при различных $K_{пл}$ и U^*. Видно, что с увеличением δ количество циклов возрастает практически по линейному закону. Это объясняется тем, что с ростом δ обратно пропорционально уменьшается τ^*, а, следовательно, и сама постоянная времени токоформирующей цепи. Это приводит к сокращению продолжительности переходных процессов, а, следовательно, и к уменьшению длительности цикла работы ключа. Наименьшая скорость изменения N с ростом δ наблюдается при максимальных $K_{пл}$ (величина U^* фиксирована) и максимальных значениях U^* ($K_{пл}$ фиксирован). С уменьшением как $K_{пл}$, так и U^* скорость изменения N возрастает. Это связано с тем, что с уменьшением $K_{пл}$ уменьшается размах пульсаций тока дросселя, а, следовательно, снижаются длительности этапов нарастания и спада тока i_L, и, соответственно, $T_к^*$. С уменьшением U^* увеличивается величина рабочего напряжения на обмотке дросселя, следовательно, возрастает скорость изменения тока i_L, что приводит к уменьшению $t_н^*$, а, соответственно, и $T_к^*$.

Выводы

1. Проведен анализ индуктивно-ключевого формирователя однополярного квазисинусоидального тока. Предложен интегральный параметр – количество циклов работы ключа, что позволяет оценить параметры формируемого тока и предъявить требования к частотным свойствам элементов схемы формирователя.
2. Получены соотношения, позволяющие проследить тенденции и характер изменения временных параметров переходных процессов, происходящих в токоформирующей цепи и произвести их расчет для заданных параметров нагрузки и тока.
3. Установлено, что тенденции изменения временных параметров обусловлены величиной напряжения, прикладываемого к дросселю формирователя в каждом цикле работы ключа, а также соотношением периода формируемого тока и постоянной времени токоформирующей цепи.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Багинский Б.А., Гребенников В.В., Нигоф Б.М. Огородников Д.Н., Ярославцев Е.В. Модуляционный формирователь квазисинусоидального асимметричного тока // Приборы и техника эксперимента. – 2001. – № 2. – С. 121–123.
2. Зиновьев Г.С. Основы силовой электроники. Изд. 2-е, испр. и доп. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2003. – 664 с.
3. Попов В.П. Основы теории цепей. Изд. 3-е, испр. – М.: Высшая школа, 2000. – 575 с.

Поступила 14.10.2011 г.

УДК 621.314

ИНВЕРТОРНЫЙ ИСТОЧНИК ПИТАНИЯ ДЛЯ ЗАРЯДА ЕМКОСТНОГО НАКОПИТЕЛЯ

Е.Ю. Буркин, В.В. Свиридов, Е.Ю. Степанов

Томский политехнический университет
E-mail: burkin@gmail.com

Дан краткий обзор теории заряда емкостного накопителя. Описано и исследовано схемное решение для увеличения мощности, передаваемой в нагрузку в течение рабочего цикла заряда емкостного накопителя на основе формирования ступенчатого зарядного тока.

Ключевые слова:
Источник для заряда емкостного накопителя, инверторный источник питания, оптимизация зарядного процесса.

Key words:
Capacitor charging circuit, inverter power supply, charging efficiency optimization.

В настоящее время широко распространен способ аккумулирования больших энергий, основанный на применении в качестве накопителей батарей конденсаторов. Батареи конденсаторов используются для получения импульсов тока самой различной длительности и энергии – от десятков Дж до десятков МДж. К достоинствам емкостных накопителей энергии, обусловившим их широкое распространение, следует отнести простоту осуществления коммутаций при заряде и разряде батареи конденсаторов и возможность строгого дозирования накопленной энергии посредством стабилизации уровня зарядного напряжения.

В работах [1–4] описаны наиболее известные схемы источников для заряда емкостных накопителей энергии (ЕНЭ). Однако предложенные пути повышения коэффициента полезного действия ведут к увеличению количества элементов схемы и, как следствие, изменению массогабаритных параметров.

