

УДК 622.625.28-83.621.315

© Дыбрин С.В.\*

## **СПОСОБ РЕГУЛИРОВАНИЯ НАПРЯЖЕНИЯ НА ЗАЖИМАХ БЛОКА КОНДЕНСАТОРОВ**

*Рассматривается способ регулирования напряжения на зажимах конденсаторного накопителя энергии путем переключения схем соединений конденсаторов в нём.*

### *Вступление*

Рациональность, эффективность, надежность и качество электроснабжения – вот те вопросы, которые всегда актуальны. Учитывая новые разработки в области конденсаторов с двойным электрическим слоем, в основе практических решений поставленных вопросов может быть применен емкостной накопитель энергии.

### *Анализ публикаций*

В литературных источниках способ регулирования напряжения на зажимах блока конденсаторов освещен недостаточно. Так, в [1] упоминается переключение конденсаторов с параллельного соединения на последовательное и вовсе не рассматриваются другие варианты соединения. В [2] емкостным накопителем энергии посвящена целая глава, однако о подобных технических решениях также ничего не сказано. Источник [3] содержит общие методы анализа зарядных цепей емкостных накопителей, но и здесь данный вопрос не освещается.

Таким образом, проблема регулирования напряжения на зажимах конденсаторного накопителя энергии путем переключения схем соединения конденсаторов в нем практически не реализована и требует дополнительной проработки и решения.

### *Постановка задачи*

Конденсатор как накопитель энергии имеет свои особенности. Одна из них – непостоянство напряжения на его зажимах в зависимости от аккумулированной в данный момент энергии. Одним из способов, позволяющих повысить напряжение на зажимах емкостного накопителя (накопительного блока конденсаторов) при разряде или понизить при заряде, является изменение схемы соединения конденсаторов.

### *Результаты исследования*

Для того чтобы эффективно (исключив потери энергии) регулировать напряжение батареи конденсаторов накопителя энергии, переключением схем их соединения, необходимо выбирать такие схемы, чтобы электрические процессы при осуществлении переключения во всех конденсаторах были одинаковы. При этом необходимо, чтобы при любом переключении с одной комбинации на другую не происходило: (а) компенсации зарядов (потеря энергии от разряда) и (б) перераспределение зарядов (потеря в проводниках). Далее будем говорить о батарее одинаковых конденсаторов.

Проанализировав возможные схемы соединения, приходим к выводу, что наиболее простые способы соединения конденсаторов с учётом соблюдения заявленного условия (процессы одинаковы) такие, когда в батарее все параллельные и последовательные ветви имеют одинаковую симметричную конфигурацию. На рис. 1 изображены схемы на примере батареи из шести конденсаторов.

Среди рассмотренных схем соединения можно найти электрически эквивалентные. На рис. 1 такие схемы сгруппированы. Классифицируем условно верхние схемы групп как последовательно-параллельные, а нижние как параллельно-последовательные.

---

\* Национальный горный университет, аспирант

Количество всех схем соединений в блоке из каждого условного класса, удовлетворяющее цели изменения напряжения на зажимах блока без потерь энергии внутри него, равно числу делителей, дающих целое число при делении общего числа конденсаторов. Причем, каждый делитель равен числу последовательно (параллельно) соединенных конденсаторов в параллельных (последовательных) ветвях блока. Найти эти делители довольно просто, используя ЭВМ.

Рассмотрим класс последовательно-параллельных схем. Пусть количество конденсаторов в накопителе  $N$  и возможные схемы соединения  $a, б, в, \dots$  (см. рис. 1).

Допустим также, что все конденсаторы соединены параллельно и каждый (как и вся батарея) имеет напряжение  $U$  на своих зажимах. Пусть также  $a, б, в$  и т.д. обозначают и число последовательно соединенных конденсаторов в каждой параллельной ветви батареи соответствующей схемы, то есть  $a = 1$ . Тогда для каждой схемы соединения в батарее:  $U/б, U/в, U/г, \dots$  такие напряжения на конденсаторах, при которых пересоединение конденсаторов в схемы  $б, в, г, \dots$  соответственно приведет к поднятию напряжения на зажимах батареи до  $U$ . Таким образом, при понижении напряжения на зажимах батареи со схемой  $a$  до напряжения  $U/б$  необходимо переподключить конденсаторы по схеме  $б$ . Напряжение на зажимах станет равным  $U$ . Переключение на схему  $в$  следует провести тогда, когда напряжение на каждом конденсаторе упадет до значения  $U/в$ . Но когда это случится, на зажимах батареи будет напряжение  $(U/в) \cdot б$ . После переключения на схему  $в$  напряжение на батарее опять станет равным  $U$ . На схему  $г$  следует переключать, когда на батарее будет напряжение  $(U/г) \cdot в$  и т.д.

