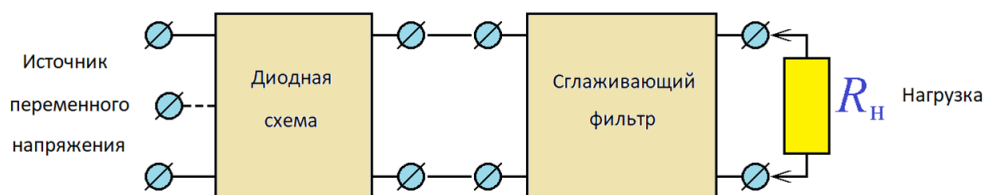


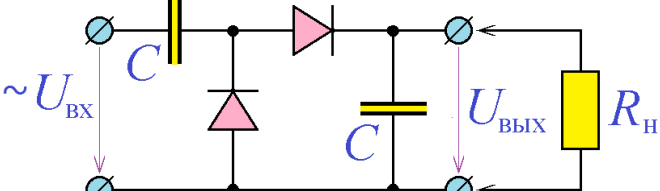
## Рекомендации по выполнению Лабораторной работы №1 «Выпрямители»

Все выпрямители построены по структурной схеме, изображённой на рисунке:

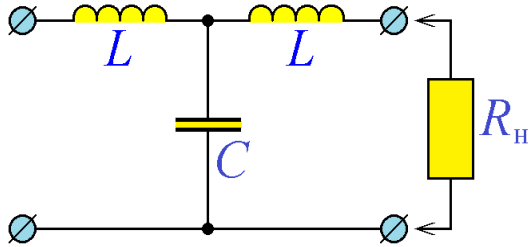
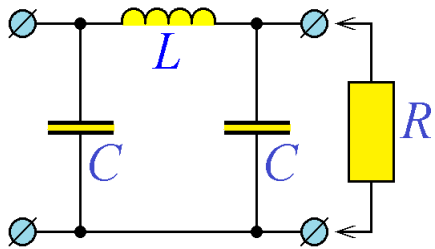
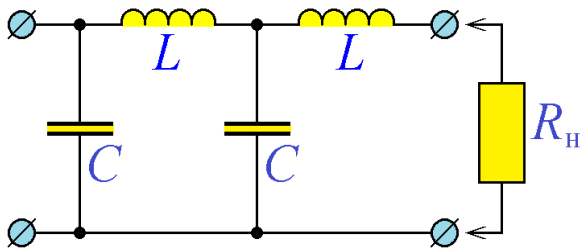
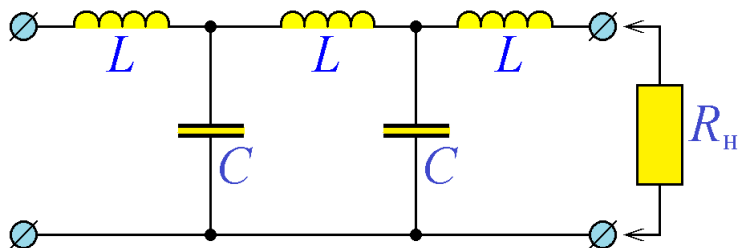
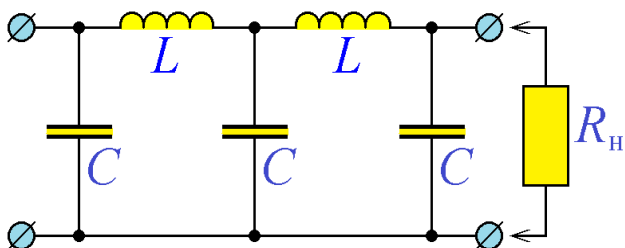


В качестве диодных схем в лабораторной работе используются схемы:

1	Одно-полупериодный выпрямитель	
2	Двух-полупериодный выпрямитель со средней точкой	
3	Мостовой двух-полупериодный выпрямитель	
4	Удвоитель напряжения по схеме Латура. $C = \frac{10}{R_H f}$ (см. Примечание)	

