

А. И. МАТВЕЕВ, аспирант

С. А. АНДРЕЕВ, канд. техн. наук, доцент

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Российский государственный аграрный университет – Московская сельскохозяйственная академия имени К. А. Тимирязева», Российская Федерация, г. Москва

A. I. MATVEEV, Postgraduate student

S. A. ANDREEV, Ph.D. of Engineering Sciences, Associate Professor

Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "Russian State Agrarian University – Moscow Agricultural Academy named after K. A. Timiryazev", Russian Federation, Moscow

## ИССЛЕДОВАНИЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ПРОЦЕССА РАЗРЯДА КОНДЕНСАТОРОВ НА ПЕРЕМЕННУЮ НАГРУЗКУ

### INVESTIGATION OF ENERGY INDICATORS OF THE CONDENSATOR DISCHARGE PROCESS FOR VARIABLE LOAD

**Аннотация.** Автономное электропитание слаботочных потребителей с возможностью периодического пополнения запасенной энергии обычно осуществляется с помощью химических аккумуляторов. На сегодняшний день такие аккумуляторы выпускаются в широком ассортименте и характеризуются большим разнообразием используемых химических реакций. Анализ тенденций развития электроникопитательных устройств показал, что, наряду с использованием химических аккумуляторов, расширяется сфера применения конденсаторов сверхбольшой емкости (ионисторов). Такие конденсаторы допускают произвольные режимы разрядки, безопасны в эксплуатации, не требуют дополнительных мер предосторожности при утилизации, выдерживают большое количество циклов «заряд-разряд», а их характеристики практически не зависят от температуры. В то же время эти устройства способны накапливать энергию весьма низкой плотности, что определяет необходимость совершенствования способов ее отбора. Использование параметрических стабилизаторов напряжения в цепях разряда конденсаторов признано неэффективным, так как часть накопленной энергии при заниженном напряжении не используется. При завышенном напряжении внутреннее сопротивление стабилизатора уменьшается, ток растет, а вместе с ним растут тепловые потери. В статье проанализировано распределение энергии на различных элементах цепи разряда конденсаторов при параметрической стабилизации напряжения. Установлено, что увеличение разности между начальным и конечным значениями напряжения на конденсаторе приводит к росту используемого количества запасенной энергии. Графики снижения напряжения располагаются между кривой разряда конденсатора без изменения сопротивления и линией, являющейся касательной к этой кривой в точке начала разряда. Показано, что при бесконечном уменьшении продолжительности интервала разряда кривая снижения напряжения стремится к линии касательной. Выделены и рассчитаны следующие энергетические составляющие: полная энергия, запасенная конденсатором; энергия, отданная конденсатором; энергия, полезно используемая нагрузкой; энергия, теряемая на эквивалентном сопротивлении (на стабилизаторе). Сделан вывод о том, что для повышения эффективности использования конденсаторов необходим иной способ отбора накопленной энергии, обеспечивающий снижение потерь при пониженном напряжении и исключение тепловых потерь при повышенном.

**Ключевые слова:** накопители электрической энергии, конденсаторы, ионисторы, разряд, параметрическая стабилизация, энергетические потери, цепь питания, динамическая коммутация.

