Федеральное агентство по образованию
Российский государственный профессионально-педагогический университет
Инженерно-педагогический институт
Кафедра общей электротехники

Теоретические основы электротехники

Задания и методические указания к контрольным работам для студентов всех форм обучения
(ГОС-2000)

Екатеринбург
2006

Теоретические основы электротехники. Задания и методические указания к контрольным работам для студентов всех форм обучения (ГОС-2000). – Екатеринбург, рос. гос. проф.-пед. ун-т, 2007. – 15 с.

Составители: доктор, физико-математических наук, профессор О.И.Клюшников
кандидат физико-математических наук, доцент Б.М.Смоляк
старший преподаватель А.В.Степанов

Контрольные задания и методические указания по их выполнению предназначены для закрепления и проверки знаний студентов при самостоятельной работе по дисциплине «Теоретические основы электротехники», включают задачи по разделу «Несинусоидальные токи в линейных цепях».

Контрольные задания предназначены для специализаций (специальностей):

030501.19 – Электроэнергетика

030502.19 – Компьютеры и информационные технологии обучения в энергетике

030503.19 – Электротехника, электротехнологии и технологический менеджмент

030504.19 – Электроэнергетика, энергоаудит, энергосбережение

140610.65(180400) – Электропривод и автоматика промышленных установок и технологических комплексов

140610.65(181300) – Электрооборудование и электрохозяйство предприятий, организаций и учреждений

Одобрены на заседании кафедры общей электротехники
Протокол от 14.12.06 № 8

Рекомендована к печати методической комиссией электроэнергетического факультета ИПИ РГППУ. Протокол от 22.01.07 № 5.

Председатель методической
комиссии ЭЭФ ИПИ РГППУ В.Ф. Журавлев

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ К ВЫПОЛНЕНИЮ КОНТРОЛЬНЫХ ЗАДАНИЙ

При изучении курса ТОЭ студенты приобретают необходимые знания об основных методах расчета и физических процессах, происходящих в электрических цепях и электромагнитных полях.

Одним из основных видов занятий является выполнение контрольных заданий.

К представленным на проверку контрольным заданиям предъявляются следующие требования:

1.Основные положения решения должны быть достаточно подробно пояснены.

2.Рисунки, графики, схемы, в том числе и заданные условием задачи, должны быть выполнены аккуратно и в удобочитаемом масштабе.

3.В тетради следует оставлять поля шириной не менее 4 см для замечаний преподавателя.

4.Вычисления должны быть сделаны с точностью до третьей значащей цифры.

5.Контрольные задания должны быть датированы и подписаны студентом.

6.Незачтенное контрольное задание должно быть выполнено заново и представлено на повторную проверку вместе с первоначальной работой и замечаниями преподавателя. Исправления ошибок в ранее проверенном тексте не допускаются. Если неправильно выполнена не вся работа, а только часть ее, то переработанный и исправленный текст следует записать в тетради после первоначального текста под заголовком «Исправление ошибок».

Контрольные задания зачитываются, если решения не содержат ошибок принципиального характера и выполнены все перечисленные требования.

Работа над контрольным заданием помогает студентам проверить степень усвоения ими курса, вырабатывает у них навык четко и кратко излагать свои мысли. Для успешного достижения этой цели необходимо руководствоваться следующими правилами:

1.Начиная решение задачи, указать, какие физические законы или расчетные методы предполагается использовать при решении, привести математическую запись этих законов и методов.

2.Тщательно продумать, какие буквенные или цифровые обозначения предполагается использовать в решении. Пояснить значение каждого обозначения.

3.В ходе решения задачи не следует изменять однажды принятые направления токов и наименования узлов, сопротивлений, а также обозначения, заданные условием.

4.Расчет каждой определяемой величины следует выполнить сначала в общем виде, а затем в полученную формулу подставить числовые значения и привести окончательный результат с указанием единиц измерения.

5.Для элементов электрических схем следует пользоваться обозначениями, применяемыми в учебниках по ТОЭ.

6.Каждому этапу решения задачи нужно давать пояснения.

7.При выполнении задания на титульном листе, указать фамилию, имя, отчество, номер группы, вариант. Вариант выбирается студентом по двум последним цифрам зачетной книжки. Если две последние цифры более 50 (например 62), то Ваш номер варианта определяется по правилу: две последние цифры –50, т.е. (62-50)=12 (вариант 12).

1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

Часто форма изменения во времени функции (ЭДС, напряжений, токов) отличается от синусоидальной. Такие ЭДС, напряжения или токи называются несинусоидальными. Они могут быть периодическими и непериодическими.

Для расчета и анализа явлений, происходящих в линейных электрических цепях при периодических несинусоидальных ЭДС, напряжениях и токах, используют разложение их в тригонометрический ряд Фурье и принцип наложения.

Запись периодического несинусоидального напряжения источника энергии рядом Фурье дает возможность представить несинусоидальную функцию в виде суммы составляющих: постоянной (в общем случае) и переменных (гармонических). Это позволяет заменить расчет линейной электрической цепи с несинусоидальными напряжениями и токами расчетом постоянной и синусоидальных составляющих.

Любую периодическую функцию $f(t)$ можно представить в виде

$$f(t) = f(t+T) = ... = f(t+kT) = ... \, , \quad (1)$$

где T – период изменения функции;

k – порядковый номер (целые числа, начиная с единицы).

