

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ЦЕПИ С ВЕНТИЛЯМИ

Цель работы. Экспериментальное подтверждение способности нелинейных элементов выпрямлять переменный ток. Сравнительный анализ эффективности различных схем выпрямителей.

Пояснения к работе

Анализ нелинейных цепей при периодических воздействиях производится с учетом динамических характеристик нелинейных элементов. Если при этом ставится цель определить форму или гармонический состав реакции цепи, то используются характеристики нелинейных элементов для мгновенных значений.

При сравнительно невысоких частотах переменных токов и напряжений динамические характеристики безынерционных нелинейных элементов практически совпадают с их статическими характеристиками.

Для выпрямления переменного тока используют нелинейные безынерционные резисторы с резко выраженной несимметрией вольтамперной характеристики (ВАХ) относительно начала координат. Такие элементы, фактически проводящие ток в одном направлении, называются *электрическими вентилями*. К вентилям относятся полупроводниковые и вакуумные диоды, газотроны, тиристоры и др.

На рис. 18.1,а представлена ВАХ диода $i(u)$ при воздействии на него гармонического напряжения $u(\omega t)$ промышленной частоты (эта зависимость показана на том же рисунке). Если перенести последовательно ряд точек с этой диаграммы при определенных значениях ωt на характеристику $i(u)$ и найти по ней соответствующие значения реакции диода – тока i , то легко можно построить и зависимость $i(\omega t)$, которая показана на рис. 18.1,б. Реакция диода оказывается несинусоидальной, причем спектр ее содержит постоянную составляющую, основную (с угловой частотой ω) и высшие гармоники.

Легко заметить, что амплитуда положительной полуволны тока гораздо больше амплитуды отрицательной полуволны. Различие этих амплитуд тем больше, чем больше амплитуда напряжения источника. Зачастую различие настолько велико, что током отрицательной полуволны можно пренебречь. В этом случае характеристику реального диода можно заменить характеристикой идеального вентиля, которая показана пунктиром на рис. 18.1, а. Сопротивление такого вентиля положительной полуволне напряжения равно нулю, а для отрицательной полуволны бесконечно велико. Схематическое изображение идеального вентиля в EWB показано на рис. 18.1, в. В данной работе в качестве вентиля используются полупроводниковые диоды с характеристиками, близкими по свойствам к идеальным.

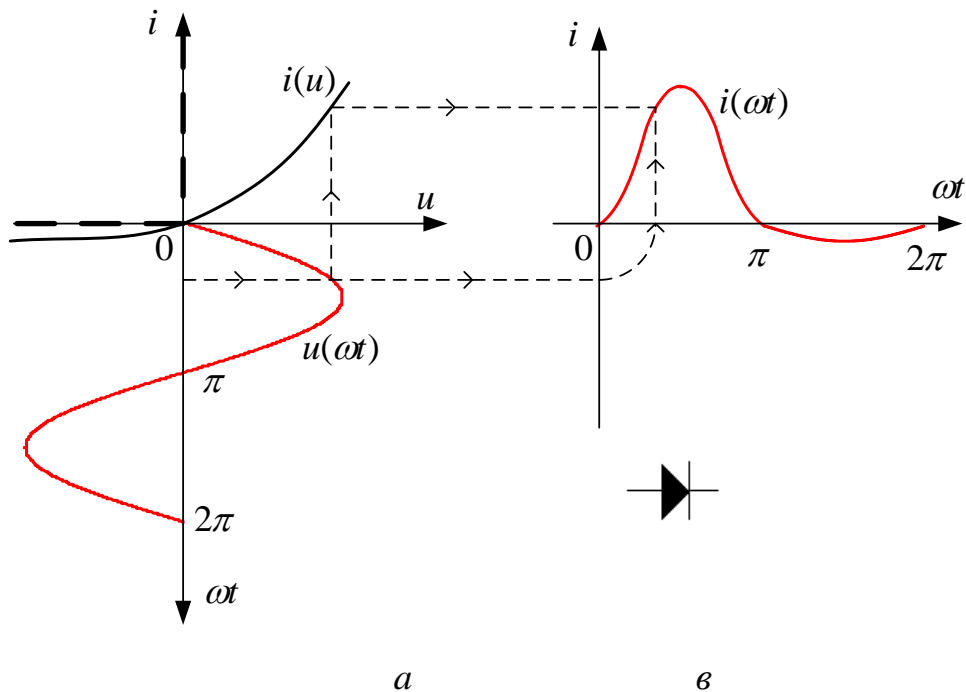


Рис. 18.1.

