**ИНДИВИДУАЛЬНЫЕ ЗАДАНИЯ ПО ТОЭ-3 ДЛЯ РАБОТЫ В РЕЖИМЕ ON LINE**

**Переходные процессы в линейных цепях**.

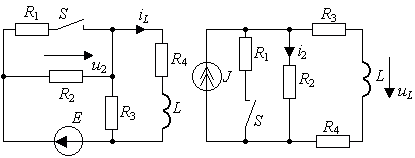
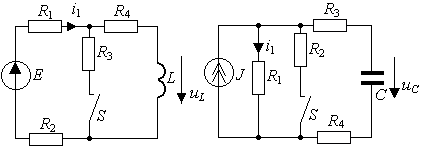
**1.** **Задание**  Исследовать переходный процесс в цепи первого порядка

(рис. 1; а - р) после коммутации (ключ S замыкается или размыкается, см. вариант индивидуального задания по табл. 3).

В цепи действует либо постоянный источник напряжения *E*, либо постоянный источник тока *J*. Параметры цепи указаны в таблице 3.

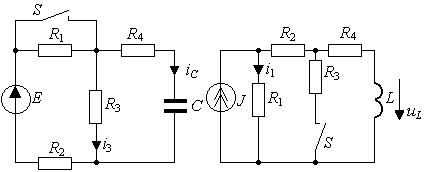
Определить закон изменения во времени указанной в таблице 3 величины (тока или напряжения).

Решить задачу **классическим** и **операторным** методами. Построить графики переходных процессов, как показано в примерах, используя MATLAB.



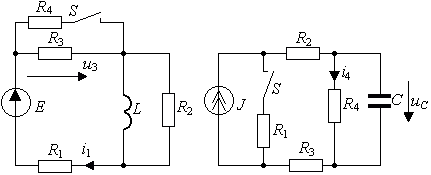
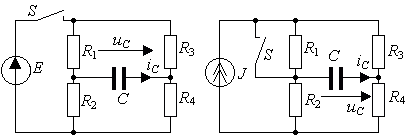
а) б)

в) г)

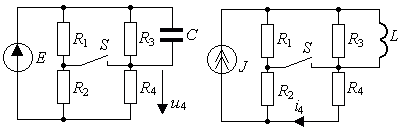
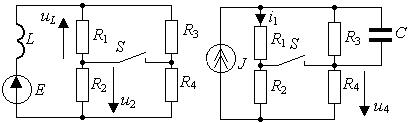


д) е)

ж) з)



и) к) л) м)



н) о)

п) р)

