

Метод регулируемого расходования энергии, накопленной в электрическом конденсаторе

© Д.И. Адейшвили¹, В.П. Кортхонджия², Н.Ф. Шульга¹

¹ Национальный научный центр "Харьковский физико-технический институт",
310108 Харьков, Украина

² 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 рясжати 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.

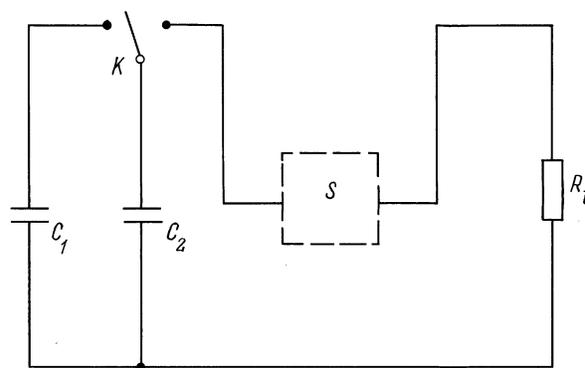


Рис. 1. Принципиальная схема по регулируемому расходованию накопленной в электрическом конденсаторе энергии: C_1 — бак-конденсатор; C_2 — конденсатор-дозатор; K — быстродействующий переключатель; S — всевозможные устройства, передающие мощность на нагрузку R_l .

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

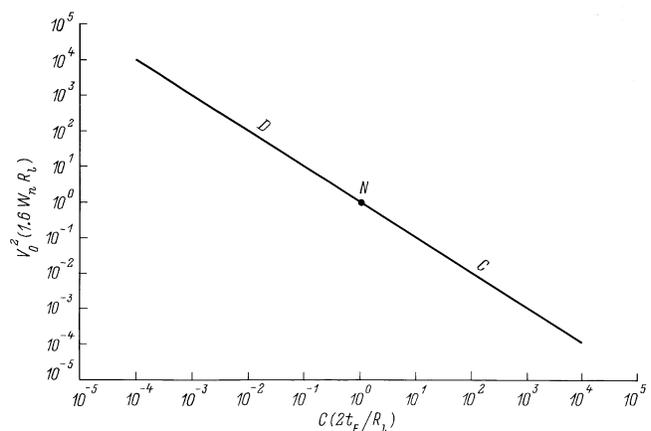


Рис. 2. Зависимость квадрата напряжения V_0^2 между обкладками конденсатора от его емкости C : W_n — номинальная мощность, R_l — нагрузка, t_E — время разрядки конденсатора по энергии, $t_E = R_l C/2$; N — "нормальная точка" — с координатами (1,1).

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 ν , согласно известной формуле $E_0 = \varepsilon_0\varepsilon_r U^2\nu/2$, где ε_0 — электрическая постоянная, ε_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 τ_i и малыми дозами ΔE_{τ_i} с некоторой скважностью \varkappa и частотой f . Частота работы дозатора определяется периодом времени τ , 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 τ , 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 ΔE_{τ} 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.