

# Разработка систем заряда

## емкостных накопителей энергии Часть 4

**Это завершающая статья цикла, посвященного разработкам систем заряда емкостных накопителей энергии (СЭ № 4 за 2008 год и № 1–2 за 2009 год). В ней рассмотрены некоторые вопросы, касающиеся многоканальных систем зарядов**

**Юрий Болотовский, к. т. н.**

eltech@ufacom.ru

**Георгий Таназлы, к. т. н.**

g\_thanazly@mail.ru

**Евгений Вашкевич, к. т. н.  
Александр Никитин**

### Четырехканальная схема заряда емкостного накопителя энергии от источника с ограниченной мощностью

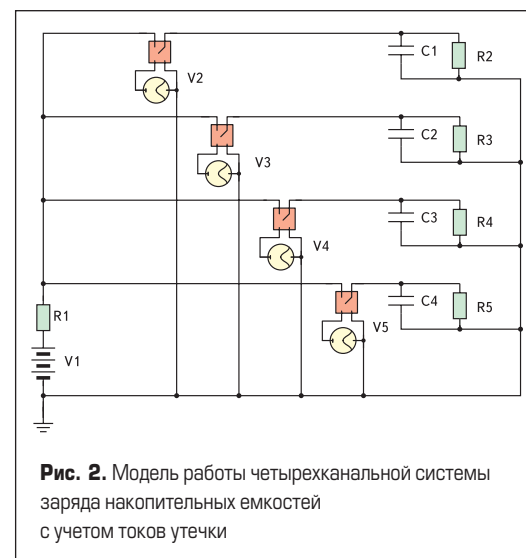
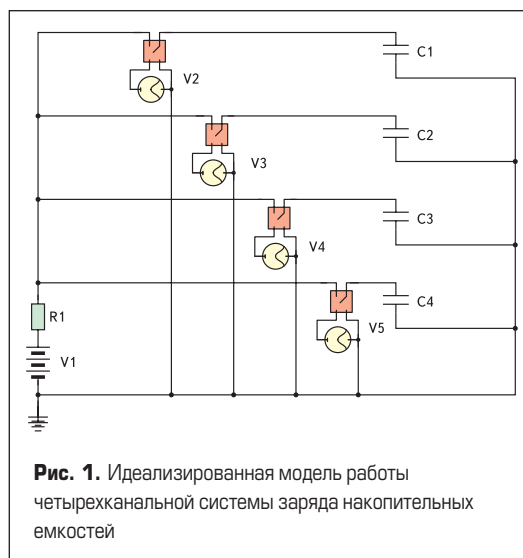
Одной из основных задач, которые приходится решать при разработке систем заряда ЕНЭ на подвижных объектах, является задача оптимизации заряда по различным критериям при питании системы от источника с ограниченной мощностью. В данном разделе рассматривается упрощенная схема четырехканальной системы заряда различных накопительных емкостей ( $C_1 = 2$  мкФ,  $C_2 = 1$  мкФ,  $C_3 = 0,5$  мкФ,  $C_4 = 0,25$  мкФ) от источника напряжения 2000 кВ. Последовательно включенное с этим источником сопротивление 2 МОм имитирует ограничение тока, потребляемого от источника величиной 100 мА. Подключение накопительных емкостей к источнику энергии осуществляется через ключи S1–S4 типа Sbreak, управляемые от импульсных источников V2–V5 типа VPulse. Сопротивление закрытого ключа принято равным  $10^9$  Ом, сопротивление открытого ключа — 55 Ом. Рассматривались два варианта схемы: вариант первый (идеализированный) без учета утечки емкостей (рис. 1), вариант второй — с учетом утечки емкостей, которые моделируются сопротивлениями 10 МОм, включенными параллельно накопительным емкостям (рис. 2).