Рис. 1. Электрические схемы цепей с одним накопителем энергии

**ТАБЛИЦА С ИНДИВИДУАЛЬНЫМИ ЗАДАНИЯМИ**

Таблица 3

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Вар. | Схе  ма | E,В | J,А | L,  мГн | C,  мкФ | R1,  Ом | R2,  Ом | R3,  Ом | R4,  Ом | Опреде  лить | Ключ  S |
| 1 | а | 120 | - | 1 | - | 20 | 20 | 40 | 20 | *iL* | зам |
| 2 | б | - | 2 | - | 10 | 40 | 20 | 10 | 30 | *uC* | разм |
| 3 | в | 100 | - | 1 | - | 10 | 10 | 25 | 25 | *iL* | зам |
| 4 | г | - | 4 | 2 | - | 6 | 6 | 3 | 6 | *iL* | разм |
| 5 | д | 150 | - | - | 10 | 50 | 50 | 25 | 25 | *u*c | зам |
| 6 | е | - | 6 | 2 | - | 3 | 3 | 3 | 3 | *i*L | разм |
| 7 | ж | 120 | - | - | 5 | 40 | 20 | 20 | 40 | *uC* | зам |
| 8 | з | - | 8 | 1 | - | 2 | 4 | 4 | 2 | *iL* | разм |
| 9 | и | 50 | - | - | 5 | 20 | 30 | 35 | 15 | *uC* | зам |
| 10 | к | - | 10 | - | 5 | 10 | 30 | 35 | 5 | *uC* | разм |
| 11 | л | 80 | - | 10 | - | 20 | 60 | 60 | 40 | *iL* | зам |
| 12 | м | - | 12 | - | 5 | 12 | 3 | 6 | 3 | *uC* | разм |
| 13 | н | 100 | - | 10 | - | 40 | 40 | 20 | 40 | *iL* | зам |
| 14 | о | - | 2 | - | 2 | 2 | 4 | 4 | 3 | *uC* | разм |
| 15 | п | 160 | - | - | 10 | 20 | 60 | 50 | 30 | *uC* | зам |
| 16 | р | - | 4 | 1 | - | 1 | 3 | 4 | 2 | *iL* | разм |
| 17 | а | 50 | - | 10 | - | 10 | 40 | 100 | 100 | *i*L | разм |
| 18 | б | - | 6 | - | 1 | 20 | 10 | 5 | 15 | *u*C | зам |
| 19 | в | 60 | - | 20 | - | 5 | 5 | 15 | 15 | *iL* | разм |
| **20** | **г** | **-** | **8** | **10** | **-** | **8** | **8** | **4** | **12** | ***iL*** | **зам** |
| 21 | д | 80 | - | - | 1 | 20 | 20 | 10 | 10 | *uC* | разм |
| 22 | е | - | 10 | 10 | - | 2 | 2 | 4 | 4 | *iL* | зам |
| 23 | ж | 100 | - | - | 2 | 20 | 40 | 45 | 15 | *uC* | разм |
| 24 | з | - | 2 | 2 | - | 4 | 2 | 1 | 5 | *iL* | зам |
| 25 | и | 120 | - | - | 5 | 40 | 10 | 30 | 30 | *uC* | разм |
| 26 | к | - | 4 | - | 10 | 4 | 6 | 8 | 2 | *uC* | зам |
| 27 | л | 150 | - | 8 | - | 50 | 50 | 60 | 40 | *iL* | разм |
| 28 | м | - | 6 | - | 8 | 12 | 6 | 3 | 3 | *uC* | зам |
| 29 | н | 180 | - | 8 | - | 20 | 20 | 40 | 40 | *iL* | разм |
| 30 | о | - | 8 | - | 10 | 4 | 8 | 8 | 16 | *uC* | зам |

Выполненные задания представить на проверку к 14 ноября (классический метод) и к 16 ноября (операторный метод) по своему варианту в WORD.

Номер варианта определяется по списку группы и назначается преподавателем.

**РЕКОМЕНДАЦИИ ПО РАСЧЕТУ**

Модель цепи с одним накопителем энергии и источником постоянной ЭДС (тока) всегда можно представить дифференциальным уравнением первого порядка. Его решение в терминах **основной переменной состояния** имеет вид

X(t)=Xp(t)\*(1-exp(-t/T))+X(0)\* exp(-t/T), (1)

где X(t) – текущее значение переменной состояния, изменяющееся во времени,

Xp(t) – принужденная составляющая (постоянная величина для цепи постоянного тока),

Х(0) – начальное условие (постоянная величина),

T – постоянная времени цепи. Для RL –цепи

T=L/Rвх,

где Rвх- входное сопротивление пассивного двухполюсника по клеммам, к которым подключена индуктивность L. Пассивный двухполюсник образуется при замене источников электроэнергии их входными сопротивлениями. Входное (внутреннее) сопротивление источника тока принимается равным бесконечности, а источника ЭДС – равным нулю (см. курс ТОЭ, ч.1).

Из уравнения (1) следует, что для получения переходного процесса в цепи следует иметь 3 параметра: **Xp(t)=const, X(0)= const и T=const.** Эти величины определяются по топологии цепи, для установившихся режимов

цепи до коммутации ключа и после коммутации.

**Пример 1.** Рассмотрим цепь г), вариант № 20.

Основная переменная состояния – ток через индуктивность Х=iL.

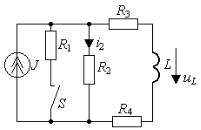


Рис.2. Электрическая цепь, вар.20.

В этой цепи нас интересует не UL(t), а ток через индуктивность iL(t).

Если мы найдем ток, то сможем рассчитать токи и напряжения на всех элементах цепи.

Определим принyжденную составляющую основной переменной состояния Xp, начальное условие X(0) и постоянную времени T (всегда определяется для режима после коммутации).