Периодическая несинусоидальная функция $f(wt)$, может быть разложена в синусоидальный ряд

$$f(wt) = A_0 + A_{1m}\sin(wt+\psi_1) + A_{2m}\sin(2wt+\psi_2) + A_{3m}\sin(3wt+\psi_3) + ... + A_{km}\sin(kwt+\psi_k) + ... \, , \quad (2)$$

где A_0 - постоянная составляющая;

$A_{1m}\sin(wt+\psi_1)$ - первая гармоника, у которой период T_1 равен периоду T функции $f(wt)$, она называется основной гармоникой;

$A_{km}\sin(kwt+\psi_k)$ - высшие гармоники, начиная со второй гармоники;

$w = w_1$ - основная (первая) угловая частота;

A_{km} - амплитуда k-й гармоники;

ψ_k - начальная фаза k-й гармоники.

Теоретически ряд Фурье содержит бесконечное число слагаемых, но так как он быстро сходится, то практически ограничиваются небольшим числом гармоник.

В зависимости от формы несинусоидальной функции и ее расположения относительно осей и начала координат ряд Фурье, в который разложена функция, состоит из тех или иных составляющих (постоянной, нечетных и четных, синусоидальных и косинусоидальных). Отсутствие или наличие их определяется некоторыми свойствами периодических несинусоидальных кривых, обладающих симметрией.

2. АНАЛИЗ И РАСЧЕТ ЛИНЕЙНЫХ ЭЛИКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЕЙ ПРИ НЕСИНУСОИДАЛЬНОМ НАПРЯЖЕНИИ ИСТОЧНИКА ПИТАНИЯ

Запись периодического несинусоидального напряжения источника энергии рядом Фурье дает возможность представить его несколькими последовательно соединенными и одновременно действующими источниками ЭДС или напряжений и осуществлять анализ электрического состояния цепей на основе метода наложения.

Мгновенное значение тока в любой ветви линейной электрической цепи, согласно принципу наложения, равно сумме мгновенных значений токов в этой ветви, возникших под действием постоянных и гармонических составляющих напряжений источников электрической энергии. Постоянную и гармонические составляющие тока вычисляют по законам линейных электрических цепей соответственно постоянного и переменного тока.

При расчете токов в ветвях и падений напряжений на участках цепи, возникших от действия постоянной составляющей напряжения, необходимо иметь ввиду, что постоянный ток через конденсатор С не проходит (емкостное сопротивление $\frac{1}{wc} = \frac{1}{0 \cdot c} = \infty$), падение напряжения на зажимах индуктивности L при постоянном толе равно нулю (индуктивное сопротивление $wL = 0 \cdot L = 0$).

При расчете токов и падений напряжений, возникших от действия гармонических составляющих напряжения, можно считать, активное сопротивление r резистора не зависит от частоты, а индуктивное kwL и емкостное $\frac{1}{kwc}$ сопротивления соответственно растет и убывает пропорционально номеру k гармоники.

При расчете более высших гармоник необходимо производить перерасчет значений x_L и x_C, так как они зависят от частоты (рис.1):

$$x_{Lk} = kwL; \; x_{Ck} = \frac{1}{kwC}.$$

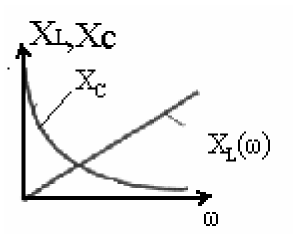


Рис.1. Частотные характеристики индуктивного и емкостного элементов

Расчет периодических несинусоидальных токов и напряжений производится обычно комплексным методом. Однако, рассчитывать комплексным методом, строить векторные диаграммы можно только для каждой гармоники в отдельности, так как для различных гармоник частоты вращения векторов различны.

При определении гармонических составляющих токов и падений напряжений надо знать их амплитуды и начальные фазы. Поэтому при расчете токов вычисляют комплексные амплитуды этих составляющих, содержащие модули амплитуд и начальные фазы.

3. ДЕЙСТВУЮЩИЕ И СРЕДНИЕ ЗНАЧЕНИЯ ПЕРИОДИЧЕСКИХ НЕСИНУСОИДАЛЬНЫХ ТОКОВ, НАПРЯЖЕНИЙ, ЭДС

При расчете полной мощности S невозможен учет начальных фаз отдельных составляющих, поэтому используют действующее значение тока и напряжения этих составляющих. Действующее значение любой периодически изменяющейся функции, например, тока, определяется как

$$I = \sqrt{\frac{1}{T}\int_0^T i^2 dt}\,. \tag{3}$$

Пусть ток

$$i = I_0 + I_{1m}\sin(wt+\psi_1) + I_{2m}\sin(2wt+\psi_2) + ... + I_{km}\sin(kwt+\psi_k) + ...$$

Тогда, подставив его значение в формулу (2), получим

$$I = \sqrt{I_0^2 + I_1^2 + I_2^2 + ... + I_k^2 + ...} \tag{4}$$

Аналогично

$$U = \sqrt{U_0^2 + U_1^2 + U_2^2 + ... + U_k^2 + ...} \text{ (4);} \quad E = \sqrt{E_0^2 + E_1^2 + E_2^2 + ... + E_k^2 + ...}\,. \tag{5}$$

Следовательно, действующее значение несинусоидального тока, напряжения, ЭДС равно корню квадратному из суммы квадратов постоянной составляющей и действующих значений всех гармоник, зависящих только от амплитуд и не зависящих от начальных фаз φ_k.