Диаграмма напряжения на зажимах батареи при постоянной нагрузке будет выглядеть, как изображено на рис 2.

Проанализировав содержание энергии в накопителе в привязке к переключению схем соединения конденсаторов, можно видеть, что с каждым переключением достаточно быстро (обратно пропорционально растущему квадрату числа последовательно соединенных конденсаторов в параллельных ветвях) уменьшаются ёмкость батареи и энергия в ней. Но чем меньше емкость, тем быстрее конденсатор (в нашем случае батарея) разряжается при данной нагрузке, тем чаще необходимо переключать схемы соединения (рис. 2) и тем меньше энергии отдаётся батареей между переключениями.

Рассмотрим вопрос, как организовать переключение конденсаторов в блоке и сколько необходимо ключей для его осуществления.

Для возможности осуществления всех возможных переключений необходим  $3(N-1)$  ключ, где  $N$  – число конденсаторов в блоке. Это легко видеть на примере 6 конденсаторов (рис. 3).

Назовём схему соединения, представленную на рис. 3,  $a$  последовательно-параллельной, а на рис. 3,  $б$  – параллельно-последовательной. Пронумеруем ключи, как показано на рис. 3. Пусть номера ключей соответствуют координатам элементов массивов А (рис. 3,  $a$ ) и Б (рис. 3,  $б$ ), а сами элементы описывают состояние ключей: ключ замкнут – 1, разомкнут – 0 (рис. 4).

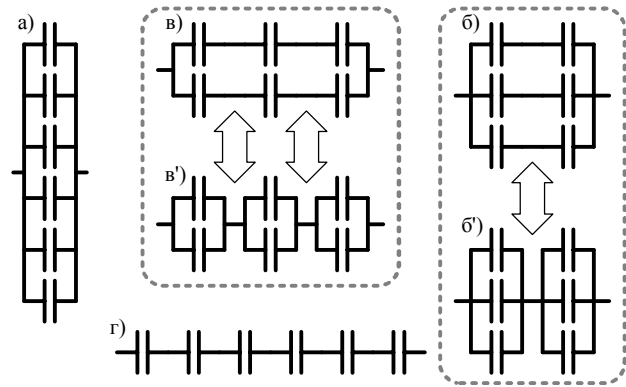


Рис. 1 – Схемы соединений шести конденсаторов, которые могут быть использованы для регулирования

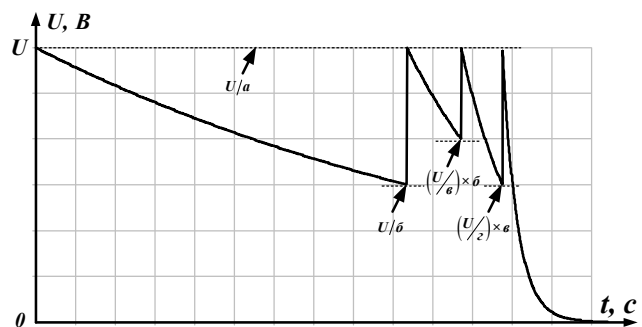


Рис. 2 – Зависимость напряжения на зажимах батареи от времени при переключениях схем соединений

Проанализируем полученные матрицы.

В случаях, представленных на рис. 3, а, видим: матрица А2, описывающая схему последовательно-параллельного соединения, у которой в каждой ветви присутствует 2 последовательно соединенных конденсатора, представляет собой А6, где каждая вторая строка инвертирована; матрица А3, представляет собой А6, где каждая третья строка не инвертирована. А1 – это А6, в которой была бы не инвертирована шестая строка. Цифра при букве массива – количество последовательных конденсаторов в параллельных ветвях последовательно-параллельных схем соединения конденсаторов.

