

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ЗАРЯДНЫХ ЦЕПЕЙ ЕМКОСТНЫХ НАКОПИТЕЛЕЙ ЭНЕРГИИ СО ЗВЕНОМ ПОВЫШЕННОЙ ЧАСТОТЫ

Дубовенко К.В., к.т.н. зав.каф.

Николаевский учебно-научный институт Одесского национального университета  
Украина, 54010, Николаев, ул. Мореходная, 2а, НУНИ ОНУ им. И.И. Мечникова,  
кафедра "Вычислительная техника и информационные технологии"  
тел. (0512) 34-60-15, факс: (0512) 34-60-15, e-mail: ppps@mksat.net

*Запропоновано спеціалізований економічний алгоритм чисельного аналізу процесів заряджання ємнісних накопичувачів енергії у зарядних колах, що вміщують напівпровідникові перетворювачі частоти. Метод має достатню для практики точність, дозволяє уникнути застосування громіздких різницьових схем, що використовуються для вирішення жорстких систем диференціальних рівнянь, і дозволяє у 100-1000 разів скоротити час розрахунків характеристик заряджання ємнісних накопичувачів енергії великої енергоємності.*

*Предложен специализированный экономичный алгоритм численного анализа процессов зарядки емкостных накопителей энергии в зарядных цепях, содержащих полупроводниковые преобразователи частоты. Метод обладает достаточной для практики точностью, позволяет избежать применения громоздких разностных схем, используемых при решении жестких систем дифференциальных уравнений, и позволяет в 100-1000 раз сократить время расчета характеристик зарядки емкостных накопителей энергии большой энергоемности.*

### ВВЕДЕНИЕ

К настоящему времени в связи с расширением областей, осваиваемых силовой электроникой и высоковольтной техникой, предложен целый ряд эффективных схемных решений полупроводниковых преобразователей напряжения со звеном промежуточной частоты для зарядных устройств емкостных накопителей энергии (ЕНЭ) электрофизических и технологических разрядно-импульсных установок [1 – 6]. Применение высокочастотных полупроводниковых преобразователей позволяет существенно повысить удельную мощность и КПД систем мощной импульсной техники. Энергия, накапливаемая в модулях емкостных накопителей энергии современных разрядно-импульсных установок, в большинстве случаев находится в диапазоне от  $10^2$  Дж до  $10^6$  Дж при напряжениях, изменяющихся от  $5 \cdot 10^3$  В до  $5 \cdot 10^4$  В. При этом емкость накопителей находится в диапазоне от  $10^{-7}$  Ф до  $10^{-3}$  Ф, а длительность процесса зарядки варьируется в пределах от  $10^{-3}$  с до  $10^2$  с. Это означает, что на осваиваемых в настоящее время промышленностью частотах преобразования до  $10^5$  Гц в большинстве случаев необходимо от  $10^3$  до  $10^7$  периодов переходного процесса до завершения зарядки емкостного накопителя. При этом зарядные процессы происходят в электрической цепи с постоянно меняющейся топологией вследствие работы полупроводниковых элементов (транзисторов, диодов) в ключевом режиме. Поэтому разработка эффективных методик расчета зарядных процессов в контурах с изменяющейся топологией при большом количестве циклов зарядки является актуальной задачей.

### ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ

Как показано в [1], к особенностям зарядных схем относится то, что весь процесс зарядки накопителя в них является переходным. В этом случае для ряда схем с относительно простой схмотехникой применяются приближенные аналитические методы,

основанные на вычислении осредненных кривых зарядки при работе цепи на противо-ЭДС [1].

В последние годы в связи с необходимостью анализа переходных процессов в течение большого количества циклов зарядки ЕНЭ существенно расширилось применение численных методов моделирования для более сложных устройств преобразовательной техники с использованием формализованных методов и универсальных пакетов программ PSpice, MicroCap, DesignLab, Electronic Workbench и др. [7, 8]. В основу работы этих программных продуктов положены различные методы численного решения систем дифференциальных уравнений. В таком программном обеспечении должен одновременно учитываться целый ряд факторов, влияющих на точность решения. К таким факторам следует отнести необходимость автоматического выбора величины шага разностной сетки по времени, контроля ошибки интегрирования, выявления возможных разрывов и особенностей решения. Удовлетворение этих требований даже в случае решения нежестких задач приводит к существенному увеличению количества арифметических операций, выполняемых программой на каждом временном интервале. Вместе с тем, зарядные схемы на основе полупроводниковых преобразователей относятся к жестким системам, которые описываются жесткой моделью. Сущность жестких моделей, как известно [9], определяется необходимостью одновременного привлечения для адекватного описания процессов в точках временного интервала как быстроизменяющихся функций с большими значениями производных (что вызвано коммутациями полупроводниковых приборов), так и малых производных, соответствующих относительно медленным переходным процессам в RLC-цепях схем силовой электроники. При этом к решению систем жестких дифференциальных уравнений предъявляются высокие требования по точности на каждом шаге интегрирования. Опыт моделирования свидетельствует о том, что применение даже спе-

