



АНАЛИЗ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЕЙ НЕСИНУСОИДАЛЬНОГО ПЕРИОДИЧЕСКОГО ТОКА

Учебное пособие по курсам
электротехники и ТОЭ

Санкт-Петербург
2006



Санкт-Петербургский государственный университет
информационных технологий, механики и оптики

Кафедра электротехники и прецизионных
электромеханических систем

**АНАЛИЗ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЕЙ
НЕСИНУСОИДАЛЬНОГО ПЕРИОДИЧЕСКОГО ТОКА**

Учебное пособие по курсам электротехники и ТОЭ



Санкт-Петербург
2006

УДК 621.3

Петров Е. А. Анализ электрических цепей несинусоидального периодического тока. Учебное пособие по курсам электротехники и ТОЭ.– СПб: СПб ГУИТМО, 2006 – 31 с.

В пособии изложена методика анализа линейных электрических цепей несинусоидального периодического тока с использованием системы MathCAD.

На примере показано представление сложной формы воздействия суммой составляющих, выполнен расчет комплексного коэффициента передачи электрической цепи, определена реакция цепи на входное воздействие.

Задания, помещенные в пособие, содержат задачи разной степени сложности и могут быть использованы для аудиторных занятий и в качестве домашних работ.

Пособие предназначено для студентов следующих направлений подготовки: 654000, 651100, 553100, 654400, 651900, 654300, 652300, 654500, 653700, 654600, 652000, 551900.

Рекомендовано кафедрой электротехники и прецизионных электро-механических систем СПб ГУИТМО, протокол № от 2006г.

© Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, 2006

© Е. А. Петров, 2006

ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЬ АНАЛИЗА ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЕЙ НЕСИНУСОИДАЛЬНОГО ПЕРИОДИЧЕСКОГО ТОКА

Во множестве приборов и устройств электротехники, радиотехники, автоматики, телемеханики, вычислительной техники, в системах управления и электропривода токи и напряжения существуют в виде несинусоидальных, периодических функций времени $f(\omega t)$. Около трех десятков таких функций представлены в приложении 1.

Обусловлено это тем, что приборы и устройства представляют собой:

- нелинейные электрические цепи с источниками синусоидальных либо несинусоидальных периодических ЭДС и токов;
- цепи линейные, содержащие генераторы специальной формы.

В пособии в качестве примера выполнен анализ линейной электрической цепи с источником, напряжение или ток которого является несинусоидальной периодической функцией времени. В задачах, предложенных в качестве домашнего задания, и предназначенных для выполнения на практических занятиях использованы аналогичные цепи.

Последовательность анализа приведена в учебниках и задачниках по курсам “Электротехника”, “Теоретические основы электротехники”, “Теория линейных электрических цепей” [1÷7, 9÷11].

Будем следовать традиции.

- Входную величину (напряжение или ток источника) разложим в ряд Фурье - представим суммой гармонических (синусоидальных) составляющих. Полученную сумму называют спектром входной величины.

- Определим комплексный коэффициент передачи электрической цепи. Тем самым установим соотношение между амплитудами и фазами составляющих выходной и входной величин.

- Рассчитаем составляющие выходной величины: напряжение на нагрузке цепи или ток в ней. Полученная сумма – спектр выходной величины.

- Для наглядного представления и оценки результатов расчета построим графики: амплитудно-частотную и фазо-частотную характеристики цепи, спектры амплитуд и фаз входной и выходной величин.

- Рассчитаем действующие значения напряжения и тока последней; оценим роль составляющих в значении активной мощности рассеиваемой в нагрузке.

- В расчетах используем пакеты системы Mathcad [13]. Рекомендуем системы MATLAB [8], Mathematica [12] и им подобные.

Теперь по порядку и подробнее.

Входную величину - напряжение $u(\omega t)$ или ток $j(\omega t)$ источника раскладываем в ряд. Все функции, используемые в пособии, удовлетворяют условиям, выполнение которых делает эту операцию возможной.

Существуют две формы записи ряда; в них k - номер очередной составляющей. Для удобства интегрирования принято $\omega t = x$.

$$f(x) \approx A_0 + \sum_{k=1}^n Bm_k \cdot \sin(k \cdot x) + \sum_{k=1}^n Cm_k \cdot \cos(k \cdot x) = A_0 + \sum_{k=1}^n Am_k \cdot \sin(k \cdot x + \psi_k) \cdot$$

\uparrow \nwarrow
 $u(\omega t)$ $j(\omega t)$

Составляющие обеих форм вычисляются следующим образом:

$$A_0 = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} f(x) dx; \quad Bm_k = \frac{1}{\pi} \cdot \int_0^{2\pi} f(x) \cdot \sin(k \cdot x) dx; \quad Cm_k = \frac{1}{\pi} \cdot \int_0^{2\pi} f(x) \cdot \cos(k \cdot x) dx;$$

$$Am_k = \sqrt{Bm_k^2 + Cm_k^2}; \quad \psi_k = \arctg\left(\frac{Cm_k}{Bm_k}\right).$$

В этих соотношениях: A_0 - постоянная составляющая; Bm_k , Cm_k , Am_k - амплитудные значения гармоник; ψ_k - их начальные фазы.

Далее будем обращаться лишь ко второй форме ряда:

$$f(x) = f(\omega t) \approx A_0 + Am_1 \cdot \sin(\omega_1 t + \psi_1) + Am_2 \cdot \sin(2 \cdot \omega_1 t + \psi_2) + \dots + Am_k \cdot \sin(k \cdot \omega_1 t + \psi_k) + \dots + Am_n \cdot \sin(n \cdot \omega_n t + \psi_n) + \dots$$

Очевидно, что при таком воздействии, токи в ветвях и напряжения на ее элементах будут представлены подобной суммой составляющих.

Пример 1. Разложим в ряд функцию $f(x)$, изображенную на рис. 1.

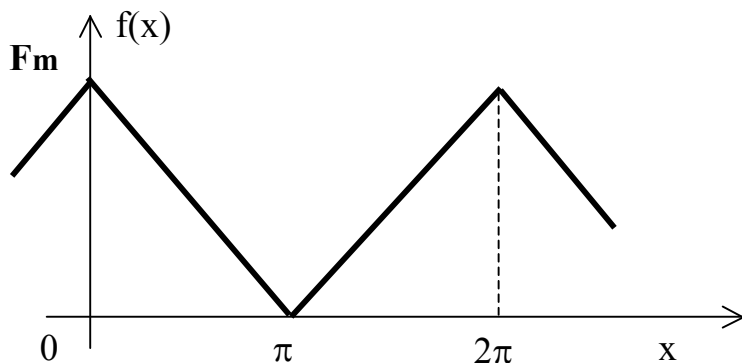


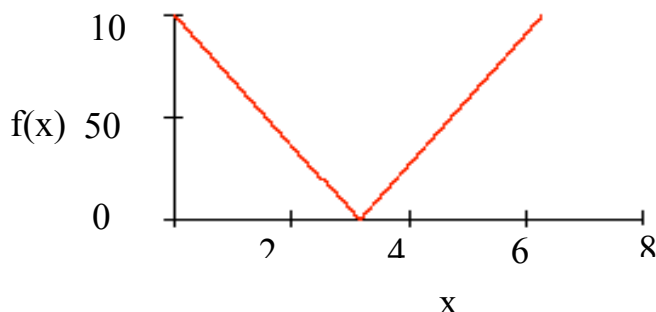
Рис. 1

Обращаемся к пакету программирования системы MathCAD.

Представляем аналитически $f(x)$ в пределах $0 \leq x \leq 2\pi$ и проверяем правильность записи построением графика.

$$x := 0, 10^{-3} \dots 2\pi \quad Fm = 100$$

$$f(x) := \begin{cases} Fm - Fm \cdot x / \pi & \text{if } 0 \leq x \leq \pi \\ Fm \cdot (x - \pi) / \pi & \text{otherwise} \end{cases}$$



Определяем составляющие ряда и помещаем их в таблицу.

$$A_0 = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} f(x) dx; \quad Bm_k = \frac{1}{\pi} \cdot \int_0^{2\pi} f(x) \cdot \sin(k \cdot x) dx; \quad Cm_k = \frac{1}{\pi} \cdot \int_0^{2\pi} f(x) \cdot \cos(k \cdot x) dx;$$

$$A_0 = 50; \quad Am_k = \sqrt{Bm_k^2 + Cm_k^2}; \quad \Psi_k = a \tan\left(\frac{Cm_k}{Bm_k}\right) \quad \Phi_k = \Psi_k \cdot \frac{180}{\pi}$$

Таблица 1

k	Am_k	Ψ_k [радиан]	Φ_k [°]
0	50	-	-
1	40.528	1.571	90
2	0	-	-
3	4.503	1.571	90
4	0	-	-
5	1.621	1.571	90
6	0	-	-
7	0.8270	1.571	90

Представляя исходную функцию, ограничиваемся четырьмя отличными от нуля гармоническими составляющими. Четных составляющих нет. Постоянную составляющую полагаем нулевой гармоникой.

Соотношения между амплитудами составляющих и их фазами представлены спектральными характеристиками на рис. 2, 3.

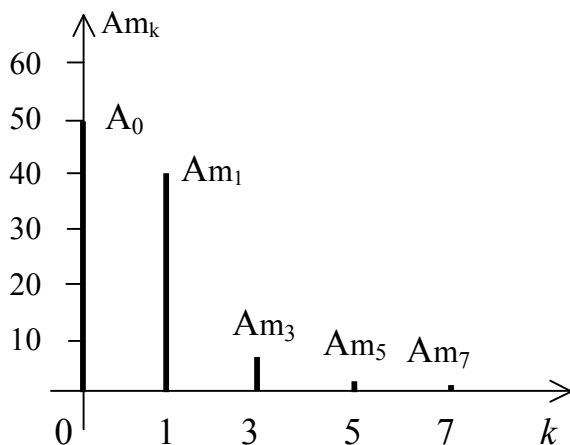


Рис. 2

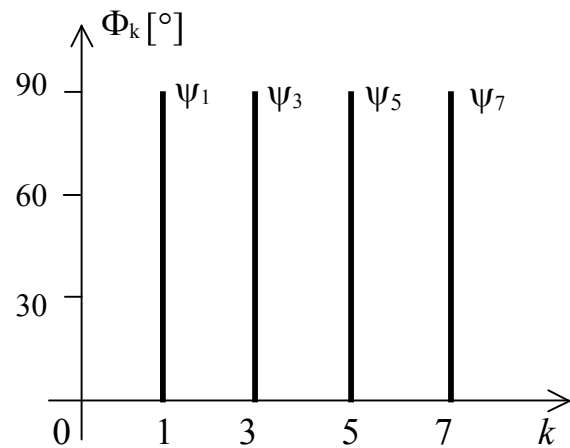


Рис. 3

Далее используем функцию $x(t)$ в качестве напряжения источника на входе электрической цепи. Угловая частота первой гармоники этого напряжения $\omega_1 = 6 \cdot 10^4$ [1/с]. Представляем его, полагая $x = \omega t$

$$u(\omega t) = 50 + 40,53 \cdot \sin(6 \cdot 10^4 t + 90^\circ) + 4,053 \cdot \sin(18 \cdot 10^4 t + 90^\circ) + 1,621 \cdot \sin(30 \cdot 10^4 t + 90^\circ) + 0,827 \cdot \sin(42 \cdot 10^4 t + 90^\circ).$$

График этого напряжения в интервале $t = 0,10^{-6} \dots 2 \cdot 10^{-4}$ [с] будет

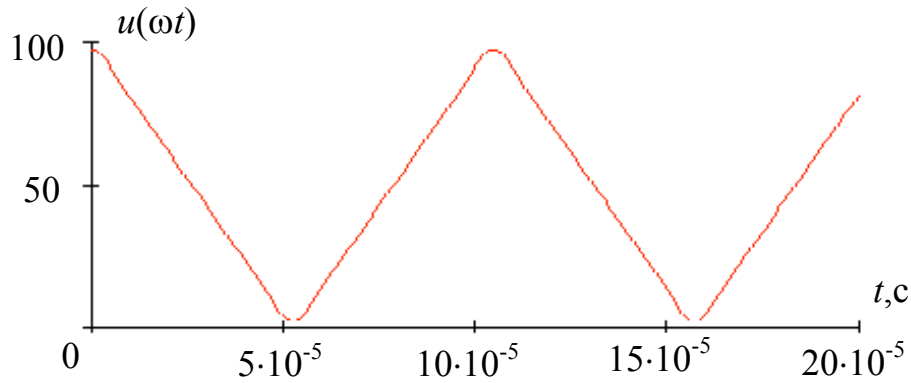


Рис. 4

Комплексным коэффициентом передачи электрической цепи называют отношение выходной величины к входной в комплексной форме записи. Если это отношение напряжений или токов, то частотные характеристики называют комплексными коэффициентами передачи по напряжению $\underline{K}_u(j\omega) = \underline{U}_{\text{вых}}/\underline{U}_{\text{вх}}$, и току $\underline{K}_i(j\omega) = \underline{I}_{\text{вых}}/\underline{I}_{\text{вх}}$. Последние соотношения представляют в виде двух функций частоты: их модуль называют амплитудно-частотной характеристикой (АЧХ), их аргумент – фазо-частотной характеристикой (ФЧХ).

