

О. В. КОЛЕСНИК, НТУ "ХПИ";

А.А. ПЕТКОВ, канд. техн. наук, с.н.с., докторант НТУ "ХПИ"

ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВРЕМЕНИ ЗАРЯДКИ ЕМКОСТНОГО НАКОПИТЕЛЯ ЭНЕРГИИ С КОЛЬЦЕВОЙ СХЕМОЙ ЗАЩИТЫ

В роботі наведені результати чисельного дослідження часу зарядки ємнісного накопичувача енергії з кільцевою схемою захисту. Отримані дані дозволяють визначити час зарядки накопичувачів з кількістю модулів $n = 3-10$.

In work results of numerical research of time of gymnastics of the capacitor store of energy with the ring scheme of protection are resulted. The obtained data allows to define time of gymnastics of stores with quantity of modules $n = 3-10$.

Постановка проблеми. Высоковольтные емкостные накопители энергии (ЕНЭ), которые используются в различных электрофизических и испытательных установках с большой запасаемой энергией, могут содержать сотни и тысячи конденсаторов, соединенных параллельно. При непосредственном соединении в случае пробоя одного из конденсаторов все остальные разряжаются на него, что может привести к деформации, разгерметизации, взрыву и возгоранию пробитого конденсатора. Чтобы исключить эти негативные последствия используются различные схемы защиты конденсаторов, и, в частности, схема с защитными резисторами, включенными между модулями ЕНЭ таким образом, что они образуют замкнутый контур (кольцевая схема защиты). Процесс зарядки ЕНЭ, выполненных по такой схеме, имеет свои особенности, что определяет необходимость проведения дополнительных исследований.

Анализ публикаций. Зарядке ЕНЭ посвящено большое количество работ, основными из которых можно считать [1, 2]. В данных работах подробно рассмотрена традиционная схемы зарядки с токоограничивающим (зарядным) резистором, показанная на рис. 1, а также схемы с другими токоограничивающими элементами.

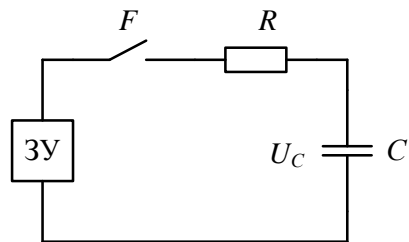


Рисунок 1 – Схемы зарядки ЕНЭ с токоограничивающим резистором

В [3] рассмотрены схема зарядки генератора импульсов напряжения, которая представляет собой лестничную схему, состоящую из n одинаковых Г – образных RC-звеньев. Для количества звеньев $n \leq 4$ в работе приведены передаточные функции зарядной цепи. В работе также показано, что при количестве звеньев $n > 10$ зарядную цепь можно рассматривать, как линию с распределенными параметрами.

В [4] рассмотрено модульное исполнение ЕНЭ с кольцевой схемой защиты. Схема зарядки таких ЕНЭ показана на рис. 2.