циальных методов их численного интегрирования, включая методы аппроксимации дифференциальных уравнений разностными схемами высоких порядков точности и многошаговые методы типа предиктор-корректор [9 – 11], оказываясь неэффективным при анализе характеристик процессов зарядки мощных накопителей энергии (даже с применением современных ЭВМ) из-за недопустимо больших затрат машинного времени и накапливаемых в процессе счета ошибок. Такое накопление ошибок обусловлено как погрешностью разностной аппроксимации численными методами исходной дифференциальной задачи, так и приближенным представлением чисел в памяти ЭВМ. В результате, даже при современном быстродействии ЭВМ сквозной расчет зарядки накопителей энергии большой емкости оказывается затрудненным, а зачастую и невозможным. В этой связи особенно возрастает актуальность разработки специализированных методов численного анализа зарядных процессов, обеспечивающих достаточную точность расчета в течение всего времени зарядки и экономичность в смысле затрат машинного времени и других ресурсов.

#### ОПИСАНИЕ МЕТОДИКИ РАСЧЕТА

Предлагаемый в настоящей работе численный подход применим для класса зарядных устройств, в котором справедливо допущение о том, что в процессе моделирования зарядной цепи длительность сверхпереходных процессов, вызванных включением расчетной схемы на ненулевое начальное напряжение накопителя, по порядку величины сравнима с длительностью периода колебаний тока многоциклического зарядного процесса.

Предпосылки предлагаемого метода расчета заключаются в следующем. Пусть  $U_{cn}(t)$  – семейство  $n$  ( $n = 0, 1, 2, 3, \dots$ ) кривых зарядки ЕНЭ в одной и той же зарядной цепи, полученные при различных значениях начального напряжения накопителя  $U_{cn}(0)$ , причем  $0 \leq U_{cn}(0) \leq U_n$ . Здесь  $U_n$  – номинальное напряжение зарядки ЕНЭ. В этом семействе зависимость  $U_{c0}(t)$ , полученная при  $U_{c0}(0) = 0$ , является основной кривой зарядки накопителя.

С целью обеспечения общности анализа и распространения его результатов на широкий класс зарядных устройств целесообразно использовать один из формализованных методов расчета вентильных цепей, например, метод переключающих функций [7]. В соответствии с ним система уравнений, описывающая работу преобразователя, составляется на основании первого закона Кирхгофа для вентильных цепей и разрешается относительно узловых потенциалов. Для получения решения используется узловый метод переключающих функций, согласно которому каждая ветвь схемы в общем случае включает последовательно соединенные источник ЭДС  $E_j$ , индуктивность (установленную или паразитную)  $L_j$ , емкость  $C_j$  и полупроводниковые ключевые элементы (ветвь должна содержать хотя бы индуктивность). В расчетах полагается, что ток  $j$ -ой ветви совпадает по направлению с ЭДС  $E_j$  и направлен от положительной обкладки конденсатора к отрицательной, а узел, имеющий нулевой

потенциал, обозначается последним по счету.

$$\sum_{j=1}^m P_j \cdot \frac{dI_j}{dt} = 0, \quad (1)$$

$$P_j \cdot \frac{dI_j}{dt} = P_{dj} \cdot (\Delta\varphi_j + U_{cmm}), \quad (2)$$

$$P_{dj} = P_j / L_j, \quad U_{smj} = E_j - (R_j + R_{pj}) \cdot I_j - P_{cj} \cdot Q_{cj}, \quad (3)$$

$$\frac{dQ_j}{dt} = I_j, \quad (4)$$

где  $m$  – количество ветвей схемы замещения;  $P_j$  – переключающая функция, принимающая значение "1" при открытом ключевом полупроводниковом элементе в этой ветви и "0" – в противоположном случае (ветвь без ключевых элементов является постоянно замкнутой с  $P_j=1$ );  $P_{dj}$  – динамическая переключающая функция;  $P_{cj}$  – коэффициент, учитывающий наличие емкости в ветви. Причем,  $P_{cj} = 1/C_j$ , если емкость в ветви имеется. При отсутствии емкости  $P_{cj} = 0$ ;  $\Delta\varphi_j$  – разность потенциалов между узлами  $j$ -ой ветви схемы;  $Q_{cj}$  – электрический заряд емкости в ветви схемы;  $R_{pj}$  – сопротивление ключевого полупроводникового элемента.