$\underline{K}(j\omega) = |\underline{K}(j\omega)| \cdot e^{j\theta(\omega)}$, где $|\underline{K}(j\omega)|$ - АЧХ и $\theta(\omega) = \arg \underline{K}(j\omega)$ - ФЧХ.

Пример 2.

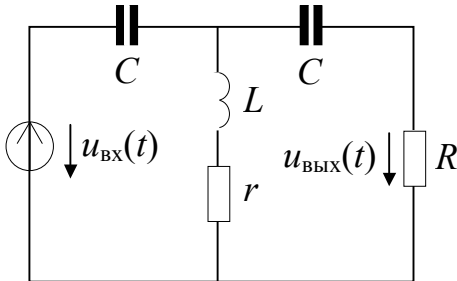
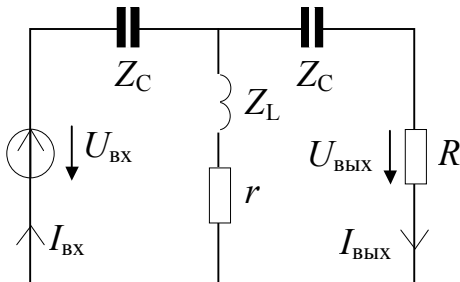


Рис. 5

Схема электрической цепи представлена на рис. 5. Определяем ее коэффициент передачи по напряжению, амплитудно-частотную и фазо-частотную характеристики.

Составляем эквивалентную схему замещения по методу комплексных чисел, в которой $Z_C = 1/j\omega C$; $Z_L = j\omega L$; $Z_{rL} = r + j\omega L$.



Последовательно определяем токи на входе и выходе цепи, напряжение на ее нагрузке и отношение этого напряжения к напряжению входному.

$$I_{\text{ex}} = \frac{U_{\text{ex}}}{Z_C + \frac{Z_{rL} \cdot (R + Z_C)}{Z_{rL} + R + Z_C}}; \quad I_{\text{ex}} = I_{\text{ex}} \cdot \frac{Z_{rL} \cdot (R + Z_C)}{Z_{rL} + R + Z_C} \cdot \frac{1}{R + Z_C};$$

$$U_{\text{вых}} = I_{\text{вых}} \cdot R; \quad U_{\text{ex}} = \frac{U_{\text{ex}}}{Z_C + \frac{Z_{rL} \cdot (R + Z_C)}{Z_{rL} + R + Z_C}} \cdot \frac{Z_{rL}}{Z_{rL} + R + Z_C} \cdot R;$$

$$K_U(\omega) = \frac{U_{\text{ex}}}{U_{\text{ex}}} = \frac{Z_{rL} \cdot R}{Z_C \cdot (Z_{rL} + R + Z_C) + Z_{rL} \cdot (R + Z_C)}.$$

Комплексная величина $\underline{K}_U(j\omega)$ и есть коэффициент передачи по напряжению электрической цепи.

Вновь обращаемся к системе MathCAD. Строим АЧХ и ФЧХ, полагая параметры элементов схемы следующими:

$$r = 10[\text{Ом}], R = 30[\text{Ом}], L = 0,5[\text{мГн}], C = 0,8[\text{мкФ}], \omega_1 = 6 \cdot 10^4[1/\text{с}], \\ \omega = 1, 100, \dots, 42 \cdot 10^4[1/\text{с}]; Z_C = 1/j\omega C; Z_L = j\omega L; Z_{rL} = r + j\omega L,$$

$$K_U(\omega) = \frac{U_{\text{ex}}}{U_{\text{ex}}} = \frac{Z_{rL} \cdot R}{Z_C \cdot (Z_{rL} + R + Z_C) + Z_{rL} \cdot (R + Z_C)}.$$

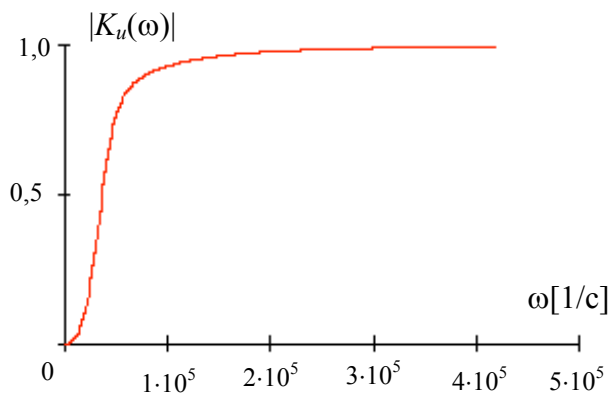


Рис. 6

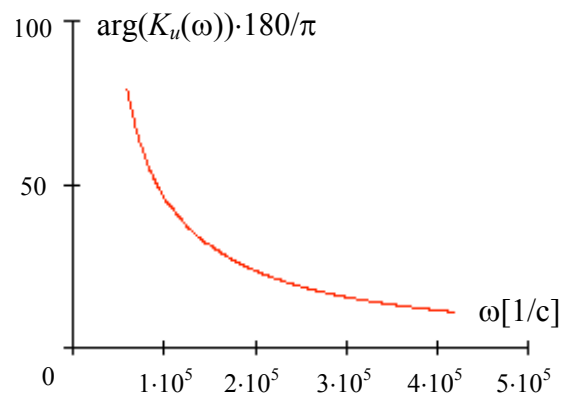


Рис. 7

Определяем значения модуля и аргумента передачи $\underline{K}_u(j\omega)$ на частотах составляющих: $k = 1, 3 \dots 7$, $\omega_1 = 6 \cdot 10^4[1/\text{с}]$, $\omega = \omega_1, 3 \cdot \omega_1 \dots 7 \cdot \omega_1$; помещаем результаты в таблицу 2.

Таблица 2

k	$ K_u(\omega) $	$\arg(K_u(\omega))$	$\arg(K_u(\omega)) \cdot 180/\pi$
0	-	-	-
1	0,843	1,375	78,8
3	0,973	0,457	26,21
5	0,99	0,278	15,839
7	0,995	0,198	11,339

Передачи постоянной составляющей напряжения источника к нагрузке данного фильтра нет: протеканию постоянного тока в левой и правой ветвях препятствуют емкостные элементы. Если в других схемах цепей такой путь имеет место, то передачу необходимо определить. Для этого удобно использовать схему замещения по постоянному току, в которой емкостные элементы следует разомкнуть, а индуктивные - замкнуть.

Подводим итоги. В первом примере несинусоидальная периодическая функция представлена приближенно суммой, содержащей постоянную составляющую и четыре гармонических составляющих. Эта функция использована в качестве входного напряжения электрического фильтра с частотой первой гармоники $\omega_1 = 6 \cdot 10^4$ [1/с]. В таблице 1 приведены значения амплитуд и фаз, составляющих этого напряжения; номер постоянной составляющей принят равным нулю.

Во втором примере представлены графиками АЧХ и ФЧХ электрической цепи и вычислены параметры $|K_u(j\omega)|$ и $\arg K_u(j\omega)$ на частотах входного сигнала; эти значения приведены в таблице 2.

Пример 3.

Используя информацию таблиц 1 и 2, рассчитываем параметры составляющих напряжения на нагрузке цепи $U_{m \text{ вых}} = |K_u| \cdot U_{m \text{ вх}}$, и $\theta_{\text{вых}} = \phi_{\text{вх}} + \arg(K_u)$ и помещаем результат в таблицу 3.

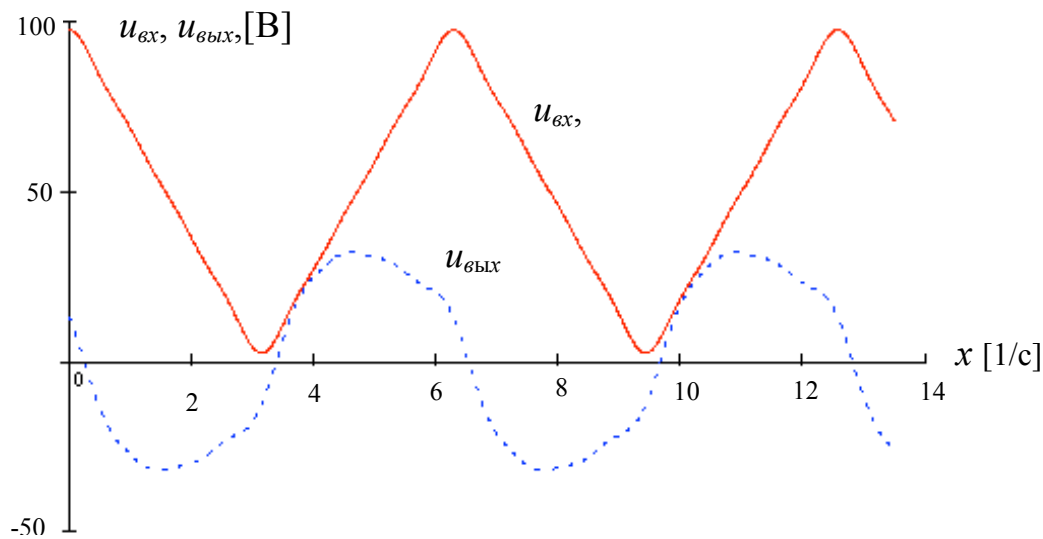
Таблица 3

κ	На входе фильтра			Передача фильтра		На выходе фильтра	
	ω [1/с]	U_m [В]	ϕ [°]	$ K_u $	$\arg(K_u)$ [°]	U_m [В]	θ [°]
0	-	50	-	0	-	-	-
1	$6 \cdot 10^4$	40,53	90	0,843	78,8	34,17	168,8
3	$18 \cdot 10^4$	4,503	90	0,973	26,21	4,378	116,2
5	$30 \cdot 10^4$	1,621	90	0,99	15,84	1,604	105,8
7	$42 \cdot 10^4$	0,807	90	0,995	11,34	0,8229	101,3

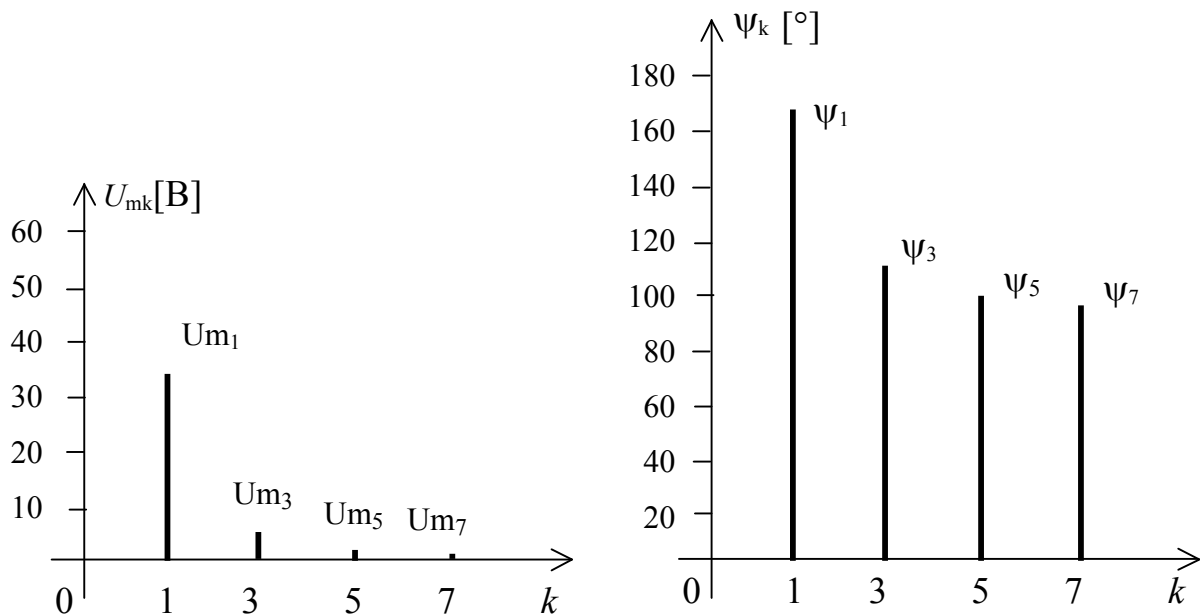
Напряжение на нагрузке в виде функции времени будет

$$u_{\text{вых}} = 34,17 \sin(6 \cdot 10^4 t + 168,8^\circ) + 4,378 \sin(18 \cdot 10^4 t + 116,8^\circ) + 1,604 \sin(30 \cdot 10^4 t + 105,8^\circ) + 0,8229 \sin(42 \cdot 10^4 t + 101,3^\circ) \text{ [В]}.$$

Представляем это напряжение графиком, используя систему MathCAD. Начальные фазы составляющих выражаем в радианах и аргумент $k \cdot \omega_1 \cdot t$ в виде $k \cdot x$.