1) X(0)=iL0 =(R2/(R1+R2+R3))\*J, т.к. ток в цепи распределяется обратно пропорционально параллельно включенным сопротивлениям.

2) Хр=iLp=(R12/R14)\*J

R12=R1\*R2/(R1+R2);

R14=R12+R3+R4;

По окончании переходного процесса, когда время t стремится к бесконечности (t→∞), а практически при t > 5\*T, ток в цепи

iL→iLp=(R12/R14)\*J

3) Для определения постоянной времени T=L/Rвх необходимо найти Rвх.

Поступим следующим образом: отключим L от цепи и исключим из цепи источник питания, оставив лишь его внутреннее сопротивление. Так образуем пассивный двухполюсник. Если источником был источник ЭДС,

то в месте его подключения надо замкнуть накоротко клеммы, к которым он был подключен, поскольку внутреннее сопротивление источника ЭДС равно нулю (см курс ТОЭ, ч. 1). Если же источником был источник тока, то источник также условно отключается, а клеммы, к которым он подсоединялся, не замыкаются, т. е. цепь остается разомкнутой, поскольку внутреннее сопротивление источника тока – бесконечно большое. Так мы исключаем источники, но сохраняем в цепи их (источников) внутренние сопротивления.

**Получили пассивный двухполюсник**. Если теперь к клеммам, где была подключена индуктивность, подключить омметр, то показания омметра дадут нам Rвх. Но мы не имеем омметра, поэтому рассчитаем Rвх. Обратимся вновь к схеме цепи. Видно, что цепь состотит из последовательно соединенных R3, R4 и R12, где R12=R1\*R2/(R1+R2). Пэтому

Rвх=R3+R4+R12. Постоянная времени T=L/R вх. Подставим численные значения параметров в полученные три искомые величины и, согласно формуле (1), будем иметь выражение для тока:

iLL= iLp\*(1-exp(-t/T))+iL0\*exp(-t/T)=

=1.6\*(1-exp(-2000\*t))+2.6667\*exp(-2000\*t).

Далее построим график тока как функции времени в режиме прямых вычислений в MATLAB:

>> t=0:T/10:5\*T;

>> iLL=1.6\*(1-exp(-2000\*t))+2.6667\*exp(-2000\*t);

>> plot(t,iLL),grid

Рисунок можно «обработать», добавив текст по осям абсцисс и ординат, заголовок и др.

**Пример 2.**  Возвратимся к рис 2. Давайте заменим источник тока источником ЭДС. Условно примем E=10 B.

Заметим, что в этом случае ток через индуктивность iL(t) при замыкании ключа изменяться не будет, и переходный процесс в RL- цепи происходить не будет. При замыкании ключа скачком ток будет изменяться только в сопротивлении R1 на величину ΔI=E/R1=10/8=1.25 A. Ток через индуктивность до коммутации и после коммутации будет равен E/(R3+R4)=10/(4+12)=0.6250 A.



Рис.3. Переходный процесс (пример 1)

**ПРИМЕР 3.** Возвратимся к рис. 2 и вместо индуктивности L подключим емкость C. Остальные элементы цепи изменять не будем. Примем условно

С=20 мкФ. Тогда основной переменной состояния в формуле (1) будет напряжение Uc(t). Опуская элемент (t), мы будем искать текущее значение Uc по формуле (1). Для этого мы должны найти принужденное напряжение Ucp, начальное условие Uc0 и постоянную времени T=Rвх\*С. Так как С задано, то необходимо рассчитать Rвх.

1). По топологии цепи видно, что Uc0=R2\*J. Через конденсатор в установившемся режиме ток не протекает. Весь ток источника J будет до коммутации протекать через R2, что и определяет Uc0.

2). При замыкании ключа сопротивление нагрузки изменится: R12=R1\*R2/(R1+R2), т.е. уменьшится. Но ток источника J останется прежним. Поэтому принужденное напряжение Uсp=(R1\*R2/(R1+R2))\*J. Оно меньше Uc0. Следовательно, во время переходного процесса произойдет уменьшение напряжения на конденсаторе до значения Uсp. Чтобы найти закон изменения, нам необходимо рассчитать T=Rвх\*С.