В соответствии с методом переключающих функций основные уравнения (1) – (4) дополняются логическими условиями, определяющими работу неуправляемых (диодов) и управляемых (транзисторы) полупроводниковых элементов, работающих в ключевом режиме.

#### ПРАКТИЧЕСКОЕ ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДИКИ РАСЧЕТА

В качестве примера на рис. 1 представлены расчетные схемы замещения полумостового и мостового преобразователей напряжения с последовательным резонансом. На рис. 1, а  $C_6, C_9, C_{12}$  – емкостный накопитель, емкость резонансного звена и емкость вторичной обмотки высоковольтного высокочастотного трансформатора соответственно;  $L_9, L_{11}, L_{10}$  – индуктивность резонансного звена, а также индуктивности рассеяния и намагничивания схемы замещения высокочастотного высоковольтного трансформатора.

На рис. 2 в качестве примера для полумостовой схемы представлены в относительных единицах характерные результаты расчета, соответствующие основной кривой зарядки (кривая 1), кривой зарядки при начальном напряжении ЕНЭ, равном  $U_{c1}(0) = 0,25U_n$ , незначительно отличающемся от нулевого значения (кривая 2), и кривой зарядки при начальном напряжении ЕНЭ, составляющем  $U_{c2}(0) = 0,8U_n$ , существенно отличающемся от нулевого значения (кривая 3). Для простоты и наглядности анализа параметры преобразователя здесь были выбраны таким образом, чтобы количество зарядных циклов было небольшим, что обычно характерно для малых значений емкости накопителя и коэффициента трансформации высокочастотного трансформатора.

В случае, когда сердечник высоковольтного трансформатора ненасыщен, а емкость его вторичной обмотки пренебрежимо мала, основная кривая зарядки накопителя имеет линейную зависимость от времени (рис. 2, кривая 1).

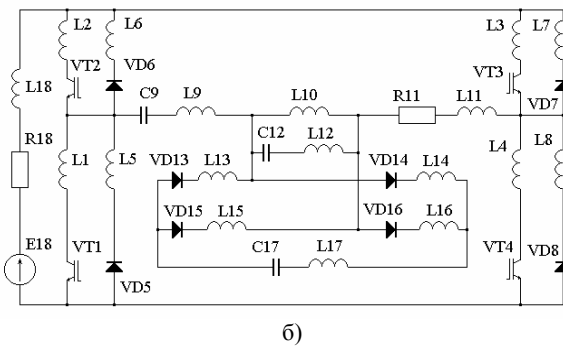
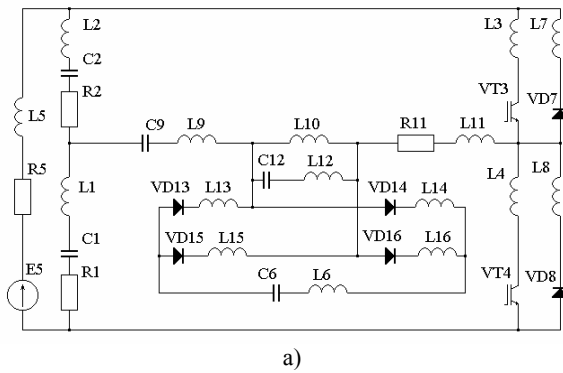


Рис. 1. Схемы замещения резонансных полумостового (а) и мостового (б) преобразователей.

