

## Метод регулируемого расходования энергии, накопленной в электрическом конденсаторе

© Д.И. Адейшвили<sup>1</sup>, В.П. Кортхонджия<sup>2</sup>, Н.Ф. Шульга<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Национальный научный центр "Харьковский физико-технический институт",  
310108 Харьков, Украина

<sup>2</sup> Институт физики АН Грузии,  
380077 Тбилиси, Грузия

(Поступило в Редакцию 30 июля 1998 г.)

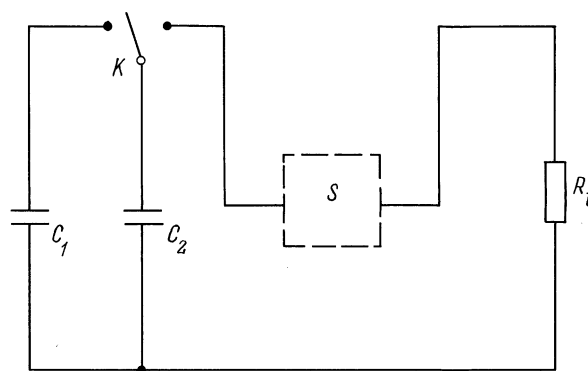
Предложен метод регулируемого расходования накопленной в электрическом конденсаторе электроэнергии с требуемой мощностью в течение длительного времени. Показана возможность использования электрических конденсаторов в качестве автономного источника электроэнергии.

**1.** Электрические конденсаторы представляют собой электроэнергонакопительные устройства, обладающие уникальными свойствами. Они имеют малое внутреннее сопротивление, могут обладать высокой удельной энергоемкостью и являются экологически чистыми источниками электроэнергии [1–3]. Такие источники, однако, не нашли широкого применения из-за неуправляемого характера процесса их разрядки. В настоящей работе предлагается метод регулируемого и расходования без потерь накопленной в электрическом конденсаторе электроэнергии с требуемой мощностью на конкретной нагрузке (потребителе) в течение достаточно длительного рабочего времени. Предложенный метод указывает на возможность использования электрических конденсаторов в качестве эффективного автономного источника электроэнергии.

**2.** Суть и принцип работы метода заключается в следующем (рис. 1). От конденсатора с большой емкостью  $C_1$  (назовем его баком-конденсатором) отбирается с определенной частотой  $f$  и скважностью  $\varkappa$  малая часть накопленной в нем электроэнергии другим конденсатором  $C_2$  (назовем его дозатором-конденсатором) со значительно меньшей емкостью, т.е.  $C_2 \ll C_1$ . Затем эта малая доза энергии передается нагрузке  $R_l$  с той же частотой и скважностью. Такая схема при соответствующем выборе параметров (емкости дозатора, скважности, частоты, переключателей и передающего устройства) позволяет управлять разрядкой конденсатора  $C_1$  и обеспечивать равномерную подачу энергии потребителю  $R_l$  в течение длительного рабочего времени  $T$  с требуемой номинальной мощностью  $W_n$ .

Таким образом, основная идея метода состоит в том, что вместо непосредственной, неконтролируемой разрядки бака-конденсатора  $C_1$  на нагрузку  $R_l$  вводится дозатор  $C_2$  для осуществления регулировки этого процесса разрядки бака. При отсутствии дозатора запасенная в баке-конденсаторе энергия в зависимости от величины собственного времени разрядки  $t^d = R_l C_1$ , а также задаваемого рабочего времени  $T$  будет по экспоненциальному закону либо выплескиваться сразу же в начале процесса при  $t^d \ll T$ , либо, если  $t^d \gg T$ , при том же значении накопленной энергии не будет обеспечиваться

выделение необходимой мощности  $W_n$  на нагрузку. Дозатор же позволяет запасенную в баке энергию расходовать некоторыми фиксированными порциями, равномерно и с требуемой номинальной мощностью путем рястяжки или сжатия процесса разрядки по времени  $t_E$  до величины требуемого рабочего времени  $T$ . В приведенной схеме метода основные меняющиеся физические величины: напряжение, скважность, частота, длительность импульса и ток в импульсе. Меняя эти величины от нуля до их номинальных значений, можно произвести регулировку подачи энергии на нагрузку  $R_l$  и тем самым осуществить требуемое управление подачи мощности в диапазоне от нуля до ее номинального значения, т.е.  $0 \leq W \leq W_n$ . Номинальные числовые значения указанных физических величин определяются конкретной задачей. Очевидно, в этом процессе управления значительную роль будут играть переключатели, так как изменения всех вышеуказанных физических величин можно осуществить исключительно с помощью этих переключателей. Конструктивно они могут быть решены либо чисто механическим, либо чисто электронным, либо обоими способами одновременно.