Спектры амплитуд и фаз выходной величины представлены на следующих рисунках.



Действующее значение выходного напряжения и каждой его составляющей:

$$U = \sqrt{\left(\frac{Um_1}{\sqrt{2}}\right)^2 + \left(\frac{Um_3}{\sqrt{2}}\right)^2 + \left(\frac{Um_5}{\sqrt{2}}\right)^2 + \left(\frac{Um_7}{\sqrt{2}}\right)^2};$$

$$U_{\text{вых}} = \sqrt{\left(\frac{34,17}{\sqrt{2}}\right)^2 + \left(\frac{4,378}{\sqrt{2}}\right)^2 + \left(\frac{1,604}{\sqrt{2}}\right)^2 + \left(\frac{0,8229}{\sqrt{2}}\right)^2} = 24,39[B]$$

$$U_{\text{вых } 1} = 24,16[B], U_{\text{вых } 3} = 3,096[B], U_{\text{вых } 5} = 1,134[B], U_{\text{вых } 7} = 0,5819[B].$$

Сопротивление нагрузки $R_H = 30[\text{Ом}]$, поэтому составляющие тока -

$$I_{\text{вых } 1} = 0,8054[\text{А}], I_{\text{вых } 3} = 0,1032[\text{А}], I_{\text{вых } 5} = 0,3781[\text{А}], I_{\text{вых } 7} = 0,01939[\text{А}].$$

Средняя мощность, рассеиваемая в нагрузке - $P = \sum_k P_k = \sum_k U_k I_k;$

$$P_{\text{вых}} = 19,46 + 0,3194 + 0,04288 + 0,01128 = 19,83[\text{Вт}]$$

Оцениваем вклад мощности каждой из четырех составляющих в сумме мощностей: 98,1% 1,61% 0,216% 0,0569%. Оказывается, что на долю мощности третьей, пятой и седьмой составляющих приходится всего лишь около двух процентов.

СОДЕРЖАНИЕ ЗАДАНИЯ ДЛЯ САМОСТОЯТЕЛЬНОЙ РАБОТЫ И РЕКОМЕНДАЦИИ К ЕГО ВЫПОЛНЕНИЮ

1. Выразить аналитически заданное входное воздействие и разложить его в ряд Фурье. Параметры воздействия приведены в таблицах 1.1 ÷ 4.1 и приложении 1. Максимальное значение: $F_M = U_M = 100[\text{В}]$ для источника ЭДС и $F_M = J_M = 10[\text{А}]$ для источника тока. Частота воздействия и первой его гармонической составляющей - $\omega_1[1/\text{с}]$. Количество гармоник должно быть достаточным (но не более 15) для графического представления входного воздействия их суммой. Записать входное воздействие функцией времени и построить график этой функции.

2. Объединить в таблицу значения постоянной составляющей, амплитуд и начальных фаз гармоник входного воздействия; их соотношение иллюстрировать спектральными характеристиками.

3. Представить заданную электрическую цепь схемой замещения по методу комплексных чисел. Опираясь законами Ома и Кирхгофа, составить комплексный коэффициент передачи по напряжению $\underline{K}_U(j\omega) = \underline{U}_{\text{вых}}(\omega)/\underline{U}_{\text{вх}}(\omega)$ или току $\underline{K}_i(j\omega) = \underline{I}_{\text{вых}}(\omega)/\underline{I}_{\text{вх}}(\omega)$ в функции угловой частоты ω .

$$K(j\omega) = |\underline{K}(j\omega)| \cdot e^{j\arg \underline{K}(j\omega)}.$$

4. Выделить амплитудно-частотную и фазо-частотную характеристики цепи: АЧХ $\rightarrow |\underline{K}(j\omega)|$ - модуль передачи, ФЧХ $\rightarrow \arg \underline{K}(j\omega)$ - аргумент передачи. Представить эти функции графиками в диапазоне $\Delta\omega[1/\text{с}]$, приведенном в таблицах 1.1 ÷ 4.1.

5. Рассчитать и поместить в таблицу значения передачи на частотах гармоник входного сигнала и для его постоянной составляющей.

6. Изменяя амплитуды и фазы каждой составляющей входного сигнала в соответствии с модулем и аргументом коэффициента передачи на частоте этой составляющей, рассчитать значения составляющих выходного сигнала - напряжения или тока. Записать выходной сигнал в функции времени и построить ее график.

Для разложения несинусоидальной периодической функции в ряд Фурье рекомендуем:

- вычислить самостоятельно значения амплитуд синусных и косинусных составляющих по формулам Эйлера-Фурье;
- воспользоваться справочником по математике;
- использовать составляющие ряда, приведенные в приложении 2 пособия;

Выбор за студентом, выполняющим задание по своей инициативе, или за преподавателем, выдающим это задание.

В систему MathCAD (или какую-либо иную) рекомендуем обращаться при расчете и графическом представлении функций времени и частоты.

ЗАДАНИЕ 1

Аналізу подлежат електрическа цепь возможные варианты схемы которой формально изображены на рис. 1 и 2.

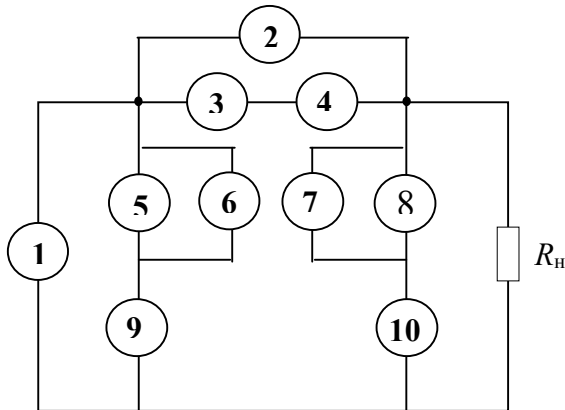


Рис.1

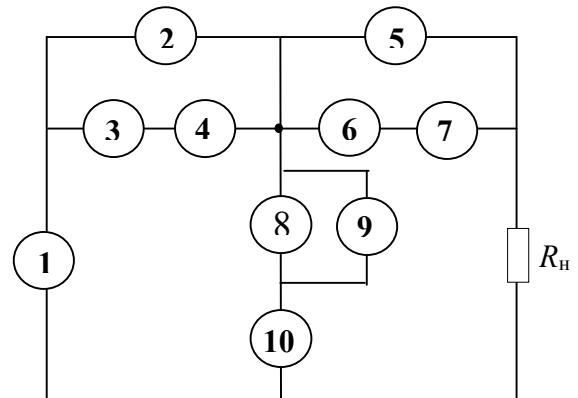


Рис.2

Перед расчетом необходимо составить схему, предложенного преподавателем варианта. В первой ветви помещаются источник ЭДС $e(t)$ или тока $j(t)$. В остальных - элементы L и C , элементы размыкания (P) или замыкания (З). В качестве примера составим схему варианта 30, обратившись к формальному рисунку 2 и таблице 1.1. В первой ветви источник $e(t)$, элементы C в ветвях 2 и 5, элемент L в ветви 10, размыкаем ветви 3, 4, 6, 7, 9 и замыкаем накоротко ветвь 8. Индексы элементов соответствуют номерам ветвей. Получили схему на рис 3. Указываем значения емкостей и индуктивностей, исключаем элементы размыкания. На рисунке 4 представлена электрическая схема варианта 30.

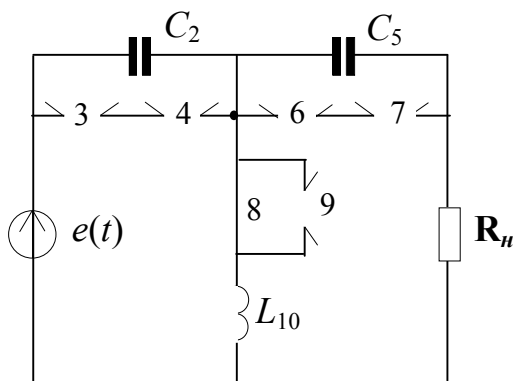


Рис.3

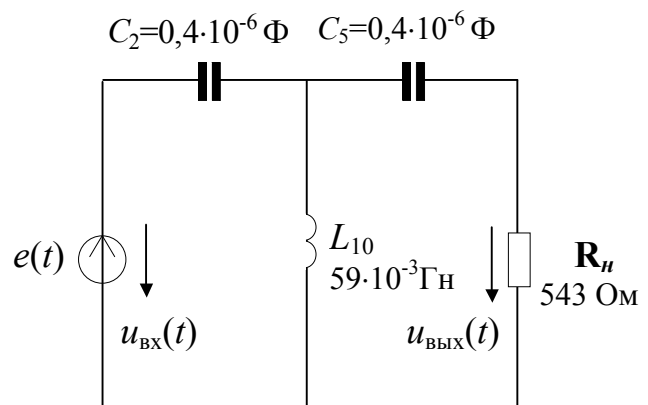


Рис.4

В таблице 1.1 указаны: параметры источника, вариант передачи, диапазон изменения частоты для построения АЧХ и ФЧХ. Последний, в случае необходимости, можно изменить по усмотрению.

Таблица 1.1

Вариант	Рисунок схемы	Источник (в ветви 1)			Передача	$\Delta\omega$ [1/с]
		Тип	Форма	ω_1 [1/с]		
1	2	ЭДС	16	31420	K_u	$0 \div 15 \cdot 10^4$
2	2	ЭДС	3	15710	K_u	$0 \div 2 \cdot 10^4$
3	2	ЭДС	14	9424	K_u	$0 \div 10 \cdot 10^4$
4	2	ЭДС	11	22000	K_u	$0 \div 2,5 \cdot 10^4$
5	2	ЭДС	1	50260	K_i	$0 \div 5 \cdot 10^4$
6	2	ЭДС	5	12560	K_i	$0 \div 1,5 \cdot 10^4$
7	2	ЭДС	10	25130	K_i	$0 \div 5 \cdot 10^4$
8	2	ЭДС	19	12560	K_i	$0 \div 2 \cdot 10^4$
9	2	тока	13	6283	K_u	$0 \div 4,5 \cdot 10^4$
10	2	тока	6	9424	K_u	$0 \div 1,5 \cdot 10^4$
11	2	тока	2	6283	K_u	$0 \div 3 \cdot 10^4$
12	2	ЭДС	19	18850	K_u	$0 \div 2 \cdot 10^4$
13	2	тока	24	6283	K_i	$0 \div 3 \cdot 10^4$
14	2	тока	20	9424	K_i	$0 \div 1,5 \cdot 10^4$
15	2	тока	21	6283	K_i	$0 \div 3 \cdot 10^4$
16	2	тока	22	12560	K_i	$0 \div 2 \cdot 10^4$
17	2	тока	7	4400	K_u	$0 \div 3 \cdot 10^4$
18	2	тока	17	9424	K_u	$0 \div 10^4$
19	2	ЭДС	23	12560	K_u	$0 \div 4 \cdot 10^4$
20	1	тока	25	15710	K_i	$0 \div 1,5 \cdot 10^4$
21	2	тока	28	5026	K_i	$0 \div 2,5 \cdot 10^4$
22	2	тока	12	9424	K_u	$0 \div 10^4$
23	2	тока	9	4712	K_u	$0 \div 2,5 \cdot 10^4$
24	1	ЭДС	15	9424	K_i	$0 \div 1,5 \cdot 10^4$
25	1	тока	18	6283	K_i	$0 \div 2,5 \cdot 10^4$
26	1	тока	27	12560	K_i	$0 \div 1,5 \cdot 10^4$
27	1	тока	1	4712	K_i	$0 \div 2,5 \cdot 10^4$
28	1	тока	11	15710	K_i	$0 \div 4 \cdot 10^4$
29	2	ЭДС	26	6283	K_u	$0 \div 2,5 \cdot 10^4$
30	2	ЭДС	8	12560	K_u	$0 \div 10^4$

Продолжение таблицы 1.1

Вариант	Параметры элементов $R[\text{Ом}], L[\text{мГн}], C[\text{мкФ}]$									
	Н о м е р а в е т в е й									
	2	3	4	5	6	7	8	9	10	$R_{\text{н}}$
1	L 0,5	P	P	3	P	P	3	P	C 0,39	36
2	C 1,52	P	P	3	P	P	3	P	L 6,0	63
3	P	L 2,5	C 1,48	3	P	P	C 0,37	L 10,0	3	82
4	L 3,5	C 1,44	3	3	P	P	L 14,0	P	C 0,36	98
5	R 25	P	P	L 4,5	P	P	3	P	C 0,36	113
6	R 30	P	P	C 1,36	P	P	3	P	L 22,0	127
7	R 10	P	P	P	C 1,32	L 6,5	L 26,0	C 0,33	3	140
8	R 100	P	P	L 7,5	C 1,28	3	L 30,0	P	C 0,32	153
9	L 8,5	P	P	3	P	P	3	P	C 0,32	166
10	C 1,2	P	P	3	P	P	3	P	L 38,0	178
11	P	L 10,5	C 1,16	3	P	P	L 42,0	C 0,29	3	190
12	L 11,5	C 1,12	3	3	P	P	L 46,0	P	C 0,28	202
13	3	P	P	L 12,5	P	P	3	P	C 0,27	215
14	3	P	P	C 1,04	P	P	3	P	L 54,0	228
15	3	P	P	P	L 14,5	C 1,0	C 0,25	L 58,0	3	240
16	3	P	P	C 0,96	L 15,5	3	L 62,0	P	C 0,24	254
17	L 15,2	P	P	L 15,2	P	P	C 0,09	P	L 23,0	582
18	C 0,64	P	P	C 0,64	P	P	L 126	P	C 0,43	627
19	L 16,2	P	P	L 16,2	P	P	C 0,07	P	L 24,4	680

20	C 0,4	L 39,0	3	L 78,0	P	P	L 78,0	C 0,2	C 0,2	312
21	L 20,5	P	P	L 20,5	P	P	3	P	C 0,38	328
22	C 0,72	P	P	C 0,72	P	P	3	P	L 43,0	345
23	P	L 22,5	C 0,68	P	L 22,5	C 0,68	L 45,0	C 0,34	3	364
24	L 190	C 0,16	3	3	P	P	3	L 284	L 284	942
25	L 49,0	P	P	3	P	P	3	C 0,15	C 0,15	404
26	C 0,28	P	P	3	P	P	3	L 102	L 102	424
27	P	L 53,0	C 0,26	L 156	C 0,13	L 156	C 0,13	3	3	450
28	C 0,04	L 34,5	3	3	P	P	3	C 0,03	C 0,03	830
29	L 28,5	P	P	L 28,5	P	P	3	P	C 0,22	510
30	C 0,4	P	P	C 0,4	P	P	3	P	L 59,0	543

ЗАДАНИЕ 2

Аналізу подлежат електрическа цепь, возможные варианты схемы которой формально изображены на рис. 1 и 2.