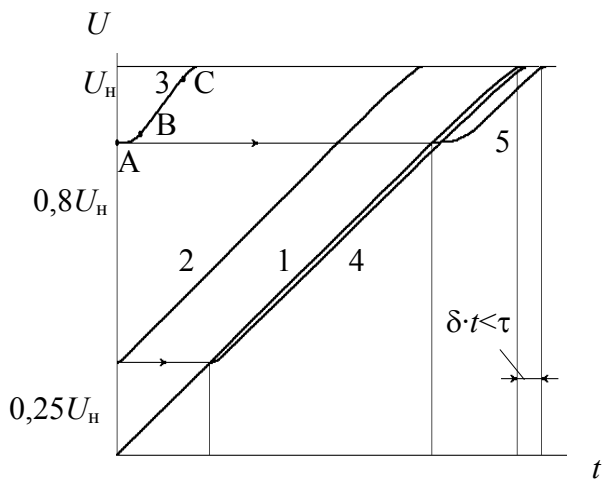


Рис. 2. Кривые зарядки ЕНЭ

Процессы зарядки при ненулевых начальных условиях (рис. 2, кривые 2, 3) происходят в две стадии. Первая стадия (участок АВ кривой 3) соответствует нелинейному режиму зарядки, который на второй стадии трансформируется в линейный режим (участок ВС кривой 3). Сравнение кривых 2 и 3 показывает, что чем выше значение начального напряжения ЕНЭ, тем продолжительнее нелинейный режим.

Временные зависимости тока, протекающего через резонансную емкость  $C_9$  полумостового преобразователя (рис. 1,а) представлены на рис. 3,а для режима с  $U_{c0}(0)=0$ , соответствующего основной кривой зарядки, на рис. 3,б – для режима с начальным напряжением  $U_{c1}(0)=0,25U_H$ , и на рис. 3,в – для режима с  $U_{c2}(0)=0,8U_H$ .

Начала координат графиков рис. 3,б и рис. 3,в совмещены с моментами  $t_1$  и  $t_2$  процесса зарядки (рис. 2), когда напряжение на основной кривой заряд-

ки достигает значений  $U_{c0}(t_1)=0,25U_H$  и  $U_{c0}(t_2)=0,8U_H$  соответственно.

Сопоставление зарядных кривых напряжения с соответствующими временными зависимостями тока (рис. 2 и рис. 3) свидетельствует о том, что нелинейным участкам зарядных кривых соответствуют пониженные значения тока в резонансной цепи, а значит, и выпрямленного тока зарядки накопителя энергии. Кроме того, даже при значении начального напряжения на накопителе близком к номинальному  $U_H$  длительность нелинейного режима  $\tau$  составляет не более двух периодов резонансного процесса  $T$  (рис. 3,б и рис. 3,в).

Характеристики процессов в мостовой схеме преобразователя аналогичны рассмотренным выше характеристикам для полумостовой схемы.

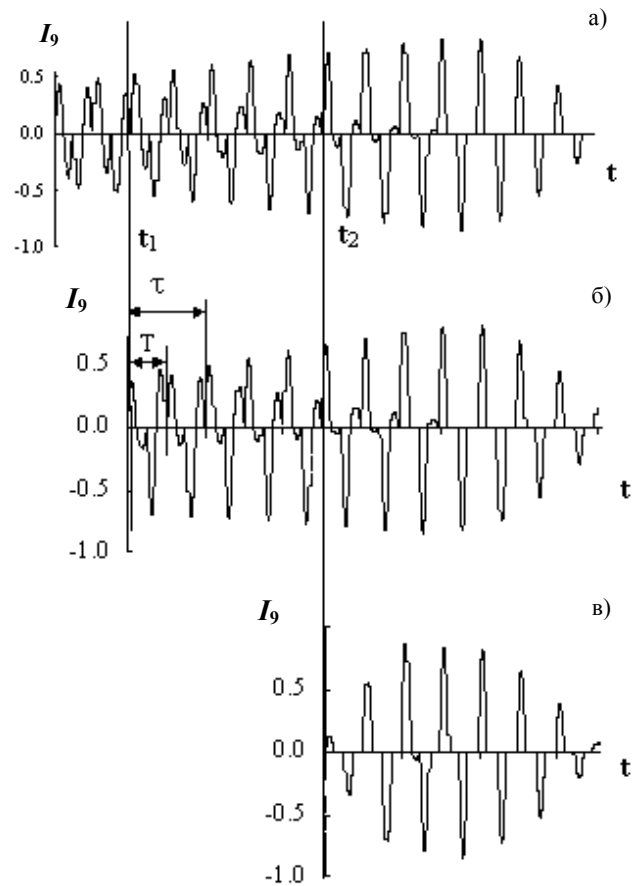


Рис. 3. Кривые тока  $I_9$  резонансной емкости при различных значениях начального напряжения на ЕНЭ

На основании изложенного можно обосновать и сформулировать несколько выводов, позволяющих реализовать предлагаемую методику расчета.

1. Поскольку на линейном участке зарядной кривой (участок ВС, кривая 3 на рис. 2) скорость изменения напряжения от времени постоянна ( $dU_c/dt=const$ ), то это соотношение может быть принято в качестве критериального для момента окончания нелинейной стадии процесса зарядки (выход в точку В кривой 3 на рис. 2) при включении зарядной цепи на емкость, имеющую ненулевое начальное напряжение.