<b>5</b>	Несимметричный удвоитель напряжения $C = \frac{10}{R_H f}$ (см. Примечание)	
----------	--	--

В качестве сглаживающего фильтра в лабораторной работе используются схемы:

<b>1</b>	Т-образный LC-фильтр $C = \frac{5}{R_H f}; \quad L = \frac{2R_H}{f}$ (см. Примечание)	
<b>2</b>	П-образный LC-фильтр $C = \frac{2}{R_H f}; \quad L = \frac{5R_H}{f}$ (см. Примечание)	
<b>3</b>	$C = \frac{2}{R_H f}; \quad L = \frac{2R_H}{f}$ (см. Примечание)	
<b>4</b>	$C = \frac{2}{R_H f}; \quad L = \frac{1,5R_H}{f}$ (см. Примечание)	
<b>5</b>	$C = \frac{1,5}{R_H f}; \quad L = \frac{2R_H}{f}$ (см. Примечание)	

**Примечание:**

Приведённые формулы не являются «абсолютной истиной» и не относятся к диодным схемам и фильтрам приведённого вида. Рассчитанные по формулам величины нужно использовать только в качестве начальной установки номиналов схемы выпрямителей. Далее, для достижения требуемого коэффициента пульсаций, следует изменять эти номиналы одновременно и пропорционально. В приведённых формулах  $f$  – это частота входного переменного напряжения.

После выполнения основного задания разрешается (по согласованию с преподавателем и до конечного срока выполнения Лаб.1) взять в качестве дополнительного задания вариант трёхфазного выпрямителя (с уже использованным сглаживающим фильтром) исследовать его параметры.

### Программа выполнения работы:

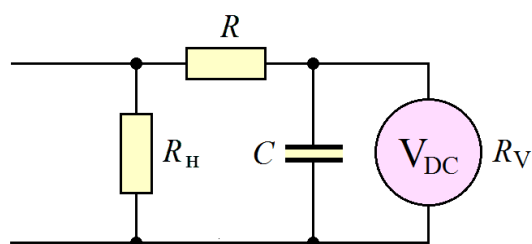
1. Рассчитать сопротивление нагрузки ( $R_H = U_{\text{ВЫХ}}^2 / P_{\text{ВЫХ}}$ ).

2. Собрать заданную диодную схему, подключить к её входу переменное напряжение заданной частоты (в случае выполнения доп. задания – трёхфазное напряжения заданной частоты, устанавливая начальные фазы каждого фазного напряжения), а к выходу – резистор с сопротивлением, рассчитанным в п.1. Диоды диодной схемы следует выбрать из вкладки Diodes / Rectifiers, с максимальным обратным напряжением, не меньшим удвоенной амплитуды входного переменного напряжения, и с максимальным прямым током, не меньшим  $P_{\text{ВЫХ}} / U_{\text{ВЫХ}}$ .

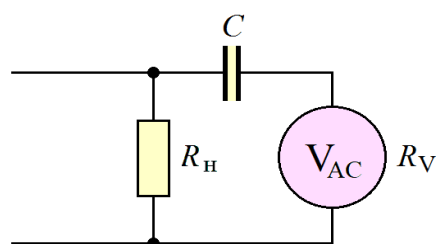
Допускается использовать вместо одного диода несколько последовательно соединённых диодов одной марки, при этом максимальное обратное напряжение возрастает пропорционально количеству диодов сборки. Допускается также использовать вместо одного диода несколько параллельно соединённых диодов одной марки, при этом максимальный ток возрастает пропорционально количеству диодов сборки.

Амплитуду входного напряжения (в программах-симуляторах устанавливается, как правило, действующее значение, а не амплитуда) изначально рекомендуется выбрать равной требуемому выходного напряжения.