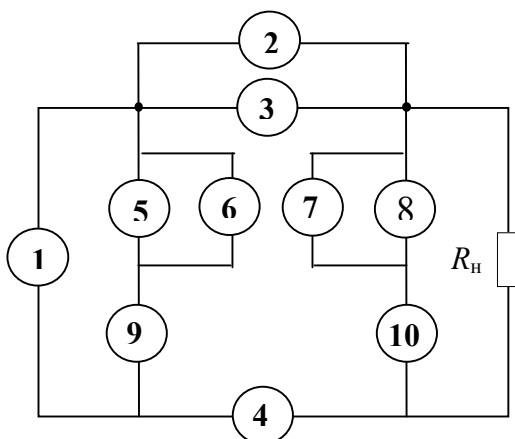


Рис.1

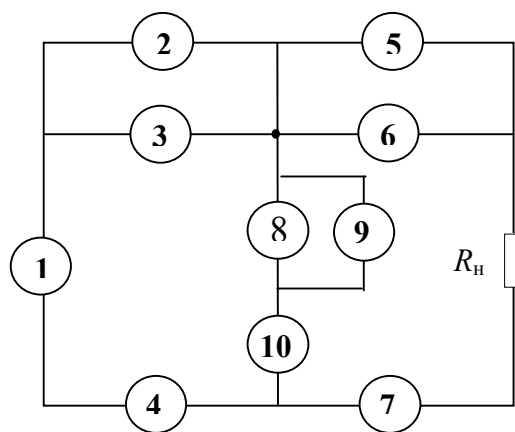


Рис.2

Перед расчетом необходимо составить схему, предложенного преподавателем варианта. В каждой из десяти ветвей помещаются: источник ЭДС $e(t)$ или тока $j(t)$, элементы R , L или C , элементы размыкания (P) или замыкания (З).

В качестве примера составим схему варианта 26, обратившись к формальному рисунку 2 и таблице 1.1. Размещаем в первой ветви источник $J(t)$, элементы C в ветвях 3, 4, 6, 7 и 10, элемент L в ветви 8, размыкаем ветви 2, 5, 9. Индексы элементов соответствуют номерам ветвей. Получили схему на рис 3.

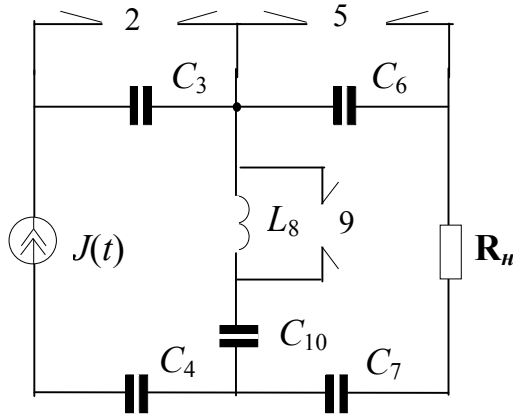


Рис.3

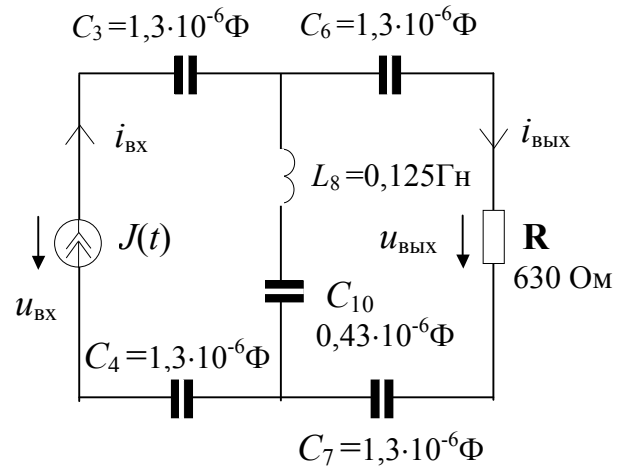


Рис.4

Указываем значения емкостей и индуктивности, направления напряжений и токов источника и нагрузки. Исключаем элементы размыкания. На рисунке 4 представлена электрическая схема варианта 26.

В таблице 2.1 указаны: параметры источника, вариант передачи, диапазон изменения частоты для построения АЧХ и ФЧХ. Последний, в случае необходимости, можно изменить по усмотрению.

Таблица 2.1

Вариант	Рисунок схемы	Источник в ветви 1			Передача	$\Delta\omega$ [1/с]
		Тип	Форма	ω_1 [1/с]		
1	2	ЭДС	25	12570	K_u	$0 \div 4 \cdot 10^4$
2	2	тока	26	5026	K_u	$0 \div 2,5 \cdot 10^4$
3	2	тока	5	9425	K_u	$0 \div 1,2 \cdot 10^4$
4	2	тока	21	4712	K_u	$0 \div 2,5 \cdot 10^4$
5	1	ЭДС	17	9425	K_i	$0 \div 1,2 \cdot 10^4$
6	1	тока	9	6283	K_i	$0 \div 2,5 \cdot 10^4$
7	1	тока	10	12570	K_i	$0 \div 1,2 \cdot 10^4$
8	1	тока	7	4712	K_i	$0 \div 2,5 \cdot 10^4$
9	1	тока	23	15710	K_i	$0 \div 5 \cdot 10^4$
10	2	ЭДС	28	6283	K_u	$0 \div 3,8 \cdot 10^4$
11	2	ЭДС	19	12570	K_u	$0 \div 2 \cdot 10^4$
12	2	ЭДС	22	12570	K_u	$0 \div 1,2 \cdot 10^4$
13	2	ЭДС	24	31410	K_u	$0 \div 19 \cdot 10^4$
14	2	ЭДС	11	15710	K_u	$0 \div 3,8 \cdot 10^4$

15	2	ЭДС	2	9424	K_u	$0 \div 7,5 \cdot 10^4$
16	2	ЭДС	18	50260	K_i	$0 \div 6,3 \cdot 10^4$
17	2	ЭДС	27	12570	K_i	$0 \div 2 \cdot 10^4$
18	2	ЭДС	6	25130	K_i	$0 \div 6,3 \cdot 10^4$
19	2	тока	16	6283	K_u	$0 \div 5 \cdot 10^4$
20	2	тока	4	9424	K_u	$0 \div 1,3 \cdot 10^4$
21	2	тока	1	6283	K_u	$0 \div 4,4 \cdot 10^4$
22	2	тока	15	6283	K_i	$0 \div 5 \cdot 10^4$
23	2	тока	20	9424	K_i	$0 \div 1,3 \cdot 10^4$
24	2	тока	14	6283	K_i	$0 \div 5 \cdot 10^4$
25	2	тока	13	4400	K_u	$0 \div 9,5 \cdot 10^4$
26	2	тока	10	9424	K_u	$0 \div 1,3 \cdot 10^4$
27	1	ЭДС	22	10053	K_i	$0 \div 3,8 \cdot 10^4$
28	2	ЭДС	3	9424	K_u	$0 \div 4,4 \cdot 10^4$
29	1	тока	8	15710	K_i	$0 \div 3 \cdot 10^4$
30	2	ЭДС	12	6283	K_u	$0 \div 2 \cdot 10^4$

Продолжение таблицы 2.1

Вариант	Параметры элементов R [Ом], L [мГн], C [мкФ]									
	Н о м е р а в е т в е й									
	2	3	4	5	6	7	8	9	10	R_H
1	P	L 8,0	L 8,0	P	L 8,0	L 8,0	C 0,07	P	L 24,0	680
2	P	L 10,0	L 10,0	P	L 10,0	L 10,0	C 0,4	P	3	330
3	P	C 1,4	C 1,4	P	C 1,4	C 1,4	L 45,0	P	3	340
4	P	L 22,0	C 0,7	P	L 22,0	C 0,7	L 45,0	C 0,35	3	360
5	L 190	C 0,15	3	L 280	P	P	L 280	R 10,0	R 10,0	940
6	P	L 25,0	L 25,0	C 0,15	P	P	C 0,15	R 8,0	R 8,0	400
7	P	C 0,3	R 10,0	L 100	P	P	L 100	3	3	430
8	P	L 52,0	C 0,25	L 155	C 0,13	C 0,13	L 155	3	3	460
9	C 0,04	L 34,0	3	C 0,02	P	P	C 0,02	R 5,0	R 5,0	825
10	P	L 14,0	L 14,0	P	L 14,0	L 14,0	C 0,2	P	3	500

11	P	C 0,4	R 6,0	P	C 0,4	R 6,0	L 60,0	P	3	540
12	P	C 1,0	C 1,0	P	C 1,0	C 1,0	L 135	P	C 0,3	750
13	L 0,25	P	L 0,25	3	P	3	C 0,4	P	R 7,0	40
14	P	C 3,0	C 3,0	P	3	3	L 6,0	P	3	60
15	P	L 2,5	C 1,5	P	3	3	C 0,4	L 10,0	3	80
16	P	3	3	P	L 2,25	L 2,25	C 0,3	P	3	110
17	P	3	3	P	C 2,7	C 2,7	L 20,0	P	R 6,0	130
18	P	3	3	P	C 1,3	L 6,5	L 25	C 0,3	3	140
19	P	L 4,0	L 4,0	P	3	3	C 0,3	P	3	160
20	P	C 2,5	C 2,5	P	3	3	L 40,0	P	3	180
21	P	L 10,0	C 1,2	P	3	3	L 40,0	C 0,3	3	190
22	P	3	3	P	L 6,0	L 6,0	C 0,3	P	3	210
23	P	3	3	P	C 2,0	C 2,0	L 55,0	P	3	230
24	P	3	3	P	L 14,0	C 1,0	C 0,25	L 60,0	3	240
25	P	L 7,5	L 7,5	P	L 7,5	L 7,5	L 23,0	P	C 0,1	580
26	P	C 1,3	C 1,3	P	C 1,3	C 1,3	L 125	P	C 0,43	630
27	L 200	C 0,15	3	L 300	P	P	L 300	R 15	R 15	10 ³
28	P	L 15	R 15	P	L 15	R 15	C 0,5	P	3	500
29	P	C 0,25	R 12	L 120	P	P	L 120	3	3	450
30	P	C 2	C 2	P	C 2	C 2	L 150	P	C 0,25	10 ³

ЗАДАНИЕ 3

Аналізу подлежат електрическа цеп, възможные варианты схемы которой формально изображены на рис. 1 и 2.

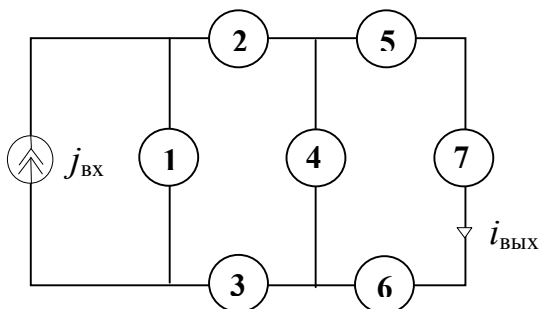


Рис.1

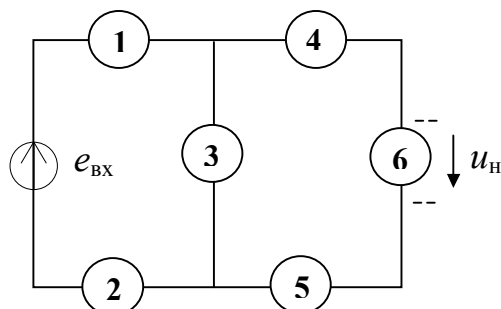


Рис.2

Перед расчетом необходимо составить схему, предложенного преподавателем варианта. В каждой из ветвей, кроме источника ЭДС $e(t)$ или тока $j(t)$, помещаются: элементы R , L и C . В качестве примера составим схему варианта 29, обратившись к формальному рисунку 2 и таблице 1.1.

