

Использование ионисторов в блоках питания слаботочных электропотребителей (Андреев С.А., Сторчевой В.Ф., Кабдин Н.Е.)

При разработке блоков питания слаботочных потребителей обычно встает вопрос о выборе заряжаемых накопителей энергии. Ранее этот выбор однозначно определялся в пользу химических аккумуляторов. Современные химические аккумуляторы обладают достаточно высоким КПД, однако их рабочие характеристики сильно зависят от температуры и режимов отбора запасенной энергии, а срок эксплуатации невелик. В последнее время возрастающее значение в качестве накопителей электрической энергии приобретают конденсаторы сверхбольшой емкости (суперконденсаторы или ионисторы), обладающие рядом преимуществ [122]. Ионисторы допускают эксплуатацию в произвольных режимах, безопасны, легко утилизируются, способны выдержать чрезвычайно большое количество циклов «заряда-разряда», а их характеристики стабильны с изменением температуры. Вместе с тем ионисторы характеризуются довольно низкой плотностью аккумулированной энергии, а напряжение на них начинает убывать сразу после подключения нагрузки. Традиционное решение проблемы за счет использования параметрической стабилизации напряжения малоэффективно, поскольку при этом часть накопленной энергии не используется. Кроме того, при таком подходе превышение напряжения над номинальным значением сопровождается уменьшением внутреннего сопротивления стабилитрона, увеличением тока и повышением тепловых потерь. Таким образом, актуальными задачами являются исследование процесса извлечения запасенной энергии и его оптимизация с учетом необходимости поддержания постоянства напряжения на нагрузке.

Целью работы является исследование процесса разряда ионистора, определение энергетических потерь на различных участках схем питания и обоснование способа динамической коммутации ионисторов при их использовании в качестве накопителей энергии в блоках питания

низкоэнергетических потребителей.

В качестве материала исследований использовались ионисторы, переменные резисторы, имитирующие активные сопротивления участков цепи, и магнитоэлектрические измерительные приборы. При выполнении теоретических исследований применялись сведения из теории переходных процессов и классические приемы расчета электрических цепей.

Для оценки количества энергии, доставленной потребителю мощностью P в течение времени t , воспользуемся выражением:

$$W = P \cdot t; \quad (139)$$

Энергия, накапливаемая ионистором, определяется формулой:

$$W = \frac{C U^2}{2}; \quad (140)$$

где C – емкость ионистора; Ф;

U – напряжение на обкладках ионистора, В

В процессе разряда ионистора напряжение на его зажимах уменьшается с U_{max} до U_{min} . В связи с этим фактически использованная часть энергии представляет собой разность между полной энергией, сосредоточенной в ионисторе при $U = U_{max}$, и энергией, оставшейся в нем по окончании разряда при $U = U_{min}$. Таким образом, если $W_{полн.} = \frac{C U_{max}^2}{2}$, и $W_{ост.} = C U_{min}^2$, то

$$W_{исп.} = \frac{C (U_{max}^2 - U_{min}^2)}{2}; \quad (141)$$

Величину емкости ионистора, необходимую для накопления энергии, определим из соотношения:

$$C = \frac{2W}{U_{max}^2 - U_{min}^2} = \frac{2Pt}{U_{max}^2 - U_{min}^2}; \quad (142)$$

С целью увеличения запасенной энергии необходимо либо увеличить U_{max} , либо уменьшить U_{min} . Однако значительное увеличение U_{max} сдерживается техническими ограничениями, связанными с вероятностью

пробоя ионистора. В то же время чрезмерное уменьшение U_{min} недопустимо из-за соответствующих требований потребителя. Если принять во внимание, что полная энергия, запасаемая ионистором, составляет 100%, то доля использованной энергии может быть оценена соотношением:

$$X = \frac{100 \cdot W_{исн}}{W_{полн}} = \frac{100 \cdot (C U_{max}^2 - C U_{min}^2) \cdot 2}{2 C U_{max}^2} = \frac{100 \cdot (U_{max}^2 - U_{min}^2)}{U_{max}^2} \% ; \quad (143)$$

Выразив U_{min} в выражении (5) через U_{max} , и введя обозначение $k = \frac{U_{max}}{U_{min}}$,

получим:

$$X = \frac{100 \cdot (U_{max}^2 - \frac{U_{max}^2}{k})}{U_{max}^2} = \frac{100 \cdot U_{max}^2 - \frac{100}{k} \cdot U_{max}^2}{U_{max}^2} = 100 - \frac{100}{k} ; \quad (144)$$

Из выражения (153) следует, что процентная доля энергии, используемой ионистором, зависит от соотношения напряжений. Задаваясь рядом значений $k = \frac{U_{max}}{U_{min}}$, построим график зависимости доли используемой энергии ионистором от отношения U_{max} и U_{min} (Рисунок 73).