Действующие значения тока и напряжения (или ЭДС) можно измерить амперметром и вольтметром электромагнитной, электродинамической и тепловой систем.

4. МОЩНОСТИ ПРИ ПЕРИОДИЧЕСКИХ НЕСИНУСОИДАЛЬНЫХ НАПРЯЖЕНИЯХ И ТОКАХ

Пусть к цепи приложено периодическое несинусоидальное напряжение в виде следующего ряда Фурье:

$$u = U_0 + U_{1m}\sin(wt+\psi_{u_1}) + ... + U_{km}\sin(kwt+\psi_{u_k}) + ...,$$

и в цепи протекает ток

$$i = I_0 + I_{1m}\sin(wt+\psi_{i_1}) + ... + I_{km}\sin(kwt+\psi_{i_k}) + ...$$

Тогда мгновенное значение мощности (полная мощность):

$$S = u \cdot i = \left[U_0 + U_{1m}\sin(wt+\psi_{u_1}) + ... + U_{km}\sin(kwt+\psi_{u_k}) + ...\right] *$$

$$* \left[I_0 + I_{1m}\sin(wt+\psi_{i_1}) + ... + I_{km}\sin(kwt+\psi_{i_k}) + ...\right]. \tag{6}$$

Полная мощность S равна сумме активной (P) и реактивной (Q) составляющих. Под активной мощностью P несинусоидального тока понимают среднее значение мгновенной (S) мощности за период первой гармоники.

Активная мощность, потребляемая цепью, может быть найдена как средняя мощность за период

$$P = \frac{1}{T}\int_0^T S dt\,. \tag{7}$$

Подставив значение мгновенной мощности P из уравнения (6) в формулу (7), получим активную мощность несинусоидального тока, потребляемую цепью:

$$P = U_0 I_0 + \sum_{k=1}^{k=\infty} U_k I_k \cos\varphi_k\,, \tag{8}$$

где $\varphi_k = (\psi_{u_k}) - (\psi_{i_k})$ - угол сдвига по фазе тока относительно напряжения для k-й гармоники.

Следовательно, активная мощность P при несинусоидальных напряжениях и токах равна сумме активных мощностей постоянной и всех гармонических составляющих напряжения и тока (постоянная составляющая рассматривается как нулевая гармоника с $\varphi_0 = 0$).

По аналогии с понятием реактивной мощности Q при синусоидальной токе, в цепи с несинусоидальным током можно формально ввести понятие реактивной мощности, определяемой как сумма реактивных мощностей отдельных гармоник.

$$Q = \sum_{k=1}^{k=\infty} U_k I_k \sin\varphi_k . \tag{9}$$

Полная мощность

$$S = UI = \sqrt{\left(U_0^2 + U_I^2 + \ldots + U_k^2 + \ldots\right)\cdot\left(I_0^2 + I_I^2 + \ldots + I_k^2\right)} = \sqrt{\sum_{k=1}^{k=\infty} U_k^2 \cdot \sum_{k=1}^{k=\infty} I_k^2} \tag{10}$$

Наличие в одной из кривых (например напряжения) высших гармоник, отсутствующих в другой кривой (в данном случае тока), с одной стороны, не отражается на величинах активной P и реактивной Q мощностей, а с другой стороны, увеличивает полную S мощность, согласно формуле (10), так как увеличивается действующее значение той функции (в данном случае напряжения), которая содержит эти гармоники. Поэтому в отличии от синусоидального режима, когда $S^2 = P^2 + Q^2$, в цепи с несинусоидальными напряжениями и токами $S^2 > P^2 + Q^2$ или $S^2 = P^2 + Q^2 + T^2$.

Величина:

$$T = \sqrt{S^2 - P^2 - Q^2} \tag{11}$$

называется мощностью искажения, поскольку она характеризует степень различия в формах кривых напряжения $u(wt)$ и тока $i(wt)$, возникающей за счет реактивных сопротивлений kwL и $\frac{1}{kwC}$.

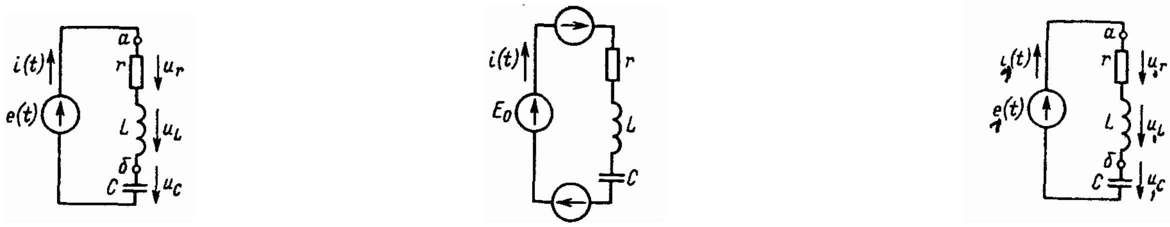
При периодических несинусоидальных напряжениях и токах, по аналогии с синусоидальными, вводят понятие о коэффициенте мощности, обозначая его (в отличие от $\cos\varphi$) через λ.