**Abstract.** Autonomous power supply of low-current consumers with the possibility of periodic replenishment of stored energy is usually carried out with the help of chemical batteries. To date, such batteries are produced in a wide range and are characterized by a wide variety of chemical reactions used. Analysis of trends in the development of electric accumulator devices has shown that along with the use of chemical batteries, the sphere of application of capacitors of extra-large capacity (ionistors) is expanding. Such capacitors allow arbitrary discharge modes, are safe in operation, do not require additional precautions for disposal, withstand a large number of charge-discharge cycles, and their characteristics are practically independent of temperature. At the same time, these devices are able to accumulate energy of very low density, which determines the need to improve the methods of its selection. The use of parametric voltage regulators in capacitor discharge circuits has been found to be ineffective, since part of the accumulated energy with underestimated voltage is not used. When the voltage is too high, the internal resistance of the zener diode decreases, the current increases, and with it the heat losses increase. The article analyzes the energy distribution on various elements of the capacitor discharge circuit for parametric voltage stabilization. It is established that an increase in the difference between the initial and final values of the voltage on the capacitor leads to an increase in the amount of stored energy used. Voltage reduction graphs are located between the discharge curve of the capacitor without changing the resistance and a line that is tangent to this curve at the point where the discharge begins. It is shown that with an infinite decrease in the duration of the discharge interval, the voltage decrease curve tends to the tangent line. The following energy components have been singled out and calculated: the total energy stored by the capacitor; energy released by the capacitor; energy, useful for loading; the energy lost on the equivalent resistance (on the zener diode). It is concluded that in order to increase the efficiency of the use of capacitors, a different method of selecting the accumulated energy is needed, which ensures a reduction in losses at a reduced voltage and the elimination of heat losses at higher voltages.

**Keywords:** telemetric system, electromagnetic energy, power of radio transmitting devices, energy storage, capacitors.

### Основные положения

1. Проанализировано распределение энергии на различных элементах цепи разряда конденсаторов при параметрической стабилизации напряжения.

2. Показана недостаточная эффективность традиционного способа отбора электрической энергии у конденсаторов при их использовании в качестве накопителей в слаботочных цепях.

3. Сделан вывод о необходимости разработки способа разряда конденсатора, позволяющего снизить потери энергии при пониженном напряжении на обкладках и исключить тепловые потери при повышенном напряжении.

### Введение

При выборе накопителей электрической энергии для питания слаботочных электронных устройств предпочтения разработчиков все чаще оказываются на стороне конденсаторов [1]. Эти конденсаторы сверхбольшой емкости (ионисторы) по сравнению с традиционными химическими

аккумуляторами обладают рядом неоспоримых преимуществ. Они допускают произвольные режимы разрядки, безопасны в эксплуатации, не требуют дополнительных мер предосторожности при утилизации, выдерживают громадное количество циклов «заряд-разряд», а их характеристики практически не зависят от температуры [2, 3]. В то же время незначительная плотность аккумулированной энергии существенно сдерживает широкое внедрение этих устройств, что определяет целесообразность проведения исследований по изысканию новых путей извлечения накопленной энергии. Традиционный подход к этой проблеме, основанный на применении в цепи разряда параметрических стабилизаторов, не вполне оправдан, так как при его реализации, во-первых, часть накопленной конденсатором энергии не используется, а во-вторых, при превышении напряжения над номинальным значением происходит уменьшение внутреннего сопротивления стабилитрона, увеличение тока и повышение тепловых

потерь. В то же время разработке иных способов отбора накопленной энергии должен предшествовать анализ процесса разряда конденсатора на меняющуюся нагрузку и выявление картины энергетического баланса на всех элементах цепи.

**Материалы и методы**

В качестве материала исследований использовались конденсаторы сверхбольших емкостей, активные сопротивления, составляющие цепь разряда и имитирующие нагрузку, и магнитоэлектрические измерительные приборы. При выполнении теоретических исследований применялись сведения из теории переходных процессов и классические приемы расчета электрических цепей.

Целью настоящей работы является исследование процесса разряда конденсатора и определение энергетических потерь на различных участках схем питания.

**Результаты и обсуждения**

Количество энергии, требуемое для питания потребителя мощностью  $P$  в течение времени  $t$  определяется произведением:

$$W = Pt. \tag{1}$$

С другой стороны, конденсатор, используемый в качестве источника питания, способен накопить энергию в объеме [4]

$$W = \frac{CU^2}{2}, \tag{2}$$

где  $C$  – емкость конденсатора;  $U$  – напряжение на

обкладках конденсатора.

