

05;12

Требования к диэлектрикам для создания автономного источника электроэнергии на основе электрического конденсатора

© Д.И. Адейшвили¹, В.П. Кортхонджия², Н.Ф. Шульга¹¹ Национальный научный центр "Харьковский физико-технический институт",
310108 Харьков, Украина² Институт физики АН Грузии,
380077 Тбилиси, Грузия

(Поступило в Редакцию 30 июля 1998 г.)

Рассмотрены и установлены требования к диэлектрикам для решения задач накопления, хранения и регулируемого расходования в течение длительного времени электроэнергии с необходимой номинальной мощностью с помощью электрических конденсаторов.

1. В работе [1] было обращено внимание на возможность использования электрических конденсаторов в качестве автономного источника электроэнергии. Для решения этой задачи был предложен метод регулируемого расходования энергии, накопленной в электрическом конденсаторе, позволяющий обеспечить в течение длительного времени выделение заданной номинальной мощности на потребителе. Накопленная в конденсаторе электроэнергия существенным образом зависит от применяемого в нем диэлектрика [2–5].

В настоящей работе рассматриваются требования к диэлектрикам для решения задач накопления, хранения и регулируемого расходования в течение длительного времени электроэнергии с необходимой номинальной мощностью с помощью электрических конденсаторов.

2. Диэлектрическая среда для указанной цели прежде всего должна удовлетворять следующим двум требованиям. Во-первых, она должна обладать высокой удельной объемной энергоемкостью. Это позволит создать компактный источник электроэнергии. Во-вторых, она должна обладать высоким удельным объемным электрическим сопротивлением, т.е. быть хорошим изолятором. Это обеспечит благодаря малости токов утечки длительную сохранность запасенной в электрическом конденсаторе энергии. Сюда же следует отнести возможность больших диссипативных потерь мощности в диэлектрике во время разрядки конденсатора на нагрузку. Обсудим эти требования более подробно.

3. Для обеспечения потребителя в течение времени T номинальной мощностью W_H требуется конденсатор C_b , позволяющий произвести накопление максимальной электроэнергии $E_0 = 1.6W_H T$ [1]. Удельная объемная электроемкость конденсатора определяется формулой $\rho_\nu = \varepsilon_0 \varepsilon_r U_0^2 / 2$ (ε_0 — электрическая постоянная, ε_r — относительная диэлектрическая проницаемость, U_0 — пробивная напряженность поля), где $U_0 = V_0 / d$ (V_0 — пробивное напряжение, d — толщина диэлектрического слоя между обкладками конденсатора). Предельный минимальный объем ν диэлектрического слоя между обкладками конденсатора, который необходим для этого случая, определяется из выражения $E_0 = \rho_\nu \nu$ [3,6–8].

С целью подстраховки от пробоя диэлектрика в качестве максимального напряжения на обкладках конденсатора мы будем брать значение, равное половине пробивного напряжения $V_0/2$. В этом случае минимальный пространственный объем диэлектрика конденсатора будет определяться соотношением

$$\nu = \frac{12.8 Q W_H T}{\varepsilon_0 \varepsilon_r U_0^2}. \quad (1)$$

4. Рассмотрим теперь вопросы, связанные с энергетическими потерями в диэлектриках накопительных конденсаторов. В диэлектрике конденсатора имеют место потери энергии, связанные с объемными токами утечки и разрядными токами на нагрузку во внешней электрической схеме разрядки конденсатора. В первой части электрической схемы [1] в цепи бака-конденсатора потери энергии обусловлены только токами утечки. Других потерь здесь нет, поскольку зарядка дозатора-конденсатора от бака-конденсатора происходит без каких-либо потерь энергии. Связано это с тем, что в обоих конденсаторах используются диэлектрики с быстрой поляризацией (10^{-14} – 10^{-8} s). Во второй части схемы [1] при разрядке дозатора на нагрузку происходят диссипативные потери мощности в дозаторе, обусловленные мощными разрядными токами на нагрузку. Другие потери энергии здесь практически отсутствуют. Таким образом, общие потери энергии предложенного в [1] метода — регулируемого расходования энергии конденсатора складываются из потерь энергии, обусловленных токами утечки бака-конденсатора в цепи зарядки дозатора, и из потерь энергии, обусловленных токами утечки бака-конденсатора в цепи зарядки дозатора, и из потерь энергии на диссипативные потери мощности в дозаторе в цепи его разрядки.