**Рис. 1.** Принципиальная схема по регулируемому расходованию накопленной в электрическом конденсаторе энергии:  $C_1$  — бак-конденсатор;  $C_2$  — конденсатор-дозатор;  $K$  — быстродействующий переключатель;  $S$  — всевозможные устройства, передающие мощность на нагрузку  $R_l$ .

Следует особо отметить, что предложенная электрическая схема функционально состоит из двух частей. Первая часть — это цепь зарядки дозатора заряженным баком, вторая часть — цепь разрядки дозатора на нагрузку  $R_l$ . Работа предложенной схемы основана на использовании конденсаторов с диэлектриками, поляризация которых происходит в течение короткого интервала времени (от  $10^{-14}$  до  $10^{-8}$  с). В этом случае можно осуществить быстрые (за  $1-10^{-3}$  с) передачи энергии нагрузке без потерь энергии при зарядке конденсатора  $C_2$  от  $C_1$ . Исходя из этого работа первой части схемы подчиняется законам электростатики, поскольку зарядка дозатора ведется его прямым подключением к баку, без зарядного сопротивления, и поэтому она происходит без потерь. В этой части схемы имеются только потери энергии, связанные с токами утечки на огромном изоляционном сопротивлении диэлектрика бака-конденсатора  $C_1$ . Работа второй части схемы протекает согласно законам электродинамики, поскольку разрядка дозатора ведется на разрядном сопротивлении (нагрузке). Эта часть схемы является диссипативной системой и работа ее сопровождается некоторыми потерями энергии.

Заметим, что термин "дозатор" используется также в работе [4]. В предложенной нами схеме, однако, дозатор заряжается от автономного источника электроэнергии — бака-конденсатора, а не от зарядного устройства, как это рассматривается в [4], которое постоянно включено и питается от внешней электрической сети. Кроме того, в предложенной нами схеме дозатор служит для передачи определенной порции энергии непосредственно нагрузке (потребителю), а не для зарядки конденсатора гораздо большей, чем дозатор, емкости. Однако схема дозатора [4] может быть применена для осуществления процесса рекуперации электроэнергии при использовании предложенной нами схемы на практике.

3. Перейдем теперь к количественной трактовке метода. Допустим, что требуется нагрузить индивидуального автономного потребителя электроэнергии  $R_l$  некоторой номинальной электрической мощностью  $W_n$  в течение достаточно длительного рабочего времени  $T$  и с возможностью плавной регулировки подачи этой мощности в пределах от нуля до номинальной, т.е.  $0 \leq W \leq W_n$ . Для этой цели потребуется некоторое количество электроэнергии

$$\Delta E = W_n T. \quad (1)$$

Если в качестве автономного источника электроэнергии выбран конденсатор, то понадобится накопительный бак-конденсатор соответствующей емкости  $C_1$ . Как известно, в электрических конденсаторах с емкостью  $C$  можно запасти максимальную электроэнергию  $E_0 = CV_0^2/2$ , где  $V_0$  — максимальное напряжение между обкладками конденсатора. Однако запасенную в конденсаторе электроэнергию, каким бы большим ее запас не был, не всегда можно извлечь с требуемой номинальной мощностью  $W_n$  в течение большого интервала рабочего времени  $T$ . Действительно, если максимально заряженный конденсатор непосредственно подключить к нагрузке, то его разрядка по энергии будет происходить по экспоненциальному закону в течение времени  $t_E = R_l C/2$

и за это время  $t_E$  будет высвобождаться из конденсатора количество энергии  $\Delta E = 0.64E_0$ . Задаваемое рабочее время извлечения из конденсатора этой энергии должно составлять  $T = t_E$ . Тогда извлекаемая мощность будет  $W = 0.64CV_0^2/(2T)$ .