По мере разряда конденсатора напряжение на его обкладках будет снижаться от  $U_{\max}$  до  $U_{\min}$ . Следовательно, фактически использованную часть энергии будет составлять величина разности между полной энергией, запасенной конденсатором при  $U = U_{\max}$ , и оставшейся в нем энергией по окончании разряда при  $U = U_{\min}$ . Если

$$W_{\text{полн.}} = \frac{CU_{\max}^2}{2} \text{ и } W_{\text{ост.}} = \frac{CU_{\min}^2}{2}, \text{ то}$$

$$W_{\text{исп.}} = \frac{C(U_{\max}^2 - U_{\min}^2)}{2}. \tag{3}$$

Требуемую емкость конденсатора легко рассчитать, приравняв выражения (1) и (3):

$$C = \frac{2W}{U_{\max}^2 - U_{\min}^2} = \frac{2Pt}{U_{\max}^2 - U_{\min}^2}. \tag{4}$$

Для увеличения запасенной энергии следует либо увеличить  $U_{\max}$  либо уменьшить  $U_{\min}$ . Однако существенное увеличение  $U_{\max}$  ограничивается повышением вероятности пробоя конденсатора, а уменьшение  $U_{\min}$  – требованиями потребителей энергии. Если принять за 100 % полную энергию, запасенную конденсатором, то процентная доля использованной энергии может быть оценена по формуле

$$X = \frac{100W_{\text{исп.}}}{W_{\text{полн.}}} = \frac{100(CU_{\max}^2 - CU_{\min}^2)}{2CU_{\max}^2} = \frac{100(U_{\max}^2 - U_{\min}^2)}{U_{\max}^2}, \% \tag{5}$$

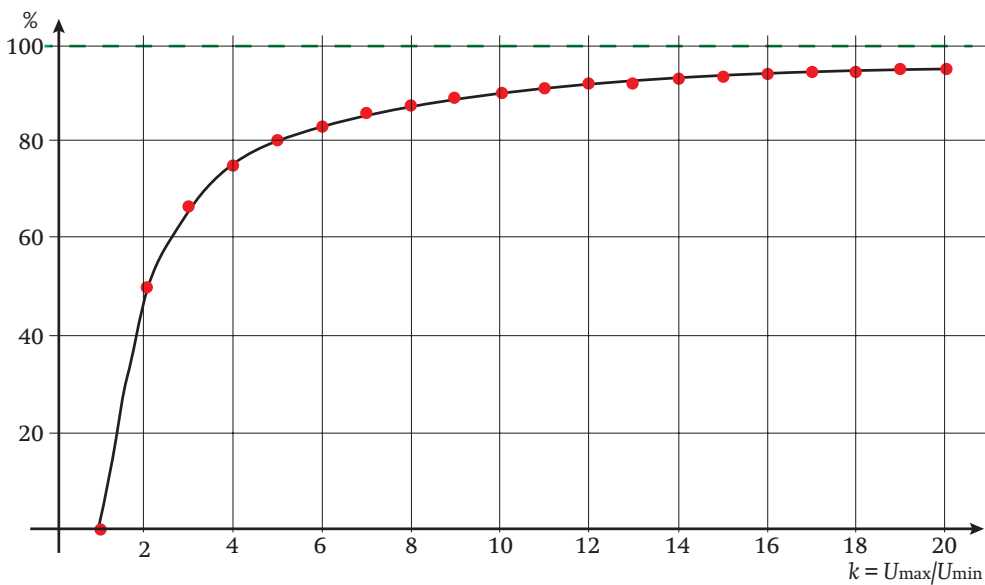


Рисунок 1 – График зависимости процентной доли использованной энергии конденсатора от отношения  $U_{\max}$  и  $U_{\min}$

Представим величину  $U_{\min}$  в выражении (5) через  $U_{\max}$ , связывая их соотношением

$$k = \frac{U_{\min}}{U_{\max}}; \quad (6)$$

$$X = \frac{100 \left( U_{\max}^2 - \frac{U_{\max}^2}{k} \right)}{U_{\max}^2} = \frac{100 U_{\max}^2 - \frac{100}{k} U_{\max}^2}{U_{\max}^2} = 100 - \frac{100}{k}.$$

Из выражения (6) следует, что процентная доля использования энергии конденсатора зависит от соотношения напряжений, а не от их величины. Задаваясь рядом значений

$k = \frac{U_{\max}}{U_{\min}}$ , построим соответствующий график (рисунок 1).