Энергетические потери из-за объемных токов утечки характеризуются постоянной времени конденсатора $\tau_c = \varepsilon_0 \varepsilon_r \rho$ и определяются лишь электрическими параметрами диэлектрика (ρ — удельное объемное электрическое сопротивление). Отношение T/τ_c пропорционально относительным потерям энергии, обусловленным объемными токами утечки бака-конденсатора. Однако так

как время разрядки конденсатора по энергии в e раз составляет половину его собственного времени разрядки, то вместо τ_c надо брать его половинное значение. Тогда относительные потери энергии, связанные с объемными токами утечки бака-конденсатора, будут определяться соотношением

$$P_y = \frac{2T}{\tau_c}. \quad (2)$$

Рассмотрим теперь диссипативные потери мощности в дозаторе C_d . Заметим, что диссипативные потери мощности в дозаторе W_{nd} компенсируются соответствующими потерями мощности в баке-конденсаторе W_n . Связь между величинами W_n и W_{nd} можно определить следующим образом. Диссипативные удельные объемные диэлектрические потери мощности определяются соотношением [2] $P_n = U_0^2/(2\rho)$. Учитывая формулы $C_b = \varepsilon_0\varepsilon_r/d^2$, $E_0 = 1.6\Delta E$ ($\Delta E = W_H T$) и $E_0 = C_b V_0^2/2$, можно определить полные диэлектрические диссипативные потери мощности бака-конденсатора $W_n = P_n \nu$ или $W_n = 1.6\Delta E/\tau_c$. Заметим, что аналогично для дозатора $W_{nd} = 1.6\Delta E\tau_i/\tau_c$, где $\Delta E\tau_i = W_H\tau$ — передаваемое дозатором нагрузке количество энергии в импульсе. Номинальная мощность определяется формулой $W_H = \Delta E\tau_i/\tau$, поэтому $\Delta E = N\Delta E\tau_i$ и, следовательно, $W_n = NW_{nd}$.

Так как номинальная мощность $W_H = \Delta E/T$, то из сравнения W_n с W_H получим с учетом (2) относительные диссипативные потери мощности рассматриваемого метода

$$P_0 = 0.8P_y. \quad (3)$$

Соотношение (3) показывает, что в рассматриваемом методе относительные диссипативные потери мощности можно выразить через относительные потери энергии токов утечки. Поэтому полные относительные потери энергии в рассматриваемом методе будут $P = P_y + P_0$, т. е.

$$P = 3.6\frac{T}{\tau_c}. \quad (4)$$

Выражение (4) показывает, что диэлектрики в конденсаторах C_b и C_d будут всегда находиться в неперегруженных состояниях и опасаться утраты ими диэлектрических свойств и других неприятностей вследствие их перегрева нет оснований.

5. Полученные результаты позволяют сформулировать необходимые требования к диэлектрикам. Введем с этой целью параметры (ε, ρ) и $(\varepsilon_r U_0^2)$, которые удобны для описания электрических характеристик диэлектрика в рассматриваемой задаче.

Так как $\tau_c = \varepsilon_0\varepsilon_r\rho$, то с учетом (4) находим, что $(\varepsilon_r\rho) = 3.6T/(\varepsilon_0 P) = 4 \cdot 10^{11} T/P$ (мы воспользовались здесь значением $\varepsilon_0 = 8.854 \cdot 10^{-12}$ F/m). В настоящее время относительные потери на уровне $P \leq 10^{-2}$ считаются малыми и для широкой практики являются очень хорошими. В этом случае $(\varepsilon_r\rho) = 4 \cdot 10^{13} T$. Это соотношение показывает, каким значениям параметров ε_r и ρ должна удовлетворять среда между обкладками

конденсатора, чтобы сохранить накопленную энергию в течение требуемого рабочего времени с потерями не более $P \leq 10^{-2}$. Произведение $(\varepsilon_r\rho)$ для удобства назовем "мерой качества" диэлектрика. Ее размерность в системе СИ — $\Omega \cdot \text{м}$. Например, если требуется обеспечить потребителя некоторой номинальной мощностью в течение рабочего времени $T = 30 \text{ h}$ (10^5 s) на уровне потерь не более $P \leq 10^{-2}$ (1%), то для этого необходим диэлектрик с мерой качества $(\varepsilon_r\rho) = 4 \cdot 10^{13} \Omega \cdot \text{м}$.