Устройства с электрическими вентилями, предназначенные для преобразования переменного напряжения в постоянное, именуются *выпрямителями*. О качестве выпрямления судят по величине *коэффициента пульсации* k_{Π} . Коэффициент пульсации определяется как отношение амплитуды одной из гармоник напряжения на выходе выпрямителя u_2 к его постоянной составляющей U_0 :

$$k_{\Pi} = \frac{U_{2m}}{U_0} \approx \frac{0,5(U_{\max} - U_{\min})}{U_0} \approx \frac{\sqrt{2}U_2}{U_0}, \quad (18.1)$$

где U_{2m} – наибольшая амплитуда одной из гармоник напряжения $u_2(t)$ на выходе выпрямителя; U_{\max}, U_{\min} – максимальное и минимальное значение осциллограммы выходного напряжения; U_2 – действующее значение переменной составляющей выходного напряжения (показание вольтметра V_2 , не учитывающего U_0).

Чем меньше величина этого коэффициента, тем лучше качество выпрямления. Для улучшения качества выпрямления используются различные схемы сглаживающих фильтров. Простейший из них – конденсатор, подключаемый параллельно нагрузке. Постоянная составляющая тока через конденсатор не течет, а замыкается по сопротивлению нагрузки R . Переменная составляющая распределяется между нагрузкой и конденсатором таким образом, что в нагрузку попадает тем меньшая часть гармонической составляющей тока k -ого порядка, чем меньше емкостное сопротивление $X_{Ck} = (k\omega C)^{-1}$ току этой гармоники.

Фактически в цепи происходит повторяющийся переходный процесс. Когда абсолютное значение напряжения на входе выпрямителя достигает напряжения на емкости, одна пара диодов открывается и конденсатор подзарядается до величины U_m . Затем эта пара диодов запирается и конденсатор начинает разряжаться через нагрузку. Когда в следующем полупериоде абсолютное значение

ние напряжения на входе выпрямителя вновь достигнет напряжения на емкости, откроется вторая пара диодов и конденсатор опять будет заряжаться до величины U_m . Затем и эти диоды запираются, конденсатор снова разряжается через нагрузку и т. д. Чем больше значение постоянной времени RC , тем медленнее падает напряжение на конденсаторе, тем меньше его пульсации. Однако при этом велики импульсы тока в диодах.

Поэтому емкостный фильтр используется в выпрямителях с малыми токами нагрузки, когда импульсы токов в диодах не достигают опасных значений. Включение сглаживающего емкостного фильтра на выходе выпрямителя снижает коэффициент пульсации $k_{ПС}$ и улучшает качество выпрямления:

$$k_{ПС} \approx \frac{k_{П}}{\sqrt{1 + (k\omega RC)^2}}, \quad (18.2)$$

где $k_{П}$ – коэффициент пульсации при отсутствии фильтра ($C=0$);
 ω – угловая частота входного синусоидального напряжения выпрямителя $u_1(t)$;

k – номер наименьшей гармоники напряжения $u_2(t)$ на сопротивлении R нагрузки при отсутствии фильтра ($C=0$).

Схемы электрических цепей

Схемы электрических цепей, сравнительное исследование которых проводится в работе, показаны на рис. 18.2 ÷ 18.5. Питание осуществляется от трехфазного генератора, причем на вход первых двух схем подается его фазное напряжение. Действующее значение этого напряжения контролируется в схемах 18.2 ÷ 18.4 вольтметром переменного напряжения V_1 . В последней же схеме этот вольтметр измеряет линейное напряжение.

На выходе каждого из выпрямителей включена нагрузка с сопротивлением $R = 10$ кОм. Вольтметры постоянного напряжения V_0 и переменного напряжения V_2 измеряют соответственно постоянную составляющую U_0 и действующее значение U_2 переменной составляющей (без учета U_0) выходного напряжения $u_2(\omega t)$. Напряжение U синусоидальных источников устанавливается согласно табл. 18.1.

Таблица 18.1

Вариант	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
U (В)	15,5	15	14	13	12	11	10	9	8	7

1. *Однополупериодный выпрямитель* (рис. 18.2,а).