Из графика видно, что при двукратном превышении  $U_{\max}$  значения  $U_{\min}$  используется 50 % от всей запасенной энергии, а при двадцатикратном – 95 %.

Поскольку потребители энергии требуют постоянства подаваемого напряжения, конденсатор обычно включают последовательно со стабилитроном или с другими полупроводниковыми приборами, внутреннее сопротивление  $R_q$  которых изменяется в зависимости от условий работы [5, 6]. Таким образом, цепь разряда конденсатора может быть представлена схемой замещения, представленной на рисунке 2.

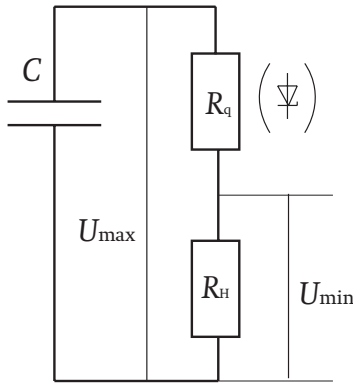


Рисунок 2 – Схема замещения цепи разряда конденсатора

Для этой схемы можно записать:

$$U_{\max} = I_H (R_q + R_H) = I_H R. \quad (7)$$

Поделим все члены выражения (7) на  $I_H$ :

$$\frac{U_{\max}}{I_H} = R_q + R_H,$$

откуда  $R_q = \frac{U_{\max}}{I_H} - R_H.$  (8)

С другой стороны, при минимально допустимом напряжении на нагрузке величина тока составит:  $I_H = \frac{U_{\min}}{R_H}$ . Подставив полученное значение в выражение (8), получим:

$$R_q = \frac{R_H U_{\max}}{U_{\min}} - R_H.$$

Сумму  $R = R_q + R_H$  можно представить в виде:

$$R = \frac{R_H U_{\max}}{U_{\min}} - R_q + R_H = \frac{R_H U_{\max}}{U_{\min}}. \quad (9)$$

Известно, что в процессе разряда конденсатора на сопротивление  $R$  напряжение на его обкладках меняется по закону:

$$u = u_0 e^{-\frac{t}{RC}},$$

где  $t$  – текущее время,  $u_0$  – напряжение на конденсаторе при  $t = 0$  [7].

Воспользовавшись результатом (9), запишем:

$$u = U_{\max} e^{-\frac{t U_{\min}}{U_{\max} R_H C}}. \quad (10)$$

Напомним, что сопротивление  $R$  состоит из постоянного сопротивления нагрузки  $R_H$  и переменного полупроводникового эквивалента  $R_q$ . Сложность расчета цепи разряда конденсатора определяется тем, что ее сопротивление зависит не только от времени, но и от текущего значения напряжения на конденсаторе. А поскольку напряжение конденсатора зависит от сопротивления, уравнение (10) становится рекурсивным.

Произведем численное решение задачи, рассчитывая величину напряжения на конденсаторе через равные интервалы времени  $\Delta t$ , составляющие 0,01 с, 0,1 с и 1 с при двукратном превышении максимального напряжения над минимальным. Номер интервала времени обозначим символом  $n$ . Будем считать, что емкость конденсатора составляет 1 Ф, а сопротивление нагрузки – 100 Ом:

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

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

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

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

Результаты расчета сведем в таблицу.

Значения напряжения на обкладках конденсатора  
в процессе разряда на активную нагрузку

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

Для большей наглядности этот расчет был повторен для интервалов времени  $\Delta t = 10$  с,  $\Delta t = 20$  с и  $\Delta t = 50$  с. При этом вслед-

ствие значительных различий результатов отпала необходимость обработки всего массива.