Целью данной работы является анализ и оптимизация процесса заряда емкостного накопителя с учетом потерь на элементах схемы.

Спецификой преобразователей для заряда ЕНЭ является построение их в виде стабилизаторов выходного тока, обеспечивающих ограничение и формирование кривой зарядного тока по заданному закону при изменении выходного напряжения в процессе заряда ЕНЭ в широком диапазоне. Большое число устройств в настоящее время реализуют режим практически неизменного зарядного тока, поскольку работа элементов преобразователя в этом режиме в наибольшей степени приближается к оптимальной с точки зрения потерь и характеризуется высокими значениями коэффициентов расчетной мощности. Однако, постоянное, практически линейное по форме, изменение выходного напряжения в этом режиме приводит к тому, что мощность, передаваемая от источника питания в ЕНЭ, также изменяется по линейному закону, достигая в конце зарядного цикла амплитудного значения в два раза превышающего среднее. Для реализации режима неизменной передаваемой мощности необходимо сформировать зарядный ток, изменяющийся по достаточно сложному закону, рис. 1.

$$i_з(t) = \frac{P_m}{\sqrt{2P_m t/C + U_{C0}^2}},$$

где P_m – заданная мощность; C – емкость накопителя; U_{C0} – начальное значение напряжения на накопителе.

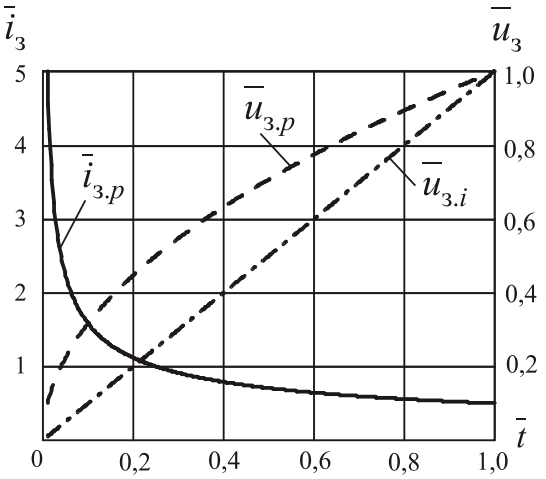

Рис. 1. *Ток и напряжение заряда в режимах неизменной передаваемой мощности – $\bar{i}_{з.р}$, $\bar{u}_{з.р}$, и постоянного зарядного тока – $\bar{i}_{з.i}$, $\bar{u}_{з.i}$. Здесь U_{Cmax} – максимальное напряжение накопителя, $\bar{t}=t/t_{з.i}$ – относительный интервал зарядного цикла, где $t_{з.i}$ – время заряда ЕНЭ постоянным током*

Видно, что ток заряда изменяется в широком диапазоне и, в случае прямого синтеза, приводит к существенному увеличению расчетных мощностей компонентов преобразователя и, в целом, неэффективному их использованию. Мало того, в случае относительно малых значений начального напряжения на накопителе (вполне реалистичным является и нулевое значение) расчетное значение зарядного тока стремится к бесконечности. В этом случае начальный этап заряда ЕНЭ происходит в режиме ограничения выходного тока источника питания, и, как следствие, уменьшения выходной мощности. В качестве параметра, характеризующего степень отклонения практически осуществимого режима заряда ЕНЭ от идеального режима передачи неизменной мощности, обычно используют коэффициент амплитуды мощности

$$K_{ap} = \frac{P_{\max}}{P_{ср}},$$

где $P_{\max}$, $P_{ср}$ – соответственно максимальная и средняя мощности, передаваемые преобразователем в процессе заряда ЕНЭ.

Эффективным способом формирования зарядного тока является построение системы заряда в виде структуры, реализующей ступенчато-падающий ток. В этом случае амплитуда и длительность ступеней зарядного тока выбираются из условия обеспечения минимума K_{ap}. Такой подход позволяет получить минимальный интервал зарядного цикла, однако практическая реализация такой системы приводит либо к увеличению расчетной мощности выходного трансформаторно-выпрямительного блока, либо к увеличенным потерям по сравнению с режимом неизменного зарядного тока.