Для выяснения вопросов, связанных с удельной объемной энергоемкостью конденсаторов, воспользуемся формулой (1). Подставляя в нее численное значение ε_0 , получим, что $(\varepsilon_r U_0^2) = 4 \cdot 10^{11} W_H T/\nu$.

Это соотношение показывает, каким значениям параметров ε_r и U_0^2 должна удовлетворять среда между обкладками конденсатора, чтобы возможно было бы накопить в ней при заданном объеме диэлектрика необходимое количество электроэнергии. Произведение $(\varepsilon_r U_0^2)$ для удобства назовем "мерой прочности" (по объему). Ее размерность в системе СИ — $(\text{V/m})^2$.

Таким образом, диэлектрик должен удовлетворять следующим требованиям:

$$(\varepsilon_r U_0^2) \geq 4 \cdot 10^{11} \frac{W_H T}{\nu}, \quad (5)$$

$$(\varepsilon_r\rho) \geq 4 \cdot 10^{11} \frac{T}{P}. \quad (6)$$

6. Рассмотрим теперь некоторую конкретную типичную ситуацию, когда требуется загрузить потребителя электроэнергией номинальной мощностью $W_H = 100 \text{ kW}$ в течение времени $T = 30 \text{ h}$, причем потребитель допускает источник электроэнергии объемом, не превышающим $\nu \leq 10^{-1} \text{ m}^3$ и с уровнем потерь энергии, не превышающим $P \leq 10^{-2}$. Для этой цели потребуются бак-конденсатор с некоторой C_b емкостью, способный запастись максимальной энергией $E_0 = 4.8 \cdot 10^3 \text{ kWh}$. Тогда, согласно (5) и (6), бак-конденсатор должен обладать диэлектриком, удовлетворяющим требованиям

$$(\varepsilon_r U_0^2) \geq 4 \cdot 10^{22} (\text{V/m})^2, \quad (7)$$

$$(\varepsilon_r\rho) \geq 4 \cdot 10^{18} \Omega \cdot \text{м}. \quad (8)$$

Эти требования являются довольно жесткими. Учитывая прогресс в области техники создания новых типов диэлектриков [11], можно надеяться на то, что в скором времени диэлектрики, удовлетворяющие отмеченным выше требованиям (7) и (8), будут созданы. Что же касается других случаев, то там, где объем не очень критичен, вполне могут оказаться пригодными для этой цели уже существующие диэлектрики [9–11], которые обладают на два порядка меньшими значениями мер прочности (7) и качества (8).

В заключение авторы приносят искреннюю благодарность А.А. Рухадзе и А.Н. Довбне за действенную поддержку и интерес к данной работе.

Список литературы

- [1] *Адейшвили Д.И., Кортхонджия В.П., Шульга Н.Ф.* // ЖТФ. 1999. Т. 69. Вып. 8. С. 118–121.
- [2] *Сканави Г.И.* Физика диэлектриков (Область слабых полей). М.: Гостехиздат, 1949. 500 с.
- [3] *Сканави Г.И.* Физика диэлектриков (Область сильных полей). М.: Физматгиз, 1958. 908 с.
- [4] *Тареев Б.М.* Физика диэлектрических материалов. М.: Энергоатомиздат, 1982. 320 с.
- [5] *Ренне В.Т.* Электрические конденсаторы. Л.: Энергия, 1969. 592 с.
- [6] *Франц В.* Пробой диэлектриков. Пер. с нем. М.: ИЛ, 1961. 208 с.
- [7] *Воробьев А.А., Завадовская Е.К.* Электрическая прочность твердых диэлектриков. М.: ГТТЛ, 1956. 312 с.
- [8] *Воробьев А.А., Воробьев Г.А.* Электрический пробой и разрушение твердых диэлектриков. М.: Высшая школа, 1966. 224 с.
- [9] *Таблицы физических величин.* Справочник / Под ред. И.К. Кикоина. М.: Атомиздат, 1976. 1008 с.
- [10] *Физические величины.* Справочник / Под ред. И.С. Григорьева, Е.З. Мейлихова. М.: Энергоатомиздат, 1991. 1232 с.
- [11] *Справочник по электротехническим материалам* / Под ред. Ю.В. Корицкого, В.В. Пасынкова, Б.М. Тареева. Т. 1, 2. М.: Энергоатомиздат, 1986, 1987. Т. 3. Л.: Энергоатомиздат, 1988.