Полученные данные используем для построения кривой разряда конденсатора, которую представим на рисунке 3. Здесь же покажем кривую разряда при неизменном сопротивлении  $R_q$ . Из построенных графиков видно, что кривые падения напряжения с 6 до 3 Вольт располагаются между кривой разряда конденсатора без изменения сопро-

тивления  $U = 6e^{\frac{-t}{(100+100)1}}$  и линией  $U = -\frac{3t}{100}$ ,

являющейся касательной к этой кривой в точке  $t = 0$ . Причем, при изменении сопротивления в  $\Delta t \rightarrow 0$ , кривая падения напряжения стремится к линии касательной.

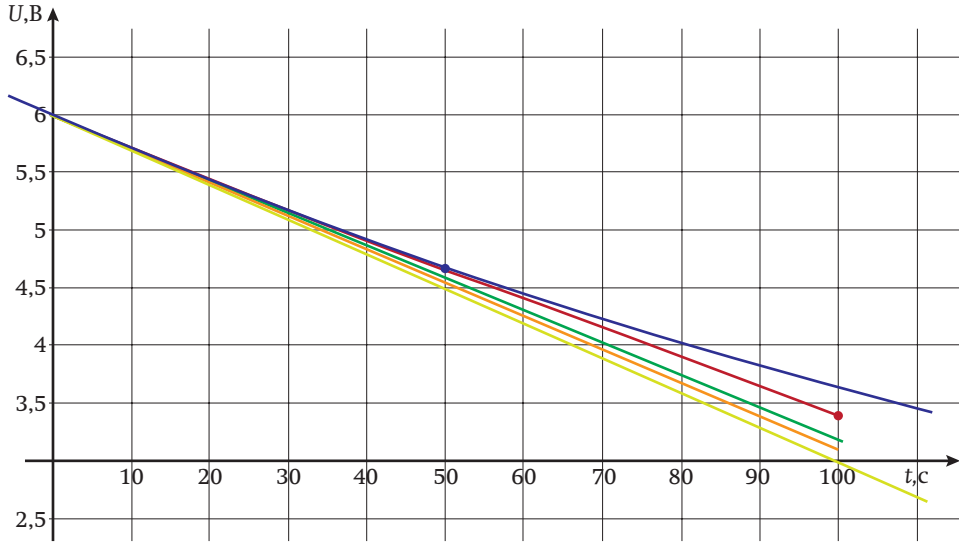


Рисунок 3 – Кривые разряда конденсатора при различных нагрузках

Для определения уравнения касательной к функции (10) воспользуемся известным математическим приемом [8]:

$$f(t) = f'(t_0) \times (t - t_0) + f(t_0). \quad (11)$$

В нашем случае роль функции  $f(t)$  выполняет выражение (10).

Запишем выражение (10), приняв во внимание известную математическую закономерность  $f'(t) = f'(v) v'$  [9] и обозначив  $u = f'(t)$ :

$$f(t) = U_{\max} e^{\frac{-tU_{\min}}{U_{\max} R_H C}}. \quad (12)$$

Введем обозначение:

$$v = \frac{-tU_{\min}}{U_{\max} R_H C}. \quad (13)$$

С учетом этого обозначения будем иметь:  $u = U_{\max} e^v$ .

Продифференцируем выражение (13) по  $t$ :

$$v' = \left( \frac{-tU_{\min}}{U_{\max} R_H C} \right)' = \frac{-U_{\min}}{U_{\max} R_H C}.$$

В результате подстановки получим:

$$f'(t) = U_{\max} e^v \frac{-U_{\min}}{U_{\max} R_H C},$$

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

Для удовлетворения условия (11) запишем:

$$u = \frac{-U_{\min}}{R_H C} t + U_{\max}. \quad (14)$$

Выражение (14) представляет собой искомое уравнение касательной, по которой происходит разряд конденсатора при переменном эквивалентном сопротивлении  $R_q$  в диапазоне напряжений от  $U_{\max}$  до  $U_{\min}$ .