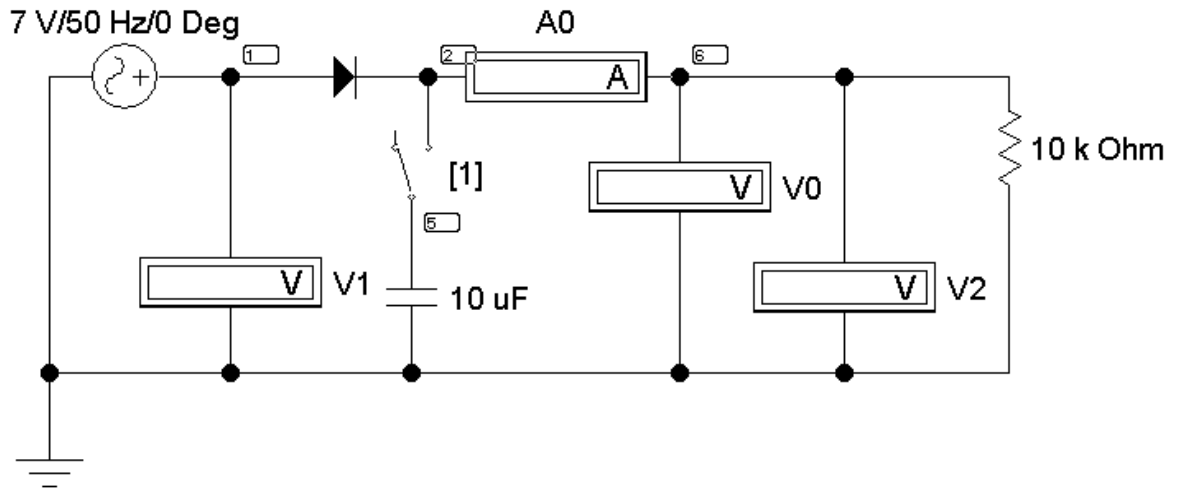


Рис. 18.2, а

В течение положительного полупериода входного напряжения $u_1(\omega t)$ диод открыт и по нему протекает ток прямого направления. В отрицательный полупериод диод закрыт – ток отсутствует. Таким образом, в нагрузке течет пульсирующий ток – переменный по величине, но имеющий постоянное направление.

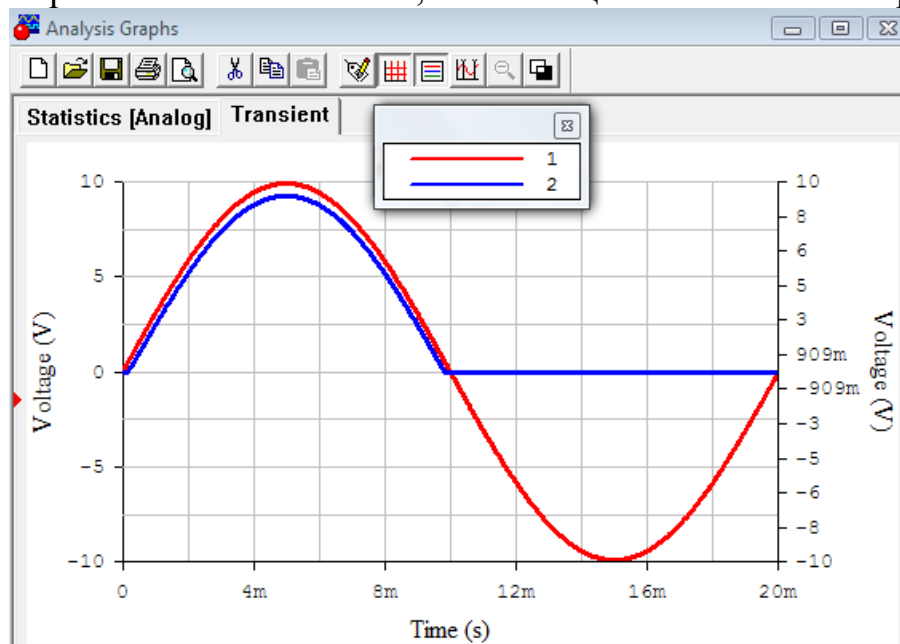


Рис. 18.2, б

Осциллограмма напряжения на нагрузке повторяет форму кривой тока и ее разложение в ряд Фурье имеет вид:

$$u_2(\omega t) = \frac{U_m}{\pi} \left[1 + \frac{\pi}{2} \sin(\omega t) - 2 \left(\frac{1}{1.3} \cos(2\omega t) + \frac{1}{3.5} \cos(4\omega t) + \dots \right) \right].$$

Очевидно, что угловая частота основной (первой) гармоники выходного напряжения $u_2(t)$ равна угловой частоте входного напряжения $u_1(t)$, т.е. $\omega=314$ (рад/с). Одинаковы и амплитуды U_m этих напряжений. Поэтому при отсутствии емкостного фильтра ($C=0$) имеем

$$U_0 = \frac{U_m}{\pi} = 0,45U_1; \quad U_2 = 0,5U_m = \frac{U_1}{\sqrt{2}}; \quad k = 1; \quad k_{\Pi} = 1,57, \quad (18.3)$$

причем наибольшее значение выходного напряжения $U_{\max} = U_m$, а наименьшее $U_{\min} = 0$.