$$\lambda = \frac{P}{S} = \frac{P}{UI} = \frac{\sum_{k=1}^{k=\infty} P_k}{\sqrt{\sum_{k=1}^{k=\infty} U_k^2} \cdot \sqrt{\sum_{k=1}^{k=\infty} I_k^2}} . \tag{12}$$

В общем случае, когда кривые напряжения $u(wt)$ и тока $i(wt)$ не совпадают по форме, то величина $\lambda < 1$. Если же эти кривые совпадают по форме, то есть подобные (случай, когда цепь содержит только активные резисторы), то мощность искажения $T = 0$ и величина $\lambda = 1$. Если напряжение и ток изменяются по гармоническому закону (отсутствует постоянная и высшие составляющие- гармоники, начиная со второй), то коэффициент мощности $\lambda = \cos\varphi$.

5. ПРЕДСТАВЛЕНИЕ ЛИНЕЙНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЕЙ ПРИ НЕСИНУСОИДАЛЬНОМ НАПРЯЖЕНИИ ИСТОЧНИКА ПИТАНИЯ

а) б) $e_1 = E_{m1}\sin\omega t$ в)



$e_2 = E_{m2}\sin 2\omega t$

Рис.2. Электрическая цепь:
а - с источником несинусоидальной ЭДС, б – схема замещения, в – схема замещения с одной ЭДС (e_1)

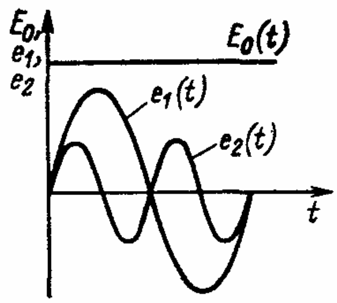


Рис.3. Временные диаграммы ЭДС источников

В качестве примера анализа рассмотрим электрическую цепь рис.2. а, в которой источник с несинусоидальной ЭДС можно представить в виде 3-х составляющих

$$e(t) = E_0 + E_{1m}\sin wt + E_{2m}\sin 2wt$$

подключены последовательно резистивный, индуктивный и емкостный элементы.

С учетом вышесказанного в рассматриваемой электрической цепи ЭДС $e(t)$ может быть представлена тремя ЭДС (рис. 2. б). Графики $E_0(t)$, а также $e_1(t)$ и $e_2(t)$ изображены на рис 3. В соответствии с методом наложения данная электрическая цепь рассчитывается как цепь, в которой действуют три независимые ЭДС. При этом определение тока и напряжений от ЭДС E_0 осуществляется, как при расчете цепей постоянного тока, а от ЭДС e_1 и e_2 - как при расчете цепей синусоидального тока от одной ЭДС, рис.2. в.

6. РАСЧЕТ ЛИНЕЙНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЕЙ ПРИ ПЕРИОДИЧЕСКИХ НЕСИНУСОИДАЛЬНЫХ НАПРЯЖЕНИЯХ И ТОКАХ С ПОДРОБНЫМИ РЕШЕНИЯМИ

ЗАДАЧА

К электрической цепи (рис. 4.) приложено напряжение u(ωt), изображенное на рис.5., с частотой первой гармоники f=50 Гц. Параметры цепи: r=15 Ом, L=60 мГн., С=80 мкФ.

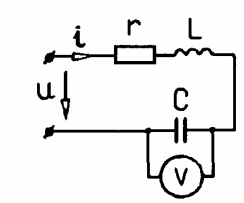


Рис.4. Электрическая цепь с несинусоидальным напряжением

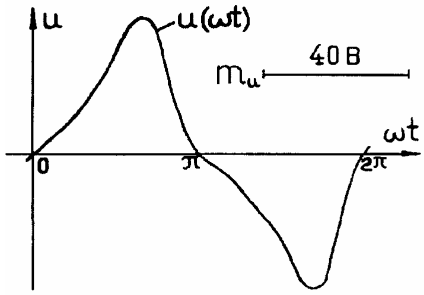


Рис.5. Диаграмма несинусоидального напряжения

Определить мгновенное значение тока I в цепи; действующие значения приложенного к цепи напряжения U и тока I; активную мощность P, потребляемую цепью, реактивную Q и полную S мощности, мощность искажения T и коэффициент мощности λ; показание вольтметра U_V электромагнитной системы, подключенного на зажимы конденсатора.

Решение.

Предварительно разложим в тригонометрический ряд Фурье заданную периодическую несинусоидальную функцию напряжения u(ωt), либо возьмем данные по составляющим, с учетом рисунка, из справочника. В результате разложения, с учетом данных рисунка, получим

$U=31{,}5\sin(wt-16°)+8{,}66\sin(3wt+88°)+2{,}58\sin(5wt+170°)$В.

В анализируемой электрической цепи постоянная составляющая ЭДС E_o отсутствует и не вызывает установившегося тока, так как сопротивление емкостного элемента при постоянном токе равно ∞.

Расчет **постоянной** составляющей тока $I_{(0)}$*.

Поскольку кривая приложенного напряжения u(ωt) не содержит постоянной составляющей, то и постоянной составляющей тока $I_{(0)}$ также нет.