Размещаем в первой ветви элемент C , в ветвях 2 и 5 элементы L , в ветвях 3 и 6 элементы R . Индексы элементов соответствуют номерам ветвей. Отсутствующий четвертый элемент замкнут накоротко.

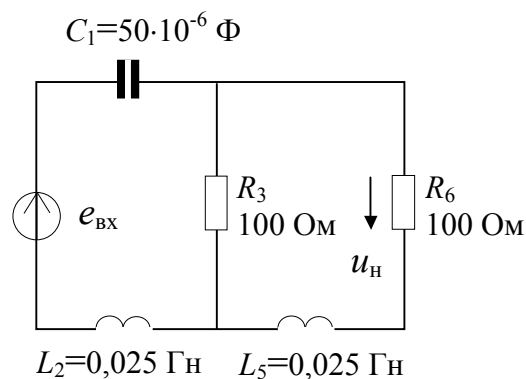


Рис. 3

Указываем значения сопротивления, емкости и индуктивности элементов. Получили схему на рис 3.

Таблица 3.1

Вариант	Рисунок схемы	Параметры источника				$f_H(\omega t)$
		Тип	Форма	$F_M [A, B]$	$\omega_1 [1/c]$	
1	2	ЭДС	12	$E_M=50B$	1000	$u_H(\omega t)$
2	1	тока	15	$J_M=1A$	600	$i_H(\omega t)$
3	2	ЭДС	6	$E_M=55B$	1000	$u_H(\omega t)$
4	1	тока	3	$J_M=1,1A$	1000	$i_H(\omega t)$
5	2	ЭДС	1	$E_M=60B$	1000	$u_H(\omega t)$
6	1	тока	23	$J_M=1,2A$	1200	$i_H(\omega t)$
7	2	ЭДС	4	$E_M=65B$	200	$u_H(\omega t)$
8	1	тока	5	$J_M=1,3A$	200	$i_H(\omega t)$
9	2	ЭДС	19	$E_M=70B$	2000	$u_H(\omega t)$
10	1	тока	27	$J_M=1,4A$	2000	$i_H(\omega t)$
11	2	ЭДС	10	$E_M=75B$	1000	$u_H(\omega t)$
12	1	тока	14	$J_M=1,5A$	200	$i_H(\omega t)$
13	2	ЭДС	17	$E_M=80B$	200	$u_H(\omega t)$
14	1	тока	26	$J_M=1,6A$	1000	$i_H(\omega t)$
15	2	ЭДС	11	$E_M=85B$	100	$u_H(\omega t)$
16	1	тока	28	$J_M=1,7A$	1000	$i_H(\omega t)$
17	2	ЭДС	22	$E_M=90B$	1000	$u_H(\omega t)$
18	1	тока	25	$J_M=1,8A$	1000	$i_H(\omega t)$
19	2	ЭДС	2	$E_M=95B$	1000	$u_H(\omega t)$
20	1	тока	20	$J_M=1,9A$	1000	$i_H(\omega t)$
21	2	ЭДС	16	$E_M=100B$	1000	$u_H(\omega t)$
22	1	тока	24	$J_M=2A$	200	$i_H(\omega t)$
23	2	ЭДС	18	$E_M=105B$	200	$u_H(\omega t)$
24	1	тока	21	$J_M=2,1A$	2000	$i_H(\omega t)$
25	2	ЭДС	7	$E_M=110B$	2000	$u_H(\omega t)$
26	1	тока	8	$J_M=2,2A$	200	$i_H(\omega t)$
27	2	ЭДС	9	$E_M=115B$	500	$u_H(\omega t)$
28	1	тока	13	$J_M=2,3A$	1000	$i_H(\omega t)$
29	2	ЭДС	1	$E_M=120B$	200	$u_H(\omega t)$
30	2	ЭДС	19	$E_M=125B$	100	$u_H(\omega t)$

Продолжение таблицы 3.1

Вариант	Рисунок схемы	Параметры элементов $R[\text{Ом}], L[\text{мГн}], C[\text{мкФ}]$						
		Н о м е р а в е т в е й						
		1	2	3	4	5	6	7
1	2	$R=20$	-	$L=10$	$R=20$	$R=20$	$L=10$	
2	1	$R=10$	$L=15$	-	$R=10$	$L=15$	-	$R=10$
3	2	$C=100$	-	$R=15$	$C=100$	-	$R=15$	
4	1	$R=12$	$C=20$	-	$R=12$	$C=20$	-	$R=12$
5	2	$R=18$	$L=20$	$R=18$	$L=20$	-	$R=18$	
6	1	$R=25$	$R=25$	-	$L=2$	$R=25$	-	$L=2$
7	2	$R=30$	$C=250$	$R=30$	$C=250$	-	$R=30$	
8	1	$R=35$	-	$C=250$	$R=35$	$C=250$	-	$R=35$
9	2	$L=4$	$R=200$	$C=5$	$L=4$	$R=200$	$R=200$	
10	1	$R=200$	$L=2,5$	-	$C=20$	$L=2,5$	-	$R=28$
11	2	$C=50$	-	$L=50$	$C=50$	-	$R=50$	
12	1	$R=32$	$C=500$	-	$L=150$	$C=500$	-	$R=32$
13	2	$L=25$	$C=50$	$R=80$	$L=25$	-	$R=80$	
14	1	$R=70$	$L=20$	-	$R=70$	$L=20$	$C=6,7$	$R=70$
15	2	$L=200$	$R=100$	$C=100$	$L=200$	$R=100$	$R=100$	
16	1	$R=10$	$L=7,5$	$L=7,5$	$R=10$	$L=15$	-	$R=10$
17	2	$R=8$	$R=12$	$L=10$	$R=22$	$R=18$	$L=10$	
18	1	$R=100$	$C=20$	-	$R=100$	$C=40$	$C=40$	$R=100$
19	2	$C=100$	-	$R=13$	$C=200$	$C=200$	$R=13$	
20	1	$R=24$	$R=12$	$R=12$	$L=2$	$R=24$	-	$L=2$
21	2	$R=19$	$L=20$	$R=19$	$L=10$	$L=10$	$R=19$	
22	1	$R=37$	$C=500$	$C=500$	$R=37$	-	$C=250$	$R=37$
23	2	$R=33$	$C=250$	$R=33$	$C=500$	$C=500$	$R=33$	
24	1	$R=30$	$L=2,5$	-	$C=40$	$L=1,2$ 5	$L=1,3$ 5	$R=30$
25	2	$L=2$	$L=2$	$C=15$	-	$L=4$	$R=50$	
26	1	$R=34$	$C=10^3$	$C=10^3$	$L=150$	$C=500$	-	$R=34$
27	2	$C=333$	$C=333$	$L=75$	$C=167$	-	$R=30$	
28	1	$R=75$	$L=10$	$L=10$	$R=75$	$L=20$	$C=6,7$	$R=75$
29	2	$C=50$	$L=25$	$R=100$	-	$L=25$	$R=100$	
30	2	$R=12$	$L=200$	$C=100$	$R=12$	$L=200$	$R=96$	

ЗАДАНИЕ 4

Аналізу подлежат електрическа цепь, возможные варианты схемы которой формально изображены на рис. 1 и 2.

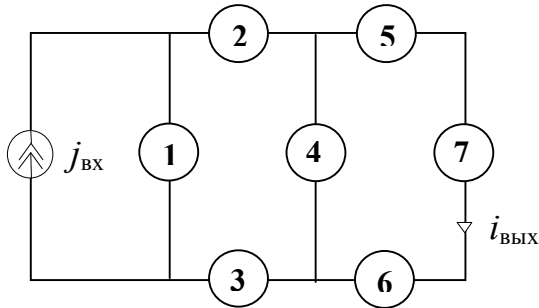


Рис.1

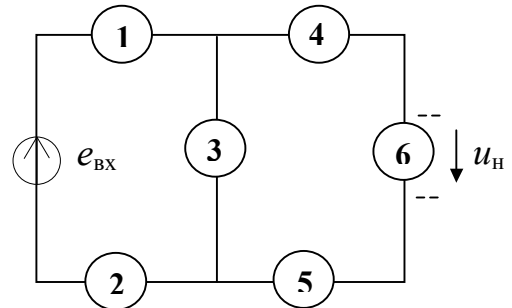


Рис.2

Перед расчетом необходимо составить схему, предложенного преподавателем варианта. В каждой из ветвей, кроме источника ЭДС $e(t)$ или тока $j(t)$, помещаются: элементы R , L и C . В качестве примера составим схему варианта 24, обратившись к формальному рисунку 2 и таблице 4.1.

Размещаем в ветвях 1, 2 и 4 элементы C , в ветви 3 элемент L , в ветви 6 элемент R . Индексы элементов соответствуют номерам ветвей. Отсутствующий пятый элемент замкнут накоротко.

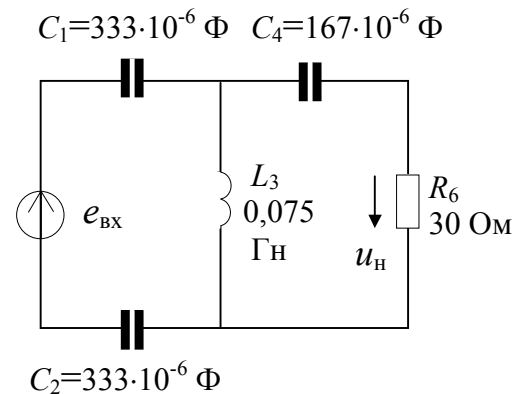


Рис. 3

Указываем значения сопротивления, емкости и индуктивности элементов. Получили схему на рис 3.