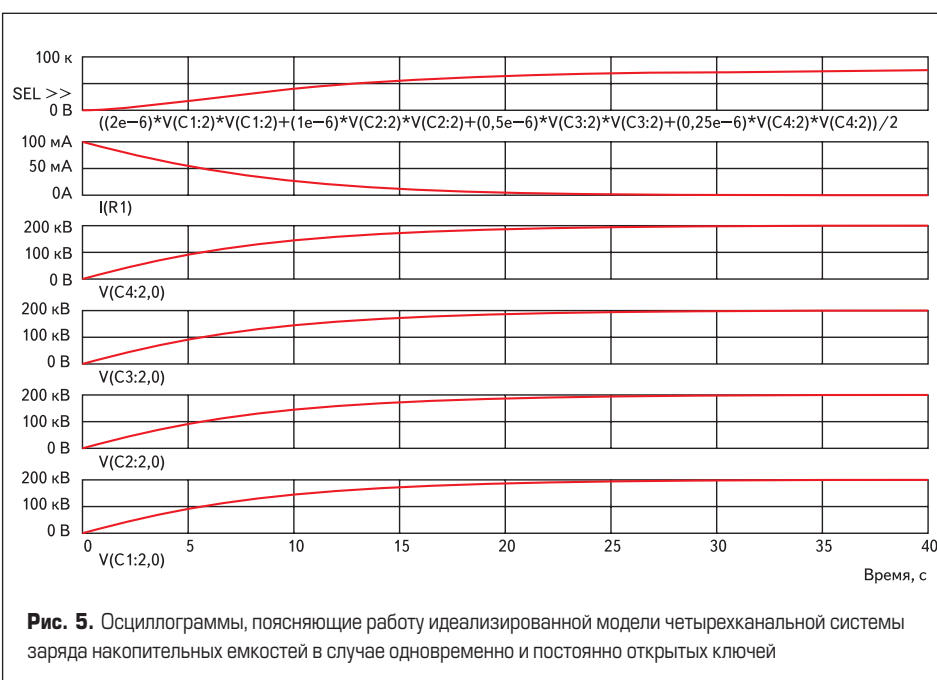
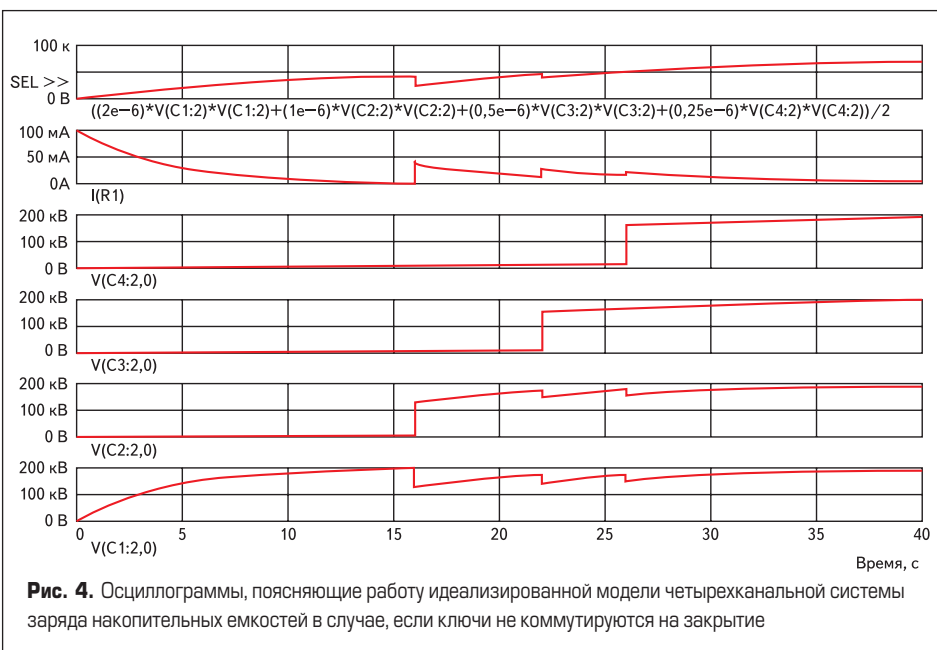
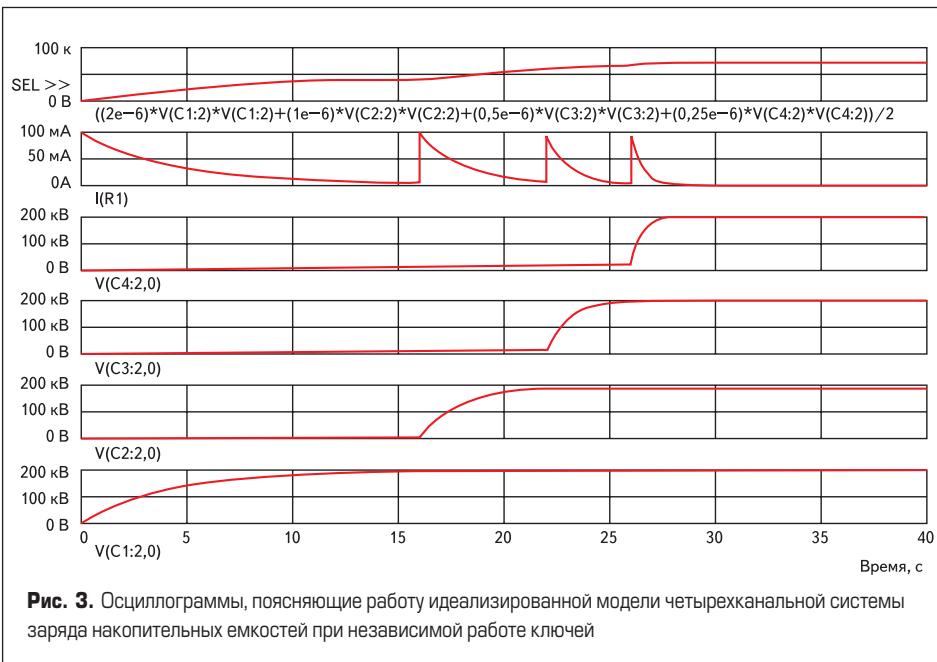
В качестве критерия оптимизации принято время, в течение которого на накопительных емкостях запасается заданное количество энергии. Для рассматриваемого случая при заряде емкостей до 200 кВ (без учета токов утечки) эта энергия (кДж) равна:

$$E = \sum_{i=1}^4 \frac{C_i U^2}{2} = \frac{U^2}{2} \sum_{i=1}^4 C_i = 70.$$

При определении минимального времени накопления этой энергии для идеализированной схемы рассмотрены три варианта коммутации ключей:

1. Независимое поочередное включение ключей S1–S4 и их выключение в моменты, когда переходный процесс заряда соответствующей накопительной емкости завершен. Моменты включения и выключения ключей: S1 — 0–16 с, S2 — 16–22 с, S3 — 22–26 с, S4 — 26–29 с. При этом время накопления энергии 70 кДж составляет 29 с. Полученные осциллограммы приведены на рис. 3.
2. Ключи S1–S4 включаются в те же моменты времени, что и при варианте 1, и не выключаются. При этом время накопления энергии 70 кДж — 37 с. (Осциллограммы — на рис. 4). Увеличение времени накопления энергии объясняется появлением контуров разряда через открытые ключи.





3. Одновременное включение всех ключей S1–S4 в нулевой момент времени. Ключи не выключаются. При этом время накопления энергии 70 кДж — 23 с. (Осциллограммы — на рис. 5).

Таким образом, для идеализированной схемы наилучшим с точки зрения времени накопления энергии является вариант одновременного включения всех ключей в нулевой момент времени.

Для четырехканальной схемы заряда ЕНЭ от источника с ограниченной мощностью и учетом токов утечки емкости (рис. 2) так же, как и для идеализированной схемы (рис. 1), рассматриваются три варианта коммутации ключей. На рис. 6 приведены осциллограммы токов и напряжений на элементах схемы при независимой работе ключей. Характерно для данного варианта, что величина суммарной энергии, запасенной в емкостях, достигает 60 кДж, и за счет утечки достигается ее пульсация. При этом максимальное значение величины суммарной энергии достигается за 25 секунд.

На рис. 7 показана работа схемы с учетом токов утечки для случая, когда ключи не выключаются (вариант 2). При этом величина суммарной энергии, запасенной в емкостях, практически монотонно возрастает, достигая максимального значения, равного 65 кДж, за 50 секунд.

На рис. 8 отображены результаты заряда емкостей (схема на рис. 2) в случае одновременного и постоянного открытия ключей. При этом величина суммарной энергии возрастает строго монотонно и достигает максимального значения 65 кДж за 30 секунд.

Таким образом, для рассматриваемой схемы (с учетом утечки) предпочтительным по времени заряда является вариант с независимой работой ключей или их одновременным включением.

### Влияние рассогласования параметров элементов в схемах двух включенных последовательно по напряжению двухтактных преобразователей с резонансной раскачкой напряжения

Одним из распространенных вариантов работы многоканальной системы ЗУ ЕНЭ является вариант последовательного включения каналов по выходному напряжению. Это позволяет получить увеличение выходного напряжения и/или увеличить крутизну его нарастания, что может иметь значение при питании, например, эксимерного лазера. На рис. 9 приведена схема последовательно включенных по выходному напряжению двух двухтактных преобразователей. Резонансные явления в этих преобразователях достигаются за счет реактивных элементов, в данном случае это индуктивности рассеяния L2, L3 трансформаторов и их динамические емкости C9, C10. Силовые транзисторы представлены моделями IGBT-транзисторов IRG4PH50U, модели высоковольтных высокочастотных диодов выполнены на основе ключей типа Sbreak [1]. Модели высоковольтных трансформаторов

реализованы на моделях сердечников 1NM700 [2]. Назначение и параметры остальных элементов ясны из схемы (рис. 9).