*В дальнейшем, чтобы не было путаницы в индексах составляющих и ветвей при решении задач, индексы и постоянной (нулевой), и переменных (гармонических) составляющих обозначены в скобках, то есть (0), (1), (3), (5).

Расчет для **первой** гармоники

Определим комплексные сопротивления току первой гармоники

R=15 Ом; $X_{L(1)}=j\omega L=j2\pi fL=j314\cdot 60\cdot 10^{-3}=j18{,}84$ Ом;

$X_{C(1)}=-j\dfrac{1}{\omega c}=-j\dfrac{1}{314\cdot 80\cdot 10^{-6}}=-j39{,}8$ Ом;

$Z_{цепи(1)}=r+j(\omega L-\dfrac{1}{\omega c})=15+j(18{,}84-39{,}8)=15-j20{,}96=25{,}774\,e^{-j54^0 25'}$ Ом$=|Z|e^{-j\varphi(1)}$,

$\varphi_{(1)}=\arccos\dfrac{r}{|Z|}$, $|Z|=\sqrt{r^2+(\omega L-\dfrac{1}{\omega c})^2}$.

Определим комплексную амплитуду тока первой гармоники, выразив U_1 через комплекс $U_{m(1)}=31{,}5\ e^{-j16}$

$I_{m(1)}=\dfrac{U_{m(1)}}{Z_{цепи\,(1)}}=\dfrac{31{,}5e^{-j16^0}}{25{,}774e^{-j54^0 25'}}=1{,}222e^{j38^0 25'}$ А.

Проверка по второму закону Кирхгофа для первой гармоники

$$\dot{U}_{m(1)} = \dot{U}_{rm(1)} + \dot{U}_{Lm(1)} + \dot{U}_{cm(1)} = r\dot{I}_{m(1)} + j\omega L\dot{I}_{m(1)} - j\frac{1}{\omega c}\dot{I}_{m(1)}.$$

Подставив вычисленные комплексные сопротивления и ток, получим

$$\dot{U}_{m(1)} = 31{,}438e^{-j15^0 38^/} \approx 31{,}5e^{-j16^0} \text{ В}.$$

Расчет для **третьей** гармоники

Определим комплексные сопротивления току третьей гармоники

r=15Ом; $X_{L(3)}$=j3ωL=j3·18,84=j56,52Ом; $X_{c(3)}=-j\frac{1}{3\omega ñ}=-j\frac{39{,}8}{3}=-j13{,}267$Ом;

$Z_{цепи(3)}=r+j(3\omega L-\frac{1}{3\omega ñ})=15+j(56{,}52-13{,}267)=15+j43{,}253=j45{,}78\,e^{j70^0 52^/}$ Ом.

Определим комплексную амплитуду тока третьей гармоники

$$\dot{I}_{m(3)} = \frac{\dot{U}_{m(3)}}{Z_{öåïè\,(3)}} = \frac{8{,}66e^{j88^0}}{45{,}78e^{j70^0 52^/}} = 0{,}189e^{j17^0 08^/} \text{ А}.$$

Проверка по второму закону Кирхгофа для третьей гармоники

$$\dot{U}_{m(3)} = \dot{U}_{rm(3)} + \dot{U}_{Lm(3)} + \dot{U}_{cm(3)} = r\dot{I}_{m(3)} + j3\omega L\dot{I}_{m(3)} - j\frac{1}{3\omega c}\dot{I}_{m(3)}.$$

Подставив вычисленные комплексные сопротивления и ток, получим

$$\dot{U}_{m(3)} = 8{,}6e^{j87^0 53^/} \approx 8{,}6e^{j88^0} \text{ В}.$$

Расчет для **пятой** гармоники

Определим комплексные сопротивления току пятой гармоники

R=15 Ом; $X_{L(5)}$=j5ωL=j5·18,84=j94,2 Ом; $X_{c(5)}=-j\frac{1}{5\omega ñ}=-j\frac{39{,}8}{5}=-j7{,}96$ Ом; $Z_{цепи(5)}=r+j(5\omega L-\frac{1}{5\omega ñ})=15+j(94{,}2-7{,}96)=j15+j86{,}24=87{,}535\,e^{j80^0 08^/}$ Ом.

Определим комплексную амплитуду тока пятой гармоники

$$\dot{I}_{m(5)} = \frac{\dot{U}_{m(5)}}{Z_{öåïè\,(5)}} = \frac{2{,}58e^{j170^0}}{87{,}535e^{j80^0 08^/}} = 0{,}029e^{j89^0 52^/} \text{ А}.$$

Проверка по второму закону Кирхгофа для пятой гармоники

$$\dot{U}_{m(5)} = \dot{U}_{rm(5)} - \dot{U}_{Lm(5)} - \dot{U}_{cm(5)} = r\dot{I}_{m(5)} - j5\omega L\dot{I}_{m(5)} - j\frac{1}{5\omega c}\dot{I}_{m(5)}.$$

Подставив вычисленные комплексные сопротивления и ток, получим

$$\dot{U}_{m(5)} = 2{,}539e^{j170^0} \approx 2{,}54e^{j170^0} \text{ В}.$$

Мгновенное значение тока в цепи определим как сумму мгновенных значений токов отдельных гармоник

$i=i_{(1)}+i_{(3)}+i_{(5)}=I_{m(1)}\sin(\omega t+\psi_{(1)})+I_{m(3)}\sin(3\omega t+\psi_{i(3)})+I_{m(5)}\sin(5\omega t+\psi_{i(5)})=1{,}222\sin(\omega t+38°25^/)+0{,}189\sin(3\omega t+17°08^/)+0{,}029\sin(5\omega t+89°52^/)$ А.