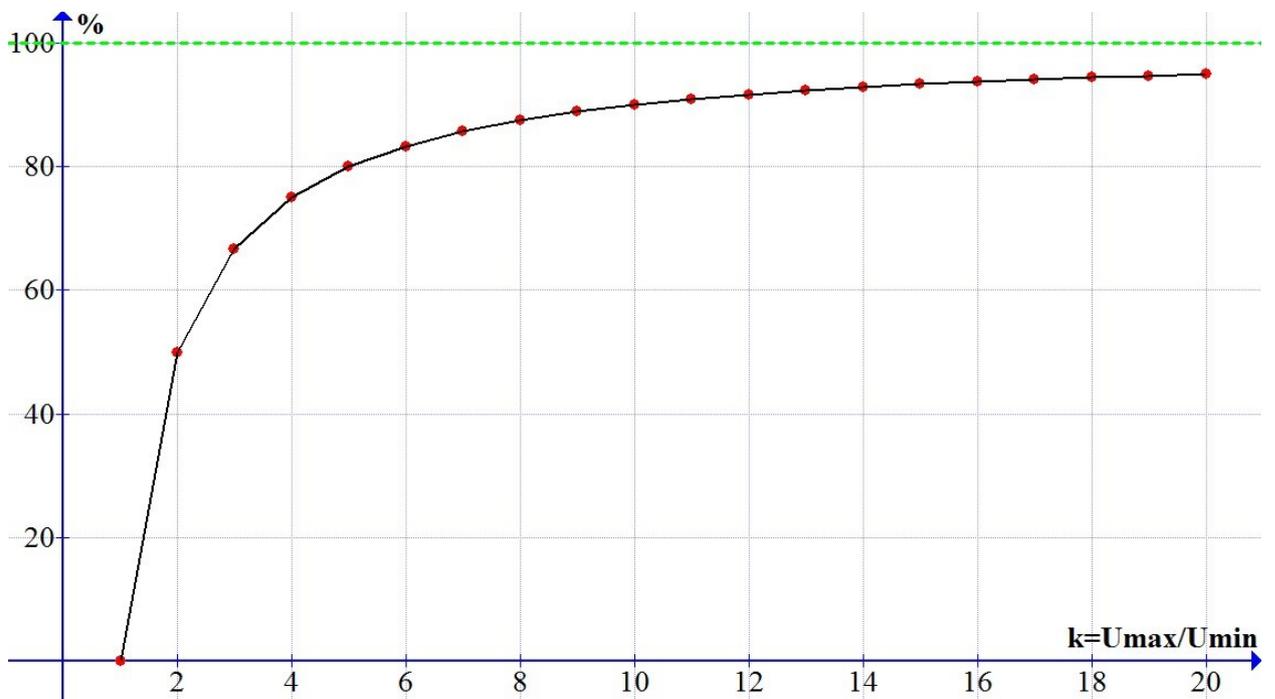


Рисунок 73. – График зависимости процентной доли использованной энергии ионистором от отношения U_{max} и U_{min}

Рассматривая график, можно сделать вывод, что если U_{max} в два раза превышает U_{min} , то использованию подлежат 50% запасенной энергии. Если же это превышение окажется двадцатикратным, то доля используемой энергии достигнет 95%. Для обеспечения постоянства напряжения на нагрузке к ионистору традиционно подключают стабилитрон (или иной полупроводниковый элемент), внутреннее сопротивление R_q которого изменяется при изменении условий работы [123]. В таком случае цепь разряда ионистора представляется схемой замещения, изображенной на Рисунок 74.

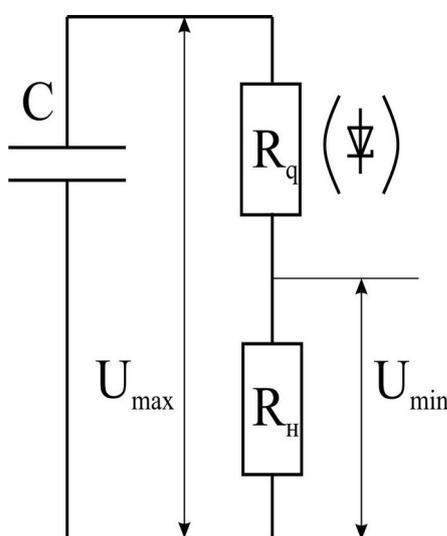


Рисунок 74. – Схема замещения цепи разряда ионистора

Для схемы замещения справедливо равенство:

$$U_{max} = I_n \cdot (R_q + R_n) = I_n R; \quad (145)$$

В результате деления всех членов выражения (154) на I_n получим:

$$\frac{U_{max}}{I_n} = R_q + R_n;$$

Следовательно,

$$R_q = \frac{U_{max}}{I_n} - R_n; \quad (146)$$

В то же время, при минимально допустимом напряжении на нагрузке

значение тока можно определить как $I_n = \frac{U_{min}}{R_n}$.

В результате подстановки этого выражения в условие (155) формируется запись:

$$R_q = \frac{R_n U_{max}}{U_{min}} - R_n;$$

Представим сумму $R = R_q + R_n$ в следующей форме:

$$R = \frac{R_n U_{max}}{U_{min}} - R_q + R_n = \frac{R_n U_{max}}{U_{min}}; \quad (147)$$

При разряде ионистора на активное сопротивление R напряжение на его зажимах будет меняться в соответствии с законом: $u = u_0 e^{\frac{-t}{RC}}$,

где t – время, с; u_0 – напряжение на ионисторе при $t=0$, В [124].

Принимая во внимание выражение (156), запишем:

$$u = U_{max} e^{\frac{-t U_{min}}{U_{max} R_n C}}; \quad (148)$$

По Рисунок 74 можно видеть, что полное сопротивление R определяется постоянным сопротивлением нагрузки R_n и переменным полупроводниковым эквивалентом R_q . Примечательно, что сопротивление контура разряда ионистора зависит и от времени, и от значения напряжения на его зажимах. Вследствие зависимости напряжения на ионисторе от сопротивления выражение (157) приобретает рекурсивный характер.

Определим значения напряжения на ионисторе через равные промежутки времени Δt (при $\Delta t = 0,01$; $0,1$ и 1 с), когда $U_{max} = 2U_{min}$. Используем символ « n » для обозначения номера интервала времени. При этом примем, что $C = 1$ Ф и $R_n = 100$ Ом:

$$u(0) = U_{max} \cdot e^{\frac{-0 \cdot U_{min}}{U_{max} \cdot R_n \cdot C}};$$

$$u(1) = U(0) \cdot e^{\frac{-\Delta t \cdot U_{min}}{u(0) \cdot R_n \cdot C}};$$

$$u(2) = U(1) \cdot e^{\frac{-\Delta t \cdot U_{min}}{u(1) \cdot R_n \cdot C}};$$

$$u(n) = U(n-1) \cdot e^{\frac{-\Delta t \cdot U_{min}}{u(n-1) \cdot R_n \cdot C}};$$

Результаты расчета представлены в Таблица 28.