2. Если совместить начальные точки кривых 2 и

3, имеющих ординаты  $0,25U_n$  и  $0,8U_n$  соответственно с точками, имеющими такие же ординаты на основной кривой зарядки, то можно получить систему кривых 1, 4, 5. Линейные участки кривых 4 и 5 параллельны кривой 1. То есть, переходной процесс зарядки ЕНЭ на этих участках происходит с одинаковой скоростью. Тогда нелинейные участки кривых 4 и 5 можно трактовать как участки кривых, соответствующие сверхпереходному режиму зарядки.

Сравнение различий в поведении кривых 1 и 5 при  $U \geq 0,8U_n$  показывает, что оба процесса происходят при одинаковых параметрах элементов линейной зарядной цепи. Однако в начальный момент развития процесса вдоль кривой 5 все потенциалы узлов схемы имеют нулевое значение, тогда как основной кривой зарядки соответствуют значения потенциалов узлов, определяемые предыдущим токораспределением в ходе зарядного процесса. Следовательно, сверхпереходный процесс, происходящий по нелинейному участку кривой 5, заключается в перераспределении потенциалов узлов и токов в ветвях схемы замещения до уровней, соответствующих основному режиму зарядки. Таким образом, сверхпереходный процесс имеет определенную длительность, не влияет на конечное значение зарядного напряжения и скорость зарядки в установившемся режиме. Но длительность зарядного процесса на рассматриваемом интервале изменения напряжений при включении преобразователя на начальное напряжение накопителя оказывается несколько увеличенной на промежуток времени  $\delta t$  из-за наличия сверхпереходного процесса. Можно показать, что значение этого приращения меньше длительности сверхпереходного процесса, то есть  $\delta t < \tau$ . Из ранее приведенных рассуждений следует, что в любом  $j$ -ом сверхпереходном режиме средний ток резонансной емкости  $i_{jcp}$  меньше среднего тока резонансной емкости  $i_{0cp}$  в соответствующие моменты зарядного процесса, происходящего вдоль основной кривой зарядки. То же самое можно сказать о выпрямленном токе накопителя. Далее, за одно и то же время равное длительности сверхпереходного процесса  $\tau$  приращение напряжения на накопителе пропорционально среднему значению выпрямленного тока  $i_n$ . Следовательно, приращение напряжения на накопителе  $\delta U_{ni}$  в режиме любого сверхпереходного процесса будет меньше приращения  $\delta U_{n0}$ , накапливаемого в соответствующие моменты времени процесса, происходящего вдоль основной кривой зарядки. Таким образом, величина недобора напряжения на накопителе  $\delta$  в течение сверхпереходного режима равна  $\delta = \delta U_{n0} - \delta U_n < \delta U_{n0}$ .

Тогда, если для увеличения напряжения на величину  $\delta U_{n0}$  необходимо время  $\tau$ , то для ликвидации недобора напряжения уровня  $\delta$  потребуется меньшее время. Что и требовалось показать.

Отсюда следует, что если длительность сверхпереходного процесса  $\tau$  пренебрежимо мала по сравнению с длительностью времени зарядки накопителя  $t_3$  ( $\tau \ll t_3$ ), то влиянием сверхпереходного режима на зарядный процесс можно пренебречь. Это неравенство

надежно выполняется при большом количестве резонансных циклов зарядки.

3. Для того, чтобы формализовать предлагаемую методику расчета следует рассмотреть более общий по сравнению с предыдущим пунктом случай, когда основная кривая переходного зарядного процесса нелинейна (рис. 4). Такой случай, например, имеет место, если нельзя пренебречь собственной емкостью многовитковой вторичной обмотки высоковольтного трансформатора на высоких частотах преобразования.