3. Включить симуляцию и измерить величины выходного напряжения  $U_{\text{ВЫХ}}$  и коэффициента пульсаций выпрямителя  $K_{\Pi} = U_{\Pi} / U_{\text{ВЫХ}}$ :



Измерение  $U_{\text{ВЫХ}}$ ,  
( $R \gg R_H$ ,  $R_V \gg R$ ,  $C \gg 1/(Rf)$ )



Измерение  $U_{\Pi}$ ,  
( $R_V \gg R_H$ ,  $C \gg 1/(R_V f)$ )

Измерения можно привести, используя приведённые схемы, а можно (особенно для выпрямителей низкочастотных сигналов) – с помощью осциллографа. В последнем случае два канала осциллографа следует подключить к нагрузке, один канал осциллографа (в режиме DC) будет показывать напряжение на нагрузке (которое можно измерить с помощью маркера), а другой (в режиме AC) – пульсации на нагрузке и с помощью маркерных измерений можно измерить размах пульсаций  $r$ , (расстояние в вольтах между максимальным и минимальным значениями

осциллограммы пульсаций), по которому можно вычислить действующее значение сигнала  $U_{\Pi} = r / (2\sqrt{2})$ .

При измерениях согласно приведённым рисункам следует контролировать, что постоянная времени вольтметра переменного тока имеет значение, много (по крайней мере, в 10 раз) большее, чем период входного напряжения  $1/f$ .

4. Подобрать амплитуду входного напряжения  $U_{BX0}$ , при которой реализуется заданное значение выходного напряжения выпрямителя и измерить соответствующий коэффициент пульсаций  $U_{\Pi0}$ . При этом, увеличивая амплитуду входного напряжения, следует контролировать максимальное обратное напряжение диодов диодной схемы, как это делалось в п.2.

С помощью осциллографа проконтролировать форму выходного напряжения выпрямителя и убедиться, что она «такая, какая должна быть».

Иногда выходной сигнал (особенно пульсации выходного сигнала) проявляет сильно нестабильное «поведение», даже после истечения очень большого времени. Это связано со слишком низкой частотой дискретизации Proteus. Поднять её очень просто – нужно добавить в проект генератор с частотой в 10-100 раз больше, чем заданная частота варианта, и подключить его, например, к неиспользуемому каналу осциллографа.

5. Собрать заданную схему сглаживающего фильтра и вставить её в собранную ранее схему.

**Обратите внимание! При исследовании однополупериодного выпрямителя (диодная схема 1) и фильтров, на входе которых присутствует индуктивность с открытым концом (схемы 1 и 4) необходимо использовать диод обратного хода.** Максимальное обратное напряжение диода обратного хода должно быть не менее амплитуды входного переменного напряжения.

Включить симуляцию, пронаблюдать изменения в форме выходного сигнала и измерить значения  $U_{ВЫХ}$  и  $K_{\Pi}$ .

6. Изменяя значения амплитуды входного напряжения  $U_{BX}$  и номиналов элементов сглаживающего фильтра (и не изменяя сопротивление нагрузки), добиться требуемых значений  $U_{ВЫХ}$  и  $K_{\Pi}$ . При этом рекомендуется использовать следующий метод подбора: сначала изменять только номиналы элементов фильтра (одновременно и синхронно, увеличение в 2 раза  $C$  влечёт за собой увеличение в 2 раза  $L$ ) до достижения требуемого значения  $K_{\Pi}$ , затем изменять только  $U_{BX}$  ( $K_{\Pi}$  при этом изменяться не должен) до достижения требуемого значения  $U_{ВЫХ}$ . Окончательные значения номиналов фильтра следует выбрать из ряда E24 (за нестандартные номиналы оценка снижается на 1 балл), допустимыми считаются отклонения  $K_{\Pi}$  от требуемого значения  $\pm 10\%$ ,  $U_{ВЫХ} - \pm 1\%$

7. Изменяя значение сопротивления нагрузки от  $\infty$  (в этом случае к выходу схемы можно не подключать ничего, либо подключить резистор с сопротивлением

100 000  $R_H$ ) до  $R_H/5$ , снять зависимость  $U_{\text{ВЫХ}}(I_{\text{ВЫХ}})$  и  $K_{\Pi}(I_{\text{ВЫХ}})$ . Выходной ток  $I_{\text{ВЫХ}}$  следует либо измерять амперметром постоянного тока, либо вычислять как  $I_{\text{ВЫХ}} = U_{\text{ВЫХ}}/R$ , где  $R$  - текущее значения сопротивления нагрузки. Заполнить таблицу, в которой записаны значения  $R$ ,  $U_{\text{ВЫХ}}$ ,  $I_{\text{ВЫХ}}$ ,  $U_{\Pi}$  и  $K_{\Pi}$ .