Предлагаемый способ формирования ступенчато-падающего зарядного тока заключается в переключении, по мере заряда ЕНЭ, выходных выпрямителей инвертора тока с параллельного соединения в последовательное, причем параметры напряжения и тока выпрямителей задаются одинаковыми. Таким образом, в течение всего времени заряда, обеспечивается непрерывная работа всех компонентов силовой части источника питания в режиме постоянного тока, что обеспечивает при прочих равных условиях уменьшение потерь по сравнению с режимом формирования ступеней зарядного тока, обеспечивающего минимум коэффициента амплитуды мощности.

Если при произвольных параметрах ступенчатого зарядного тока в конденсатор передается фиксированная энергия, то при равенстве амплитуд мощности справедливо следующее выражение:

$$K_{ap}^{(N)} = \frac{P_{\max}}{P_{срN}} = 2\frac{t_з}{t_{s1}}, \qquad (1)$$

где t_{S1} –длительность зарядного цикла при одноступенчатом зарядном токе; $P_{срN}$ – средняя передаваемая мощность для N-ступенчатого зарядного тока.

Полагая, что в конце каждой ступени тока передаваемая в накопитель мощность максимальна и равна определенному постоянному значению $P_{\max}$=const, можно записать:

$$I_1U_1 = I_2U_2 = ... = I_nU_n = ... = I_NU_{C\max}, \qquad (2)$$

где I_n – амплитуда соответствующей ступени тока, U_n – величина напряжения в конце текущей ступени тока, U_{Cmax} – максимальное напряжение на накопителе в конце зарядного цикла. При выполнении равенства (2) очевидно, что амплитуда одно-

ступенчатого зарядного тока I_{S1} равна амплитуде последней ступени I_N при многоступенчатом зарядном токе. Учитывая это, выражение (2) в относительных единицах запишется следующим образом

$$\bar{I}_n \bar{U}_n = 1,$$

где $$\bar{I}_n = I_n / I_{s1}, \ \bar{U}_n = U_n / U_{C\max}, \qquad (3)$$

С другой стороны, приращение заряда емкостного накопителя на каждой ступени зарядного тока определяется простым соотношением

$$\begin{cases} \bar{U}_1 = \bar{I}_1 \Delta\bar{t}_1; \\ \bar{U}_n - \bar{U}_{n-1} = \bar{I}_n \Delta\bar{t}_n, \ n = 2,3,...N, \end{cases} \qquad (4)$$

где $\Delta\bar{t}_n = \dfrac{\Delta t_n}{t_{s1}}$ – относительная длительность n-й ступени зарядного тока.

Математические зависимости, описанные выражениями (1)–(4), следует дополнить графиками рис. 2, *а–в*. Данные графики показывают характер изменения электрических параметров при различных методах заряда накопителя.

Отсюда, с учетом выражения (3), для относительного интервала ступени зарядного тока (4) можно записать

$$\Delta\bar{t}_n = \begin{cases} \dfrac{1}{\bar{I}_1^2}; \\ \dfrac{1}{\bar{I}_n^2} - \dfrac{1}{\bar{I}_n \bar{I}_{n-1}}, \ n = 2,3,...N. \end{cases} \qquad (5)$$

Очевидно, что общее время заряда определяется суммой временных интервалов ступеней зарядного тока

$$\Delta\bar{t}_з = \sum_{n=1}^{N} \Delta\bar{t}_n = \frac{1}{\bar{I}_1^2} + \sum_{n=2}^{N} \frac{1}{\bar{I}_n^2} - \frac{1}{\bar{I}_n \bar{I}_{n-1}}. \qquad (6)$$