Определим действующее значение U приложенного к цепи напряжения U(t) согласно формуле (4).

Предварительно определим величины напряжений действующих значений отдельных гармоник

$$U_{(1)} = \frac{U_{m(1)}}{\sqrt{2}} = \frac{31{,}5}{\sqrt{2}} = 22{,}274 \text{ В};\ U_{(3)}\frac{U_{m(3)}}{\sqrt{2}} = \frac{8{,}66}{\sqrt{2}} = 6{,}124 \text{ В};\ U_{(5)} = \frac{U_{m(5)}}{\sqrt{2}} = \frac{2{,}58}{\sqrt{2}} = 1{,}824 \text{ В}.$$

Тогда

$$U = \sqrt{22{,}274^2 + 6{,}124^2 + 1{,}824^2} = 23{,}172 \text{ В}.$$

Определим действующее значение тока в цепи, для этого предварительно определим действующие значения токов отдельных гармоник

$$I_{(1)}=\frac{I_{m(1)}}{\sqrt{2}}=\frac{1{,}222}{\sqrt{2}}=0{,}864\,\text{А};\ I_{(3)}=\frac{I_{m(3)}}{\sqrt{2}}=\frac{0{,}189}{\sqrt{2}}=0{,}134\,\text{А};\ I_{(5)}=\frac{I_{m(5)}}{\sqrt{2}}=\frac{0{,}029}{\sqrt{2}}=0{,}021\,\text{А},$$

Тогда

$$I=\sqrt{0{,}864^2+0{,}134^2+0{,}029^2}=0{,}874\,\text{А}.$$

Определим активную P, реактивную Q и полную S мощности, мощность искажения T и коэффициент мощности λ согласно формулам (8), (10), (11), (12)

Предварительно определим углы сдвига фаз $\varphi_{(к)}$, $\cos\varphi_{(к)}$, $\sin\varphi_{(к)}$; активные $P_{(к)}$, реактивные $Q_{(к)}$ мощности отдельных гармоник.

Углы сдвига фаз $\varphi_{(1)}$, $\varphi_{(3)}$ и $\varphi_{(5)}$ известны из вычислительных комплексов сопротивлений $Z_{цепи(1)}$, $Z_{цепи(3)}$ и $Z_{цепи(5)}$, а именно $\varphi_{(1)}=-54°25'$, $\varphi_{(3)}=70°52'$ и $\varphi_{(5)}=80°08'$. Следовательно, $\cos\varphi_{(1)}=0{,}5819$, $\sin\varphi_{(1)}=-0{,}8133$, $\cos\varphi_{(3)}=0{,}3277$, $\sin\varphi_{(3)}=0{,}9447$, $\cos\varphi_{(5)}=0{,}1713$ и $\sin\varphi_{(5)}=0{,}9852$.

$P_{(1)}=U_{(1)}I_{(1)}\cos\varphi_{(1)}=22{,}274\cdot0{,}864\cdot0{,}5819=11{,}199$ Вт;

$P_{(3)}=U_{(3)}I_{(3)}\cos\varphi_{(3)}=6{,}124\cdot0{,}134\cdot0{,}3277=0{,}269$ Вт;

$P_{(5)}=U_{(5)}I_{(5)}\cos\varphi_{(5)}=1{,}824\cdot0{,}021\cdot0{,}1731=0{,}007$ Вт.

$Q_{(1)}=U_{(1)}I_{(1)}\sin\varphi_{(1)}=22{,}274\cdot0{,}864(-0{,}8133)=-15{,}652$ вар;

$Q_{(3)}=U_{(3)}I_{(3)}\sin\varphi_{(3)}=6{,}124\cdot0{,}134\cdot0{,}9447=0{,}775$ вар;

$Q_{(5)}=U_{(5)}I_{(5)}\sin\varphi_{(5)}=1{,}824\cdot0{,}021\cdot0{,}9852=0{,}038$ вар.

Активная мощность, потребляемая цепью

$P=P_{(1)}+P_{(3)}+P_{(5)}=11{,}199+0{,}269+0{,}007=11{,}475\approx11{,}5$ Вт.

Проверка

Мощность потерь P_r определим по закону Джоуля-Ленца

$P_r=P_{r(1)}+P_{r(3)}+P_{r(5)}=rI_{(1)}^2+rI_{(3)}^2+rI_{(5)}^2=15\cdot0{,}864^2+15\cdot0{,}134^2+15\cdot0{,}021^2=11{,}197+0{,}269+0{,}007=11{,}473\approx$ 11,5 Вт.

Реактивная мощность

$Q=Q_{(1)}+Q_{(3)}+Q_{(5)}=-15{,}652+0{,}775+0{,}038=-14{,}839\approx-14{,}8$ вар.

Проверка

$$Q=Q_{(1)}+Q_{(3)}+Q_{(5)}=(\omega L-\frac{1}{\omega\tilde{n}})I_{(1)}^2+(3\omega L-\frac{1}{\omega\tilde{n}})I_{(3)}^2+(5\omega L-\frac{1}{5\omega\tilde{n}})I_{(5)}^2.$$

Подставив вычисленные комплексные сопротивления и токи, получим

$Q=-14{,}832\approx-14{,}8$ вар.