2. Двухполупериодный выпрямитель (рис. 18.3, а).

В положительный полупериод входного напряжения открыты диоды D_1 и D_2 , а диоды D_3 и D_4 заперты. В отрицательный же полупериод, наоборот, открыты диоды D_3 и D_4 , а диоды D_1 и D_2 заперты. В результате ток в нагрузке имеет одно и то же направление в оба полупериода (рис 18.3, б). Разложение в ряд Фурье выходного напряжения имеет вид:

$$u_2(\omega t) = \frac{2 \cdot U_m}{\pi} \left[1 - 2 \left(\frac{1}{1 \cdot 3} \cos(2\omega t) + \frac{1}{3 \cdot 5} \cos(4\omega t) + \dots \right) \right].$$

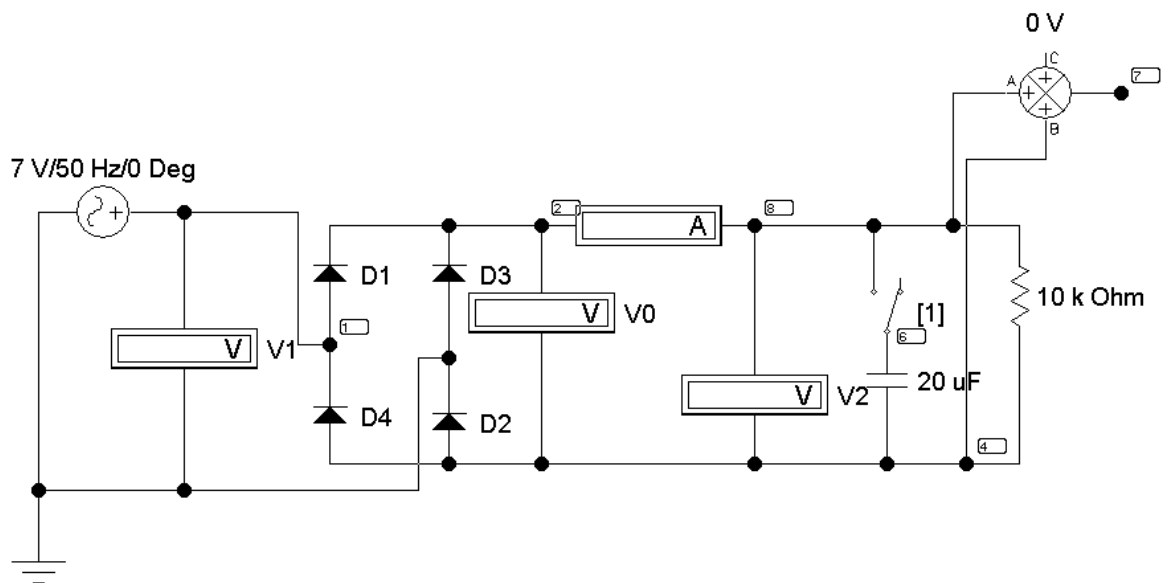


Рис. 18.3, а

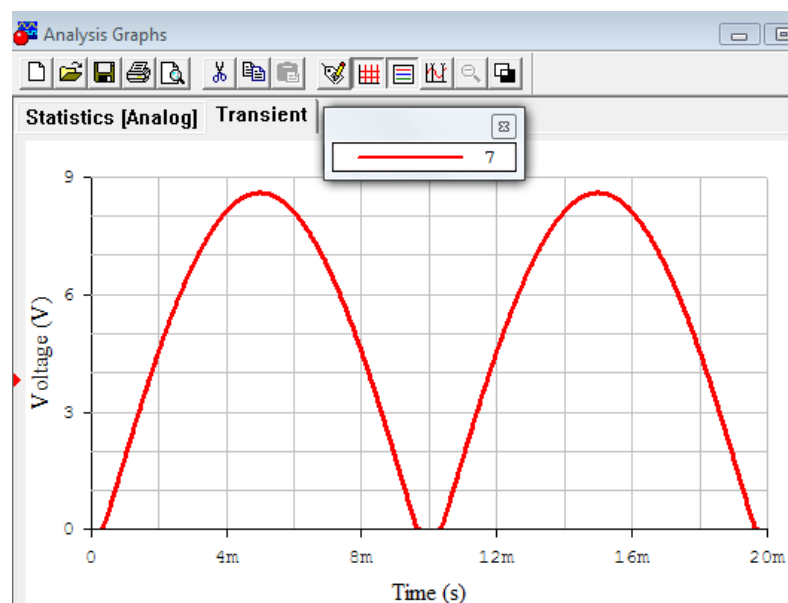


Рис. 18.3, б

Очевидно, что угловая частота основной гармоники выходного напряжения $u_2(t)$ равна удвоенной угловой частоте входного напряжения $u_1(t)$, т.е. $2\omega=628$ (рад/с). Одинаковы амплитуды U_m напряжений $u_1(t)$ и $u_2(t)$. Поэтому при отсутствии емкостного фильтра ($C=0$) имеем

$$U_0 = \frac{2U_m}{\pi} = 0,9U_1; \quad U_2 = \frac{U_m}{\sqrt{2}} = U_1; \quad k = 2; \quad k_{\Pi} = 0,67, \quad (18.4)$$

