данные для вариантов 7 – 12					
			i	E_i , (В)	τ_{ui} , (с)	ΔT_i , (с)	t_0 , (с)	$\Delta T_{к}$, (с)
13	10^3	10^{-6}	1	5	10^{-3}	$5 \cdot 10^{-2}$	$3 \cdot 10^{-3}$	$2,5 \cdot 10^{-2}$
14	$3 \cdot 10^3$	10^{-6}	2	2	$3 \cdot 10^{-3}$	$5 \cdot 10^{-2}$	$3 \cdot 10^{-3}$	$2,5 \cdot 10^{-2}$
15	10^4	$6 \cdot 10^{-7}$	3	3	$7 \cdot 10^{-3}$	$5 \cdot 10^{-2}$	$3 \cdot 10^{-3}$	$2,5 \cdot 10^{-2}$
16	10^4	10^{-6}	4	4	10^{-2}	$5 \cdot 10^{-2}$	$3 \cdot 10^{-3}$	$2,5 \cdot 10^{-2}$
17	10^5	$1,5 \cdot 10^{-7}$						
18	$2 \cdot 10^5$	10^{-7}						
Вариант №	R, (Ом)	C, (Ф)	Общие исходные данные для вариантов 7 – 12					
			i	E_i , (В)	τ_{ui} , (с)	ΔT_i , (с)	t_0 , (с)	$\Delta T_{к}$, (с)
19	10^2	10^{-6}	1	5	10^{-2}	$5 \cdot 10^{-3}$	10^{-2}	10^{-2}
20	$3 \cdot 10^2$	10^{-6}	2	4	10^{-3}	10^{-3}	10^{-2}	10^{-2}
21	10^3	$6 \cdot 10^{-7}$	3	3	$7 \cdot 10^{-3}$	$3 \cdot 10^{-3}$	10^{-2}	10^{-2}
22	10^3	10^{-6}	4	2	$3 \cdot 10^{-3}$	$7 \cdot 10^{-3}$	10^{-2}	10^{-2}
23	10^4	$1,5 \cdot 10^{-7}$						
24	$2 \cdot 10^4$	10^{-7}						

П7. ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №1
"МОДЕЛИРОВАНИЕ ЛЦ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ РЕЖИМОВ
ЧАСТОТНОГО И ВРЕМЕННОГО АНАЛИЗА"

П7.1. Цель работы

П7.1.1. Ознакомление с системой схемотехнического моделирования Micro-CAP V(VI).

П7.2.2. Изучение частотного и временного анализа и моделирования АЧХ и ФЧХ ЛЦ с постоянными параметрами.

П7.2.3. Получение практических навыков планирования эксперимента и его выполнения.

П7.2. Содержание работы

В соответствии с заданным номером варианта:

П7.2.1. Произвести формирование эквивалентной структуры для моделирования ЛЦ на основе рекомендаций, приведенных в Micro-CAP — программа анализа электронных схем (руководство пользователя).

П7.2.2. Исследовать АЧХ и ФЧХ звеньев ЛЦ и ЛЦ в целом на основе режима частотного анализа, рекомендации по использованию которого приведены в Micro-CAP — программа анализа электронных схем (руководство пользователя).

П7.2.3. Зафиксировать в виде графиков АЧХ и ФЧХ ЛЦ в целом и определить:

- максимальное значение коэффициента передачи ЛЦ по напряжению $K_M(f_M) \in [K_M, f_M]$;
- граничные значения частот f_{H1} (Гц) и f_{B1} (Гц) при $K(f_C)/K_M(f_M) = 0,707$ и f_{H2} (Гц) и f_{B2} (Гц) при $K(f_C)/K_M(f_M) = 0,316$;
- коэффициенты передачи по напряжению $K(f_j)$ на частотах $f \in \{f_{H1}, f_{H2}, f_M, f_{B1}, f_{B2}\}$;
- фазовые сдвиги $\varphi(f_i)$, вносимые ЛЦ на частотах $f \in \{f_{H1}, f_{H2}, f_M, f_{B1}, f_{B2}\}$;
- групповое время запаздывания $t_{гр}(f_i)$ на частотах $f \in \{f_{H1}, f_{H2}, f_M, f_{B1}, f_{B2}\}$.

П7.2.4. Исследовать прохождение гармонического сигнала $E(t) = U_m \cos 2\pi f_i t$ при $U_m = 1$ В, $f_i \in \{f_{H1}, f_{H2}, f_M, f_{B1}, f_{B2}\}$ через ЛЦ на основе режима временного анали-

за, рекомендации по использованию которого приведены в Micro-CAP — программа анализа электронных схем (руководство пользователя).

