

Министерство высшего и среднего специального
образования РСФСР

Куйбышевский ордена Трудового Красного Знамени
авиационный институт имени академика С.П.Королева

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ПАРАМЕТРОВ
ИМПУЛЬСНОГО ТРАНСФОРМАТОРА
НА ЕГО ПЕРЕХОДНУЮ ХАРАКТЕРИСТИКУ
С ПОМОЩЬЮ ЭВМ

У т в е р ж д е н о
редакционно-издательским
советом института
в качестве
методических указаний
к лабораторной работе
для студентов

Куйбышев 1988

УДК 621.314.632

В методических указаниях рассматриваются эквивалентные схемы импульсного трансформатора и влияние их параметров на переходную характеристику, дается алгоритм расчета переходной характеристики импульсного трансформатора при изменении его конструктивных параметров с целью оценки их влияния на форму передаваемого импульса.

Методические указания предназначены для студентов специальности 0705.

Рецензенты: И.И.В о л к о в, Б.В.С к в о р ц о в

Составитель Лилия Михайловна Капитонова

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ПАРАМЕТРОВ
ИМПУЛЬСНОГО ТРАНСФОРМАТОРА
НА ЕГО ПЕРЕХОДНУЮ ХАРАКТЕРИСТИКУ
С ПОМОЩЬЮ ЭВМ

Редактор Е.Д.А н т о н о в а
Техн.редактор Н.М.К а л е н ю к
Корректор О.Ю.Н е н а ш е в а

Подписано в печать 26.04.88 г. Формат 60x84^I/16.
Бумага оберточная. Печать оперативная.
Уч.-изд.л. 0,93. Усл.п.л. 0,8. Т. 500 экз.
Заказ № 3685. Бесплатно.

Куйбышевский ордена Трудового Красного Знамени
авиационный институт имени академика С.П.Королева.
г. Куйбышев, ул. Молодогвардейская, 151.

Тип.им.В.П.Мяги Куйбышевского полиграфического
объединения. 443099, г. Куйбышев, ул. Венцека, 60.

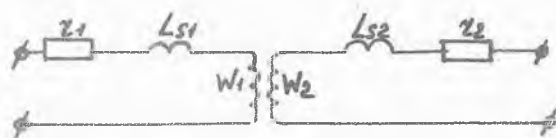
Цель работы - исследование влияния параметров импульсного трансформатора на его переходную характеристику с помощью ЭВМ.

1. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ РАБОТЫ

1.1. Полная эквивалентная схема импульсного трансформатора

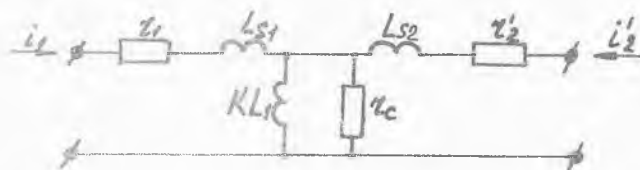
Импульсные трансформаторы находят широкое применение в современной радиоэлектронной аппаратуре (РЭА) в качестве элементов импульсных устройств, блокинг-генераторов и генераторов сверхвысоких частот. Импульсный трансформатор должен передавать импульс с минимальными искажениями.

Реальный трансформатор можно заменить схемой, состоящей из идеального трансформатора, активные сопротивления обмоток которого равны нулю и в котором отсутствуют потоки рассеивания, и двумя реактивными катушками с активными сопротивлениями Z_1 и Z_2 , и индуктивностями L_{S1} и L_{S2} (рис. 1).



Р и с. 1.

Если вторичная обмотка приведена к числу витков первичной, то идеальный трансформатор превращается в реактивную катушку, по сердечнику которой замыкается основной магнитный поток трансформатора. Таким образом импульсный трансформатор можно заменить π -образной схемой (рис. 2).

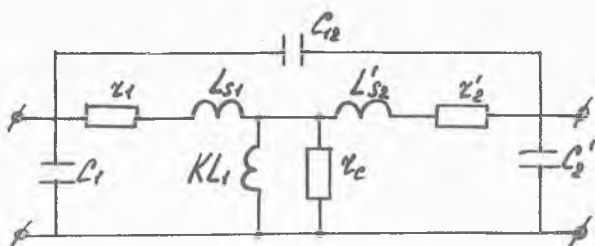


Р и с. 2.