Таблица 28

Напряжение на обкладках ионистора в процессе его разряда

t, с	$\Delta t=0,01$ с	$\Delta t=0,1$ с	$\Delta t=1$ с	t, с	$\Delta t=0,01$ с	$\Delta t=0,1$ с	$\Delta t=1$ с
	Напряжение U, В				Напряжение U, В		
0	6	6	6	50	4,50	4,50	4,50
1	5,97	5,97	5,97	51	4,47	4,47	4,47
2	5,94	5,94	5,94	52	4,44	4,44	4,44
3	5,91	5,91	5,91	53	4,41	4,41	4,41
4	5,88	5,88	5,88	54	4,38	4,38	4,38
5	5,85	5,85	5,85	55	4,35	4,35	4,35
6	5,82	5,82	5,82	56	4,32	4,32	4,32
7	5,79	5,79	5,79	57	4,29	4,29	4,29
8	5,76	5,76	5,76	58	4,26	4,26	4,26
9	5,73	5,73	5,73	59	4,23	4,23	4,23
10	5,70	5,70	5,70	60	4,20	4,20	4,20
11	5,67	5,67	5,67	61	4,17	4,17	4,17
12	5,64	5,64	5,64	62	4,14	4,14	4,14
13	5,61	5,61	5,61	63	4,11	4,11	4,11
14	5,58	5,58	5,58	64	4,08	4,08	4,08
15	5,55	5,55	5,55	65	4,05	4,05	4,05
16	5,52	5,52	5,52	66	4,02	4,02	4,02
17	5,49	5,49	5,49	67	3,99	3,99	3,99
18	5,46	5,46	5,46	68	3,96	3,96	3,96
19	5,43	5,43	5,43	69	3,93	3,93	3,93
20	5,40	5,40	5,40	70	3,90	3,90	3,90
21	5,37	5,37	5,37	71	3,87	3,87	3,87
22	5,34	5,34	5,34	72	3,84	3,84	3,84
23	5,31	5,31	5,31	73	3,81	3,81	3,81
24	5,28	5,28	5,28	74	3,78	3,78	3,78
25	5,25	5,25	5,25	75	3,75	3,75	3,75
26	5,22	5,22	5,22	76	3,72	3,72	3,72
27	5,19	5,19	5,19	77	3,69	3,69	3,69
28	5,16	5,16	5,16	78	3,66	3,66	3,66
29	5,13	5,13	5,13	79	3,63	3,63	3,63
30	5,10	5,10	5,10	80	3,60	3,60	3,60
31	5,07	5,07	5,07	81	3,57	3,57	3,57
32	5,04	5,04	5,04	82	3,54	3,54	3,54
33	5,01	5,01	5,01	83	3,51	3,51	3,51
34	4,98	4,98	4,98	84	3,48	3,48	3,48
35	4,95	4,95	4,95	85	3,45	3,45	3,45
36	4,92	4,92	4,92	86	3,42	3,42	3,42
37	4,89	4,89	4,89	87	3,39	3,39	3,39

38	4,86	4,86	4,86	88	3,36	3,36	3,36
39	4,83	4,83	4,83	89	3,33	3,33	3,33
40	4,80	4,80	4,80	90	3,30	3,30	3,30
41	4,77	4,77	4,77	91	3,27	3,27	3,27
42	4,74	4,74	4,74	92	3,24	3,24	3,24
43	4,71	4,71	4,71	93	3,21	3,21	3,21
44	4,68	4,68	4,68	94	3,18	3,18	3,18
45	4,65	4,65	4,65	95	3,15	3,15	3,15
46	4,62	4,62	4,62	96	3,12	3,12	3,12
47	4,59	4,59	4,59	97	3,09	3,09	3,09
48	4,56	4,56	4,56	98	3,06	3,06	3,07
49	4,53	4,53	4,53	99	3,03	3,03	3,04
				100	3,00	3,00	3,01

С целью повышения наглядности расчет напряжений был повторен при $\Delta t=10, 20$ и 50 с. По причине значительных различий полученных результатов утрачивается необходимость статистической обработки полного массива.

Таблица 29

**Напряжение на обкладках ионистора при
укрупненных временных интервалах**

n	$\Delta t=10$ с	$\Delta t=20$ с	$\Delta t=50$ с
	Напряжение U , В		
0	6,00	6,00	6,00
1	5,70	5,42	4,67
2	5,41	4,86	3,39
3	5,12	4,29	–
4	4,83	3,73	–
5	4,54	3,18	–
6	4,25	–	–
7	3,96	–	–
8	3,67	–	–
9	3,38	–	–
10	3,09	–	–

По расчетным значениям напряжения построим кривую разряда ионистора, представленную на Рисунок 75. В тех же координатах изобразим график разряда ионистора при постоянном сопротивлении R_q .

Из представленных на Рисунок 75 кривых видно, что графики, иллюстрирующие изменение напряжения от 6 до 3 В, находятся между кривой разряда ионистора при постоянном сопротивлении: $u(t)=6 \cdot e^{\frac{-t}{(100+100) \cdot 1}}$ и прямой линией $u(t)=-3t/100$. Последняя линия представляет собой касательную, проведенную к кривой разряда в точке $t=0$. Несложно заметить, что при $\Delta t \rightarrow 0$ кривая изменения напряжения стремится к касательной.