Продолжительность разряда может быть вычислена в соответствии с зависимостью

$$t = \frac{tU_{\min}}{R_H (U_{\max} - U_{\min})}, \quad (15)$$

а емкость конденсатора при известной нагрузке, продолжительности разряда и значений напряжений определена по формуле

$$C = \frac{tU_{\min}}{R_H (U_{\max} - U_{\min})}. \quad (16)$$

Произведем анализ зависимости потерь энергии на эквивалентном сопротивлении от соотношения максимального и минимального напряжений. При протекании

по исследуемой цепи постоянного тока значение мгновенной мощности составит:

$$p = \left( -\frac{U_{\min}}{R_H C} t + U_{\max} \right) \frac{U_{\min}}{R_H} = \frac{U_{\min} U_{\max}}{R_H} - \frac{t U_{\min}^2}{R_H^2}. \quad (17)$$

Количество энергии, полезно потребленной нагрузкой, найдем как произведение:  $W_H = Pt = I^2 R_H t$ . При подстановке в последнее выражение вместо  $t$  соотношения (15) будем считать, что разряд конденсатора осуществляется до минимально допустимого значения, т. е.  $u = U_{\min}$ .

Таким образом,

$$W_H = \left( \frac{U_{\min}}{R_H} \right)^2 R_H \left( \frac{R_H C (U_{\max} - U_{\min})}{U_{\min}} \right) = U_{\min} C (U_{\max} - U_{\min}). \quad (18)$$

На эквивалентном сопротивлении будет рассеиваться энергия, определяемая разностью:  $W_{\text{qp}} = W_H - W$ ,

$$\begin{aligned} W_{\text{q}} &= \left( \frac{CU_{\max}^2 - CU_{\min}^2}{2} \right) - (U_{\min} C (U_{\max} - U_{\min})) = \frac{1}{2} CU_{\max}^2 - \frac{1}{2} CU_{\min}^2 - \\ &- CU_{\min} U_{\max} + CU_{\min}^2 = \frac{1}{2} CU_{\max}^2 + \frac{1}{2} CU_{\min}^2 - CU_{\min} U_{\max} = \\ &= \frac{C(U_{\max}^2 - 2U_{\min} U_{\max} + U_{\min}^2)}{2} = \frac{C(U_{\max} - U_{\min})^2}{2}. \quad (19) \end{aligned}$$

Таким образом, лишь часть энергии, запасаемая конденсатором при традиционном способе ее отбора, используется рационально. Для повышения эффективности использования конденсаторов параметрическая стабилизация напряжения должна быть исключена.

#### Выводы

1. Увеличение разности между началь-

ным и конечным значениями напряжения на конденсаторе приводит к росту используемого количества запасенной энергии. Например, при двукратном превышении максимального напряжения над минимальным используется 50 % от всей запасенной энергии, а при двадцатикратном – 95 %.

2. Графики снижения напряжения располагаются между кривой разряда конденсатора без изменения сопротивления и линией, являющейся касательной к этой кривой в точке начала разряда. Причем, при бесконечном уменьшении продолжительности интервала разряда кривая снижения напряжения стремится к линии касательной.

3. При разряде конденсатора на последовательно соединенную нагрузку и эквивалентное управляемое сопротивление можно выделить и рассчитать по полученным выражениям следующие энергетические составляющие:

- полную энергию, запасенную конденсатором;
- энергию, отданную конденсатором;
- энергию, полезно используемую нагрузкой;
- энергию, теряемую на эквивалентном сопротивлении (на стабилитроне).

4. Для повышения эффективности использования конденсаторов необходим иной способ отбора накопленной энергии, обеспечивающий снижение потерь при пониженном напряжении на обкладках и исключение тепловых потерь на стабилитроне при повышенном напряжении.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Галушко А. И., Гром Ю. И., Лазарев А. Н., Салихов Р. С. Исследование свойств ионисторов и эффективность их применения в системах электропитания космических аппаратов // Вопросы электромеханики. 2014. Т. 133. С. 15–18.
2. Конденсаторы с двойным электрическим слоем (ионисторы): Разработка и производства / В. Кузнецов, О. Понькина, Н. Мачковская [и др.] // Компоненты и технологии. 2006. № 6. С. 12–16.
3. Развитие и внедрение нанотехнологий как инструмента инновационного развития предприятий ракетно-космической промышленности // Материалы семинара учебно-методического центра ИПК «МАШПРИБОР». Королев : Федеральное космическое агентство, 12–13 октября, 2010.
4. Бессонов Л. А. Теоретические основы электротехники: Электрические цепи: Учебник для студентов электротехнических, энергетических и приборостроительных специальностей вузов. 7-е изд., перераб. и доп. М. : Высшая школа, 2008. 528 с.
5. Сажнёв А. М., Рогулина Л. Г., Абрамов С. С. Электропитание устройств и систем связи: Учебное пособие / ГОУ ВПО СибГУТИ. Новосибирск, 2008. 112 с.
6. Электропитание устройств связи / В. В. Китаев [и др.]. М. : Связь, 1975. 328 с.