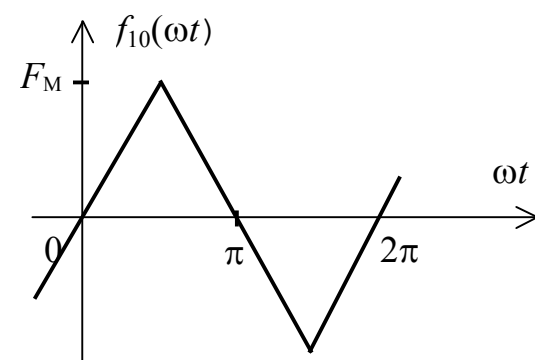
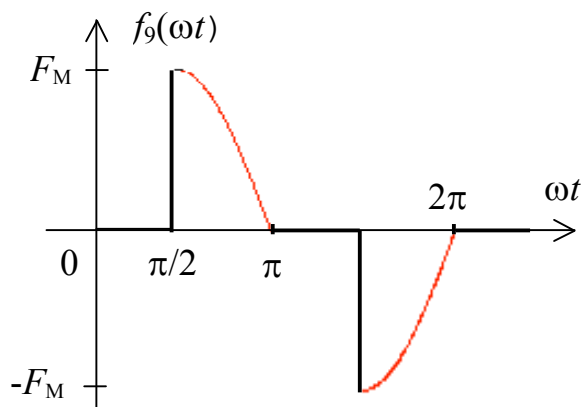
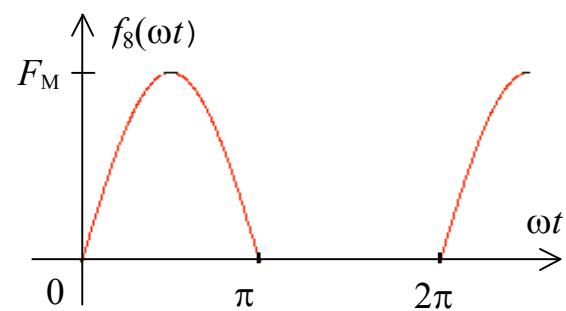
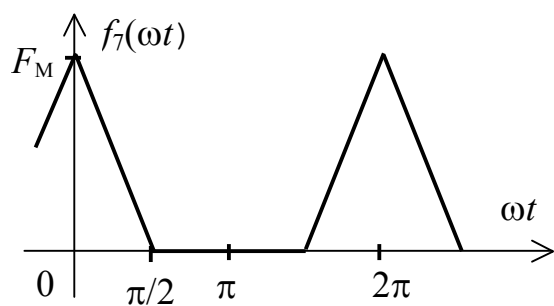
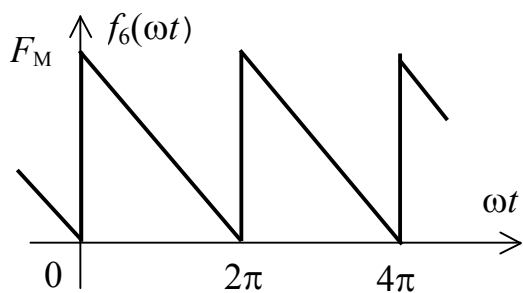
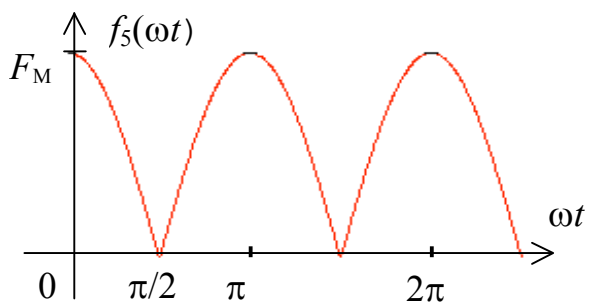
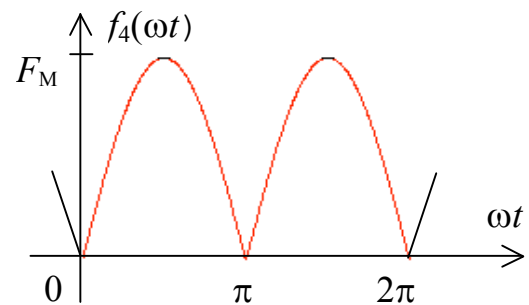
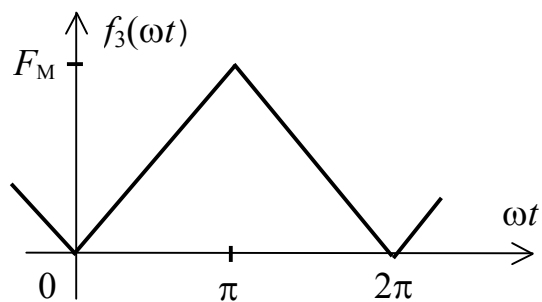
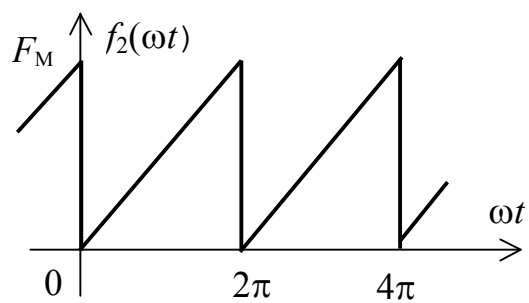
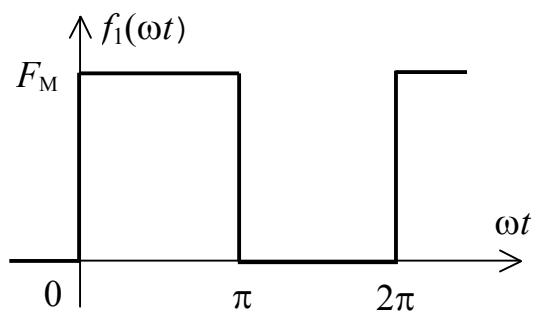
Таблица 4.1

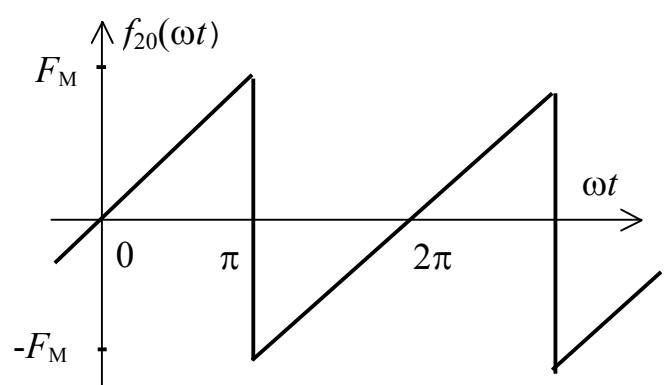
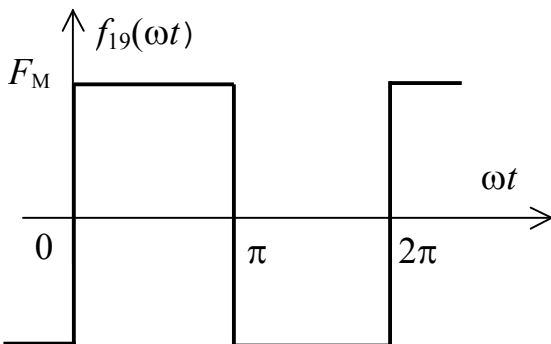
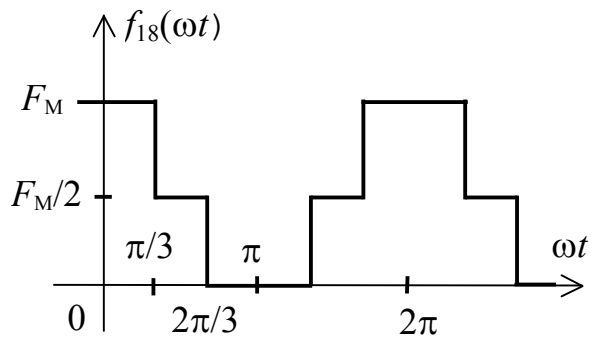
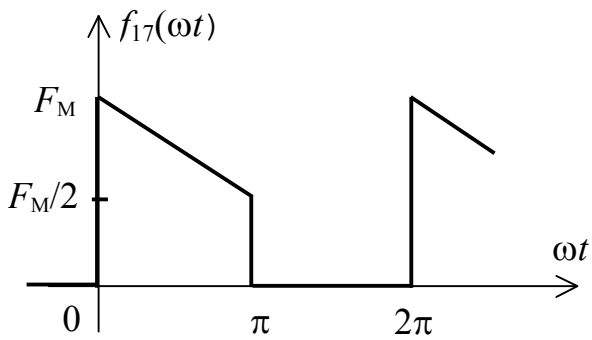
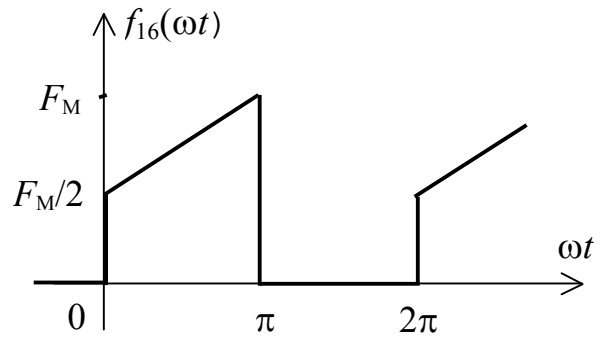
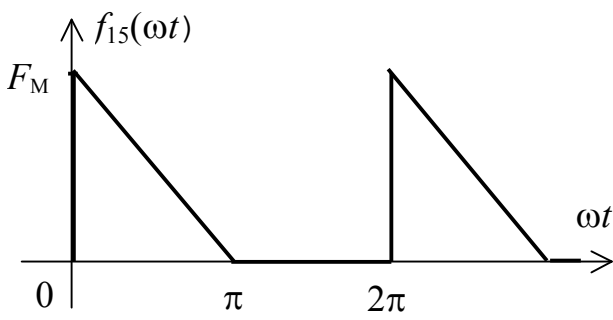
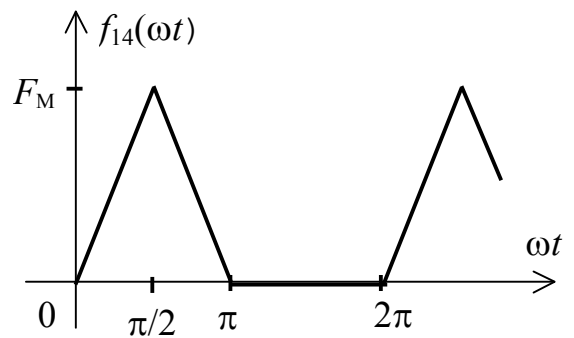
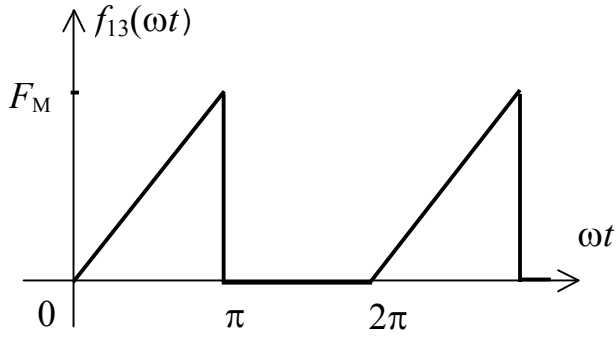
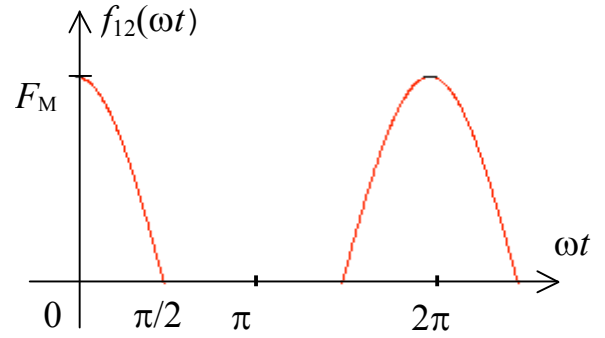
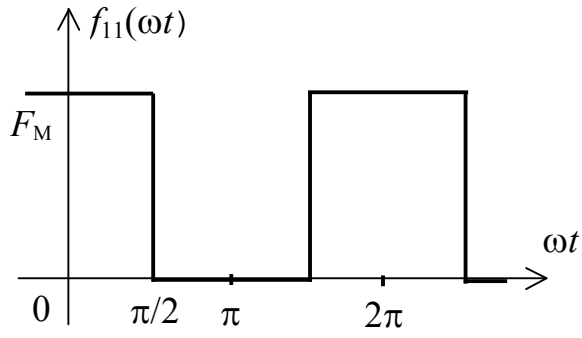
Вариант	Рисунок схемы	Параметры источника				$f_H(\omega t)$
		Тип	Форма	$F_M [A, B]$	$\omega_1 [1/c]$	
1	1	тока	16	$J_M=1,4A$	2000	$i_H(\omega t)$
2	2	ЭДС	19	$E_M=70B$	2000	$u_H(\omega t)$
3	1	тока	6	$J_M=1,3A$	200	$i_H(\omega t)$
4	2	ЭДС	26	$E_M=65B$	200	$u_H(\omega t)$
5	1	тока	23	$J_M=1,2A$	1000	$i_H(\omega t)$
6	2	ЭДС	25	$E_M=60B$	1000	$u_H(\omega t)$
7	1	тока	4	$J_M=1,1A$	1000	$i_H(\omega t)$
8	2	ЭДС	5	$E_M=55B$	1000	$u_H(\omega t)$
9	1	тока	1	$J_M=1,0A$	1000	$i_H(\omega t)$
10	2	ЭДС	7	$E_M=50B$	1000	$u_H(\omega t)$
11	1	тока	9	$J_M=1,9A$	1000	$i_H(\omega t)$
12	2	ЭДС	6	$E_M=95B$	1000	$u_H(\omega t)$
13	1	тока	3	$J_M=1,8A$	1000	$i_H(\omega t)$
14	2	ЭДС	12	$E_M=90B$	1000	$u_H(\omega t)$
15	1	тока	15	$J_M=1,7A$	1000	$i_H(\omega t)$
16	2	ЭДС	14	$E_M=85B$	100	$u_H(\omega t)$
17	1	тока	2	$J_M=1,6A$	1000	$i_H(\omega t)$
18	2	ЭДС	13	$E_M=80B$	200	$u_H(\omega t)$
19	1	тока	11	$J_M=1,5A$	200	$i_H(\omega t)$
20	2	ЭДС	17	$E_M=75B$	1000	$u_H(\omega t)$
21	2	ЭДС	18	$E_M=125B$	100	$u_H(\omega t)$
22	2	ЭДС	8	$E_M=120B$	200	$u_H(\omega t)$
23	1	тока	21	$J_M=2,3A$	1000	$i_H(\omega t)$
24	2	ЭДС	10	$E_M=115B$	200	$u_H(\omega t)$
25	1	тока	22	$J_M=2,2A$	200	$i_H(\omega t)$
26	1	тока	26	$J_M=0,9A$	2000	$i_H(\omega t)$
27	2	ЭДС	28	$E_M=45B$	2000	$u_H(\omega t)$
28	1	тока	24	$J_M=0,8A$	250	$i_H(\omega t)$
29	2	ЭДС	20	$E_M=40B$	250	$u_H(\omega t)$
30	1	тока	27	$J_M=0,7A$	1000	$i_H(\omega t)$