3). Входное сопротивление находим точно так же, как в **примере 1**:

получаем пассивный двухполюсник, учитываем сопротивления R3 и R4. Поэтому получаем то же числовое значение Rвх, что и в примере 1,

т.е. Rвх=R1\*R2/(R1+R2)+R3+R4=20 Ом.

Постоянная времени равна

T=0.4мс или T=4.0000e-04 c.

Получаем численные значения исходных трех величин:

Uc0=R2\*J=64 B, Ucp=(R1\*R2/(R1+R2))\*J=32 B и T=4.0000e-04 c.

Поэтому решение, согласно формуле (1), для напряжения на конденсаторе

будет иметь вид:

Uc=32\*(1- exp(-2500\*t))+64\*exp(-2500\*t), B.

Получим график переходного процесса.

Tc=T;

>> t=0:Tc/100:5\*Tc;

>> Uc=32\*(1- exp(-2500\*t))+64\*exp(-2500\*t);

>> plot(t,Uc),grid



Рис. 4. Переходный процесс в RC – цепи, пример 3

**ОПЕРАТОРНЫЙ МЕТОД**

Применение преобразования Лапласа позволяет от дифференциальных уравнений (область оригиналов) перейти к алгебраическим ( область изображений), решить алгебраические уравнения относительно искомой величины. А по окончании решения вновь перейти из области изображений в область оригиналов, т.е. во временную область. Такой переход осуществляется с помощью специальных таблиц преобразования Лапласа, составленных для функций во времени. В лекциях по операторному методу вопрос получения таких таблиц и их применение для расчета динамических систем рассматривается подробно. Вместо таблиц для перехода от изображений к оригиналам и обратно можно использовать функции laplace и ilaplace, содержащиеся в инструментах Symbolic Toolbox среды MATLAB. Но при этом придется соблюдать требования синтаксиса функций и инструментов. В приведенной ниже таблице содержатся формулы соответствия для простейших функций, которые нам понадобятся.

Их нельзя приравнивать, а можно говорить только о соответствии,

которое обозначается специальным знаком.

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| № п/п | Оригинал функции | Изображение функции |
| 1 | Постоянные величины J или E | J/s или E/s |
| 2 | exp(-a\*t) | 1/(s+a) |
| 3 | 1-exp(-b\*t) | b/(s·(s+b)) |
| 4 | A·(1-exp(-b\*t)) | A·b/(s·(s+b)) |

Из курса ТОЭ- 3 известно, что в операторной форме напряжение на индуктивности и напряжение на емкости (обозначены большими буквами) можно записать в форме алгебраических уравнений:

UL(s)=L·s·IL(s) -L·iL(0),

UC(s)=Ic(s)/(s·C)+uC(0)/s

Здесь s – оператор Лапласа, IL(s) – ток через индуктивность в операторной форме, UL(s)- напряжение на индуктивности, Ic(s) – ток через конденсатор, Uc(s) – напряжение на конденсаторе (также в форме Лапласа), C –емкость (в фарадах), L- индуктивность (в генри), iL0 – начальный ток через индуктивность (А), uC0- начальное напряжение на конденсаторе (В). Введя обозначения переменных в операторной форме, мы можем считать уравнения алгебраическими и будем обращаться с ними как с алгебраическими уравнениями. Может показаться, что такое обращение с моделями динамики слишком привольное. Но это не так. На самом деле мы перешли в область изображений, и во временную область будем переходить с помощью таблиц преобразования Лапласа. Это и определяет корректность решения. Если начальные условия нулевые, т. е. в начале переходного процесса запасы энергии на индуктивности и емкости отсутствуют, то преобразования существенно упрощаются. Это условие обычно используется, например, при записи передаточных функций динамических систем в курсах автоматики. Оператор Лапласа в литературе и учебных курсах часто обозначается буквой «р». В современных же научных журналах и иностранной литературе применяется обозначение «s». Мы его также используем. В операторной форме, с учетом начальных условий, можно составлять уравнения цепей по законам Кирхгофа и решать их как алгебраические.