Знак «минус» у реактивной мощности для первой гармоники $Q_{(1)}$ объясняется тем, что емкостное сопротивление $x_{c(1)}=\frac{1}{\omega\tilde{n}}=39{,}8$ Ом преобладает над индуктивным сопротивлением $x_{L(1)}=\omega L=18{,}84$ Ом.

Полная мощность

$\underline{S}=\underline{UI}=23{,}172\cdot0{,}874=20{,}252\approx20{,}3$ В·А.

Мощность искажения

$$T=\sqrt{S^2-P^2-Q^2}=\sqrt{20{,}252^2-11{,}475^2-14{,}839^2}=7{,}634\approx7{,}6\ \text{В·А}.$$

Коэффициент мощности

$$\lambda=\frac{P}{S}=\frac{11{,}475}{20{,}252}=0{,}567\,.$$

Показание вольтметра, подключенного к зажимам емкости C, равно действующему значению напряжения на ее зажимах, то есть

$U_c=\sqrt{U_{c(1)}^2+U_{c(3)}^2+U_{c(5)}^2}$, где

$$U_{c(1)} = \frac{U_{cm(1)}}{\sqrt{2}} = \frac{\frac{1}{\omega c} I_{cm(1)}}{\sqrt{2}} = \frac{39{,}8 \cdot 1{,}222}{\sqrt{2}} = 34{,}39 \text{ В};$$

$$U_{c(3)} = \frac{U_{cm(3)}}{\sqrt{2}} = \frac{\frac{1}{3\omega c} I_{cm(3)}}{\sqrt{2}} = \frac{13{,}267 \cdot 0{,}189}{\sqrt{2}} = 1{,}773 \text{ В};$$

$$U_{c(5)} = \frac{U_{cm(5)}}{\sqrt{2}} = \frac{\frac{1}{5\omega c} I_{cm(5)}}{\sqrt{2}} = \frac{7{,}96 \cdot 0{,}029}{\sqrt{2}} = 0{,}163 \text{ В}.$$

Тогда

$$U_c = \sqrt{34{,}39^2 + 1{,}773^2 + 0{,}163^2} = 34{,}436 \text{ В}.$$

Следовательно, вольтметр покажет напряжение $U_V \approx 34{,}4$ В.

ЗАДАНИЕ

Для электрической схемы, изображенной на рис.6. и соответствующего номера варианта выбранного из таблицы заданий выполнить следующее:

1.Использоввать метод преобразования заменить исходную схему на эквивалентную схему, удобную для расчета.

2.Для решения задачи применить метод наложения, используя для получения ответов комплексный метод решения.

Определить

1.Мгновенное значение токов i(t) в ветвях цепи ( ).

2.Действующие значения приложенного к цепи напряжения U_0 и тока I_0.

3.Активную мощность P, потребляемую цепью.

4.Реактивную мощность Q, созданную в цепи.

5.Полную мощность S, потребляемую от источника.

6.Мощность искажения T, создаваемую высшими гармониками.

7.Коэффициент мощности λ цепи.

8.Показания вольтметра U_V (электромагнитной системы) на элементе, к которому он подключен.

Схема

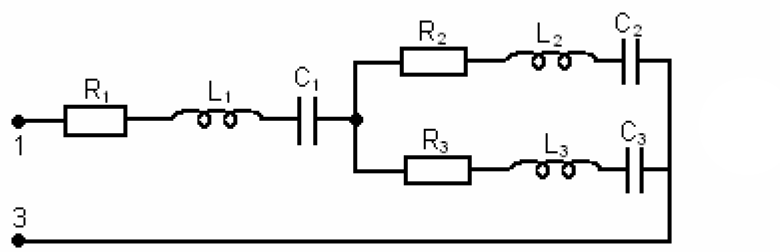


Рис.6. Электрическая схема для контрольного задания

Пользование схемой. По данным варианта, взятым из таблицы, находим число отсутствующих в схеме элементов. Например, вариант 1 имеет в составе R_1,L_1,R_2,L_2,R_3,C_2,L_3. Отсутствуют C_1 и C_2 (равны 0). Это означает, что в схеме рис.5 C_1 и C_3 замкнуты накоротко. Ставшаяся часть является схемой для расчета варианта 1.