Выражение (6) является функцией n-1 переменных, и экстремум может быть определен путем решения системы уравнений в частных производных по каждой из переменных:

$$\frac{\partial \bar{t}_з}{\partial \bar{I}_n} = 0. \qquad (7)$$

С учетом (6) уравнение (7) можно представить следующим образом:

$$\frac{\partial \bar{t}_з}{\partial \bar{I}_n} = \frac{\partial \left(\dfrac{1}{\bar{I}_n^2} - k \dfrac{1}{\bar{I}_n} \right)}{\partial \bar{I}_n} = 0,$$

где

$$k = \begin{cases} \dfrac{1}{\bar{I}_2}, \ n = 1; \\ \dfrac{1}{\bar{I}_{n-1}} + \dfrac{1}{\bar{I}_{n+1}}, \ n = 2,3,..., N-1; \\ \dfrac{1}{\bar{I}_{N-1}}, \ n = N. \end{cases} \qquad (8)$$

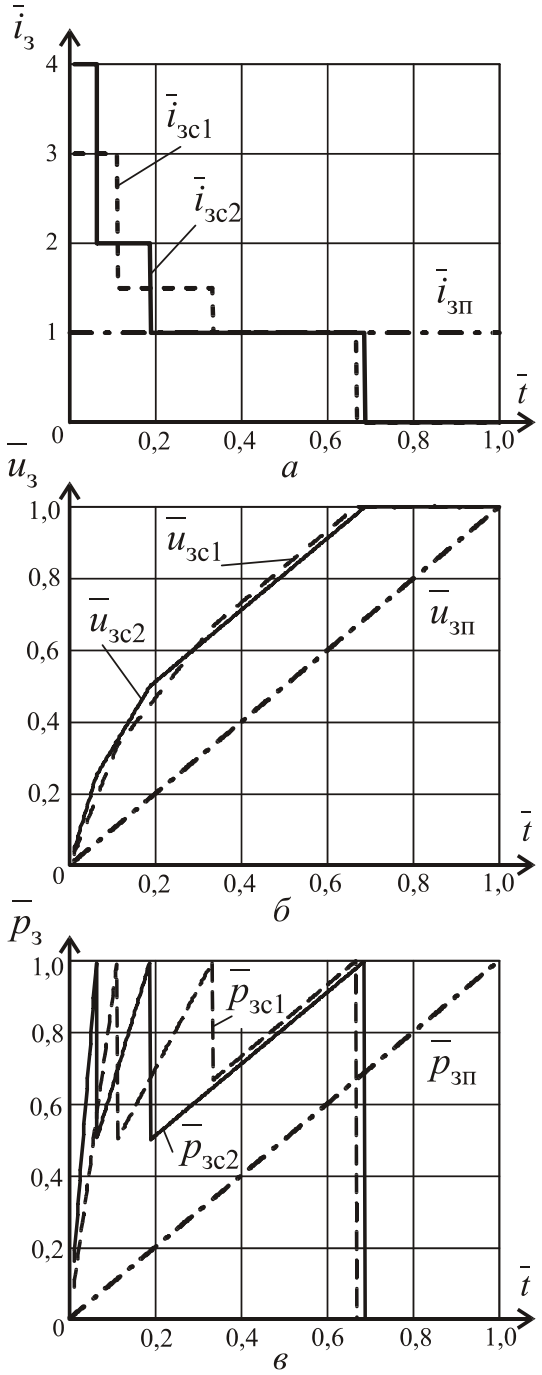

Рис. 2. *Сравнительные зависимости для различных режимов формирования зарядного тока: а) относительный ступенчатый зарядный ток $\bar{I}_з$; б) напряжение $\bar{U}_з$; в) мгновенная мощность $\bar{P}_з$. Здесь $\bar{I}_{зс1}$, $\bar{U}_{зс1}$, $\bar{P}_{зс1}$ – ток, напряжение и мощность для обеспечения минимума $K_{ар}$; $\bar{I}_{зс2}$, $\bar{U}_{зс2}$, $\bar{P}_{зс2}$ – равномерные ступени зарядного тока при переключении с параллельного соединения в последовательное*