На практике, однако, далеко не всегда удается найти конденсатор с параметрами (диэлектрик, пробойное напряжение, удельная объемная емкость и др.), удовлетворяющими отмеченным выше условиям: выделение требуемой номинальной мощности  $W_n$  на нагрузку  $R_l$  в течение рабочего времени  $T$ . При этом если емкость  $C \ll 2T/R_l$ , то разрядка конденсатора будет происходить в течение времени  $W_n \ll T$  и на нагрузке будет выделяться большая мощность  $W \gg W_n$  (что весьма нежелательно). Если же  $C \gg 2T/R_l$ , то  $t_E \gg T$  и на нагрузке будет выделяться малая мощность  $W \ll W_n$  (что не удовлетворяет потребителя). По этой причине разрядка конденсатора требует регулировки: в первом случае необходима растяжка времени разрядки  $t_E$ , а во втором случае — его сжатие до значения рабочего времени  $T$ . При этом процесс регулировки разрядки должен осуществляться почти без потерь накопленной в баке энергии.

Этот результат иллюстрирует рис. 2, на котором в логарифмическом масштабе представлена зависимость квадрата максимального напряжения  $V_0^2$  между обкладками конденсатора при максимально накопленной энергии  $E_0$  от емкости  $C$  для одного и того же диэлектрика. По оси ординат отложена величина  $V_0^2/(1.6W_n R_l)$ , а по оси абсцисс величина  $CR_l/(2t_E)$ . Как легко проверить, только в точке с координатами (1,1) на этом графике выполняется условие  $t_E = T$ . При этом если  $C < 1$ , то  $t_E < T (W > W_n)$  и требуется растяжка процесса разрядки (область  $CD$  на рисунке), если же  $C > 1$ , то  $t_E > T (W < W_n)$  и требуется сжатие процесса разрядки (область  $C$ ). Отметим, что представленный график является универсальным для рассматриваемой

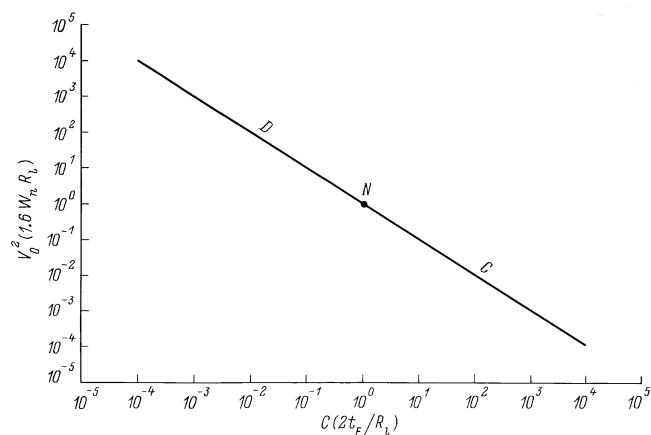


Рис. 2. Зависимость квадрата напряжения  $V_0^2$  между обкладками конденсатора от его емкости  $C$ :  $W_n$  — номинальная мощность,  $R_l$  — нагрузка,  $t_E$  — время разрядки конденсатора по энергии,  $t_E = R_l C/2$ ;  $N$  — "нормальная точка" — с координатами (1,1).

проблемы, так как он в явном виде снормирован по всем задаваемым параметрам  $E_0$ ,  $W_n$ ,  $T$  и  $R_l$  и справедлив для всех диэлектриков.