В этой схеме индуктивности рассеяния L_{S1} и L'_{S2} учитывают потоки рассеивания, сопротивления Z_1 и Z'_2 — сопротивления первичной и вторичной обмоток; индуктивность L_1 , по которой проходит намагничивающий ток трансформатора $i_1 + i_2$, называется индуктивностью намагничивания. Сопротивление Z_c учитывает потери в сердечнике на гистерис и вихревые токи.

Вместе с тем работа импульсного трансформатора характеризуется наличием паразитных емкостей, емкостных связей между элементами. Все эти связи имеют распределенный характер. Для упрощения анализа распределенные емкости заменяют сосредоточенными, включенными между точками наиболее высокого потенциала. Межвитковыми емкостями обычно пренебрегают ввиду их относительной малости.

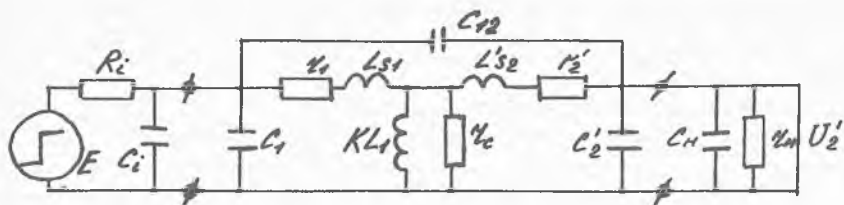
Эквивалентная схема импульсного трансформатора, учитывающая влияние паразитных емкостей, изображена на рис. 3.



Р и с. 3.

Импульсный трансформатор входит составным элементом в различные типы генераторов электрических импульсов, выполняя функцию согласующего звена между этим генератором и сопротивлением нагрузки. Как генератор, так и сопротивление нагрузки вместе с параметрами трансформатора влияют на переходную характеристику импульсного трансформатора. С учетом параметров генератора и нагрузки эквивалентная схема приобретает вид, приведенный на рис. 4.

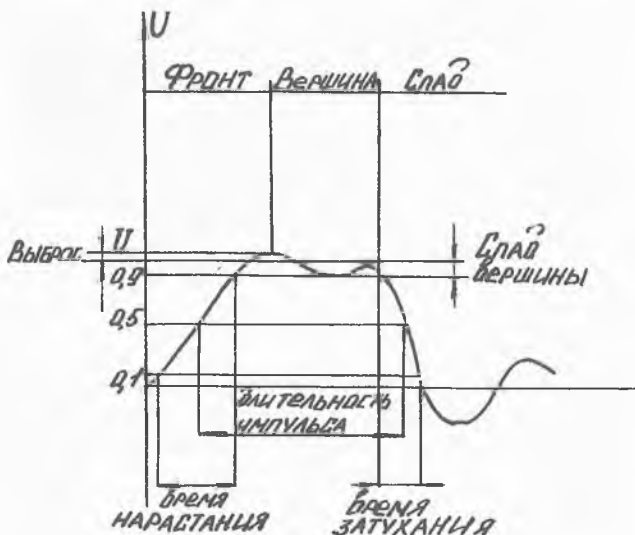
На практике применяют упрощенные эквивалентные схемы, которые при определенных условиях дают простое и достаточно точное решение.



Р и с . 4.

1.2. Процесс нарастания фронта импульса

Стандартный импульс изображен на рис. 5. В нем можно выделить: передний фронт, вершину и спад импульса. Характеристиками переднего фронта являются время нарастания и выброс.



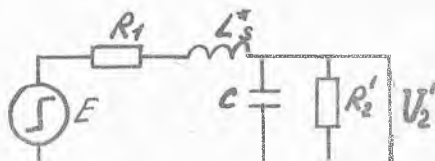
Р и с . 5.

Из-за несовершенства магнитной связи между элементами обмотки импульсного трансформатора, наличия емкостных связей между обмотками и других реактивных элементов, при воздействии на трансформатор им-

пульса с крутым фронтом, в цепи возникает сложный колебательный процесс. Этот процесс обуславливает искажение формы передаваемого импульса.