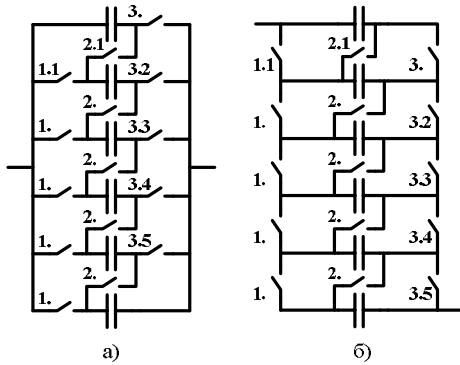


Рис. 3 – Возможные варианты осуществления переключения схем соединения конденсаторов в блоке

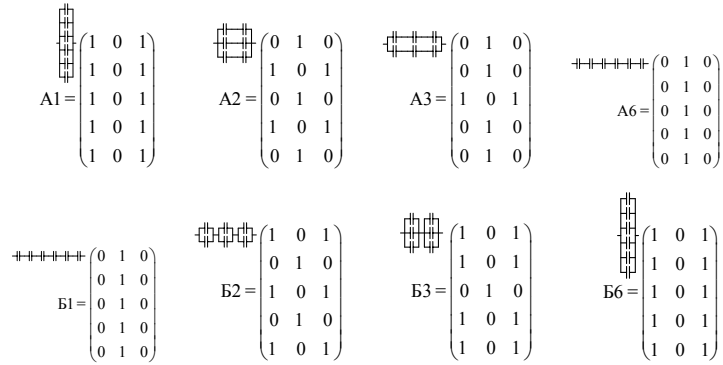


Рис. 4 – Матрицы, описывающие положение ключей последовательно-параллельных (А) и параллельно-последовательных (Б) схем соединения конденсаторов

В случаях, представленных на рис. 3, б, видим: матрица В2, описывающая схему параллельно-последовательного соединения, у которой в каждом последовательном звене присутствуют 2 параллельно соединенных конденсатора, представляет собой В6, где каждая вторая строка инвертирована; матрица В2 – это В6, у которой не инвертирована каждая вторая строка. В1 – это В6, в которой была бы инвертирована каждая шестая строка.

Схемы соединения, описываемые матрицами А1, А6 и В1, В6, антогонистичны по положению ключей, что и определяет их (ключей) большое число.

Исключим из соответствующих групп схемы, описываемые А1 и В1, и произведем операции эквивалентности ( $\equiv$ ) поэлементно со всеми оставшимися матрицами. Получим:

$$A1^* = \overline{A2 \equiv A3 \equiv A6} = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 \end{pmatrix}; \quad B1^* = \overline{B2 \equiv B3 \equiv B6} = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 \end{pmatrix}.$$

Таким образом, видим, что ключи 1.1, 2.1, 3.1, 1.5, 2.5, 3.5 на рис. 3, а, б не участвуют в переключениях. Их можно убрать, заменив или разрывом, или перемычкой. Т.е. число ключей может быть уменьшено минимум до  $3(N - 3)$ . Найдем общее правило определения минимума ключей для любой батареи из любого числа конденсаторов в случае исключения из регулирования некоторого числа схем.

Операция эквивалентности может дать единицы только в тех строчках, в которых:

- 1) инвертирование не происходило ни в одной из матриц соответствующих схем;
- 2) инвертирование происходило во всех матрицах соответствующих схем.

Рассчитаем сокращение числа ключей за счёт совпадения их состояния во всех схемах включения в случае если отбросить некоторое число схем соединения включая схему параллельного соединения конденсаторов для последовательно-параллельных схем (А1) и схему последовательного соединения конденсаторов для параллельно-последовательных схем (В1). Последние схемы (А<sub>п</sub> и В<sub>п</sub>) будем рассматривать как базовые, которые нельзя отбросить.

Определяем число строк матриц, описывающих схемы соединения, в которых инвертирование (относительно А<sub>п</sub> в группе матриц А, и относительно В<sub>п</sub> в группе матриц В) происходило у всех рассматриваемых матриц.