После дифференцирования (8), окончательно, получим

$$\frac{\partial \bar{t}_з}{\partial \bar{I}_n} = \frac{1}{\bar{I}_n^2} \left(k - 2 \frac{1}{\bar{I}_n} \right) = 0. \qquad (9)$$

Решение системы (9) методом Гаусса ведет к следующему результату

$$\overline{I}_n = \frac{N}{n}. \qquad (10)$$

Подставив полученное соотношение в (6) и учитывая (1), получим зависимости относительного времени заряда и коэффициента амплитуды мощности от числа ступеней зарядного тока:

$$\Delta\overline{t}_з = \frac{N+1}{2N},\ K_{ар}^{(N)} = 2\overline{t}_з = \frac{N+1}{N}. \qquad (11)$$

Выражения (10) и (11) определяют параметры ступеней зарядного тока, обеспечивающие минимальное значение коэффициента амплитуды мощности. В свою очередь, при формировании зарядного тока путем переключения эквивалентных выпрямительных ячеек с параллельного соединения в последовательное относительная величина ступеней зарядного тока определяется следующим соотношением:

$$\overline{I}_n = \frac{2^{N-1}}{2^{n-1}}.$$

Используя выражения (1), (5) и (6), получаем зависимости для коэффициента амплитуды мощности и относительных временных интервалов зарядного цикла. Сравнительные характеристики двух способов формирования ступенчатого зарядного тока сведены в таблице. Анализ показывает, что увеличение зарядного цикла при формировании ступенчатого зарядного тока путем переключения одинаковых ячеек с параллельного соединения в последовательное по сравнению с режимом оптимального формирования ступеней не превышает 15 % при количестве ступеней $N \leq 6$.

Для проведения исследований был смонтирован макет инверторного источника питания. Принципиальная схема источника приведена на рис. 3, а внешний вид на рис. 4.

Устройство представляет собой стабилизатор постоянного тока. Принцип действия основан на модуляционном формировании постоянного тока дросселя с последующим его инвертированием, согласованием с нагрузкой и выпрямлением. Напряжение входной трехфазной питающей сети выпрямляется мостовым выпрямителем и фильтруется Г-образным *LC*-фильтром. Входной выпрямитель и фильтр на схеме не показаны, т. к. выполняют очевидные функции. Постоянное напряжение с выхода сглаживающего фильтра поступает на импульсный стабилизатор тока. Основой стабилизатора является блок силовых транзисторов и дроссель. За счет периодической коммутации силовых транзисторов на фиксированной частоте происходит модуляция тока дросселя. Стабилизация и регулирование среднего значения тока дросселя и, как следствие, зарядного тока осуществляется путем широтно-импульсной модуляции. Схемное решение стабилизатора тока представляет собой двухканальный преобразователь постоянного тока понижающего типа. Управление силовыми транзисторами осуществляется через специализированные схемы – драйверы управления, которые обеспечивают энергетическое согласование логического сигнала управления и управляющего сигнала необходимого для работы силового транзистора. Сигнал обратной связи для обеспечения режима стабилизации зарядного тока берется с измерительных датчиков тока и поступает на систему управления.

Таблица. *Сравнительные характеристики способов формирования ступенчатого зарядного тока*

Режим формирования тока	Относительная величина тока ступени $\overline{I}_n = I_n / I_{s1}$	Относительная величина напряжения накопителя в конце *n*-й ступени тока $\overline{U}_n = U_n / U_{Cmax}$	Относительная длительность интервала ступени тока $\Delta\overline{t}_n = \Delta t_n / t_з$	Коэффициент амплитуды мощности $K_{ар}$
1 (мин. t_s)	N/n	n/N	$\frac{2n}{(1+N)N}$	$(N+1)/N$
2 (равн.ст)	$2^{N-1}/2^{(n-1)}$	$1/2^{(N-n)}$	$6/(4^N+2),\ n=1$ $\frac{3\cdot 4^{(n-1)}}{(4^N+2)},\ n>1$	$\frac{4}{3}\left(1+\frac{2}{4^N}\right)$

Примечание: N – количество ступеней тока; $t_з$ – время зарядного цикла.