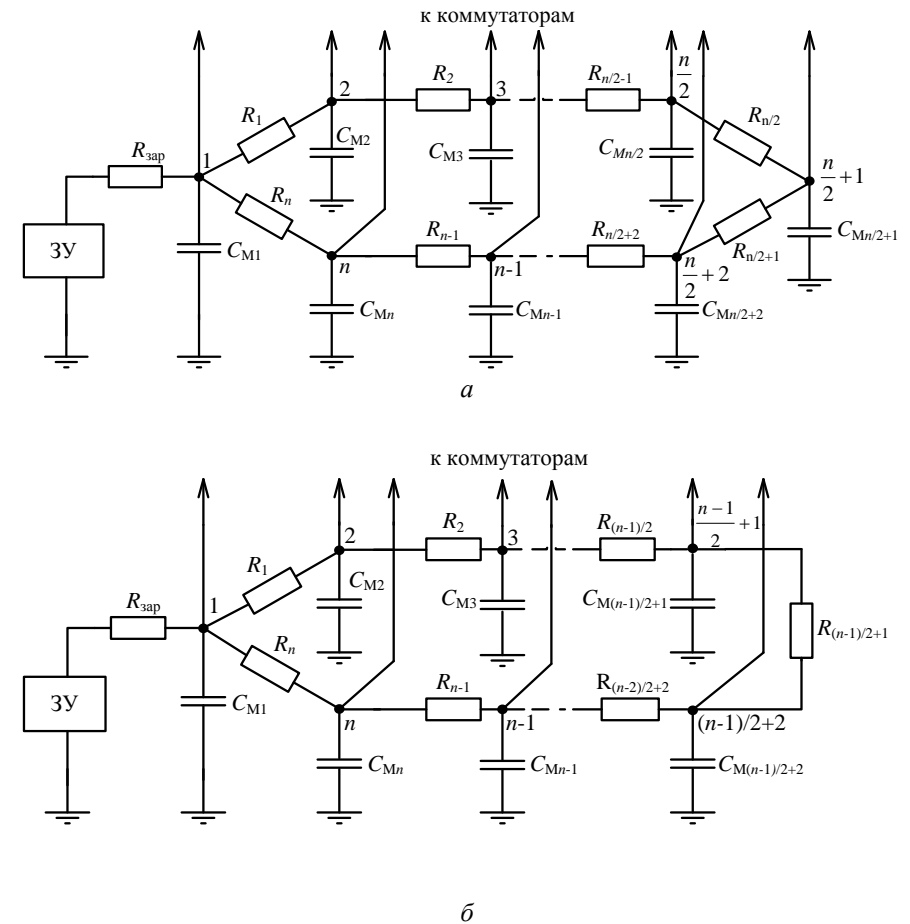


Рисунок 2 – Кольцевая схема защиты: а - при четном количестве модулей; б – при нечетном количестве модулей.

Для ЕНЭ выполненных с кольцевой схемой защиты, в [5] предложены соотношения, определяющие верхнюю границу времени зарядки $t_{зар}$. В работе показано отличие параметров схемы зарядки при четном и нечетном количествах модулей, соответствующих ЕНЭ.

Формулы получены в предположении, что все конденсаторы батареи сосредоточены в точке кольцевой схемы, противоположной точке подключения к ней зарядного резистора $R_{зар}$, что соответствует эквивалентной схеме, показанной на рис. 1.

Как показывает приведенный анализ, в настоящее время процессы зарядки ЕНЭ, выполненных с кольцевой схемой защиты, не обладают достаточной полнотой рассматривания.

Целью настоящей работы является определение соотношений для расчета времени зарядки емкостных накопителей энергии, выполненных с кольцевой схемой защиты.

Материалы и результаты исследований. Схемы зарядки, показанные на рис. 2, имеют особенность: при одинаковой величине емкости всех модулей $C_{M1} = C_{M2} = \dots = C_{Mn} = C$ и одинаковой величине активного сопротивления защитных резисторов $R_1 = R_2 = \dots = R_n = R$ потенциалы точек 2 и n , 3 и $n-1$, ... в процессе зарядки всегда остаются одинаковыми. Это обстоятельство позволяет кольцевые схемы, приведенные на рис. 2, для целей анализа процесса зарядки преобразовать в эквивалентные лестничные, показанные на рис. 3. Преобразование осуществляется соединением эквипотенциальных точек. Данные схемы близки по структуре к рассмотренным в [3], но имеют отличия в величине параметров первого и последнего RC-звена, что затрудняет использование результатов [3].

Анализ схем, показанных на рис. 3, был проведен с использованием системы схемотехнического моделирования Micro Cap [6]. Моделирование проводилось для различных отношений сопротивлений защитного и зарядного резисторов $0 \leq R/R_{зар} \leq 1$ и различного количества модулей в ЕНЭ $3 \leq n \leq 10$.

Проведенный анализ показал, что время зарядки ЕНЭ может быть определено по выражению

$$t_{зар} = k\tau_3, \quad (1)$$

где k – коэффициент, который зависит от способа зарядки (постоянным или выпрямленным напряжением), количества модулей n и отношения $R/R_{зар}$.

$\tau_3 = R_3 C_3$ – постоянная времени эквивалентной зарядной цепи;

$C_3 = nC$ – эквивалентная емкость;

R_3 – эквивалентное активное сопротивление, которое определяется [5]:

– при нечетном количестве модулей $n = 3, 5, 7, 9, \dots$

$$R_3 = R_{зар} + R \frac{n-1}{4}, \quad (2)$$

– при четном количестве модулей $n = 4, 6, 8, 10, \dots$

$$R_3 = R_{зар} + R \frac{n}{4}. \quad (3)$$

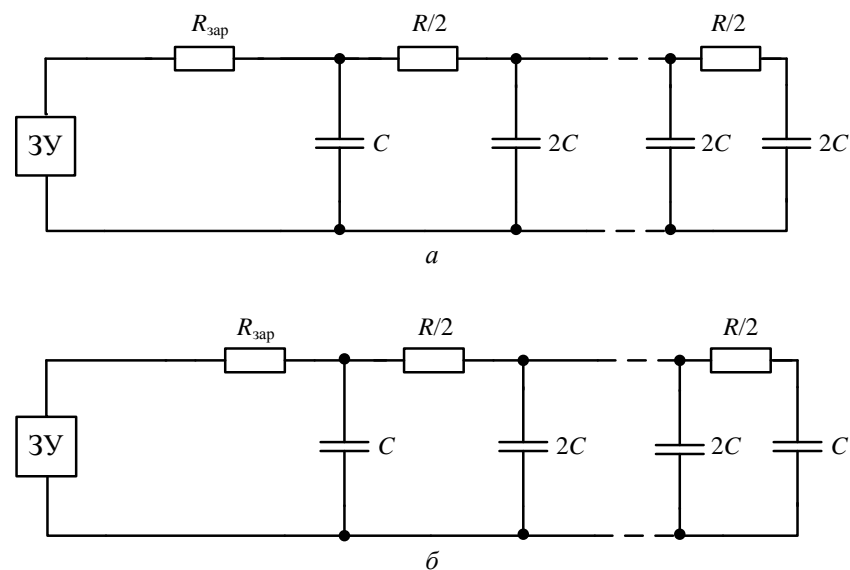


Рисунок 3 – Эквивалентная схема зарядки

a – при нечетном количестве модулей; b – при четном количестве модулей.

Значения коэффициента k , рассчитанные по результатам моделирования процесса зарядки постоянным напряжением, приведены в табл. 1. Характер изменения величины коэффициента k при зарядке ЕНЭ от источника постоянного напряжения величиной E , показан на рис. 4. Кривые построены для варианта зарядки ЕНЭ до уровня $Y = \frac{u_c(t)}{E} = 0,9$.

Таблица 1. Значения коэффициента k для зарядки постоянным напряжением

К-во модулей	$R/R_{зар}$					
	0	0,2	0,5	0,8	0,9	1
$Y = 0,9$						
3	2,3	2,21	2,1	2,02	1,99	1,97
4	2,3	2,07	1,85	1,7	1,66	1,63
5	2,3	2,11	1,92	1,8	1,77	1,74
6	2,3	1,99	1,72	1,57	1,53	1,5
7	2,3	2,02	1,79	1,65	1,62	1,59
8	2,3	1,91	1,63	1,48	1,45	1,42
9	2,3	1,94	1,69	1,55	1,52	1,5
10	2,3	1,85	1,56	1,4	1,39	1,36
$Y = 0,95$						
3	3	2,87	2,72	2,61	2,57	2,55
4	3	2,69	2,38	2,19	2,14	2,09
5	3	2,73	2,48	2,32	2,27	2,24
6	3	2,57	2,22	2,02	1,97	1,93
7	3	2,61	2,3	2,13	2,08	2,05
8	3	2,48	2,1	1,9	1,86	1,82
9	3	2,51	2,17	1,99	1,95	1,92
10	3	2,39	2	1,8	1,77	1,74
$Y = 0,99$						
3	4,61	4,4	4,16	3,98	3,93	3,88
4	4,61	4,11	3,63	3,32	3,24	3,17
5	4,61	4,18	3,78	3,52	3,45	3,39
6	4,61	3,93	3,38	3,06	2,98	2,91
7	4,61	3,84	3,29	3,01	2,95	2,89
8	4,61	3,78	3,18	2,87	2,8	2,74
9	4,61	4,11	3,63	3,32	3,24	3,17
10	4,61	3,64	3,03	2,71	2,68	2,62

Зависимости, аппроксимирующие данные, приведенные на рис. 4, имеют вид:

– для $n = 3$

$$k = 2,3 \exp \left[-0,16 \left(\frac{R}{R_{\text{зад}}} \right)^{0,82} \right]; \quad (4)$$

– для $n = 5$

$$k = 2,3 \exp \left[-0,28 \left(\frac{R}{R_{\text{зад}}} \right)^{0,7} \right]; \quad (5)$$

– для $n = 7$

$$k = 2,3 \exp \left[-0,376 \left(\frac{R}{R_{\text{зад}}} \right)^{0,63} \right]; \quad (6)$$

– для $n = 9$

$$k = 2,3 \exp \left[-0,437 \left(\frac{R}{R_{\text{зад}}} \right)^{0,551} \right]. \quad (7)$$

Погрешность вычисления по (4)–(7) не превышает 3%.