Иногда возникает ещё одна неадекватность системы моделирования Proteus. Конденсаторы и катушки индуктивности в системе Proteus – идеальные. В замкнутых цепях на их основе сразу после включения симуляции могут возникнуть незатухающие колебания, имеющие период не входного переменного сигнала, а определяющийся номиналами  $L$  и  $C$ . Это проявляется, как правило, при  $R_H \rightarrow \infty$ . В это случае допускается не отмечать на графиках точку  $R_H = \infty$  ( $I_{\text{ВЫХ}} = 0$ ).

По заполненной таблице построить графики зависимостей  $U_{\text{ВЫХ}}(I_{\text{ВЫХ}})$  и  $K_{\Pi}(I_{\text{ВЫХ}})$ . Оба графика следует построить так, чтобы вертикальная ось имела значение 0. При правильном выполнении работы на горизонтальной оси графика  $K_{\Pi}(I_{\text{ВЫХ}})$  полностью помещается интервал от 0 до  $5U_{\text{ВЫХ}}/R_H$ , при  $I_{\text{ВЫХ}} \rightarrow 0$   $K_{\Pi}$  линейно стремится к 0, при больших значениях  $I_{\text{ВЫХ}}$  график  $K_{\Pi}(I_{\text{ВЫХ}})$  убывает, а максимум  $K_{\Pi}(I_{\text{ВЫХ}})$  наблюдается не очень далеко от значения  $I_{\text{ВЫХ}} = U_{\text{ВЫХ}}/R_H$ . Если максимум  $K_{\Pi}$  на построенном графике не наблюдается, следует увеличить интервал изменения сопротивления нагрузки.

8. По таблице измерений и построенному графику  $U_{\text{ВЫХ}}(I_{\text{ВЫХ}})$  вычислить напряжение холостого хода, то есть значение  $U_{\text{ВЫХ}}(I_{\text{ВЫХ}})|_{I_{\text{ВЫХ}}=0}$ . Для этого достаточно оставить свободным выход выпрямителя (не подключить ничего) и измерить  $U_{\text{ВЫХ}}$  вольтметром постоянного тока.

9. Определить внутреннее сопротивление выпрямителя. Это можно сделать двумя способами:

Способ А: по таблице измерений и/или построенному графику  $U_{\text{ВЫХ}}(I_{\text{ВЫХ}})$ .

На график  $U_{\text{ВЫХ}}(I_{\text{ВЫХ}})$  нанести ВАХ резисторов с сопротивлениями  $R_H + r$  и  $R_H - r$ , где  $r$  – достаточно малая величина, например,  $0,01R_H$ . Найти координаты точки пересечения этих ВАХ с нагрузочной характеристикой выпрямителя  $U(I)$  –  $(U_+; I_+)$  для резистора  $R_H + r$  и  $(U_-; I_-)$  для резистора  $R_H - r$ . (Для этого, возможно, понадобится максимально увеличить масштаб графика.)

Можно для определения координат точек пересечения не строить реально графики, а решить системы уравнений из ВАХ резистора и прямой линии, проведённой через две точки нагрузочной характеристики  $U_{\text{ВЫХ}}(I_{\text{ВЫХ}})$ .

Вычислить внутреннее сопротивление по формуле

$$R_{\text{ВНУТР}} = -(U_+ - U_-)/(I_+ - I_-).$$

Способ Б: Непосредственным измерением.