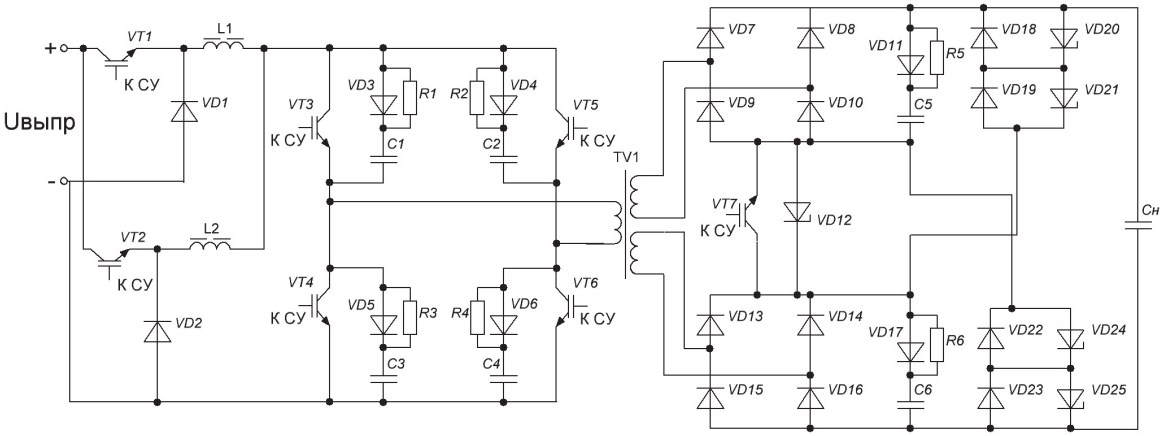

Рис. 3. *Принципиальная схема источника для заряда емкостного накопителя. СУ – система управления*

После стабилизатора постоянный ток поступает на высокочастотный инвертор тока, работающий на фиксированной частоте с максимальным коэффициентом заполнения. Основу блока составляют силовые транзисторные модули, которые управляются с помощью драйверов. Переменный ток поступает на повышающий трансформатор, обеспечивающий помимо гальванической развязки выходных цепей согласование выходного и входного напряжений. Для формирования постоянного зарядного тока используется выходной выпрямитель.

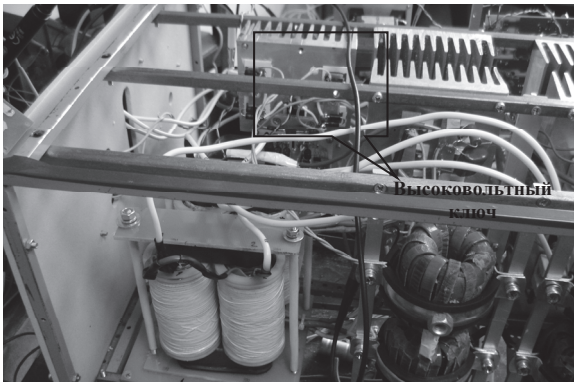

Рис. 4. *Внешний вид макета источника питания*

Для создания ступенчатого снижения зарядного тока в схему макета включается высоковольтный ключ VT7, рис. 3. Поясним принцип работы прибора с использованием ключа. В процессе заряда емкостного накопителя от 0 до 500 В ключ VT7 открыт. Соответственно две половины выходного выпрямительного моста (VD7–VD10 и VD13–VD16 на рис. 3) работают параллельно. Таким образом, максимальная амплитуда напряжения на выпрямителе на первом этапе заряда равна 500 В. Ток в зарядной цепи на данном этапе будет в два раза выше, чем при номинальной амплитуде $U_{ном}$=1000 В. При достижении разности потенциалов на емкостном накопителе значения U=500 В ключ замыкается, и весь мост включается последовательно. В этот момент амплитуда зарядного напряжения увеличивается до 1000 В, а зарядный ток снижается в два раза.