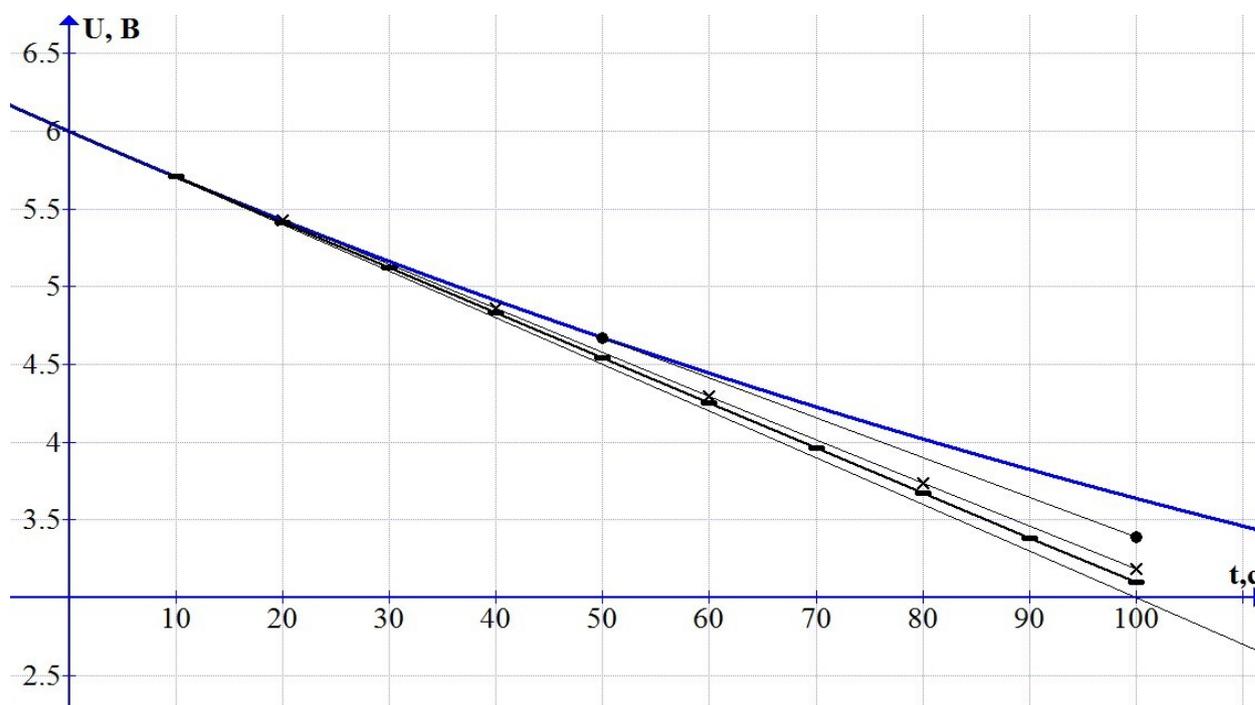


Рисунок 75. – Кривые разряда ионистора при различных нагрузках

Уравнение линии касательной к кривой, описываемой выражением (157), получим с применением известного математического приема [85]:

$$f(t) = f'(t_0) \cdot (t - t_0) + f(t_0); \quad (149)$$

В наших рассуждениях в качестве функции $f(t)$ выступает выражение (157)

Учитывая закономерность $f'(t) = f'(v) \cdot v'$, и приняв обозначение $u = f'(t)$, представим выражение (157) в виде:

$$f(t) = U_{\max} e^{\frac{-t U_{\min}}{U_{\max} R_n C}}; \quad (150)$$

Обозначим:

$$v = \frac{-t \cdot U_{min}}{U_{max} \cdot R_H \cdot C}; \quad (151)$$

Тогда: $u = U_{max} e^v$.

В результате дифференцирования выражения (160) по t получим:

$$v' = \left(\frac{-t U_{min}}{U_{max} R_H C} \right)' = \frac{-U_{min}}{U_{max} R_H C};$$

После подстановки будем иметь: $f'(t) = U_{max} e^v \cdot \frac{-U_{min}}{U_{max} R_H C}$

$$\text{или } u = f'(t) = \frac{-U_{min}}{R_H C} \cdot e^{\frac{-t U_{min}}{U_{max} R_H C}}$$

В соответствии с условием (158) можно записать:

$$u = \frac{-U_{min}}{R_H C} \cdot t + U_{max}; \quad (152)$$

Выражение (161) является искомым уравнением касательной, описывающей разряд ионистора в условиях меняющегося эквивалентного сопротивления R_q при изменении напряжения от U_{max} до U_{min} . Для определения длительности соответствующего разряда ионистора воспользуемся зависимостью:

$$t = \frac{R_H \cdot C \cdot (U_{max} - u)}{U_{min}}; \quad (153)$$

В то же время емкость ионистора может быть рассчитана по формуле:

$$C = \frac{t \cdot U_{min}}{R_H \cdot (U_{max} - U_{min})}; \quad (154)$$

Определенный интерес представляет влияние соотношения максимального и минимального напряжений на величину потерь энергии на эквивалентном сопротивлении. Протекание электрического тока по исследуемой цепи сопровождается выделением тепловой энергии. При этом мгновенная мощность может определяться как

$$p = \left(\frac{-U_{min}}{R_n C} \cdot t + U_{max} \right) \cdot \frac{U_{min}}{R_n} = \frac{U_{min} \cdot U_{max}}{R_n} - \frac{t U_{min}^2}{R_n^2}; \quad (155)$$

Оценка количества полезно затраченной энергии на нагрузке характеризуется произведением:

$$W_n = P \cdot t = I^2 \cdot R_n \cdot t;$$

Подставим в последнее выражение вместо t соотношение (162). При этом будем считать, что разряд ионистора происходит до минимально допустимого значения U_{min} .