Точка (1,1) на графике является опорной точкой. В этой точке происходит не только нормировка по всем задаваемым параметрам метода, но и, что весьма важно, производится согласование между необходимым рабочим временем  $T = t_E$  и необходимой максимально накопленной в баке  $C_1$  энергией  $E_0 = 1.6\Delta E$ . В точке (1,1) должно иметь место одновременно, с одной стороны,  $T = RC_1/2$  и, с другой стороны,  $E_0 = 1.6W_n/T$ . Это возможно, поскольку необходимую максимальную энергию  $E_0$  при заданной емкости  $C_1 = 2T/R_l$  можно обеспечить путем подбора соответствующего диэлектрика с удовлетворяющим объемом  $\nu$ , согласно известной формуле  $E_0 = \varepsilon_0\varepsilon_r U^2\nu/2$ , где  $\varepsilon_0$  — электрическая постоянная,  $\varepsilon_r$  — (относительная) диэлектрическая проницаемость и  $U$  — напряженность электрического поля в диэлектрике. Конденсаторы, для которых одновременно выполняются условия  $t_E = T$  и  $E_0 = 1.6W_nT$ , назовем "нормальными". Им соответствует на графике точка (1,1). Исходя из этого и точку (1,1) также назовем "нормальной". Координатные числа на оси  $C$  указывают одновременно на степень операции необходимого сжатия или необходимой растяжки времени процесса разрядки  $t_E$  до значения  $t_E = T$  в единичной точке (1,1). Именно в осуществлении этого процесса приведения времени разрядки конденсатора  $t_E$  в единичной (нормальной) точке (1,1) графика, там, где  $t_E = T$  и  $E_0 = 1.6W_nT$ , и основан предложенный метод.

Представленный на рис. 2 график позволяет определить, требуется ли сжатие или растяжка времени разрядки выбранного бака-конденсатора с заданными его параметрами  $E_0$  и  $V_0^2$  для обеспечения на потребителе  $R_l$  необходимой номинальной мощности в течение рабочего времени  $T$ .

Обсудим теперь требования, которым должен удовлетворять дозатор. Расходование энергии дозатором  $C_2$  из бака  $C_1$  производится короткими импульсами  $\tau_i$  и малыми дозами  $\Delta E_{\tau_i}$  с некоторой скважностью  $\varkappa$  и частотой  $f$ . Частота работы дозатора определяется периодом времени  $\tau$ , в течение которого происходит полный цикл процесса зарядки и разрядки дозатора  $f = 1/\tau$ . Под скважностью процесса понимается величина  $\varkappa = \tau/\tau_i$ . Предполагается, что  $\tau_i \leq \tau$ , поэтому  $\varkappa \geq 1$ .

Необходимая в импульсе энергия для обеспечения потребителя требуемой номинальной мощностью составляет

$$\Delta E_{\tau_i} = W_n \tau. \quad (2)$$

Изменение энергии в  $e$  раз при разрядке дозатора на потребителе происходит в течение времени  $\tau_i = \tau^d/2$ , где  $\tau^d = R_l C_2$  — собственное время разрядки дозатора  $C_2$ . Таким образом, емкость дозатора  $C_2$  может быть выражена через параметры  $\tau$ ,  $R$  и  $\varkappa$

$$C_2 = 2\tau / (R_l \varkappa). \quad (3)$$

4. Рассмотрим теперь работу предлагаемой схемы в целом. Если время  $t_E$  разрядки конденсатора  $C_1$  сравнимо

с рабочим временем  $T$ , т.е. имеем нормальный конденсатор, то разрядка конденсатора  $C_1$  на нагрузку будет происходить по экспоненциальному закону. Дозатор в этом случае требуется для обеспечения равномерной подачи электроэнергии на нагрузку. Это можно осуществить с помощью дозатора, работающего со скважностью  $\varkappa = 1$ , поскольку при больших значениях  $\varkappa$  в этом случае будет происходить потеря мощности. При этом в "нормальном" режиме емкость конденсатора-дозатора  $C_2$  определяется соотношением

$$C_2 = \frac{2\tau}{R_l}. \quad (4)$$

Если  $t_E \ll T$ , то дозатор требуется для растяжки времени разрядки конденсатора  $C_1$  до рабочего времени  $T$  и равномерной подачи электроэнергии на нагрузку  $R_l$ . Для этого требуется, чтобы дозатор работал со скважностью  $\varkappa = T/t_E \gg 1$ . В этом случае его емкость должна быть в  $\varkappa$  раз меньше, чем емкость дозатора при нормальном режиме (4).