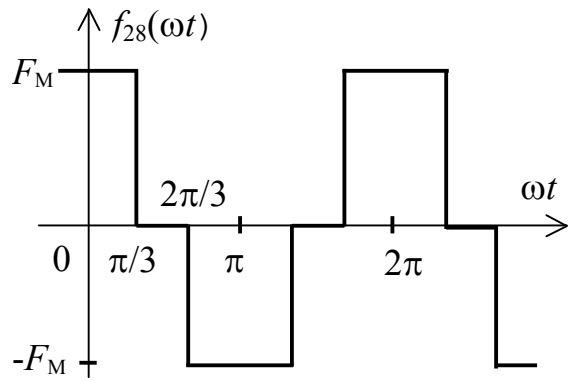
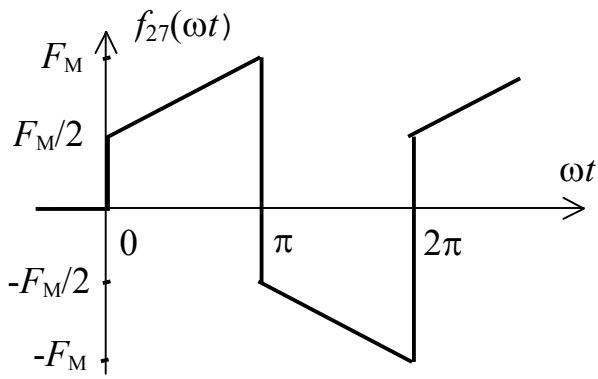
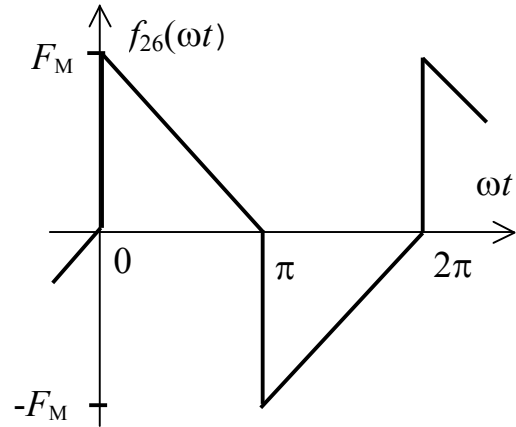
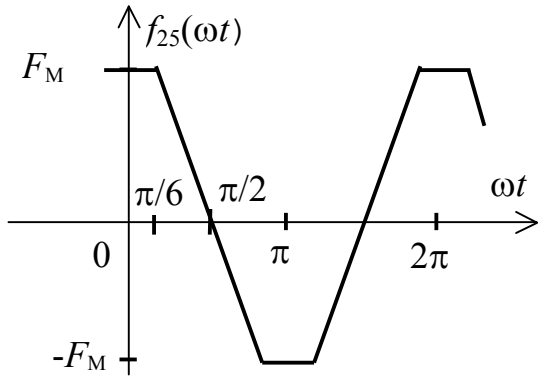
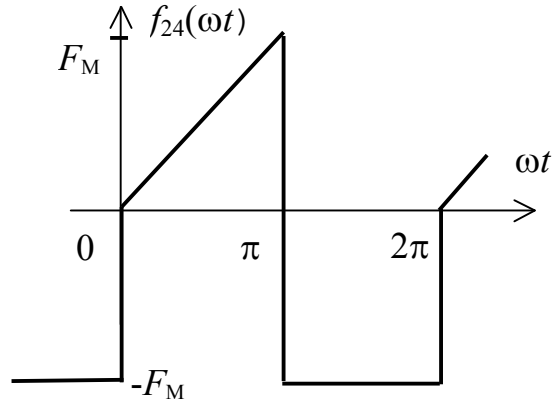
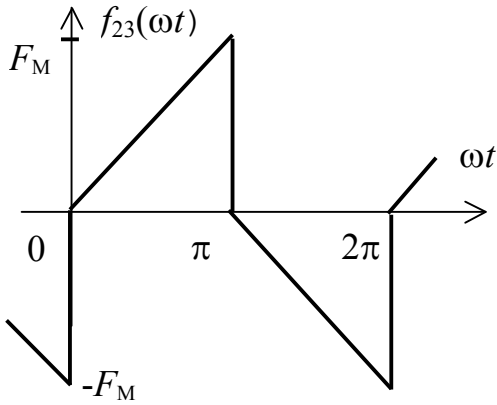
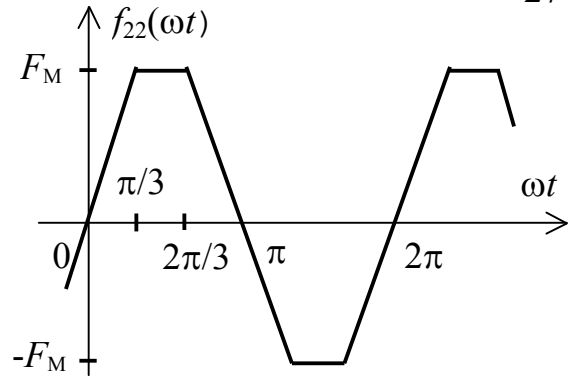
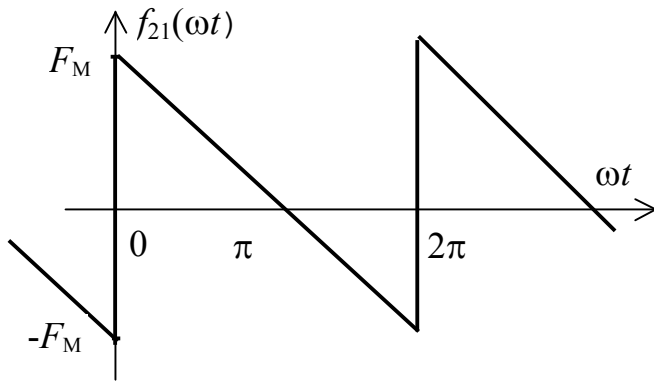
Продолжение таблицы 4.1

Вариант	Рисунок схемы	Параметры элементов $R[\text{Ом}], L[\text{мГн}], C[\text{мкФ}]$						
		Н о м е р а в е т в е й						
		1	2	3	4	5	6	7
1	1	$R=28$	$L=5$	-	$C=10$	$L=5$	-	$R=28$
2	2	$L=4$	-	$C=5$	$L=4$	-	$R=26$	
3	1	$R=35$	-	$C=250$	$R=35$	$C=250$	-	$R=35$
4	2	$R=30$	$C=250$	$R=30$	$C=250$	-	$R=30$	
5	1	$R=25$	$R=25$	-	$L=2$	$R=25$	-	$L=2$
6	2	$R=18$	$L=20$	$R=18$	$L=20$	-	$R=18$	
7	1	$R=12$	$C=20$	-	$R=12$	$C=20$	-	$R=12$
8	2	$C=100$	-	$R=15$	$C=100$	-	$R=15$	
9	1	$R=10$	$L=15$	-	$R=10$	$L=15$	-	$R=10$
10	2	$R=20$	-	$L=10$	$R=20$	$R=20$	$L=10$	
11	1	$R=24$	$R=12$	$R=12$	$L=2$	$R=24$	-	$L=2$
12	2	$C=100$	-	$R=13$	$C=200$	$C=200$	$R=13$	
13	1	$R=100$	$C=20$	-	$R=100$	$C=40$	$C=40$	$R=100$
14	2	$R=8$	$R=12$	$L=10$	$R=22$	$R=18$	$L=10$	
15	1	$R=10$	$L=7,5$	$L=7,5$	$R=10$	$L=15$	-	$R=10$
16	2	$L=200$	$R=10$	$C=100$	$L=200$	$R=10$	$R=100$	
17	1	$R=70$	$L=20$	-	$R=70$	$L=20$	$C=6,7$	$R=70$
18	2	$L=25$	$C=50$	$R=80$	$L=25$	-	$R=80$	
19	1	$R=32$	$C=500$	-	$L=150$	$C=500$	-	$R=32$
20	2	$C=50$	-	$L=50$	$C=50$	-	$R=50$	
21	2	$R=12$	$L=200$	$C=100$	$R=12$	$L=200$	$R=96$	
22	2	$C=50$	$L=25$	$R=100$	-	$L=25$	$R=100$	
23	1	$R=75$	$L=10$	$L=10$	$R=75$	$L=20$	$C=6,7$	$R=75$
24	2	$C=333$	$C=333$	$L=75$	$C=167$	-	$R=30$	
25	1	$R=50$	$C=10^3$	$C=10^3$	$L=150$	$C=500$	-	$R=50$
26	1	$R=30$	$L=5$	-	$C=12$	$L=5$	-	$R=30$
27	2	$L=5$	-	$C=7$	$L=5$	-	$R=29$	
28	1	$R=40$	-	$C=250$	$R=40$	$C=250$	-	$R=40$
29	2	$R=35$	$C=300$	$R=35$	$C=300$	-	$R=35$	
30	1	$R=28$	$R=28$	-	$L=5$	$R=28$	-	$L=5$

Приложение 1







Приложение 2

$$f_1(\omega t) \approx \frac{F_M}{2} + \frac{2F_M}{\pi} \left(\sin \omega_1 t + \frac{1}{3} \sin 3\omega_1 t + \frac{1}{5} \sin 5\omega_1 t + \dots \right)$$

$$f_2(\omega t) \approx \frac{F_M}{2} - \frac{F_M}{\pi} \left(\sin \omega_1 t + \frac{1}{2} \sin 2\omega_1 t + \frac{1}{3} \sin 3\omega_1 t + \dots \right)$$

$$f_3(\omega t) \approx \frac{F_M}{2} - \frac{4F_M}{\pi^2} \left(\cos \omega_1 t + \frac{1}{9} \cos 3\omega_1 t + \frac{1}{25} \cos 5\omega_1 t + \dots \right)$$

$$f_4(\omega t) \approx \frac{2F_M}{\pi} - \frac{4F_M}{\pi} \left(\frac{1}{3} \cos 2\omega_1 t + \frac{1}{15} \cos 4\omega_1 t + \frac{1}{35} \cos 6\omega_1 t + \dots \right)$$

$$f_5(\omega t) \approx \frac{2F_M}{\pi} + \frac{4F_M}{\pi} \left(\frac{1}{3} \cos 2\omega_1 t - \frac{1}{15} \cos 4\omega_1 t + \frac{1}{35} \cos 6\omega_1 t - \dots \right)$$

$$f_6(\omega t) \approx \frac{F_M}{2} + \frac{F_M}{\pi} \left(\sin \omega_1 t + \frac{1}{2} \sin 2\omega_1 t + \frac{1}{3} \sin 3\omega_1 t + \dots \right)$$

$$f_7(\omega t) \approx \frac{F_M}{4} + \frac{4F_M}{\pi^2} \left(\cos \omega_1 t + \frac{1}{2} \cos 2\omega_1 t + \frac{1}{9} \cos 3\omega_1 t + \frac{1}{25} \cos 5\omega_1 t + \dots \right)$$

$$f_8(\omega t) \approx \frac{F_M}{\pi} + 2F_M \left(\frac{1}{4} \sin \omega_1 t - \frac{1}{3\pi} \cos 2\omega_1 t - \frac{1}{15\pi} \cos 4\omega_1 t - \dots \right)$$

$$f_9(\omega t) \approx \frac{F_M}{\pi} \left[\sqrt{\frac{\pi^2}{4} + 1} \cdot \sin(\omega_1 t - 32,5^\circ) + \sin(3\omega_1 t + 90^\circ) + \frac{1}{3} \sin(5\omega_1 t - 90^\circ) + \right. \\ \left. + \frac{1}{3} \sin(7\omega_1 t + 90^\circ) + \frac{1}{5} \sin(9\omega_1 t - 90^\circ) + \frac{1}{5} \sin(11\omega_1 t + 90^\circ) + \frac{1}{7} \sin(13\omega_1 t - 90^\circ) + \dots \right]$$

$$f_{10}(\omega t) \approx \frac{8F_M}{\pi^2} \left(\sin \omega_1 t - \frac{1}{9} \sin 3\omega_1 t + \frac{1}{25} \sin 5\omega_1 t - \dots \right)$$

$$f_{11}(\omega t) \approx \frac{F_M}{2} + \frac{2F_M}{\pi} \left(\cos \omega_1 t - \frac{1}{3} \cos 3\omega_1 t + \frac{1}{5} \cos 5\omega_1 t - \dots \right)$$

$$f_{12}(\omega t) \approx \frac{F_M}{\pi} + 2F_M \left(\frac{1}{4} \cos \omega_1 t + \frac{1}{3\pi} \cos 2\omega_1 t - \frac{1}{15\pi} \cos 4\omega_1 t + \dots \right)$$

$$f_{13}(\omega t) \approx \frac{F_M}{4} + \frac{F_M}{\pi} \left[\frac{\sin(\omega_1 t - 32,5^\circ)}{0,843} - \frac{\sin(2\omega_1 t)}{2} + \frac{\sin(3\omega_1 t)}{3} - \frac{\sin(4\omega_1 t)}{4} + \frac{\sin(5\omega_1 t)}{5} - \dots \right]$$