Таким образом,

$$W_n = \left(\frac{U_{min}}{R_n} \right)^2 \cdot R_n \cdot \dot{t} \quad (156)$$

Объем энергии, рассеиваемой на эквивалентном сопротивлении, определим в результате вычитания [125]: $W_q = W_n - W_n$. Или

$$W_q = \left(\frac{C U_{max}^2 - C U_{min}^2}{2} \right) \cdot \dot{t} \\ \frac{C(U_{max}^2 - 2 U_{min} U_{max} + U_{min}^2)}{2} = \frac{C(U_{max} - U_{min})^2}{2} \dot{t}; \quad (157)$$

Подводя промежуточные результаты рассуждений, рассмотрим зависимость всех составляющих уравнения энергетического баланса от отношения $\frac{U_{max}}{U_{min}}$. Рассмотрению подлежат:

- полная энергия, накопленная в заряженном ионисторе $W = \frac{C U_{max}^2}{2}$;
- энергия, переданная ионистором в цепь разряда $W_{омд.} = \frac{C(U_{max}^2 - U_{min}^2)}{2}$;
- энергия, полезно используемая нагрузкой $W_n = U_{min} \cdot C \cdot (U_{max} - U_{min}) \dot{t}$;
- энергия, утрачиваемая на стабилитроне $W_q = \frac{C(U_{max} - U_{min})^2}{2}$;
- неиспользованная энергия $W_{ост.} = \frac{C U_{min}^2}{2}$;

Значения энергий, рассчитанные по вышеприведенным выражениям,

представлены на Рисунок 76.

Здесь график 1 характеризует изменение W_q , график 2 – изменение W_n , график 3 – изменение $W_{ост.}$ и график 4 – величину W .

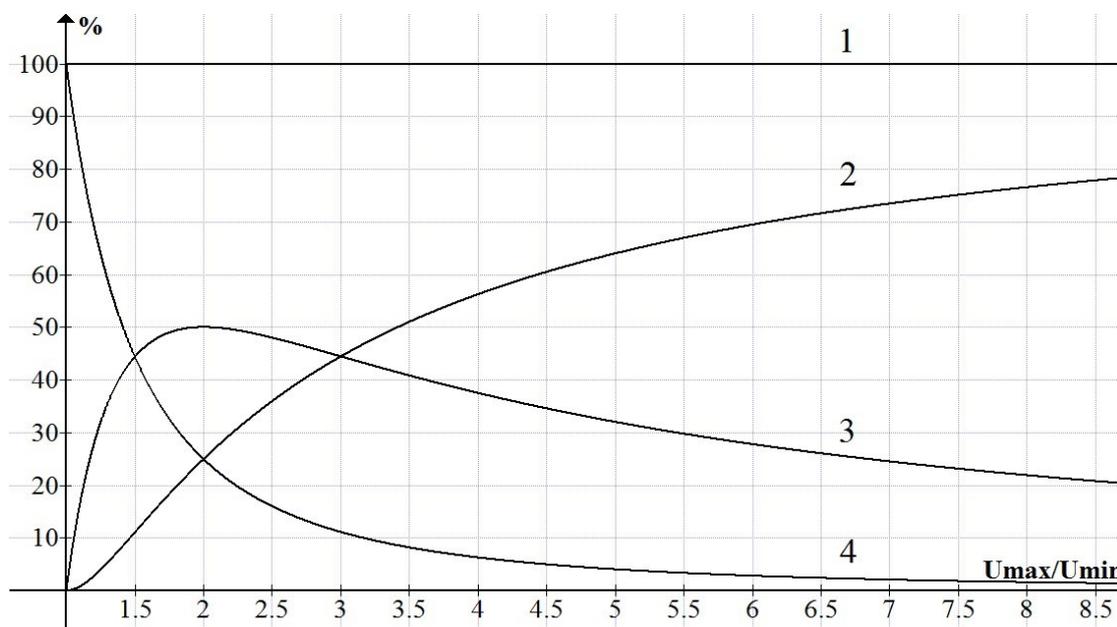


Рисунок 76. – Зависимости составляющих уравнений энергетического баланса от отношения $\frac{U_{max}}{U_{min}}$

Нетрудно заметить, что при использовании стабилизатора значительная часть сосредоточенной в ионисторе энергии расходуется нерационально. Например, при двукратном превышении максимального напряжения над минимальным полезному использованию подлежат не более 50% запасенной энергии. Поэтому для повышения эффективности ионисторов использование параметрической стабилизации по мере возможности следует ограничивать. Традиционный подход к стабилизации напряжения у потребителя предлагается заменить на принцип динамической коммутации, заключающийся в принудительном переключении отдельных ионисторов, суммарная емкость которых эквивалентна расчетной. В различные моменты времени в цепь разряда должны подключаться ионисторы или группы ионисторов, соединенные определенным образом между собой. При этом коммутация ионисторов происходит в функции напряжений на их зажимах.

Рассмотрим разряд группы ионисторов, в которой содержатся от

одного до десяти элементов, считая, что до начала процесса они были соединены параллельно, а после начала – последовательно. Будем считать, что рассматриваемый контур обладает следующими параметрами: $U_{max}=10\text{В}$ и $C=1\text{Ф}$. Определим доли неиспользованной энергии для трех значений минимального напряжения на группе ионисторов: в первом случае $U_{min}=7\text{В}$, во втором $U_{min}=5\text{В}$ и в третьем $U_{min}=3\text{В}$. Представим результаты расчета в виде графиков на Рисунок 77. Эти графики иллюстрируют зависимости доли неиспользованной энергии W_{ocm} (%) от количества (n) ионисторов в группе.