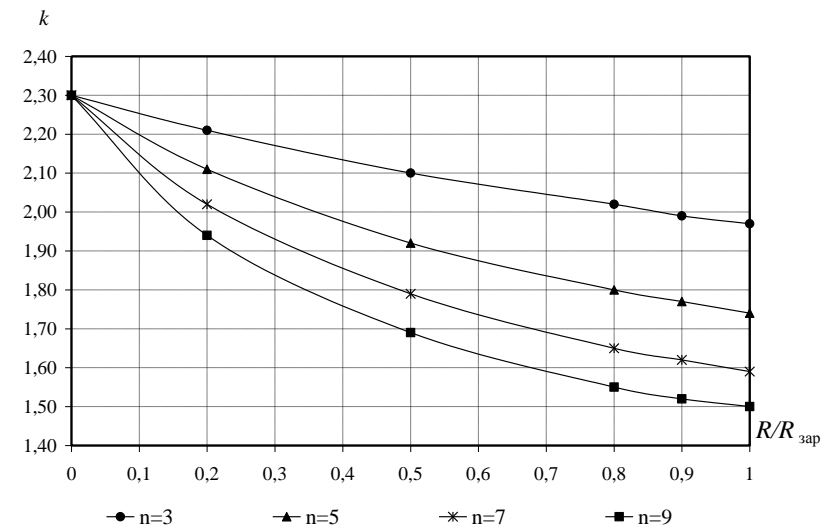


Рисунок 4 – Изменение коэффициента k при заряде ЕНЭ постоянным напряжением до уровня 0,9

Из рассмотренных графиков и таблицы видно, что, при постоянном эквивалентном сопротивлении и постоянной эквивалентной емкости, с увеличением отношения сопротивления защитного резистора к сопротивлению зарядного резистора значение коэффициента k , а значит и время зарядки ЕНЭ, уменьшается. Имеет место также уменьшение времени зарядки с увеличением количества модулей (раздельно для четного и нечетного их числа).

Приведенные данные могут быть использованы для расчета времени зарядки других устройств, зарядные цепи которых приводятся к схемам, показанным на рис. 3.

Выводы.

1. В работе рассмотрен расчет времени зарядки емкостного накопителя энергии с кольцевой схемой защиты при использовании постоянного напряжения.

2. Полученные данные позволяют определить время зарядки емкостного накопителя энергии до уровня, соответствующего 0,9; 0,95 и 0,99 от максимального значения напряжения зарядки.

3. Показано, что с увеличением количества модулей время зарядки уменьшается при фиксированной постоянной времени эквивалентной цепи. Аналогичная тенденция имеет место при увеличении отношения значений сопротивлений защитного и зарядного резисторов.

Материалы статьи могут быть использованы для планирования исследований зарядных цепей емкостных накопителей энергии с кольцевой схемой защиты при других способах зарядки и количестве модулей, а также оптимизации систем заряда ЕНЭ.

Список литературы: 1. *Чиженко И.М.*, Зарядные устройства емкостных накопителей энергии. / *И. М. Чиженко, Г. С. Бердинских.* – К.: Наук. думка, 1980. – 152 с. 2. *Пентегов И.В.* Основы теории зарядных цепей емкостных накопителей энергии / *И.В. Пентегов.* – К.: Наук. думка, 1982. – 424 с. 3. *Смирнов С. М.* Генераторы импульсов высокого напряжения / *С.М. Смирнов, П.В. Терентьев.* – М.: Энергия, 1964. – 239 с. 4. *Колушко Г.М.* Анализ схем защиты магнитно-импульсных установок с использованием резисторов на стадии заряда / *Г.М. Колушко, В.В. Конотоп* / Вестник Харьковского политехнического института. Тематический выпуск: Магнитно-импульсная обработка металлов. – Харьков: Вища школа. – 1977. – 4. – С. 66 – 71. 5. *Петков А. А.* Расчет и проектирование защитных резисторов емкостных накопителей энергии: учеб.-метод. пособие / *А. А. Петков.* – Харьков: НТУ «ХПИ», 2009. – 65 с. 6. *Разевиг В.Д.* Схемотехническое моделирование с помощью Micro-Cap 7 / *В.Д. Разевиг.* – М.: Горячая линия-Телеком, 2003. – 368 с.

Поступила в редколлегию 30.04.2010.