причем наибольшее значение выходного напряжения $U_{\max} = U_m$, а наименьшее $U_{\min} = 0$.

1. Трехфазный выпрямитель с нагрузкой в нулевом проводе (рис. 18.4, а).

С увеличением числа фаз в схеме выпрямления форма кривой тока заметно сглаживается. Диоды работают поочередно: открывается диод включенный в фазу, напряжение на которой в данный момент времени имеет положительную полярность и оказывается больше напряжения на другой фазе, имеющего ту же полярность. Если, например,

$$\underline{U}_A = U_m / \sqrt{2} = a\underline{U}_B = a^2\underline{U}_C,$$

то в интервале от $t = 0$ до $t = T/12$ открыт диод в фазе C , поскольку в это время $u_C > u_A > 0 > u_B$. В течение следующей трети периода открыт диод в фазе A , потом столько же в фазе B , снова в фазе C (рис. 20.4, б) и т. д. Ток через нагрузку в любой момент течет в одном и том же направлении.

При отсутствии емкостного фильтра ($C=0$) разложение в ряд Фурье выходного напряжения имеет вид:

$$u_2(t) = \frac{3\sqrt{3} \cdot U_m}{\pi} \left[\frac{1}{2} + \frac{1}{2 \cdot 4} \cos(3\omega t) - \frac{1}{5 \cdot 7} \cos(6\omega t) + \dots \right].$$