Для облегчения исследования процесса формирования фронта импульса введем упрощения. Во-первых, примем, что индуктивность намагничивания L_1 по сравнению с индуктивностью рассеяния L_S очень мала и ее шунтирующим действием можно пренебречь. Это упрощение ко-

выполняется в реальных условиях, так как для импульсных трансформаторов коэффициент связи между обмотками $K = 0,99 \dots 0,999$. Кроме того, из-за небольших значений R_i и Z_1 , незначительного влияния емкостей C_i и C_1 на переходную характеристику во время формирования фронта эквивалентная схема импульсного трансформатора при передаче фронта импульса имеет вид, показанный на рис. 6.



Р и с. 6.

В данной схеме принято $L_S^* = 2L_S$, причем индуктивность рассеяния находится из индуктивности обмоток через коэффициент связи между обмотками по формуле (1).

$$L_S = L_1 (1-K). \quad (1)$$

В последовательное сопротивление R_1 входит внутреннее сопротивление генератора и активное сопротивление первичной обмотки

$$R_1 = R_i + Z_1. \quad (2)$$

Сопротивление R_2' находится по формуле

$$R_2' = \frac{Z_0 (R_H' + Z_2')}{Z_0 + R_H' + Z_2'} \quad (3)$$

Если не учитывать сопротивление потерь в сердечнике Z_0 , то по формуле

$$R_2' = R_H' + z_2' . \quad (4)$$

Приведенные сопротивления рассчитываются по формулам

$$R_H' = R_H / n^2 ; z_2' = z_2 / n^2 , \quad (5)$$

где n - коэффициент трансформации.

Эффективная общая емкость C' определяется как

$$C' = C_2' + C_H + C_{12} , \quad (6)$$

$$C_2' = C_2 n^2 ; C_H' = C_H n^2 . \quad (7)$$

Динамическая емкость между обмотками зависит от включения обмоток. При синфазной трансформации она определяется по формуле (8), а при противофазной - по формуле (9)

$$C_{12} = \frac{C_{D12}}{3} (n-1)^2 , \quad (8)$$

$$C_{12} = \frac{C_{D12}}{3} (n+1)^2 . \quad (9)$$

Коэффициент трансформации определяется как отношение числа витков обмоток:

$$n = \frac{\omega_2}{\omega_1} . \quad (10)$$

Характер переходного процесса зависит от коэффициента затухания ρ . Переходный процесс представляет собой незатухающую синусоиду, если коэффициент затухания $\rho = 0$. При $\rho < 1$ процесс имеет затухающую периодическую форму. Если $\rho \geq 1$, реакция обладает аперiodическим затуханием.

$$\rho = \frac{1}{2\sqrt{1 + \gamma_R}} \left(\frac{z_T}{R_2'} + \gamma_R \frac{R_2'}{z_T} \right) , \quad (11)$$

$$\text{где } z_T = \sqrt{\frac{L^* s}{C'}} , \quad (12)$$

$$\gamma_R = \frac{R_1}{R_2'} \quad (13)$$

Переходный процесс характеризуется постоянной времени

$$\tau_{\varphi} = \sqrt{\frac{L_3^* C}{1 + \gamma_R}} \quad (14)$$

и относительной частотой колебательного процесса

$$\nu = \sqrt{1 - \rho^2} \quad (15)$$

Если $\rho < 1$, коэффициент передачи трансформатора записывается как

$$K_{\varphi} = \frac{U_2'}{U_{2\infty}'} = 1 - e^{-\frac{\rho t}{\tau_{\varphi}}} \left(\frac{\rho}{\nu} \sin \frac{\nu t}{\tau_{\varphi}} + \cos \frac{\nu t}{\tau_{\varphi}} \right), \quad (16)$$

где U_2' - напряжение на нагрузке;

$U_{2\infty}'$ - установившееся значение напряжения на нагрузке.