П7.2.5. Зафиксировать эюры гармонического сигнала на входе и выходе ЛЦ и определить по ним коэффициенты передачи по напряжению $K(f_j)$, групповое время запаздывания $t_{гр}(f_i)$ и фазовые сдвиги $\varphi(f_i)$. На основе полученных отчетов построить АЧХ и ФЧХ ЛЦ и сравнить точность результатов при использовании режима частотного анализа и временного анализа.

П7.2.6. Сопоставить результаты, полученные в ходе моделирования с результатами, полученными в ходе выполнения контрольной работы № 1.

П8. ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №2

"МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОХОЖДЕНИЯ ВИДЕОСИГНАЛОВ ЧЕРЕЗ RC-ЦЕПИ"

П8.1. Цель работы

П8.1.1. Ознакомиться с системой схемотехнического моделирования Micro-CAP V(VI).

П8.1.2. Изучение временного метода анализа и моделирования прохождения видеосигналов сложной формы через RC-цепи.

П8.1.3. Получение практических навыков планирования эксперимента и его выполнения.

П8.2. Содержание работы

В соответствии с заданным номером варианта:

П8.2.1. Произвести формирование эквивалентной структуры RC-цепи для моделирования, а также заданного видеосигнала на основе рекомендаций, приведенных в Micro-CAP — программа анализа электронных схем (руководство пользователя).

П8.2.2. Произвести моделирование процесса прохождения видеосигналов сложной формы через дифференцирующую и интегрирующую RC-цепи, используя временной анализ, рекомендации по применению которого приведены в Micro-CAP — программа анализа электронных схем (руководство пользователя).

П8.2.3. Зафиксировать в виде эпюр напряжения на входе и выходе RC-цепи и сопоставить результаты моделирования с результатами, полученными в ходе выполнения контрольной работы № 2.

СОДЕРЖАНИЕ

Предисловие	3
Введение	5
1. Методические указания к практическому занятию на тему: "Анализ амплитудно- и фазочастотных характеристик линейных цепей с постоянными параметрами"	8
1.1. Цель занятий	8
1.2. Методика анализа АЧХ и ФЧХ двухзвенной ЛЦ.....	8
2. Методические указания к практическому занятию на тему: "Анализ прохождения видео сигналов через RC-цепи"	17
2.1. Цель занятия.....	17
2.2. Временной метод анализа.....	17
2.3. Пример первый	18
2.4. Пример второй	22
3. Содержание отчета	26
Контрольные вопросы для самооаттестации.....	26
Литература.....	27
Приложение 1. Основные определения.....	28
Приложение 2. Комплексные числа и функции комплексного переменного ..	31
Приложение 3. Фильтры	33
Приложение 4. Реакция RC-цепей на воздействие видеосигналов типовой формы.....	40
Приложение 5. Контрольная работа № 1 "Анализ АЧХ и ФЧХ ЛЦ с постоянными параметрами"	47
Приложение 6. Контрольная работа № 2 "Анализ прохождения видеосигналов через RC-цепи "	50
Приложение 7. Лабораторная работа №1 "Моделирование ЛЦ с использованием режимов частотного и временного анализа"	52
Приложение 8. Лабораторная работа №2 "Моделирование прохождения видеосигналов через RC-цепи"	54

Дятлов Анатолий Павлович

Дятлов Павел Анатольевич

АНАЛИЗ И МОДЕЛИРОВАНИЕ ЛИНЕЙНЫХ ЦЕПЕЙ

С ПОСТОЯННЫМИ ПАРАМЕТРАМИ

Методические указания по курсу

Ответственный за выпуск Дятлов А.П.

Редактор Маныч Э.И.

Корректор Селезнева Н.И.

Компьютерная верстка Дятлов П.А.

ЛР № 020565 от 25 июня 1997 г. Подписано к печати

Формат 60×84 $\frac{1}{16}$ Бумага офсетная

Офсетная печать. Усл. п.л. – Уч.-изд. л. – .

Заказ № Тираж экз.

"С"

Издательство Таганрогского государственного радиотехнического университета

ГСП, 17 А, Таганрог, 28, Некрасовский, 44

Типография Таганрогского государственного радиотехнического университета

ГСП, 17 А, Таганрог, 28, Энгельса, 1