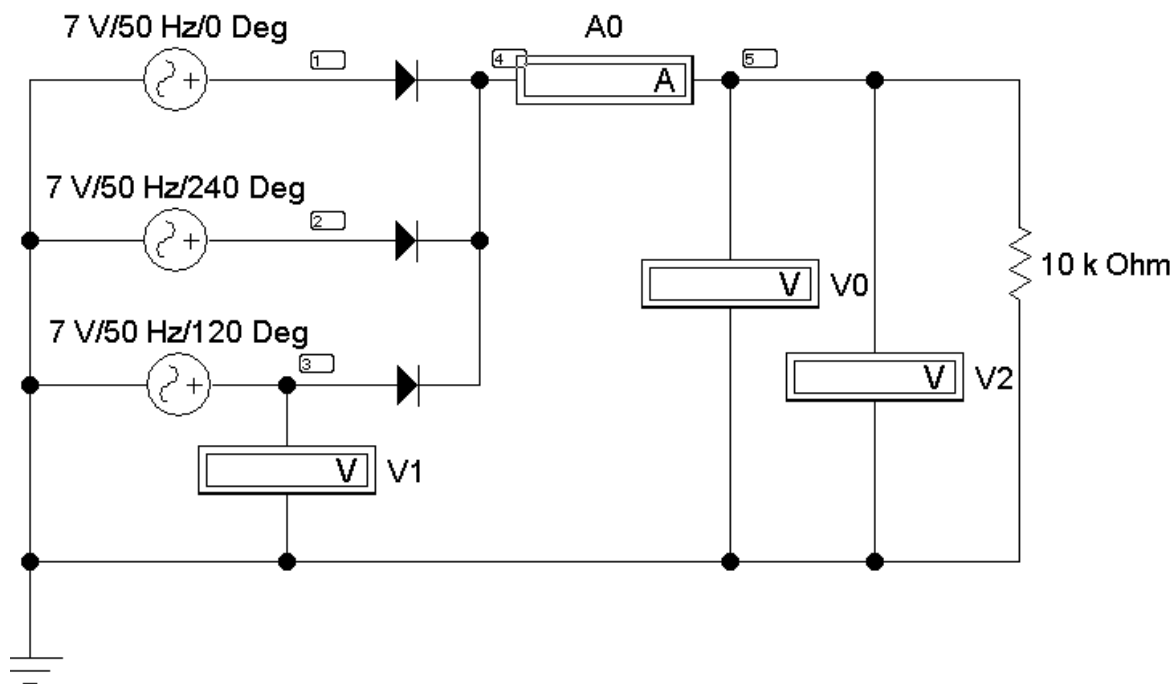


Рис. 18.4, а

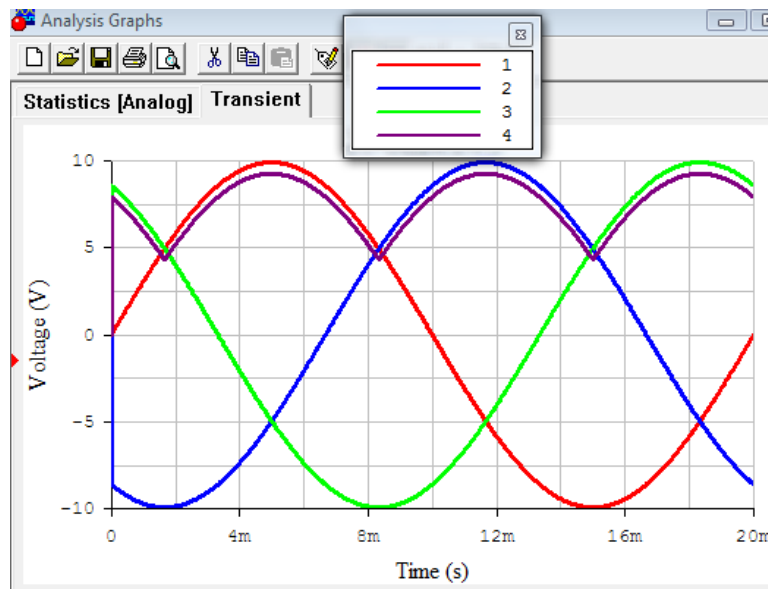


Рис. 18.4, б

Очевидно, что угловая частота основной гармоники выходного напряжения $u_2(t)$ равна утроенной угловой частоте входного фазного напряжения, например, $u_c(t)$, т.е. $3\omega=942$ (рад/с). Одинаковы амплитуды U_m напряжений $u_c(t)$ и $u_2(t)$. Поэтому при отсутствии емкостного фильтра ($C=0$) имеем

$$U_0 = \frac{3\sqrt{3}U_m}{2\pi} = 1,17U_1; \quad U_2 = 1,189U_1; \quad k = 3; \quad k_{\Pi} = 0,25, \quad (18.5)$$

причем наибольшее значение выходного напряжения $U_{\max} = U_m$, а наименьшее $U_{\min} = 0,5 \cdot U_m$.

2. *Трехфазная мостовая выпрямительная схема Ларионова* (рис. 18.5, а).

Эта схема обеспечивает еще большее сглаживание выходного напряжения и не требует наличия нулевого провода. Поочередно открываются пары диодов. Открыта пара, включенная между фаз, разность потенциалов которых имеет в данный момент положительную полярность и превышает напряжение между двумя другими фазами. При том же условии для фазных напряжений, что и в предыдущей схеме, на интервале от $t=0$ до $t=T/12$ этому правилу удовлетворяет линейное напряжение u_{CB} , в следующую шестую часть периода – напряжение u_{AB} , затем $u_{AC}, u_{BC}, u_{BA}, u_{CA}$, снова u_{CB} и т. д. Ток в нагрузке в любой момент времени течет в одном направлении.