Наконец, если  $t_E > T$ , то требуется сжатие процесса разрядки конденсатора  $C_1$  до требуемого рабочего времени  $T$ . Использование одного дозатора для этой цели, однако, не позволяет обеспечить требуемой мощности на нагрузку. Преодолеть эту трудность можно путем осуществления процедуры умножения напряжения с помощью гирлянды из  $n$  вспомогательных конденсаторов, соединенных последовательно [3,4]. А именно если  $n$  вспомогательных дозаторов мы одновременно зарядим от конденсатора  $C_1$  по параллельной схеме и затем соединим их последовательно в гирлянду, то получим единый рабочий дозатор с напряжением на обкладках, в  $n$  раз большим, чем напряжение на обкладках конденсатора  $C_1$ . Количество таких вспомогательных конденсаторов-дозаторов  $n = \sqrt{t_E/T}$ . При этом вся гирлянда конденсаторов в целом будет работать как единый дозатор со скважностью  $\varkappa = 1$ . Емкость такого единого дозатора должна составлять  $C_2 = 2\tau/R_l$ , как и при (4).

Заметим, что если величина  $\sqrt{t_E/T}$  очень велика, то может быть развита и использована процедура умножения напряжения количеством вспомогательных дозаторов, значительно меньшим, чем  $n = \sqrt{t_E/T}$ . Для этого набор вспомогательных дозаторов должен быть разбит по напряжениям на несколько групп конденсаторов. При этом конденсаторы первой группы должны быть заряжены одновременно от  $C_1$ . Затем эти конденсаторы соединяются последовательно в гирлянду, и вся гирлянда заряжает конденсаторы второй группы в отдельности каждый. В свою очередь заряженные конденсаторы второй группы соединяются в новую группу и такая гирлянда используется для зарядки конденсаторов следующей группы и т.д. Такую процедуру умножения напряжения возможно осуществить без потерь энергии, так как предполагается использование дозаторов с коротким временем зарядки ( $\tau_i \leq 10^{-8}$  s). Заметим, что емкость единого дозатора, составленного из последней гирлянды конденсаторов, должна всегда определяться формулой

(4) и суммарное напряжение на таком дозаторе должно составлять  $V_2 = \sqrt{t_E/T}V_1$ , где  $V_1$  — напряжение на обкладках бака-конденсатора  $C_1$ .

Обратим внимание еще на одну важную сторону работы рассматриваемой схемы. По мере расходования энергии из конденсатора  $C_1$  напряжение на его обкладках за время  $t_E$  будет уменьшаться по экспоненциальному закону от значения  $V_0$  до  $\sim 0.6V_0$ . До этого же напряжения будет уменьшаться и значение максимального напряжения на дозаторе при его зарядке. Это означает, что передаваемое дозатором нагрузке количество энергии в импульсе  $\Delta E_{\tau}$  с течением времени тоже будет постепенно уменьшаться в  $e$  раз до значения  $0.37\Delta E_{\tau}$ . Все это имеет место для всех трех рассмотренных выше режимов. Предотвратить такое явление возможно путем корректировки времени разрядки бака-конденсатора с помощью дополнительных дозаторов. Для этого достаточно уменьшить время разрядки бака-конденсатора в два раза. Практически это можно осуществить с помощью двух дозаторов, соединенных последовательно в гирлянду. Емкости каждого из этих дозаторов должны быть в два раза больше, чем емкость дозатора  $C_2$ , используемого до корректировки времени разрядки  $C_1$ . При этом общая емкость полученной гирлянды должна по-прежнему определяться соотношением (3) или (4) в зависимости от соотношения между  $t_E$  и  $T$ , т.е. в зависимости от применяемого режима.

Авторы выражают благодарность А.А. Рухадзе и А.Н. Довбне за поддержку и интерес к данной работе.

## Список литературы

- [1] *Сканави Г.И.* Физика диэлектриков (Область слабых полей). М.: Гостехиздат, 1949. 500 с.
- [2] *Ренне В.Т.* Электрические конденсаторы. Л.: Энергия, 1969. 592 с.
- [3] *Хипель А.Р.* Диэлектрики и их применение. Пер. с англ. М.; Л.: Госэнергоиздат, 1959. 336 с.
- [4] *Бут Д.А., Алиевский Б.Л., Мизюрин С.Р., Васюкевич П.В.* Накопители энергии. М.: Энергоатомиздат, 1991. 400 с.