На рис. 5, *а*, приведена осциллограмма процесса заряда емкостного накопителя без использования высоковольтного ключа. Процесс протекает при неизменном токе. Здесь канал 1 – разность потенциалов на емкостном накопителе энергии, канал 2 – зарядный ток. Масштаб напряжения по оси OY 200 В на деление. Масштаб тока, пересчитанный исходя из параметров датчика CSNF-161, составляет 6,7 А на деление. Из рис. 5 видно, что среднее значение тока является практически постоянным в течение всего времени заряда и составляет ~6 А, напряжение на нагрузке возрастает линейно. Время заряда составляет ~65 мс.

Анализируя осциллограмму рис. 5, *б*, заряда при ступенчатом снижении зарядного тока, получаем время зарядного цикла t=50 мс. Это на 15 мс меньше, чем при работе источника питания в режиме заряда постоянным током.

Используя данные обоих экспериментов, рассчитаем мощность, выделенную в нагрузке при различных способах заряда. Для этого воспользуемся формулой мощности при заряде емкостного накопителя постоянным током [1]:

$$P = P_{cp}\gamma = \frac{I^2}{2C}t,\ P_{cp} = \frac{Pm}{2}.$$

Значение средней мощности, выделенной в нагрузке, можно определить исходя из линейности ее нарастания при заряде постоянным током. Для режима постоянного тока примем γ=1. Тогда имеем:

$$P = \frac{6^2}{2\cdot 360\cdot 10^{-6}}\cdot 0,065 = 3250\ \text{Вт}.$$

Для режима ступенчатого снижения зарядного тока расчет суммарной выделенной мощности нужно разделить на два этапа. Для каждой части

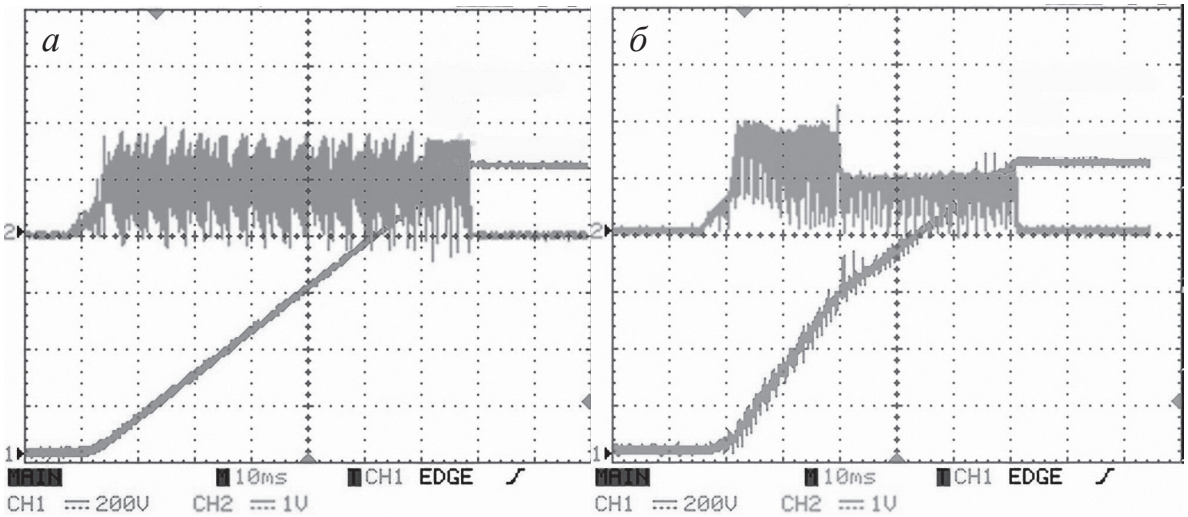

Рис. 5. *Напряжение на выходе (канал 1) и зарядный ток (канал 2): а) заряд постоянным током; б) ступенчатое снижение зарядного тока*