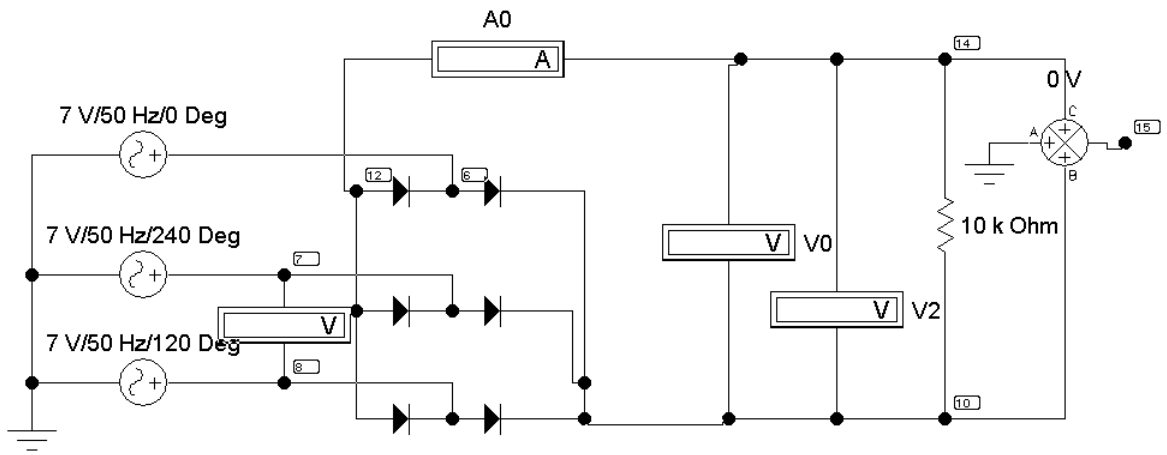


Рис. 18.5, а

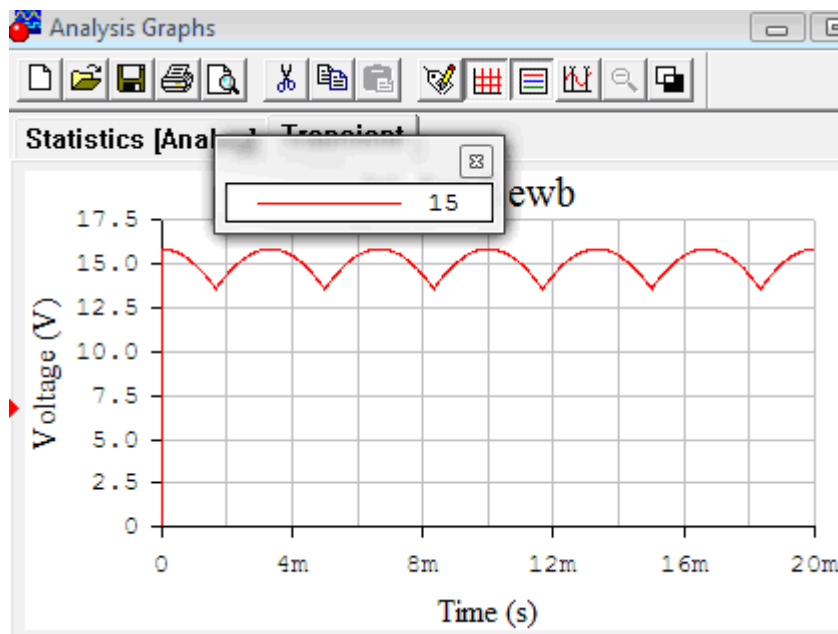


Рис. 18.5, б

При отсутствии емкостного фильтра ($C=0$) разложение в ряд Фурье выходного напряжения имеет вид:

$$u_2(t) = \frac{6 \cdot U_{m1}}{\pi} \left[\frac{1}{2} + \frac{1}{5 \cdot 7} \cos(6\omega t) - \frac{1}{11 \cdot 13} \cos(12\omega t) + \dots \right].$$

Очевидно, что угловая частота основной гармоники выходного напряжения $u_2(t)$ равна $6\omega=1884$ (рад/с). Одинаковы амплитуды $U_{m1} = \sqrt{3}U_m$ напряжений $u_{CA}(t)$ и $u_2(t)$. Поэтому при отсутствии емкостного фильтра ($C=0$) имеем

$$U_0 = \frac{3\sqrt{3}U_m}{\pi} = 1,35U_1; \quad U_2 = 1,3516U_1; \quad k = 6; \quad k_{\Pi} = 0,057 \quad (18.6)$$

причем наибольшее значение выходного напряжения $U_{\max} = \sqrt{3} \cdot U_m$, наименьшее $U_{\min} = 1,5 \cdot U_m$.

Подготовка к работе

Изучив теоретический материал, ответить на следующие вопросы.

1. В чем принципиальное отличие динамических характеристик от статических?