$$f_{14}(\omega t) \approx \frac{F_M}{4} + \frac{4F_M}{\pi^2} \left(\sin \omega_1 t - \frac{1}{2} \cos 2\omega_1 t - \frac{1}{9} \sin 3\omega_1 t + \frac{1}{5} \sin 5\omega_1 t - \dots \right)$$

$$f_{15}(\omega t) \approx \frac{F_M}{4} + \frac{F_M}{\pi} \left[\frac{\sin(\omega_1 t + 32,5^\circ)}{0,843} + \frac{\sin(2\omega_1 t)}{2} + \frac{\sin(3\omega_1 t)}{3} + \frac{\sin(4\omega_1 t)}{4} + \frac{\sin(5\omega_1 t)}{5} - \right]$$

$$f_{16}(\omega t) \approx \frac{3F_M}{8} + \frac{F_M}{\pi} \left[\frac{\sin(\omega_1 t - 12^\circ)}{0,653} - \frac{\sin(2\omega_1 t)}{4} + \frac{\sin(3\omega_1 t)}{2} - \frac{\sin(4\omega_1 t)}{8} + \frac{\sin(5\omega_1 t)}{3,33} - \right]$$

$$f_{17}(\omega t) \approx \frac{3F_M}{8} + \frac{F_M}{\pi} \left[\frac{\sin(\omega_1 t + 12^\circ)}{0,653} + \frac{\sin(2\omega_1 t)}{4} + \frac{\sin(3\omega_1 t)}{2} + \frac{\sin(4\omega_1 t)}{8} + \frac{\sin(5\omega_1 t)}{3,33} - \right]$$

$$f_{18}(\omega t) \approx \frac{F_M}{2} + \frac{\sqrt{3}F_M}{\pi} \left(\cos\omega_1 t - \frac{1}{5}\cos 5\omega_1 t + \frac{1}{7}\cos 7\omega_1 t - \dots \right)$$

$$f_{19}(\omega t) \approx \frac{4F_M}{\pi} \left(\sin\omega_1 t + \frac{1}{3}\sin 3\omega_1 t + \frac{1}{5}\sin 5\omega_1 t + \dots \right)$$

$$f_{20}(\omega t) \approx \frac{2F_M}{\pi} \left(\sin\omega_1 t - \frac{1}{2}\sin 2\omega_1 t + \frac{1}{3}\sin 3\omega_1 t + \dots \right)$$

$$f_{21}(\omega t) \approx \frac{2F_M}{\pi} \left(\sin\omega_1 t + \frac{1}{2}\sin 2\omega_1 t + \frac{1}{3}\sin 3\omega_1 t + \dots \right)$$

$$f_{22}(\omega t) \approx \frac{6\sqrt{3} \cdot F_M}{\pi^2} \left(\sin\omega_1 t - \frac{1}{25}\sin 5\omega_1 t + \frac{1}{49}\sin 7\omega_1 t - \frac{1}{121}\sin 11\omega_1 t + \dots \right)$$

$$f_{23}(\omega t) \approx \frac{F_M}{\pi} \left[\frac{\sin(\omega_1 t - 32,5^\circ)}{0,422} + \frac{\sin(3\omega_1 t)}{1,5} + \frac{\sin(5\omega_1 t)}{2,5} + \frac{\sin(7\omega_1 t)}{3,5} + \dots \right]$$

$$f_{24}(\omega t) \approx \frac{-F_M}{4} + \frac{F_M}{\pi} \left[\frac{\sin(\omega_1 t - 12^\circ)}{0,326} - \frac{\sin(2\omega_1 t)}{2} + \frac{\sin(3\omega_1 t)}{1} - \frac{\sin(4\omega_1 t)}{4} + \frac{\sin(5\omega_1 t)}{1,67} - \right]$$

$$f_{25}(\omega t) \approx \frac{6\sqrt{3} \cdot F_M}{\pi^2} \left(\cos\omega_1 t - \frac{1}{25}\cos 5\omega_1 t - \frac{1}{49}\cos 7\omega_1 t + \frac{1}{121}\cos 11\omega_1 t + \dots \right)$$

$$f_{26}(\omega t) \approx \frac{F_M}{\pi} \left[\frac{\sin(\omega_1 t + 32,5^\circ)}{0,422} + \frac{\sin(3\omega_1 t)}{1,5} + \frac{\sin(5\omega_1 t)}{2,5} + \frac{\sin(7\omega_1 t)}{3,5} + \dots \right]$$

$$f_{27}(\omega t) \approx \frac{F_M}{\pi} \left[\frac{\sin(\omega_1 t - 12^\circ)}{0,326} + \frac{\sin(3\omega_1 t)}{1} + \frac{\sin(5\omega_1 t)}{1,67} - \frac{\sin(7\omega_1 t)}{2,33} + \dots \right]$$

$$f_{28}(\omega t) \approx \frac{2\sqrt{3}F_M}{\pi} \left(\cos\omega_1 t - \frac{1}{5}\cos 5\omega_1 t + \frac{1}{7}\cos 7\omega_1 t - \dots \right)$$

Список литературы

1. Бессонов Л. А. Теоретические основы электротехники. Электрические цепи. – М.: Высшая школа, 1978.
2. Зевеке Г. Ф. и др. Основы теории цепей. Учебник для вузов. – М.: Энергоатомиздат, 1989.
3. Нейман Л. Р., Демирчян К. С. Теоретические основы электротехники. В двух томах. Том 1. Учебник для вузов. – Л.: Энергоатомиздат, 1981.
4. Матханов П. Н. Основы анализа электрических цепей. Линейные цепи. – М.: Высшая школа, 1980.
5. Касаткин А. С. Электротехника. – М.: Энергия, 1973.
6. Общая электротехника. Учебное пособие для вузов. /Под редакцией А. Т. Блажжина/. – Л.: Энергоатомиздат, 1986.
7. Новгородцев А. Б. 30 лекций по теории электрических цепей. – СПб.: Политехника, 1995.
8. Новгородцев А. Б. Расчет электрических цепей в MATLAB: Учебный курс. – СПб.: <<Петер>>, 2004.
9. Прянишников В. А. Теоретические основы электротехники. Курс лекций. – СПб.: Корона принт, 2000.
10. Прянишников В. А., Петров Е. А., Осипов Ю. М. Электротехника и ТОЭ в примерах и задачах. Практическое пособие – СПб.: Корона принт, 2001.
11. Шебес М. Р. Теория линейных электрических цепей в упражнениях и задачах. Учебное пособие для электротехнич. радиотехнич. специальностей вузов. М.: “Высшая школа”, 1973.
12. Воробьев Е. М. Введение в систему символьных, графических и численных вычислений “Математика-5”. – М.: <<ДИАЛОГ-МИФИ>>, 2005.
13. MathCAD 6.0 PLUS. Финансовые, инженерные и научные расчеты в среде WINDOWS 95. Издание 2-е, стереотипное – М.: Информационно-издательский дом <<ФИЛИНЬ>>, 1997.

СОДЕРЖАНИЕ

1. Последовательность анализа электрических цепей несинусоидального периодического тока.....	3
2. Задание 1.....	12
3. Задание 2.....	15
4. Задание 3.....	19
5. Задание 4.....	22
5. Приложение 1.....	25
8. Приложение 2.....	27
9. Список литературы.....	30



ИСТОРИЯ РАЗВИТИЯ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКОГО ОБРАЗОВАНИЯ В ИНСТИТУТЕ ТОЧНОЙ МЕХАНИКИ И ОПТИКИ

Ю.А. Климов, В.С. Томасов

В 1930 году техникум точной механики и оптики был реорганизован в учебный комбинат, состоящий из института, техникума и ФЗУ в системе Всесоюзного объединения оптико-механической промышленности.

В те годы электротехническую подготовку в нашем институте проводили кафедры «Электротехники» и «Электроизмерительных приборов». Кафедрой «Электротехники» руководил проф. Салтыков Л.Н., а кафедрой «Электроизмерительных приборов» проф. Шишелов Л.П.

С сентября 1933 года исполнять обязанности заведующего кафедрой «Электротехники» нашего института начинает Рукавишников Н. Н., а с ноября 1937 года, на заведование кафедрой назначается Солодовников А. А., известный специалист в области электротехники, электроизмерительных приборов и оборудования.

Во время войны при эвакуации ЛИТМО в г. Черепаново кафедрой руководил доц., к.т.н. Березниковский С. Ф.; штатное расписание кафедры в те годы насчитывало всего 4 человека.

После возвращения ЛИТМО из эвакуации в 1944 году кафедрой заведует Березниковский С.Ф., которого 25 января 1945 года освобождают от обязанностей заведующего кафедрой «Общей и специальной электротехники» и назначают заведующим этой кафедрой профессора Зилитенкевича С.И.

В послевоенные годы в целом по стране и в Ленинграде ощущался дефицит опытных преподавателей высшей школы, и руководство институтом пригласило в качестве зав. кафедрой «Общей и специальной электротехники» известного ученого, педагога и методиста Пиотровского Л. М. Большинство учебников по электрическим машинам в ту пору было написано либо лично Пиотровским Л.М., либо в соавторстве с другими видными учеными.

В 1948 году на базе кафедры «Общей и специальной электротехники» образуются кафедры: «Общей электротехники и электрических машин» зав.каф. доц. Березниковский С.Ф., «Теоретических основ электротехники» зав. каф. проф. Слепян Л.Б. и «Электроизмерительных приборов» исполняющий обязанности зав. каф. проф. Слепян Л.Б.

В 1951 году кафедры «Электротехники» и «ТОЭ» объединяют в единую кафедру «Электротехники и ТОЭ» под руководством доц. Березниковского С.Ф. в составе Радиотехнического факультета,

В 1956 году на Радиотехническом факультете вновь образуются две кафедры – «ТОЭ» зав. каф. доц. Сочнев А.Я. и «Электрических машин» зав. каф. доц. Березниковский С.Ф.

В июле 1958 года доц Сочнева А.Я. освобождают от обязанностей зав. каф. «ТОЭ», а доц. Фунтова Н.М. назначают в.и.о. зав. каф. и избирают по конкурсу на должность заведующего в 1960 году.

В 1961 году в ЛИТМО на должность заведующего кафедрой «Электрических машин» приглашают профессора Сахарова А.П.

В 1965 году на должность заведующего кафедрой «Электрических машин» избирается доц., к.т.н. Глазенко Т.А.

В 1968 году кафедры «ТОЭ» и «Электрических машин» объединяются в единую кафедру «Электротехники» под руководством Т.А. Глазенко.

Татьяна Анатольевна Глазенко в 1948 году с отличием закончила энергетический факультет Ленинградского института инженеров железнодорожного транспорта. В 1953 году она защитила кандидатскую диссертацию и в 1966 году докторскую диссертацию. Заслуженный деятель науки и техники Российской Федерации, почетный член Электротехнической академии России проф. Глазенко Т.А. двадцать пять лет возглавляла кафедру. Она являлась видным, творчески активным ученым, автором более 200 опубликованных научных работ.

В 1990 году на должность заведующего кафедрой избирается проф., д.т.н. Герман - Галкин С.Г.

В 1996 году кафедра «Электротехники» была переименована в кафедру «Электротехники и прецизионных электромеханических систем».

С 1991 года кафедрой руководит доцент кандидат технических наук Томасов Валентин Сергеевич.

Сегодня в составе кафедры: заслуженный деятель науки и техники Российской Федерации, действительный член Международной Энергетической академии, профессор, д.т.н. Сабинин Ю.А., проф., д.т.н. Овчинников И.Е., доц., к.т.н. Толмачев В.А., доц., к.т.н. Губанов Н.Н., доц., к.т.н. Кротенко В.В., доцент, к.т.н. Кардонов Г.А., доц., к.т.н. Осипов Ю.М., доц., к.т.н. Петров Е.А., доцент, к.т.н. Сеницын В.А., доц., к.т.н. Усольцев А.А., доцент, к.т.н. Шалин В.М., доцент, к.т.н. Соловьев В.И. доц. Гурьянов В.А., ст. преп., к.т.н., Махин И.Е., асс. Денисов К.М. асс., к.т.н. Денисова А.В., асс. Осипов Д.В., ассистент Никитина М.В., асс. Серебряков С. А., ассистент Борисов П.А., асс. Лукичев Д.В., асс. Жданов И.Н.

Евгений Алексеевич Петров

**АНАЛИЗ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЕЙ
НЕСИНУСОИДАЛЬНОГО ПЕРИОДИЧЕСКОГО ТОКА**

Учебное пособие по курсам электротехники и ТОЭ

В авторской редакции
Компьютерная верстка и дизайн

Е. А. Петров

Зав. редакционно-издательским отделом
Лицензия ИД № 00408 от 5.11.99
Подписано к печати

Н. Ф. Гусарова

Отпечатано на ризографе. Тираж экз. Заказ №

Редакционно-издательский отдел
Санкт-Петербургского государственного
университета информационных технологий,
механики и оптики
197101, Санкт-Петербург, ул. Саблинская, 14