Если $\rho \geq 1$, то коэффициент передачи

$$K_{\varphi} = 1 + \alpha_1 e^{-\frac{s_1 t}{\tau_{\infty}}} - \alpha_2 e^{-\frac{s_2 t}{\tau_{\infty}}}, \quad (17)$$

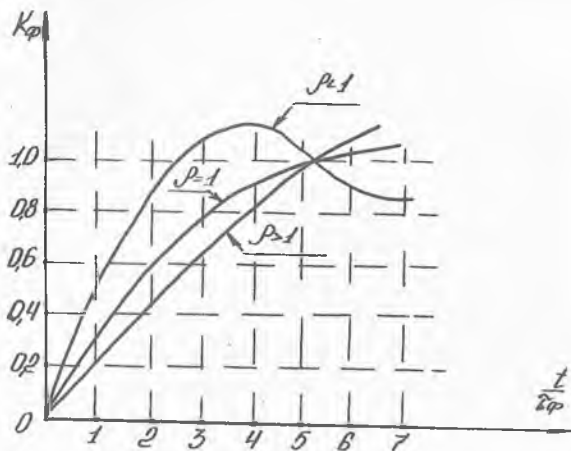
$$\alpha_1 = \frac{i}{2} (\rho/\nu - 1); \quad \alpha_2 = \frac{i}{2} (\rho/\nu + 1), \quad (18)$$

$$s_1 = \rho + \nu; \quad s_2 = \rho - \nu. \quad (19)$$

Время нарастания импульса обычно составляет

$$t_{\varphi \max} = 10 \tau_{\varphi} (1 + \rho^{3/2}). \quad (20)$$

Переходные процессы на фронте импульса для различных значений коэффициента затухания показаны на рис. 7.

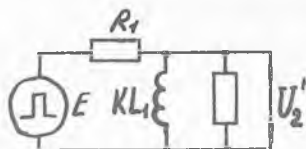


Р и с. 7.

1.3. Процесс формирования вершины импульса

При рассмотрении процессов на вершине импульса можно пренебречь влиянием емкостей C_1 и C_2 и индуктивности L_S . Такое упрощение допускается вследствие того, что, достигнув установившихся значений, токи и напряжения этих элементов меняются незначительно и не оказывают существенного влияния на форму вершины импульса.

С учетом этих пренебрежений эквивалентная схема имеет вид, показанный на рис. 8. Процессы в схеме рис. 8 описываются уравнениями



Р и с. 8.

$$U_2' = L_1 \frac{di_2}{dt}; \quad E = U_2' + (i_2 + i_2') R_1, \quad (21)$$

Решение уравнений (21) с начальными условиями ($t = 0$) приводит к следующим выражениям для коэффициента передачи трансформатора

$$K_B = \frac{U_2'(t)}{U_2'(0)} = e^{-\frac{t}{\tau_B}}, \quad (22)$$

где τ_B - постоянная времени,

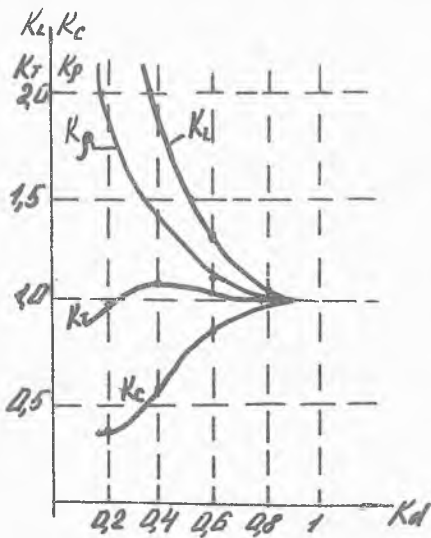
$$\tau_B = \frac{\kappa L_1 (1 + \beta_R)}{R_1} . \quad (23)$$

Длительность вершины импульса составляет примерно $t_{B \max} = 3\tau_B$. Характерным искажением вершины импульса является спад вершины.

1.4. Влияние параметров импульсного трансформатора на искажение передаваемого импульса

В идеальном случае желательно иметь индуктивность рассеяния $L_S = 0$, паразитные емкости C_1 и C' также равными нулю, а также бесконечно большую индуктивность намагничивания L_1 . Такая трансформаторная цепь не внесла бы никаких искажений в передаваемый сигнал.