**Пример 4.**

Применительно к цепи по варианту 20 уравнения пo законам Кирхгофа в операторной форме будут иметь вид:

1. UL(s)=s·L·IL (s)-L·iL(0),

2. UL(s)+ (R3+R4)·IL(s)=(J/s –IL(s))·R1·R2/(R1+R2)

Обращаемся с этими уравнениями как с алгебраическими, так как они записаны в форме Лапласа. Решаем их относительно IL(s):

[s\*L+(R1\*R2/(R1+R2)+R3+R4)]\*IL(s)=(R1\*R2/(R1+R2))\*J/s+L\*iL(0), (2)

где iL(0)=R2/(R2+R3+R4)\*J.

Для наглядности вычислений введем обозначения

a= R1\*R2/(R1+R2)+R3+R4 и b= R1\*R2/(R1+R2).

Тогда, после подстановки а и b в уравнение (2) и деления на L, получим:

(s+a/L)\*IL(s)=(b/L)\*J/s+iL(0).

iL(0)=2.6667 (см. Пример 1); b=R1\*R2/(R1+R20=4.0: a=20; a/L=2000; b/L=400.

(s+2000)\*IL(s)=400\*8/s+2.6667.

Находим IL(s):

IL(s)=(3200+s\*2.6667)/(s\*(s+2000))=3200/(s\*(s+2000))+2.6667/(s+2000)=

1.6\*2000/(s\*(s+2000))+2.6667\*(1/(s+2000).

Для перехода во временную область к первому слагаемому применим формулу №4 из таблицы, а ко второму формулу № 2. В результате получим:

iL(t)=1.6\*(1-exp(-2000\*t))+2.6667\*exp(-2000\*t).

Эту формулу можно использовать для построения графиков переходных процессов. Так как полученная формула iL(t) совпадает с аналогичной формулой из примера (1), то и график не нужно строить, так как он будет совпадать с рис. 3, т. е. уже построен.

**Пример 5.** Теперь на рис. 2 заменим индуктивность на емкость.

Тогда

uC(0)=R2\*J;

UCпр=R1\*R2/(R1+R2)\*J=b\*J.

Напряжение на конденсаторе (с учетом начальных условий) в операторной форме запишется

Uc(s)=Iс(s)/(sC)+ uC(0)/s,

откуда

Ic(s)=s\*C\*Uc(s) - C\*uC(0).

Составим уравнения по законам Кирхгофа. Приравнивая напряжения на двух

параллельно включенных ветвях, получим:

Uc(s)+(R3+R4)\*Ic(s)=R1\*R2/(R1+R2)\*(J/s – Ic(s)).

После простейших АЛГЕБРАИЧЕСКИХ преобразований получаем уравнение

(s+1/(C\*a))Uc(S)=(b/(C\*a))\*J/s +uC(0).

Напряжение на конденсаторе в операторной форме

uC(s)=b\*J\* (1/C\*a)/(s(s+1/(C\*a))) + uC(0)\*(1/(s+1/(C\*a))).

Для перехода в область оригиналов к первому слагаемому в правой части уравнения применим формулу (4) из таблицы, а ко второму – формулу (2).

В результате получим

Uc(t)=b\*J\*(1-exp(- (1/(a\*C)\*t))+Uc(0)\* exp(- (1/(a\*C)\*t).

Теперь можно подставить в уравнение численные значения параметров цепи

по варианту № 20:

a=20; J=8; C=20e-06 или С=20 мкФ, b=4, Uc(0)=64,

b\*J=32, 1/(C\*a)=2500.

Uc(t)=32\*(1-exp(-2500\*t))+64\*exp(-2500\*t).

Получили уравнение идентичное результату, содержащемуся в примере 3. Поэтому при построении графика получим характеристику, представленную на рис.4.

Используя примеры, лекционный материал и табличные данные, определите переходный процесс в вашей цепи. Будьте внимательны с учетом положения ключа в переходном режиме. Проявите должное внимание при получении пассивного двухполюсника, начальных условий и принужденной составляющей. Эффективно используйте формулу (1). Согласно таблице, работайте только с основной переменной составляющей. Вариант 20 не следует использовать в качестве индивидуального задания.

**Отчет должен содержать**: титульный лист, номер варианта, постановку задачи, исходные данные и схему цепи, расчеты переходного процесса классическим (по формуле 1) и операторным методами, графики и выводы по работе. Файлы, используемые в расчетах и при построении графиков. Текст представляется в ВОРДе, Срок представления отчета -12 ноября 2021 г.

Желаю всем успехов.