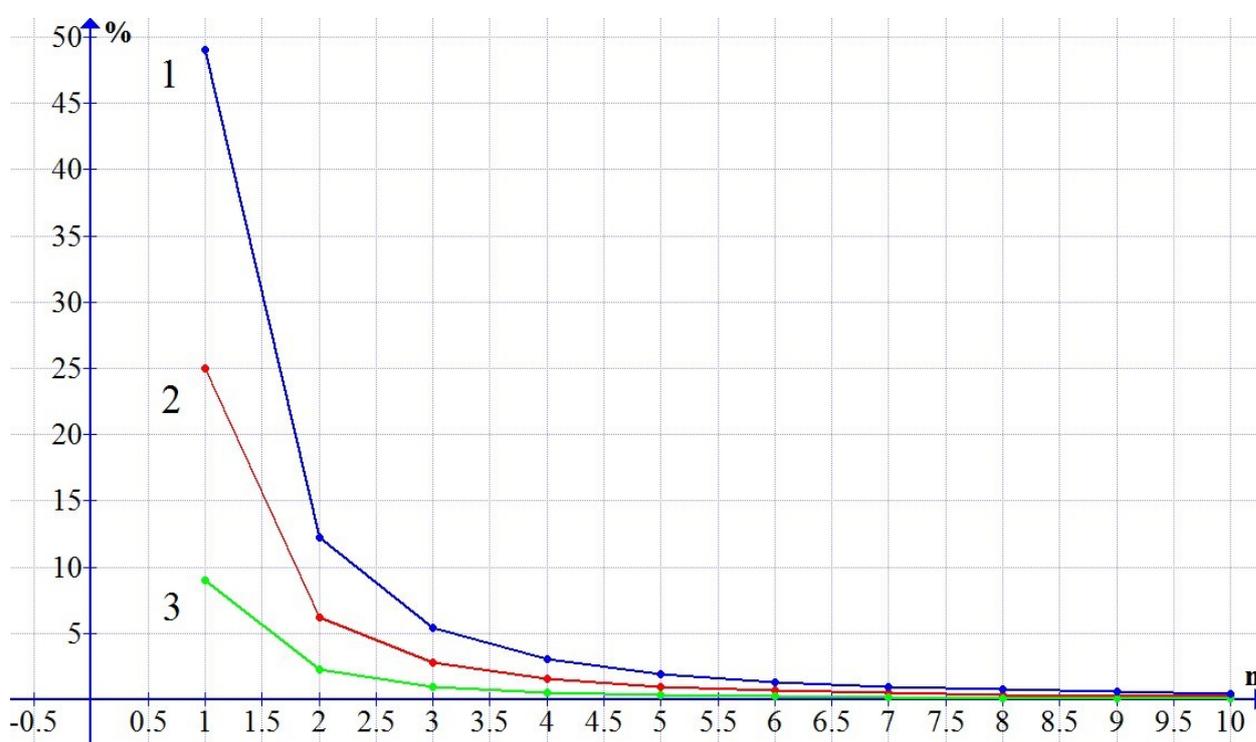


Рисунок 77. – Зависимости долей неиспользованной энергии W_{ocm} (%) от количества ионисторов в группе при различных значениях U_{min}

Из графиков видно, что, например, для второго случая при изменении количества ионисторов от одного до двух доля неиспользованной энергии уменьшается от 25% до 12,5%. При последующем увеличении количества ионисторов эта доля продолжает снижаться и уже при $n > 5$ становится меньше 1%.

Заметим, что при $n \geq 3$ открывается возможность различного соединения ионисторов, как показано на Рисунок 78. Очевидно, что в начале

разряда целесообразно параллельное соединение (Рисунок 78а), по мере снижения напряжения – комбинированное (Рисунок 78б) и в конце – последовательное (Рисунок 78в). Манипуляция схемами соединения ионисторов в группе позволяет поддерживать напряжение на нагрузке в пределах заданного интервала. При этом доля использованной энергии увеличивается, а тепловые потери на стабилизаторе исключаются.

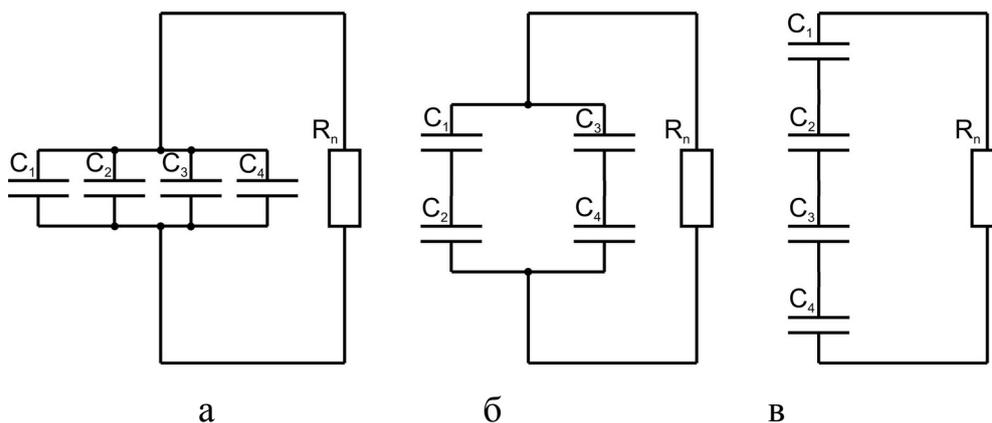


Рисунок 78. – Примеры схем соединения ионисторов при динамической коммутации

Надо отметить, что не все схемы соединения ионисторов приводят к положительному результату. Например, неэффективной окажется схема, в которой к последовательно соединенным ионисторам параллельно подключаются другие ионисторы. Такое соединение определит возникновение уравнивающих токов до выравнивания напряжений на всех параллельно соединенных элементах. Если внутреннее сопротивление коммутирующего устройства является достаточно низким, уравнивающие токи могут значительно превысить значения рабочих токов. Для предотвращения появления этих токов в группе ионисторов при их динамической коммутации должно содержаться 2^m элементов, где m – целое положительное число. Более того, изменение первоначального вида схемы должно быть исключительно симметричным, допуская образование полностью параллельных или последовательных цепей.