Параметры L_S , C_1 и C' влияют на формирование фронта импульса. Требование одновременного уменьшения этих параметров противоречиво, как следует из графика (рис. 9) при уменьшении L_S возрастают C_1 и C' и наоборот. На практике легче добиться уменьшения C_1 и C' , чем уменьшения индуктивности рассеяния. Для уменьшения паразитных емкостей следует придерживаться следующих соображений. Поскольку емкости приводятся пропорционально квадрату коэффициента трансформации n , то следует избегать больших n .



Р и с. 9.

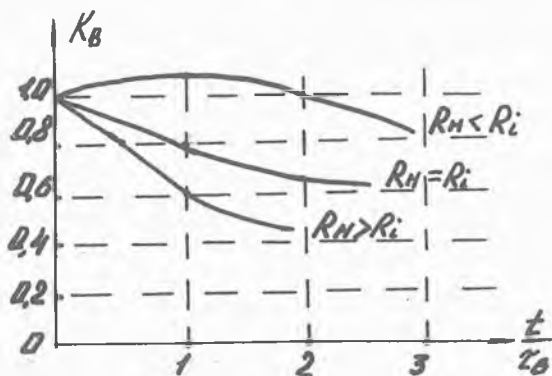
Как следует из формул (8) и (9), противофазное включение обмоток резко увеличивает динамическую емкость между обмотками, поэтому следует применять синфазное включение. Результаты исследования влияния коэффициента заполнения проводом обмотки на электромагнитные параметры трансформатора, приведенные в работе /1/, сведены в график (см. рис. 9), где K_L - нормированная индуктивность рассеяния, K_C - нормированная емкость обмоток, K_D - нормированный коэффициент затухания, $K_T = L_S C'$. При относительном уменьшении отношения диаметра провода к шагу намотки происходит уменьшение емкостей обмоток. Как видно из графика, изменение шага намотки не приводит к существенному изменению постоянной времени τ_B (кривая K_T), зато резко изменяется отношение L_S и C' , определяющее величину коэффициента затухания ρ .

Обычно число витков обмотки в импульсном трансформаторе невелико, и поэтому активное сопротивление обмоток значительно меньше внутреннего сопротивления генератора и сопротивления нагрузки. В связи с этим вопрос о величине сопротивления обмоток имеет второстепенное значение. Время нарастания фронта импульса является функцией высокочастотной постоянной времени τ_{ϕ} . Выброс может быть уменьшен за счет дополнительных потерь в трансформаторе, однако в этом случае увеличится время нарастания. Обычно допускается выброс в 5-10%. Индуктивность намагничивания L_1 влияет на формирование вершины импульса. Величина L_1 определяет величину спада вершины. Увеличение L_1 уменьшает этот спад. Спад вершины в процентах зависит от длительности входного импульса.

Все параметры трансформатора взаимосвязаны, и увеличение L_1 приводит к возрастанию L_S , C_1 и C' . Из сказанного вытекает, что сами требования к искажениям внутренне противоречивы: уменьшение искажений фронта неизбежно приводит к увеличению искажений вершины и наоборот.

Влияние параметров генератора и нагрузки. Параметры генератора: R_i - внутреннее сопротивление и C_i - емкость - оказывают существенное влияние на искажения как фронта, так и вершины импульса. Условие минимизации спада вершины требует уменьшения R_i и C_i . Уменьшение сопротивления нагрузки R_H также уменьшает спад вершины, однако при этом увеличивается время нарастания импульса. Увеличение емкости нагрузки вызывает увеличение общей емкости C' и приводит к увеличению времени нарастания импульса, к искажению формы

фронта. Зависимость K_B от $\frac{v}{v_B R_i}$ для различных значений внутреннего сопротивления генератора R_H и сопротивления нагрузки представлена на рис. 10.



Р и с. 10.

Программа, реализующая описанный алгоритм, приведена в приложении. Программа составлена на языке *Basic* для реализации на ДЗ-28. В качестве объекта исследования взят миниатюрный импульсный трансформатор ТИМ-4.