Подключить к построенному выпрямителю по очереди две разные нагрузки с сопротивлениями  $R_H + r$  и  $R_H - r$ , где  $r$  – достаточно малая величина, например,  $0,01 R_H$ . Непосредственными измерениями определить напряжение на нагрузке и ток через неё. Далее воспользоваться той же формулой

$$R_{\text{ВНУТР}} = -(U_+ - U_-)/(I_+ - I_-).$$

10. Определить «коэффициент стабилизации» выпрямителя (в кавычках – потому что, как правило, выпрямители не применяются для стабилизации напряжения, и их «коэффициент стабилизации» несильно отличается от 1). Для этого подключить к выходу выпрямителя нагрузку с сопротивлением  $R_H$ , а к его входу – по очереди переменное напряжение с амплитудой  $U_{\text{ВХ}} + \Delta$  и  $U_{\text{ВХ}} - \Delta$ , где  $U_{\text{ВХ}}$  – найденное в п.6 номинальное входное напряжение, а  $\Delta$  – достаточно малая величина, например,  $0,01 U_{\text{ВХ}}$ . Измерить в обоих случаях выходное напряжение выпрямителя  $U_{\text{ВЫХ+}}$  и  $U_{\text{ВЫХ-}}$ . Вычислить «коэффициент стабилизации» выпрямителя по формуле  $k = 2\Delta/(U_{\text{ВЫХ+}} - U_{\text{ВЫХ-}})$ .

### Содержание отчёта:

Отчёт должен содержать:

1. Расчёт номинальной нагрузки выпрямителя и её значение<sup>1</sup>

2. Самостоятельно выполненную (в любом графическом редакторе) итоговую схему выпрямителя со сглаживающим фильтром. Схема должна содержать обозначения только российского ГОСТ и определённые в п.6 номиналы элементов. За применение обозначений, отличных от ГОСТ, оценка снижается на 1 балл, за необозначение точек соединения проводников – на 2 балла, за рукописные символы на схеме – на 1 балл.

3. Найденное (в п.4) номинальное значение входного напряжения выпрямителя  $U_{\text{ВХ0}}$  без сглаживающего фильтра его коэффициент пульсаций  $U_{\text{П0}}$ .

4. Определённые в п.6 номиналы элементов сглаживающего фильтра и номинальное значение входного напряжения  $U_{\text{ВХ0}}$ , обеспечивающие заданные значения выходного напряжения и коэффициента пульсаций.

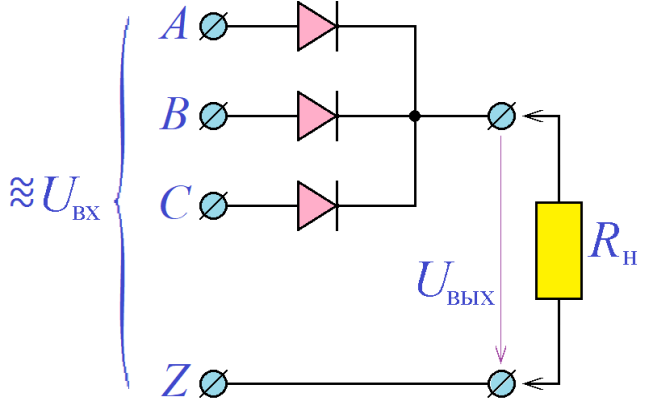
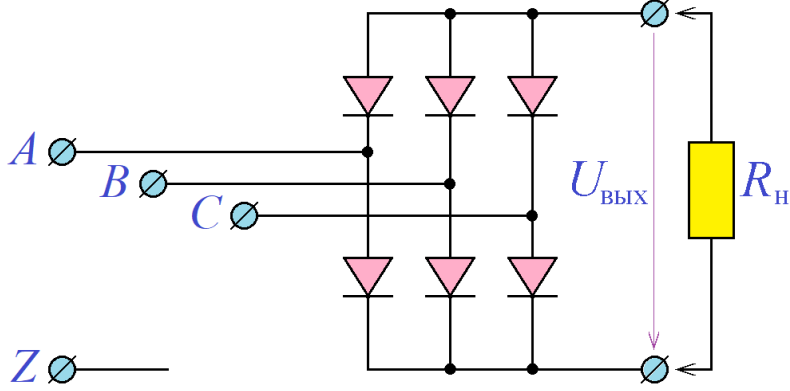
5. Таблицы и графики снятых в п.7 зависимостей  $U_{\text{ВЫХ}}(I_{\text{ВЫХ}})$  и  $K_{\text{П}}(I_{\text{ВЫХ}})$ . На графике  $K_{\text{П}}(I_{\text{ВЫХ}})$  обязательно должен быть виден его максимум и желательно (до +2 балла) асимптотики при  $I_{\text{ВЫХ}} \rightarrow 0$  и  $I_{\text{ВЫХ}} \rightarrow \infty$ .