7. Татур Т. А., Татур В. Е. Установившиеся и переходные процессы в электрических цепях. М. : Высшая школа, 2001. 407 с.
8. Смирнов В. И. Курс высшей математики. 24-е изд. СПб. : БХВ–Петербург, 2008. Том II. 848 с.
9. Шипачев В. С. Высшая математика / под ред. А. Н. Тихонова. 8-е изд., перераб. и доп. М. : Юрайт, 2014. 447 с.

REFERENCES

1. Galushko A. I., Grom Yu. I., Lazarev A. N., Salikhov R. S. Issledovanie svoystv ionistorov i effektivnost' ikh primeneniya v sistemakh elektropitaniya kosmicheskikh apparatov // Voprosy elektromekhaniki. 2014. T. 133. S. 15–18.
2. Kondensatory s dvoynym elektricheskim sloem (ionistory): Razrabotka i proizvodstva / V. Kuznitsov, O. Pon'kina, N. Machkovskaya i dr. // Komponenty i tekhnologii. 2006. № 6. S. 12–16.
3. Razvitie i vnedrenie nanotekhnologiy kak instrumenta innovatsionnogo razvitiya predpriyatiy raketno-kosmicheskoy promyshlennosti // Materialy seminaru uchebno-metodicheskogo tsentra IPK «MASHPRIBOR». Korolev : Federal'noe kosmicheskoe agentstvo, 12-13 oktyabrya 2010.
4. Bessonov L. A. Teoreticheskie osnovy elektrotekhniki: Elektricheskie tsepi: Uchebnyk dlya studentov elektrotekhnicheskikh, energeticheskikh i priborostroitel'nykh spetsial'nostey vuzov. 7-e izd., pererab. i dop. M. : Vysshaya shkola, 2008. 528 s.
5. Sazhnev A. M., Rogulina L. G., Abramov S. S. Elektropitanie ustroystv i sistem svyazi»: Uchebnoe posobie / GOU VPO SibGUTI. Novosibirsk , 2008. 112 s.
6. Elektropitanie ustroystv svyazi. / V. V. Kitaev [i dr.]. M. : Svyaz', 1975. 328 s.
7. Tatur T. A., Tatur V. E. Ustanovivshiesya i perekhodnye protsessy v elektricheskikh tsepyakh. M. : Vysshaya shkola, 2001. 407 s.
8. Smirnov V. I. Kurs vysshey matematiki. Tom II. 24-e izd. SPb. : BKhV–Peterburg, 2008. 848 s.
9. Shipachev V. S. Vysshaya matematika / pod red. A. N. Tikhonova. 8-e izd., pererab. i dop. M. : Yurayt, 2014. 447 s.

*Матвеев Андрис Илмарович, аспирант*

Тел. 8-964-628-54-88

E-mail: [anddri@bk.ru](mailto:anddri@bk.ru)

170040, Тверь, проспект 50 лет Октября, д. 32, кв. 2

*Андреев Сергей Андреевич, канд. техн. наук, доцент,  
заведующий кафедрой «Автоматизация и роботизация технологических процессов  
имени академика И. Ф. Бородина»*

Тел. 8-906-783-71-60

E-mail: [asa-finance@yandex.ru](mailto:asa-finance@yandex.ru)

123557, Москва, Большой Тишинский переулок, д. 2, кв. 61