Основные характеристики трансформатора ТИМ-4

Коэффициент трансформации	$n = 2$
Индуктивность I обмотки	$L_1 = 0,75 \text{ мГн}$
Сопротивление I обмотки	$Z_1 = 4,8 \text{ Ом}$
Сопротивление 2 обмотки	$Z_2 = 9,6 \text{ Ом}$
Коэффициент рассеяния	$K = 0,95$
Емкость I обмотки	$C_1 = 1 \text{ пФ}$
Емкость 2 обмотки	$C_2 = 1 \text{ пФ}$
Статистическая емкость между обмотками	$C_{112} = 9 \text{ пФ}$
Максимальное напряжение	$U_m = 15 \text{ В}$
Количество витков в обмотках	$\omega = 60$
Провод ПЭВ-2	$\phi = 0,08$
Сердечник пермалоевый	марки 68НМП
	КЛ 6x3x1,5

Параметры генератора и нагрузки взяты следующими: $R'_i = 100 \text{ Ом}$,
 $R_H = 1000 \text{ Ом}$, $C_H = 1 \text{ нФ}$.

2. ИССЛЕДОВАНИЕ ПЕРЕХОДНОЙ ХАРАКТЕРИСТИКИ НА ЭВМ

2.1. Блок-схема алгоритма исследования

Целью исследования является установление зависимости переходной характеристики от конструктивных параметров импульсного трансформатора, параметров генератора и нагрузки. Переходная характеристика определяется коэффициентом передачи, который рассчитывается отдельно для фронта (16) и вершины импульса (22). Расчет коэффициента передачи фронта проводится по формулам (16) и (17) для различных значений коэффициента затухания. Коэффициент передачи фронта считаем для значений времени $t = t + \tau_{\phi} (1 + \rho^{3/2})$. Расчеты продолжаются, пока выполняется условие $t < t_{\phi \max}$.

В противном случае рассчитывается процесс формирования вершины импульса по формуле (22) для времени $t = t + \tau_{\phi}$. Расчеты ведутся до тех пор пока $t < t_{B \max}$. Блок-схема данного алгоритма приведена на рис. II.

ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

1. Ознакомиться с правилами техники безопасности при работе на микроЭВМ.

2. Ознакомиться с методикой работы на вычислительном устройстве "Электроника ДЗ-28".

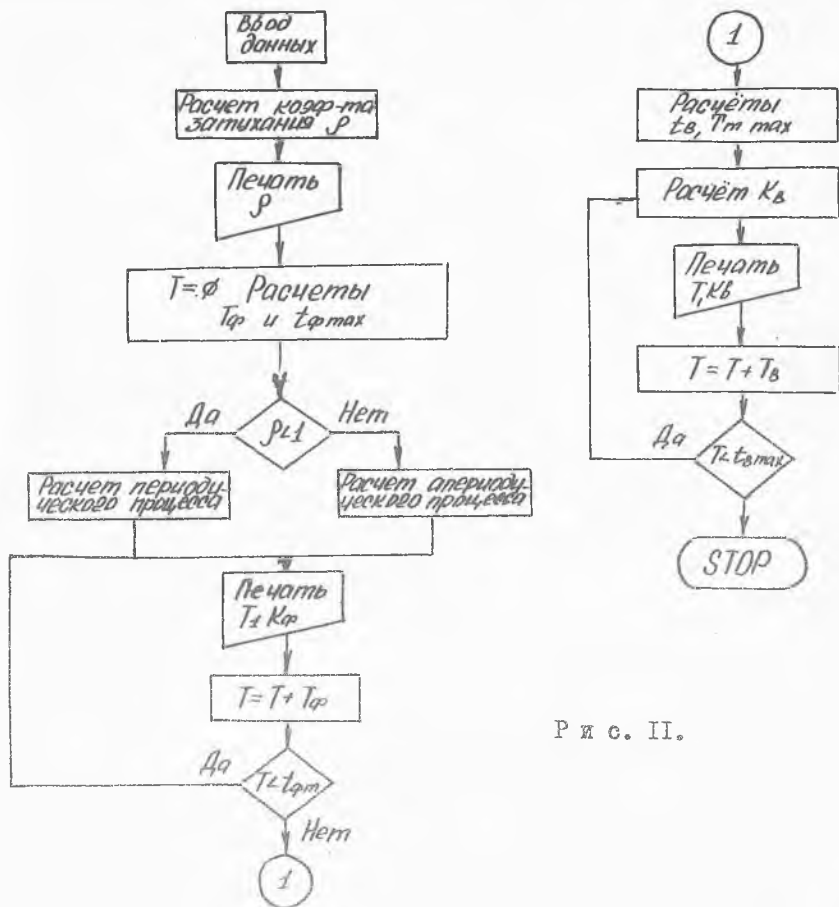
3. Включить питание дисплея и процессора ЭВМ.