6. Напряжение холостого хода выпрямителя, определённое в п.8.

7. Внутреннее сопротивление выпрямителя, определённое в п.9. Допускается использовать как Способ А, так и Способ Б. При использовании обоих способов измерения внутреннего сопротивления оценка увеличивается на 1 балл.

8. «Коэффициент стабилизации», определённый в п.10.

**В качестве дополнительного задания** к лабораторной работе №1 можно взять дополнительное задание (только после выполнения основного задания и до выдачи задания на лабораторную работу №2) – построить и исследовать трёхфазный выпрямитель по одной из схем:

1	Схема Миткевича	
2	Схема Ларионова	

При выполнении дополнительного задания (+5 баллов) остаются те же самые Программа выполнения и Содержание отчёта, значения частоты входного напряжения, величины выходного напряжения, выходной мощности и коэффициента пульсаций также остаются теми же самыми, что и в основном задании.

Варианты заданий приведены в таблице:

№ варианта	Частота	Диодная схема	Сглажив. фильтр	$U_{\text{ВЫХ}}, В$	$P_{\text{ВЫХ}}, Вт$	$K_{\Pi}, \%$
1	15	1	1	4,5	10	0,2
2	200	3	1	15	1000	1,5
3	120	4	1	15	600	1,5
4	300	3	4	1500	10	10
5	20	3	5	200	35	1,5
6	300	2	1	120	450	0,5
7	60	4	4	200	600	1,5
8	300	5	3	60	600	10
9	120	2	4	6	450	0,5
10	300	3	3	27	35	5
11	120	4	5	15	35	1,5
12	150	4	5	24	200	3
13	1000	5	4	200	150	1,5
14	300	2	4	27	200	5
15	800	3	3	300	150	3
16	20	2	1	60	35	10
17	1000	1	3	200	10	1,5
18	120	3	3	60	450	10
19	500	3	5	60	150	10
20	400	2	2	150	600	1
21	300	1	3	500	300	5
22	100	4	4	12	10	1
23	60	5	2	60	1000	10
24	60	1	4	15	150	1,5
25	15	2	3	12	35	1
26	500	3	2	200	100	1,5
27	500	2	3	200	1000	1,5
28	400	1	4	1000	450	7
29	200	3	5	120	1000	0,5
30	250	4	4	35	35	7
31	800	4	2	12	150	1
32	1000	4	2	120	300	0,5
33	100	1	5	24	200	3
34	50	2	1	1000	150	7
35	60	4	3	6	1000	0,5
36	500	4	4	500	150	5
37	120	4	4	15	150	1,5
38	100	1	1	24	35	3
39	60	3	1	27	200	5
40	120	1	2	27	100	5