В результате произведённого анализа выяснилось что: если ввести вектор  $k$ , у которого элементы  $k_i$  соответствуют числу последовательных (параллельных) конденсаторов в  $i$ -той схеме, а  $i$  – текущая рассматриваемая схема, тогда при выполнении условия  $(\max(k_i)/k_i) = Z$ , где  $Z$  – любое натуральное число, каждая  $\max(k_i)$ -я строка будет инвертироваться, что даст сокращение ключей:

$$NK_{1mns} = (N/\max(k_i)) - 1.$$

В данном случае можно констатировать очень незначительное уменьшение количества ключей.

Определяем число строк матриц, описывающих схемы включения, в которых инвертирование (относительно AN в группе матриц A, и относительно BN в группе матриц B) не происходило у всех рассматриваемых матриц.

В результате произведённого анализа выяснилось, что количество таких строк можно найти по формуле:

$$(N-1) - \left[ \sum_{i=1}^{rows(k')} \left( \frac{N}{k'_i} - 1 \right) - \sum_{i=1}^{rows(k')-1} \sum_{j=i+1}^{rows(k')} \left( \frac{N}{HOK(k'_i, k'_j)} - 1 \right) \right].$$

Сокращение ключей в этом случае определится выражением:

$$NK_{2mns} = 3 \left[ (N-1) - \left[ \sum_{i=1}^{rows(k')} \left( \frac{N}{k'_i} - 1 \right) - \sum_{i=1}^{rows(k')-1} \sum_{j=i+1}^{rows(k')} \left( \frac{N}{HOK(k'_i, k'_j)} - 1 \right) \right] \right],$$

где  $N$  – число конденсаторов в блоке;  $k'$  – вектор, полученный путём исключения больших из кратных друг другу элементов вектора  $k$ ;  $\sum_{i=1}^{rows(k')} \left( \frac{N}{k'_i} - 1 \right)$  – сумма количества строк матриц с номерами, кратными  $k'_i$ ;  $\sum_{i=1}^{rows(k')-1} \sum_{j=i+1}^{rows(k')} \left( \frac{N}{HOK(k'_i, k'_j)} - 1 \right)$  – вычитаемое, необходимое для внесения поправки в результат суммирования  $\sum_{i=1}^{rows(k')} \left( \frac{N}{k'_i} - 1 \right)$  на величину числа строк матриц с номерами кратными всем возможным наименьшим общим кратным любых двух элементов вектора  $k'$ ;  $rows(k')$  – количество элементов вектора  $k'$ ;  $HOK(k'_i, k'_j)$  – наименьшее общее кратное любых двух элементов вектора  $k'$ ;  $i, j$  – текущие значения элементов вектора  $k'$ .

Следует отметить: при расчёте по данной формуле в случае, если после преобразования  $k$  в  $k'$  у последнего останется только один элемент,  $k'$  следует умножить на вектор  $[1, 1]$  или исключить из расчёта поправочное вычитаемое.

В данном случае может быть достигнуто значительное уменьшение количества ключей. Причём это уменьшение тем больше, чем меньше схем соединений будет задействовано в регулировании.

#### Выводы

Один из способов регулирования напряжения на накопительном блоке конденсаторов – переключение схем их соединения. Однако способ имеет ряд существенных недостатков: большое число ключей для реализации всех схем соединения; уменьшение емкости блока с каждым переключением, что приводит к резкому сокращению времени разряда блока между переключениями, начиная уже со второй схемы. Эти недостатки до определенной степени можно минимизировать путём уменьшения числа используемых схем переключений, однако эффективность такого способа остается достаточно низкой.

#### Перечень ссылок

1. Астахов Ю.Н. Накопители энергии в электрических системах: Учеб. пособие для электроэнергет. спец. Вузов / Ю.Н. Астахов, В.А. Веников, А.Г. Тер-Газарян. – М.: Высш. шк., 1989. – 159 с.
2. Накопители энергии: Учеб. пособие для вузов / Бут Д.А., Алиевский Б.Л., Мизюрин С.Р., Васюкевич П.В. и др. // Под ред. Бута Д.А. – М.: Энергоатомиздат, 1991. – 400 с.
3. Основы теории зарядных цепей емкостных накопителей энергии / Пентегов И.В. – Киев : Наук. думка, 1982. – 424 с.
4. Демидович Б.П. Основы вычислительной математики / Б.П. Демидович, И.А. Марон. – М.: Наука, 1966. – 664 с.

Рецензент: С.И. Выпанасенко,  
д-р техн. наук, проф., НГУ

Статья поступила 15.03.2008