Обычно при анализе зарядных процессов известен уровень напряжения зарядки емкостного накопителя  $U_n$ , определяемый либо схемой и параметрами зарядного устройства, либо напряжением срабатывания коммутатора в разрядной цепи импульсного высоковольтного источника энергии. В том случае, когда к анализу переходного процесса применимо понятие усредненной кривой зарядки [1], производная напряжения на всем интервале зарядки имеет конечное значение  $dU/dt=U'$ . При этом, как показано на рис. 4, весь интервал зарядных напряжений целесообразно разбить на такое количество частей  $k$  шагом  $\Delta U_i$ ,

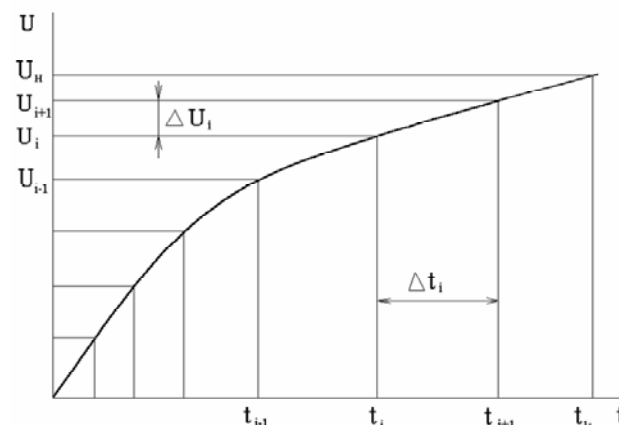


Рис. 4. Разбиение кривой зарядки на интервалы по напряжению и времени

на каждой из которых зависимость напряжения накопителя от времени можно считать линейной и изменением производной от времени напряжения заряда  $U'_i$  можно пренебречь, считая, что в пределах каждого интервала разбиения  $U'_i \approx \text{const}$ . Под усредненной кривой зарядки в соответствии с [1] здесь понимается гладкая, монотонная функция, пересекающаяся с истинной зависимостью  $U_c(t)$  изменения напряжения накопителя от времени (реальной кривой) в строго определенных равноотстоящие моменты, представляющие собой реперные точки, выбираемые в зависимости от типа зарядной цепи. С учетом этого, переходя от производных к приращениям, можно определить время повышения напряжения на величину  $\Delta U_i$  на  $i$ -ом участке разбиения кривой зарядки как

$$\Delta t_i = \Delta U_i / U'_i. \quad (5)$$

В таком случае напряжение на емкостном накопителе в начале каждого интервала зарядки определяется как

$$U_{i+1} = U_i + \Delta U_i. \quad (6)$$

Тогда время зарядки равно суммарной длительности всех  $k$  интервалов разбиения кривой зарядки

$$t_3 = \sum_{i=1}^k \Delta t_i. \quad (7)$$

4. Алгоритм расчета зарядных процессов в соответствии с предлагаемым подходом заключается в следующем.

4.1. Значение заданного напряжения зарядки ЕНЭ  $U_n$  разбивается на ряд интервалов  $\Delta U_i$ , каждому из которых соответствует подлежащий определению интервал времени зарядки  $\Delta t_i$  (рис. 4).

4.2. На текущем интервале по заданному значению начального напряжения на накопителе  $U_i$  и параметрам схемы замещения полупроводникового преобразователя выполняется расчет переходного процесса в цепи в соответствии с уравнениями (1) – (4). Длительность расчета для каждого интервала разбиения кривой зарядки в большинстве случаев ограничена всего четырьмя периодами резонансного процесса  $T$  (в течение первых двух периодов заканчивается сверхпереходной процесс, еще два цикла требуется для надежной проверки выполнения условия его завершенности). По полученным на каждом последнем (обычно четвертом) цикле данным определяется среднее значение производной напряжения зарядки за период резонансного процесса, как отношение приращения напряжения на накопителе за резонансный цикл к длительности резонансного цикла зарядки  $\tau_p$ . Эта величина присваивается среднему значению производной напряжения зарядки  $U'_i$  на данном интервале разбиения кривой зарядки.

4.3. По значению приращения напряжения зарядки  $\Delta U_i$  и вычисленному после окончания сверхпереходного процесса в соответствии с предыдущим пунктом среднему значению производной напряжения зарядки  $U'_i$ , определяется с использованием соотношения (5) длительность интервала зарядного процесса  $\Delta t_i$ .

4.4. Расчет повторяется на всех  $k$  интервалах разбиения кривой зарядки, а по соотношению (7) определяется полное время зарядного процесса накопителя.

Таким образом, для расчета зарядной цепи нет необходимости в проведении сквозного счета в течение всего переходного процесса зарядки, то есть на протяжении  $10^3 \dots 10^7$  периодов длительностью  $T$ . Объем вычислений сводится лишь к расчету четырех периодов  $T$  высокочастотного процесса резонансной зарядки на каждом  $k$ -ом интервале разбиения зарядного процесса по напряжению. В результате, количество циклов  $M$  резонансного процесса длительностью  $T$ , необходимое для полного расчета зарядного процесса в схеме определяется соотношением

$$M = N \cdot k \leq 400, \quad (8)$$

где  $N$  - количество циклов резонансной зарядки до завершения сверхпереходного процесса с выполнением контроля его завершенности (обычно  $N=4$ ). Количество интервалов  $k$  разбиения кривой зарядки по напряжению на участки  $\Delta U_i$  в большинстве случаев меньше 100.