расчета используем формулу нахождения мощности при заряде постоянным током. Подставив значения с осциллограмм, получим:

$$P = \frac{I^2}{C}\left(2t_1 + \frac{t_2}{2}\right) =$$

$$= \frac{6^2}{360 \cdot 10^{-6}}\left(2 \cdot 0,02 + \frac{0,03}{2}\right) = 5500 \text{ Вт.}$$

Полученные цифры показывают мощность, потраченную на заряд емкостного накопителя в единицу времени. По результатам расчета можно сделать вывод, что значение переданной в нагрузку энергии при ступенчатом снижении зарядного тока на ~70 % превышает аналогичную величину при заряде постоянным током. При этом напряжение и ток первичной цепи остаются неизменными.

Примененное в работе схемное решение является простым и не представляет сложности в управлении. Заметим, что в схеме источника работают параллельно два преобразователя постоянного напряжения с одинаковыми параметрами, работающими в режиме стабилизации зарядного тока. Такое решение позволяет уменьшить пульсацию зарядного тока и распределить по каналам передаваемую мощность.

Выводы

Описан и исследован стабилизатор зарядного тока емкостного накопителя с повышенной мощностью, передаваемой в нагрузку в течение рабочего цикла. Результаты расчетов мощности, выделяемой в нагрузке, показали возможность ее увеличения при формировании ступенчатого зарядного тока. Поскольку процесс заряда сократился во времени с 65 до 50 мс, КПД устройства по сравнению с прототипом на основе заряда постоянным током вырос на 20 %. Одновременно достигнуто повышение частоты зарядно-разрядных циклов емкостного накопителя.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Пентегов Е.В. Основы теории зарядных цепей емкостных накопителей энергии. – Киев: Наукова думка, 1982. – 406 с.
2. Багинский Б.А. Бестрансформаторные преобразователи переменного напряжения в постоянное. – Томск: Изд-во ТПУ, 1990. – 220 с.
3. Булатов О.Г. Полупроводниковые зарядные устройства емкостных накопителей энергии. – М.: Радио и связь, 1986. – 160 с.
4. Кныш В. А. Полупроводниковые преобразователи в системах заряда накопительных конденсаторов. Л.: Энергоатомиздат, 1981. 160 с.

Поступила 17.05.2011 г.

УДК 621.3.082

ИССЛЕДОВАНИЕ ШИРОКОДИАПАЗОННЫХ ПЬЕЗОКВАРЦЕВЫХ ВЛАГОЧУВСТВИТЕЛЬНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

В.Е. Иващенко, В.Г. Мазур, А.Д. Пудалов

Ангарская государственная техническая академия, г. Ангарск
E-mail: systems-ntfs@mail.ru

Предложен пьезосорбционный метод измерения влажности газов и жидких органических соединений в диапазоне от 0 до 100 %. В основе метода измерений лежит одновременное использование двух типов сорбентов. Результатом исследования является расчет их оптимальных соотношений.

Ключевые слова:
Влажность, измерение, сорбент, пьезосорбционный чувствительный элемент, частота, газ, органическая жидкость, диапазон концентраций.

Key words:
Humidity, measurement, sorbent, piezosorption sensitive element, frequency, gas, organic liquid, range of concentrations.

Во многих отраслях промышленности и в целом ряде областей научных исследований приходится сталкиваться с решением задач, связанных с измерением влажности газов и жидких органических соединений.

Современные приборы, предназначенные для измерения влажности газов и жидкостей, позволяют осуществлять измерения либо в диапазоне микро-, либо макроконцентраций [1–4]. Приборы, которые бы охватывали весь диапазон измерений, включая низкие, средние и макроконцентрации, отсутствуют, что может приводить к снижению эффективности управления технологическими процессами. С появлением такого прибора многие за-