2. Какой вид должна иметь ВАХ нелинейного элемента, чтобы его можно было использовать для выпрямления переменного тока?
3. Нарисуйте форму кривой тока в нагрузке цепи с идеальным диодом при синусоидальном входном напряжении.
4. Что оценивает коэффициент пульсации? Как его подсчитать по осциллограммам и по показаниям приборов? Используя приведенные выше разложения в ряд Фурье и формулы (18.1) и (18.2), рассчитать теоретическое значение $k_{Пг}$ для всех схем выпрямления без фильтра и с фильтром при емкостях согласно табл. 18.1 при $R=10$ (кОм), коэффициенты $k_{Пг}$ внести в табл. 18.2.

Программа работы

1. Выбрать модуль входного напряжения $u_1(t)$ для всех схем выпрямителей в соответствии таблицы 18.1.
2. Собрать электрическую цепь по схеме рис. 18.2,а, срисовать осциллограммы без фильтра и с фильтром, а показания приборов записать в таблицу 18.2.
3. Собрать электрическую цепь по схеме рис. 18.3,а. При разомкнутом положении ключа записать показания приборов и снять осциллограмму выходного напряжения выпрямителя. Для регистрации кривых $u_1(t)$ и $u_2(t)$ достаточно открытие диалогового окна команды Transient Analysis по пути Analysis < Transient. Рассчитать потенциалы узлов **1** и **2**.
4. При замкнутом ключе исследовать влияние величины емкости C фильтра на качество выпрямления. Для этого записать показания приборов и снять осциллограмму выходного напряжения выпрямителя при трех значениях емкости. Показания приборов записывать в табл. 18.3.
5. Изменяя сопротивление нагрузки при отсутствии ёмкостного фильтра (ключ разомкнут) и при $C=100$ мкФ, снять 8-10 показаний приборов, результаты измерений записать в табл. 18.3.
6. Построить в одних осях графики внешних характеристик $U_0(I_0)$ по данным таблицы 18.3.

Таблица 18.2

Выпрямитель		Эксперимент			Расчет	
		U_1	U_0	U_2	$k_{Пг}$	$k_{Пср}$
		В	В	В	-	-
Одно- полупериодный	без фильтра					
	$C = 20$ мкФ					
Двух- полупериодный	без фильтра					
	$C = 1$ мкФ					
	$C = 10$ мкФ					
	$C = 100$ мкФ					
Трехфазный с нулевым проводом						
Схема Ларионова						

Таблица 18.3

$U=...В, C=0$									
$R, кОм$	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$U_0, В$									
$I_0, А$									
$U=...В, C=100мкФ$									
$R, кОм$	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$U_0, В$									
$I_0, А$									

7. Собрать электрическую цепь по схеме рис. 18.4,а , записать показания приборов в табл. 18.2 и снять осциллограмму выходного напряжения выпрямителя.

8. Собрать электрическую цепь по схеме рис. 18.5,а , записать показания приборов в табл. 18.2 и снять осциллограмму выходного напряжения выпрямителя.

9. Измерить наибольшее U_{max} и наименьшее U_{min} значения выходного напряжения $u_2(t)$ на осциллограммах, полученных при исследовании выпрямителей. Вычислить средние значения коэффициента пульсации $k_{Пср}$, рассчитанные по формулам (18.1) с использованием осциллограмм и показаний вольтметров для всех проведенных экспериментов. Записать средние значения коэффициентов пульсации $k_{Пср}$ в табл. 18.2 и сравнить эти коэффициенты с их теоретическими величинами $k_{Пт}$.

10. Проанализировать полученные результаты (сравнить теоретические и средние экспериментальные коэффициенты пульсации) и сделать выводы по работе, ответив на вопросы: Как объяснить понижение напряжения на выходе выпрямителя при увеличении тока нагрузки? Почему ёмкостной фильтр изменяет форму кривой напряжения на приёмнике при изменении тока нагрузки? Как объяснить несоответствие внешних характеристик выпрямителя при работе без фильтра и при включенном фильтре?

Литература

1. Теоретические основы электротехники: учебник для вузов / К.С.Демирчян, Л.Р.Нейман, Н.В.Коровкин. – 5-е изд. – СПб.: Питер, 2009. – (Учебник для вузов). Т. 2. – 2009. – 432 с.

2. Теоретические основы электротехники. Электрические цепи: учебник для бакалавров / Л.А.Бессонов. – 11-е изд., перераб. и доп. – М.: Юрайт, 2012. – 701 с.

3. Основы теории цепей / Г.В.Зевеке, П.А.Ионкин, А.В.Нетушил, С.В.Страхов. М.: Энергоатомиздат, 1989. – 528 с.