Рассмотрим состояние слагаемых уравнения энергетического баланса при параметрической стабилизации и динамической коммутации ионисторов.

Известно, что $W = \frac{CU_{max}^2}{2}$; $W_{ocm}(n) = \frac{U_{min}^2 C}{2 \cdot 2^m}$;

Для случая $U_{max} = 2U_{min}$:

$$W_n(n) = \sum_{i=0}^n \frac{U_{min}^2 C}{2^{2i}};$$

где i – порядковый номер коммутации.

При отсутствии стабилизатора

$$W_{омд} = \frac{CU_{max}^2}{2} - \frac{CU_{min}^2}{2 \cdot 2^m} = \frac{C \cdot 2^m U_{max}^2 - CU_{min}^2}{2 \cdot 2^{2m}} = \frac{C(2^{2m} U_{max}^2 - U_{min}^2)}{2 \cdot 2^{2m}};$$

Результаты расчета слагаемых энергетического баланса в долях от полного объема запасенной энергии при различном количестве ионисторов в группе представлены в Таблица 30.

Таблица 30

**Распределение долей слагаемых энергетического
баланса от полной запасенной энергии при различном
количестве ионисторов в группе**

Количество ионисторов в группе, m	1	2	4	8
Доля отданной энергии ($W_{омд}$)	75%	93,8%	98,4%	99,6%
Доля неиспользованной энергия ($W - W_{омд}$)	25%	6,3%	1,6%	0,4%

Примечательно, что, что при использовании группы из восьми ионисторов доля неиспользованной энергии снижается до 0,4%.

Следует отметить, что на практике динамическая коммутация реализуется полупроводниковыми бесконтактными устройствами.

При этом продолжительность подключения ионисторов будет зависеть от напряжения на их зажимах.

При необходимости уменьшения напряжения на нагрузке в отсутствие параметрической стабилизации возможно осуществить отбор энергии в импульсном режиме. Чередованием открытого и закрытого состояния

коммутирующего устройства, достигается требуемое среднее значение напряжения на нагрузке. Проиллюстрируем последнее утверждение следующими рассуждениями.

Известно, что напряжение на ионисторе в процессе его разряда на внешнюю цепь происходит в соответствии с выражением:

$$u = u_0 \cdot e^{-\frac{t}{RC}}; \quad (158)$$

где u_0 – напряжение на зажимах ионистора при подключении к нагрузке, В; t – длительность разряда ионистора, с; R – сопротивление нагрузки, Ом; C – емкость ионистора, Ф.

Введем обозначения: T_1 и T_2 – длительности открытого и закрытого состояний коммутирующего устройства соответственно, с. Если в качестве накопителя энергии использован ионистор, то $T_1 = const$, а T_2 является функцией от среднего значения напряжения U_{cp} на его зажимах при открытом состоянии коммутирующего устройства и номинального напряжения $U_{ном}$, требуемого потребителем. При этом среднее значение напряжения определяется в соответствии с выражением:

$$U_{cp} = \frac{1}{T_1} \int_0^{T_1} u \cdot e^{-\frac{t}{RC}} dt = \frac{CRu - CRu e^{-\frac{T_1}{RC}}}{T_1} = \frac{CRu \left(1 - e^{-\frac{T_1}{RC}}\right)}{T_1};$$

Мгновенное значение напряжения « u » в последнем выражении характеризует величину напряжения на зажимах ионистора в начале каждого интервала T_1 . В таком случае значение T_2 может быть определено в соответствии с выражением:

$$T_2 = T_1 \left(\frac{U_{cp}}{U_{ном}} - 1 \right);$$

Преимущества динамической коммутации по сравнению с традиционной параметрической стабилизацией иллюстрируются примером разряда группы из двух ионисторов. Допустим, емкость каждого ионистора составляет $C = 2,5 \text{ Ф}$, $R_{нагр} = 500 \text{ Ом}$, $U_{max} = 10 \text{ В}$, $U_{нагр} = 5 \text{ В}$.

При наличии стабилитрона разряд ионистора происходит в

соответствии с выражением:

$$U = U_{\max} \cdot e^{\frac{-t}{R_q(U) + R_n} \cdot C};$$

$$\text{При этом можно записать: } R_q = \frac{U_{\text{нагр}} \cdot R_{\text{нагр}}}{U};$$

В таком случае несложно подсчитать, что разряд ионистора до номинального значения напряжения, требуемого потребителем, произойдет за 1250 с. Изменение этого напряжения иллюстрируется кривой 1 на Рисунок 79. Отметим, что при построении этой зависимости принималось допущение о пошаговом изменении внутреннего сопротивления стабилитрона каждые 100 секунд. В процессе динамической коммутации разряд замедлится, и его продолжительность возрастет до 2500 секунд (кривые 2 на Рисунок 79). В результате переключения схемы соединения ионисторов с параллельной на последовательную напряжение на общих зажимах группы ионисторов возрастет. При этом потребитель будет располагать электроэнергией требуемого напряжения. На Рисунок 79 факт переключения ионисторов отмечен точками пересечения пунктирных вертикальных линий с осью абсцисс.