Причем, на каждом таком интервале расчет выполняется с учетом задания начального напряжения на емкостном накопителе в соответствии с выражени-

ем (6). А производная напряжения  $U'_i$  на каждом интервале определяется как отношение приращения напряжения на емкостном накопителе за один период резонансного цикла к длительности периода после прекращения сверхпереходных процессов включения схемы на емкость с начальным напряжением.

Точность получаемых результатов контролируется с учетом влияния на расчет двух временных факторов. С одной стороны, малая погрешность расчетов определяется точностью аппроксимации исходных дифференциальных уравнений (1) – (4) выбранной разностной схемой. От этого выбора зависит величина временного шага расчета каждого резонансного цикла зарядки  $\tau_p$ . Длительность  $\tau_p$  на несколько порядков меньше длительности периода резонансного цикла зарядки  $T$ , а значит, длительности сверхпереходного процесса  $\tau$  и, тем более, длительности любого интервала разбиения кривой зарядки  $\Delta t_i$ . С другой стороны, на точность расчета влияет величина временного интервала зарядки  $\Delta t_i$ , прямо связанная с величиной выбираемого приращения интервала напряжения зарядки  $\Delta U_i$ . Практически сходимость результатов к точному решению достигается сгущением разностных сеток. Таким образом, заданная точность достигается уменьшением расчетных шагов  $\tau_p$  и  $\Delta U_i$  до значений, при которых их величина не влияет на получаемые результаты в пределах заданной погрешности. Программы с автоматическим выбором этих значений обеспечивают наибольшую гибкость и эффективность алгоритма расчета.

В качестве примера на рис. 5 представлено сравнение результатов численного моделирования, полученных в настоящей работе, с данными экспериментальных исследований [5] зарядного устройства с последовательным резонансным мостовым преобразователем частоты (рис. 1,б) мощностью  $15 \cdot 10^3$  Вт, частотой преобразования  $6,8 \cdot 10^4$  Гц и частотой коммутации транзисторов  $3,2 \cdot 10^4$  Гц. В схеме резонансная индуктивность вместе с индуктивностью первичной обмотки трансформатора составляла  $5,5 \cdot 10^{-6}$  Гн, резонансная емкость имела значение  $10^{-6}$  Ф. ЕНЭ емкостью  $4,4 \cdot 10^{-8}$  Ф заряжался до напряжения  $3 \cdot 10^4$  В через высоковольтный высокочастотный трансформатор с коэффициентом трансформации равным 65. Малая емкость накопителя обуславливает малые времена зарядного процесса ( $0,8 \cdot 10^{-3}$  с) и применение преобразователя в разрядно-импульсных технологиях с частотой следования импульсов в килогерцовом диапазоне. Благодаря секционированию вторичной обмотки трансформатор имеет малую паразитную емкость и процесс зарядки накопителя происходит по зависимости, близкой к линейной. На рис. 5 кривые 1, 2 – расчетная и экспериментально зарегистрированная кривые зарядки; кривые 3, 4 – аналогично полученные огибающие токов диодов (VD4, VD17 и VD6, VD16); кривые 5, 6 – огибающие токов транзисторов (VT1, VT3 и VT2, VT4). Результаты расчета свидетельствуют о том, что даже при количестве циклов резонансной зарядки равном 30 метод позволяет получить хорошее согласие с экспериментальными данными.

$U, \text{кВ}; I, 10\text{А}$

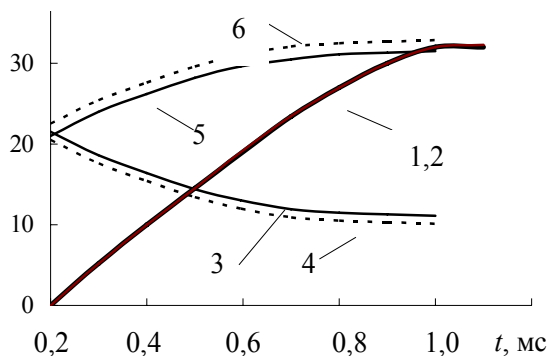


Рис. 5. Сравнение результатов численного расчета с экспериментальными данными [5]