№ варианта	Частота	Диодная схема	Сглажив. фильтр	$U_{\text{ВЫХ}}, В$	$P_{\text{ВЫХ}}, Вт$	$K_{\Pi}, \%$
41	300	5	5	6	200	0,5
42	20	1	2	6	35	0,5
43	800	1	2	150	1000	1
44	1000	1	4	27	1000	5
45	1000	3	4	500	200	5
46	120	1	5	6	10	0,5
47	1000	2	5	500	35	5
48	400	1	1	12	300	1
49	300	4	2	200	35	1,5
50	100	4	5	300	1000	3
51	500	4	1	6	100	0,5
52	15	3	4	150	10	1
53	20	1	5	500	100	5
54	15	5	2	4,5	450	0,2
55	150	2	5	12	600	1
56	800	1	3	24	600	3
57	50	1	2	1000	450	7
58	50	2	2	90	100	0,2
59	800	3	2	90	600	0,2
60	400	4	3	300	100	3
61	150	5	2	1000	35	7
62	400	3	5	4,5	35	0,2
63	60	1	3	1500	600	10
64	400	3	1	150	35	1
65	1000	2	2	6	10	0,5
66	60	5	5	15	10	1,5
67	250	5	2	35	450	7
68	20	5	3	6	600	0,5
69	200	1	4	60	200	10
70	800	2	4	300	10	3
71	200	3	2	500	600	5
72	20	4	1	1500	450	10
73	100	2	3	4,5	300	0,2
74	50	4	3	150	450	1
75	800	2	1	4,5	1000	0,2
76	150	5	5	150	100	1
77	500	1	2	15	450	1,5
78	120	5	4	120	35	0,5
79	50	4	1	4,5	10	0,2
80	200	5	2	27	150	5

№ варианта	Частота	Диодная схема	Сглажив. фильтр	$U_{\text{ВЫХ}}, В$	$P_{\text{ВЫХ}}, Вт$	$K_{\Pi}, \%$
81	100	4	3	12	100	1
82	400	5	5	90	450	0,2
83	250	3	2	24	10	3
84	250	4	1	150	10	1
85	500	5	5	120	10	0,5
86	800	5	3	150	100	1
87	120	2	1	27	300	5
88	300	4	5	60	100	10
89	20	3	2	1500	150	10
90	150	2	1	12	35	1
91	20	2	4	15	100	1,5
92	400	2	5	35	300	7
93	800	4	5	1000	200	7
94	400	5	4	90	1000	0,2
95	200	4	3	27	10	5
96	120	5	1	500	10	5
97	50	5	1	35	600	7
98	100	1	4	4,5	1000	0,2
99	250	2	4	90	1000	0,2
100	1000	3	3	120	1000	0,5
101	15	1	5	35	10	7
102	150	4	2	24	1000	3
103	100	3	2	35	300	7
104	100	2	4	150	200	1
105	250	1	2	300	200	3
106	250	5	4	4,5	150	0,2
107	50	3	3	4,5	200	0,2
108	15	5	5	300	200	3
109	150	5	1	24	100	3
110	500	1	5	1500	600	10
111	250	5	3	35	200	7
112	400	5	1	90	10	0,2
113	15	1	4	300	35	3
114	100	5	3	90	10	0,2
115	100	3	5	12	450	1
116	60	4	2	6	35	0,5
117	300	2	5	120	10	0,5
118	400	3	4	35	100	7
119	150	3	1	300	450	3
120	50	5	4	12	1000	1

№ варианта	Частота	Диодная схема	Сглажив. фильтр	$U_{\text{ВЫХ}}, В$	$P_{\text{ВЫХ}}, Вт$	$K_{\Pi}, \%$
121	500	3	1	60	450	10
122	15	3	5	1000	300	7
123	20	4	5	27	450	5
124	20	1	1	500	300	5
125	200	1	1	200	150	1,5
126	250	3	3	1000	1000	7
127	300	5	4	60	300	10
128	150	2	2	35	450	7
129	200	5	3	1500	100	10
130	60	2	2	1500	200	10
131	150	1	3	35	150	7
132	200	2	3	60	600	10
133	150	3	4	90	600	0,2
134	1000	4	3	15	200	1,5
135	120	2	5	200	300	1,5
136	15	3	1	1000	100	7
137	250	1	5	90	300	0,2
138	50	2	5	24	150	3
139	60	2	3	120	150	0,5
140	800	4	1	90	200	0,2
141	200	2	2	15	100	1,5
142	60	3	4	6	300	0,5
143	50	1	3	12	100	1
144	250	2	3	24	150	3
145	200	5	1	27	300	5
146	500	1	1	120	600	0,5
147	500	5	2	120	35	0,5
148	15	4	4	24	300	3
149	50	4	2	4,5	600	0,2
150	1000	5	1	1500	300	10