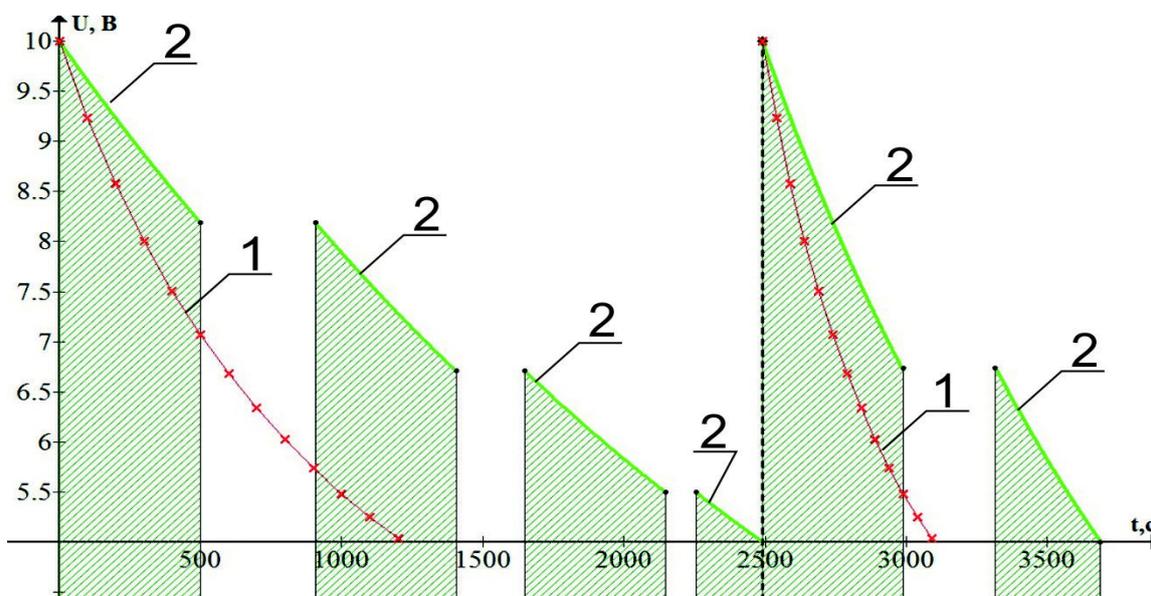


Рисунок 79. – Графики изменения напряжения у потребителей при разряде ионисторов с использованием параметрической стабилизации и динамической коммутации

Схема контактного аналога динамической коммутации внутри группы представлена на Рисунок 80а. Коммутация взаимного соединения ионисторов осуществляется ключами $K1, K2, K3$ и $K4$, а регулирование напряжения у потребителя – ключом $K4$.

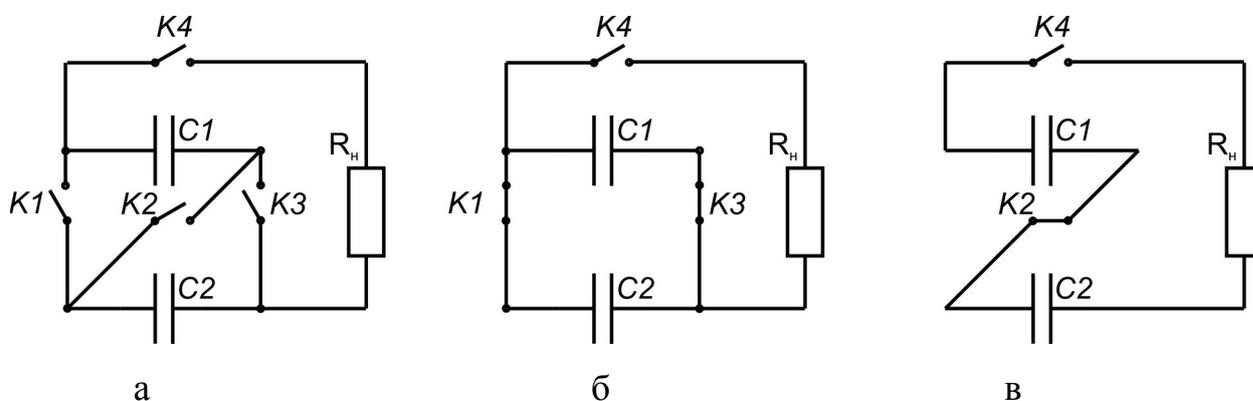


Рисунок 80. – Схема контактного аналога динамической коммутации ионисторов

Начало разряда ионисторов иллюстрируется Рисунок 80б. В этот момент ключи $K1$ и $K3$ замкнуты, а ключ $K2$ – разомкнут, обеспечивая параллельное соединение ионисторов $C1$ и $C2$. По мере разряда ионисторов ключи $K1$ и $K3$ должны быть разомкнуты, а ключ $K2$ замкнут. Этой мерой достигается последовательное соединение ионисторов $C1$ и $C2$ и поддержание напряжения у потребителя. Периодическое замыкание и размыкание ключа $K4$ приводит к намеренному снижению напряжения [126], [124]. В соответствии с расчетами продолжительность работы низкоэнергетического потребителя от группы ионисторов при манипулировании ключами $K1, K2$ и $K3$ увеличивается на 600 с, и ключом $K4$ – на 1850 с.

Таким образом, можно сделать вывод о том, что:

1. Объем полезно используемой энергии при разряде ионистора с ростом разности между начальным и конечным значениями напряжения увеличивается. При двукратном превышении максимального напряжения над минимальным полезному использованию подлежат 50 % от энергии, заключенной в ионисторе, а при 20-кратном – 95 %.

2. Кривая снижения напряжения на ионисторе в процессе его разряда расположена между графиком разряда при постоянной нагрузке и прямой линией, представляющей собой касательную к этой кривой в начальной точке. При уменьшении длительности разряда кривая снижения напряжения приближается к касательной линии.

3. Разряд ионистора при параметрической стабилизации напряжения у потребителя происходит при следующих составляющих энергетического баланса:

- полной энергии, накопленной в заряженном ионисторе;
- энергии, переданной ионистором в цепь разряда;
- энергии, полезно используемой нагрузкой;
- энергии, утрачиваемой на стабилитроне;
- неиспользованная энергия.

4. Использование динамической коммутации ионисторов в процессе отбора энергии по сравнению с параметрической стабилизацией позволяет увеличить продолжительность работы низкоэнергетического потребителя в три раза.