Предложенный подход был использован в работе [12] для анализа полумостового преобразователя зарядного устройства погружной скважинной разрядно-импульсной установки, предназначенной для увеличения дебета водозаборных скважин. В этом случае при частоте резонансной зарядки  $36 \cdot 10^4$  Гц и емкости накопителя  $3,3 \cdot 10^{-6}$  Ф для зарядки до напряжения  $3 \cdot 10^4$  В в течение пяти секунд зарядному устройству необходимо выполнить до  $10^5$  резонансных циклов. Полученные в работе [12] результаты свидетельствуют о совпадении результатов численного моделирования с данными натурального эксперимента и в режиме длительного (порядка  $10^5$  циклов) нелинейного зарядного процесса.

#### ВЫВОДЫ

Таким образом, предлагаемый метод позволяет:

- существенно снизить объем и длительность вычислений, сократив в большинстве случаев количество расчетных циклов резонансной зарядки накопителя  $T$  с  $10^3 \dots 10^7$  до существенно меньших значений, определяемых выражением (8);

- избежать влияния ошибок, накапливаемых в процессе длительного численного счета, связанных с неточностью дискретного представления чисел в памяти ЭВМ и погрешностей, связанных с конечным порядком точности разностных схем. Причем, погрешностью численных методов на нескольких периодах зарядки можно пренебречь, тогда как этого нельзя сказать об интегрировании жестких дифференциальных уравнений в течение сотен тысяч или миллионов зарядных циклов. Следует особо подчеркнуть, что для достижения требуемой точности согласно предлагаемому подходу применимы даже наиболее простые, а значит, и наиболее экономичные с точки зрения количества выполненных математических операций, разностные схемы для аппроксимации исходных дифференциальных уравнений математической модели. Например, в рассматриваемом случае в качестве демонстрации этого использовалась явная схема эйлеровой аппроксимации.

#### ЛИТЕРАТУРА

- [1] Пентегов И.В. Основы теории зарядных цепей емкостных накопителей энергии. – Киев: Наукова думка, 1982. - 421с.
- [2] Рябенкий В.М., Мирошниченко Л.Н., Вовк И.Т., Голобородько А.Н. Генераторы импульсных токов нового поколения // Технічна електродинаміка, 2000, Ч.5. Тематичний випуск. – С. 46 - 51.
- [3] Вовк И.Т., Вовченко А.И., Мирошниченко Л.Н. Тенденции развития высоковольтного оборудования для электрогидроимпульсных технологий // Технічна електродинаміка, 2002. - № 2. – С. 63 - 67.
- [4] Рудык С.Д., Турчанинов В.Е. Мостовой преобразователь напряжения с фазовым управлением, обеспечивающий "мягкую" коммутацию силовых ключей в широком диапазоне изменения нагрузки // Электротехника 1996, №12. – С. 19 - 21.
- [5] Song I.H., Shin H.C., Choi C.H. A Capacitor Charging Power Supply Using a Serious Resonant Three-Level Inverter Topology // 13<sup>th</sup> IEEE Intl Pulsed Power Conf. Digest of Tech. Papers. - Las Vegas, Nevada USA. - Vol. 2. - 2001. - PP. 1066 - 1069. - PP. 1583 - 1586.
- [6] Vovchenko A., Shvets I., Dubovenko K., Ivanov A., et al. Developments of Pulsed Power Industrial Applications at the Institute of Pulse Research and Engineering (IPRE) // item. - PP. 1066 - 1069.
- [7] Кутковецкий В.Я. Формализация расчета процессов в вентильных цепях узловым методом переключающих функций // Электричество. - 1989, № 5. – С. 72 - 74.
- [8] Мирошниченко Л.Н., Голобородько А.Н. Моделирование переходных процессов в зарядных устройствах генераторов импульсных токов // Технічна електродинаміка, 2000, Ч.2, тематичний випуск. - С. 41 - 46.
- [9] Ракитский Ю.В., Устинов С.М. Численные методы решения жестких систем. - М.: Наука, 1979. – 208с.
- [10] Калиткин Н.Н. Численные методы. – М.: Наука, 1978. – 512 с.
- [11] Форсайт Дж. Малькольм М., Молер К. Машинные методы математических вычислений. – М.: Мир, 1982. – 282 с.
- [12] Дубовенко К.В., Курашко Ю.И., Климанский Н.Н. Высоковольтный резонансный источник питания для разрядно-импульсных погружных разрядно-импульсных установок // Технічна електродинаміка, 2004, №6. – С. 52 – 55.

Поступила 03.12.2005