Таблица заданий

Вариант №	Заданное напряжение	Сопротивление участков электрической цепи								
		R_1, Ом	L_1, мГн	C_1, мкФ	R_2, Ом	L_2, мГн	C_2, мкФ	R_3, Ом	L_3, мГн	C_3, мкФ
1	U(t)=40+60sinwt+ +50sin(3wt-60)	20	40	0	10	20	50	40	80	0
2		10	50	0	50	30	80	30	20	0
3		30	70	0	30	60	100	20	60	0
4		50	60	0	40	100	120	80	40	0
5		40	30	0	20	40	60	60	80	0
6		10	20	0	60	80	40	20	100	0
7		60	40	0	80	60	80	40	30	0
8		40	80	0	40	20	60	30	60	0
9		20	40	0	20	40	20	50	20	0
10		30	60	0	30	50	120	10	40	0
11	U(t)=30+40sinwt+ +80sin(5wt-30)	50	100	0	60	40	0	20	50	50
12		10	20	0	80	20	0	10	40	80
13		30	60	0	40	60	0	30	20	100
14		20	40	0	20	30	0	50	60	60
15		40	80	0	30	100	0	40	80	120
16		80	40	0	10	80	0	10	40	40
17		60	30	0	50	40	0	60	100	20
18		30	60	0	30	60	0	40	60	60
19		10	20	0	40	20	0	20	30	80
20		50	100	0	20	80	0	30	20	50
21	U(t)=20+30sinwt+ +60sin(3wt-90)	10	40	50	30	100	80	30	100	0
22		50	20	80	20	20	50	20	20	0
23		30	60	100	40	60	60	40	60	0
24		40	30	120	80	40	20	80	30	0
25		20	100	60	60	80	40	10	120	0
26		60	80	40	20	30	120	50	20	0
27		80	40	80	80	40	60	30	60	0
28		40	60	60	30	60	100	40	40	0
29		20	20	20	50	20	80	20	80	0
30		30	80	120	10	10	50	60	30	0
31	U(t)=40+20sin(wt-30)+ +40sin5wt	0	20	80	20	80	0	30	100	60
32		0	40	50	10	60	0	20	20	40
33		0	80	60	30	20	0	40	60	80
34		0	60	20	50	40	0	80	40	120
35		0	30	40	40	50	0	60	80	100
36		0	40	120	60	40	0	10	40	80
37		0	50	60	10	100	0	50	30	60
38		0	70	100	40	60	0	30	60	40
39		0	60	80	20	30	0	80	20	30
40		0	80	50	30	20	0	20	100	20
41	U(t)=60+40sin(wt-60)+ +20sin(5wt-30)	60	60	60	0	120	40	10	30	0
42		40	80	50	0	100	20	30	40	0
43		20	40	80	0	80	60	50	80	0
44		30	20	120	0	60	80	20	60	0
45		10	100	40	0	40	50	40	40	0
46		40	30	20	0	20	60	80	20	0
47		50	60	50	0	10	100	60	100	0
48		30	10	100	0	60	120	40	10	0
49		10	40	80	0	100	80	20	60	0
50		20	20	60	0	40	50	60	20	0

7. УЧЕБНО_МЕТОДИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ДИСЦИПЛИНЫ

1. Рекомендуемая литература.

а) основная литература:

1. *Бессонов Л.А.* Теоретические основы электротехники. Электрические цепи: Учеб. для электротехн., энерг., приборостр. спец. вузов, 10-е изд., перераб. и доп. – М.: Высш. шк., 2003. - 612 с.: ил.

б) дополнительная литература:

2. *Бессонов Л.А.* Теоретические основы электротехники. Электромагнитное поле: Учеб. для электротехн., энерг., приборостр. спец. вузов, 9-е изд., перераб. и доп. –М.: Высш. шк., 2002.- 638 с.: ил.
3. *Демирчян К.С., Бутырин П.А.*. Моделирование и машинный расчет электрических цепей: Учеб. пособие для электр. и электроэнерг. спец. вузов. М.: Высш. шк., 1988. 335 с.: ил.
4. Комплексный метод расчета электрических цепей: Метод. указания / Екатеринбург: Урал. гос. проф.пед. ун-т, 1994. 84 с.
5. *Нейман Л.Р.,. Демирчян К.С.* Теоретические основы электротехники: Учеб. для вузов: в 2 т. Т.1. 3-е изд., перераб. и доп. Л.: Энергоиздат. Ленингр. отд-ние, 1981. 536 с.: ил.
6. *Нейман Л.Р., Демирчян К.С.*. Теоретические основы электротехники: Учеб. для вузов: в 2 т. Т.2. 3-е изд., перераб. и доп. Л.: Энергоиздат. Ленингр. отд-ние, 1981. 416 с.: ил.
7. Расчет линейных электрических цепей при переменном токе и построение векторных диаграмм: Метод. указания /Свердл. инж.-пед. ин-т. Свердловск, 1988. 104 с.
8. Сборник задач по теоретическим основам электротехники: Учеб. пособие для энерг. и приборостр. спец. вузов. - 3-е изд., перераб. и доп. / Л.А. Бесонов, И.Г. Демидова, М.Е. Заруди и др.; Под ред. Л.А. Бесонова – М.: Высш. шк., 1988. – 543 с.: ил.
9. Сборник задач и упражнений по теоретическим основам электротехники: Учеб. пособие для вузов / Под ред. П.А. Ионкина. М.: Энергоиздат, 1982. – 786 с.: ил.
10. Голубов Г.В. Расчет линейных электрических цепей при периодических несинусоидальных напряжениях и токах, Методические казания, СИПИ, г.Екатеринбург, 1992,91с.

Задания и методические указания к контрольным работам для студентов всех форм обучения
(ГОС-2000)

Подписано в печать…   . Бумага для множ. аппаратов.
Печать плоская. Усл. печ. л…. Уч.- изд. л…..Тираж   экз. Заказ №….
Издательство Российского государственного профессионально – педагогического университета, Екатеринбург, ул. Машиностроителей, 11

Ризограф РГППУ. Екатеринбург, ул. Машиностроителей, 11