4. Вставить кассету с магнитной лентой в гнездо. Возвратить гнездо с кассетой в исходное положение. Перемотать ленту в начальное положение.

5. Произвести загрузку интерпретатора языка БЭЙСИК.

6. Проверить правильность считывания интерпретатора с ленты.

Контрольная сумма кодов команд интерпретатора составляет число 132098. Если в регистре X индицируется данное число, то считывание произведено правильно, если индицируется другое число, либо наблюдается мигание, то следует повторить п. 5.



Р и с. II.

7. Произвести запуск интерпретатора. Если на экране появится "ГОТОВ", то микроЭВМ готова к работе.
8. Произвести считывание программы расчета параметров катушки с ленты в запоминающее устройство.
9. Ввести текст программы расчета на экран дисплея.
10. Проверить программу.
11. Произвести запуск программы.
12. Ввести исходные данные.

13. Записать в таблицу рассчитанные данные.
14. Проверить п. 9–10 необходимое число раз.
15. Выключить процессор и дисплей.

П р и м е ч а н и я:

1. Вычеркивание нежелательных знаков при вводе осуществляется нажатием клавиши "ЭБ". Каждое нажатие стирает один последний символ.
2. Для стирания текущей строки необходимо нажать клавиши "СУ" и "У".
3. Исправление уже введенной строки производится путем набора ее номера и нового содержания. Для вычеркивания строки нужно напечатать ее номер и нажать клавишу "ВК".
4. Для останова выполнения программы в произвольный момент времени необходимо нажать клавиши "СУ" и "Р". ЭВМ печатает "ГОТОВ" и ожидает дальнейших указаний.
5. Для вывода текста программы на экран дисплея следует набрать команду "LIST".
6. Запуск программы, находящейся в памяти, осуществляется командой "RUN".
7. Для загрузки считывания программы расчета с магнитной ленты в запоминающее устройство следует набрать команду "LOAD".
8. Перемотка ленты в начальное положение осуществляется нажатием клавиши "▶▶".
9. Для загрузки интерпретатора языка БЭЙСИК необходимо нажать клавиши "С" и "СЛ".
10. Для вычисления контрольной суммы кодов команд интерпретатора необходимо нажать клавишу "КП".
11. Запуск интерпретатора осуществляется последовательным нажатием клавиш "С" и "S".

ПРАВИЛА ТЕХНИКИ БЕЗОПАСНОСТИ

1. Включение и выключение микроЭВМ производить только в присутствии преподавателя.
2. При возникновении сбоев в программе, которые не устраняет БЭЙСИК, не разрешается предпринимать какие-либо действия, нажатие клавиатуры.

3. Запрещается снимать крышки, вскрывать корпус процессора и дисплея, подсоединять и отсоединять разъемы.

СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЕТА

1. Алгоритм расчета.

2. Графики зависимости $K_{\Phi}(t)$, $K_B(t)$ при различных ρ .

3. Выводы.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Что называется переходной характеристикой импульсного трансформатора (ИТ)?

2. Нарисуйте эквивалентную схему ИТ при передаче фронта импульса.

3. Нарисуйте эквивалентную схему ИТ, отражающую процесс формирования вершины импульса.

4. Что такое ρ ?

5. Какие параметры влияют на коэффициент затухания?

6. Запишите формулу для постоянной времени τ_{Φ} .

7. Нарисуйте графики зависимости коэффициента передачи от времени для различных значений коэффициента затухания.

8. Запишите формулу для постоянной времени τ .

9. Какое значение имеет индуктивность рассеяния в идеальном трансформаторе?

10. Как влияют параметры генератора и нагрузки на параметры ИТ?

Библиографический список

Вдовин С.С. Проектирование импульсных трансформаторов. - Л.: Энергия, 1971.

Балбашова Н.Б. Миниатюрные импульсные трансформаторы на ферритовых сердечниках. - М.: Энергия, 1976.

Норденберг Г.М. Трансформаторы для радиоэлектронной аппаратуры. - Л., 1970.