На рис. 10 приведена зависимость выходного напряжения (напряжения на C19) от периода следования импульсов управления, подаваемых на силовые транзисторы. В данном случае параметры всех элементов двухтактных преобразователей полностью идентичны. Характерной особенностью рассматриваемой зависимости является «острый резонанс», то есть малое изменение периода следования импульсов управления, что приводит к резкому изменению выходного напряжения.

Применять здесь принцип суперпозиции для получения выходных характеристик схемы по характеристикам двухтактных преобразователей можно только теоретически. Дело в том, что параметры элементов рассматриваемых схем двухтактных преобразователей имеют разброс, что в случае резонансной настройки одной схемы приводит к уходу от резонанса другой. Особенно трудно обеспечить полную идентичность параметров высоковольтных трансформаторов. На рис. 11–13 приведена зависимость изменения выходного напряжения ЗУ при рассогласовании параметров схем по длительности импульсов управления, индуктивности рассеяния и динамической емкости. Из анализа зависимости следует, что при рассогласовании длительности импульсов управления до 7% выходное напряжение практически не меняется, а более 7% — меняется незначительно (рис. 11).

Рассогласование значений динамических емкостей (рис. 12) и индуктивностей рассеяния (рис. 13) приводит к резкому изменению выходного напряжения. Данная особенность резонансных схем заряда ЕНЭ определяет следующие требования к управлению многоканальными системами.

Если при последовательном включении каналов по выходу необходимо получить максимально возможное напряжение на ЕНЭ, системы управления каналами необходимо выполнять с независимым изменением частоты. При этом каналы следует настраивать на максимальное выходное напряжение раздельно.

Если получение максимально возможного выходного напряжения не требуется, управление каналами от одного задающего генератора допустимо.

### Анализ аварийных режимов систем преобразования энергии для ЗУ ЕНЭ

В данном разделе на примере параллельной работы двух каналов системы преобразования энергии, работающих на общую накопительную емкость (схема на рис. 9), проанализированы некоторые аварийные режимы, вызванные возможными повреждениями в анализируемой схеме. Рассмотрены аварийные режимы, возникающие при пробое накопительной емкости, пробое транзистора, пробое между первичной и вторичной обмотками трансформатора и закорачивании первичной обмотки. Пробой имитировался подключением к соответствующим точкам схемы ключа

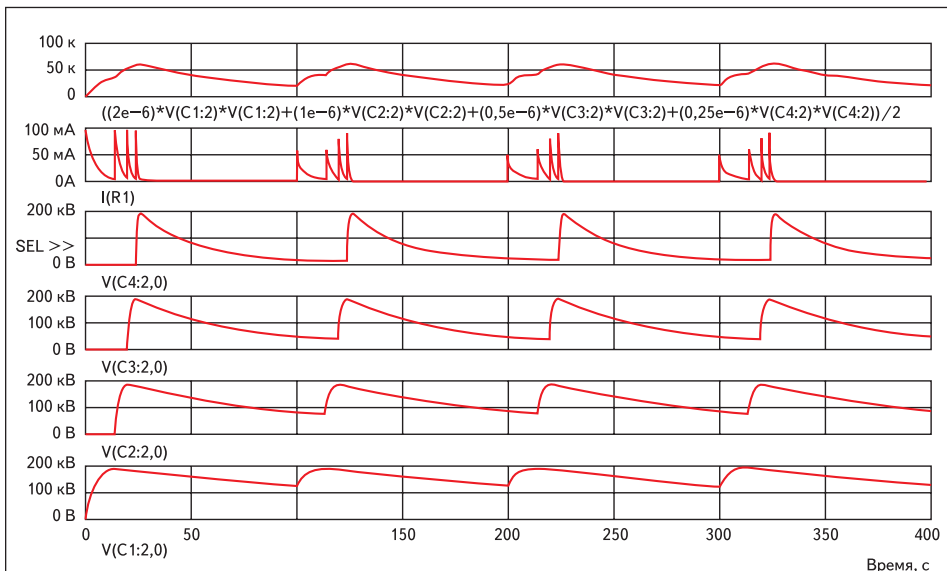


Рис. 6. Осциллограммы, поясняющие работу модели четырехканальной системы заряда накопительных емкостей при независимой работе ключей с учетом токов утечки

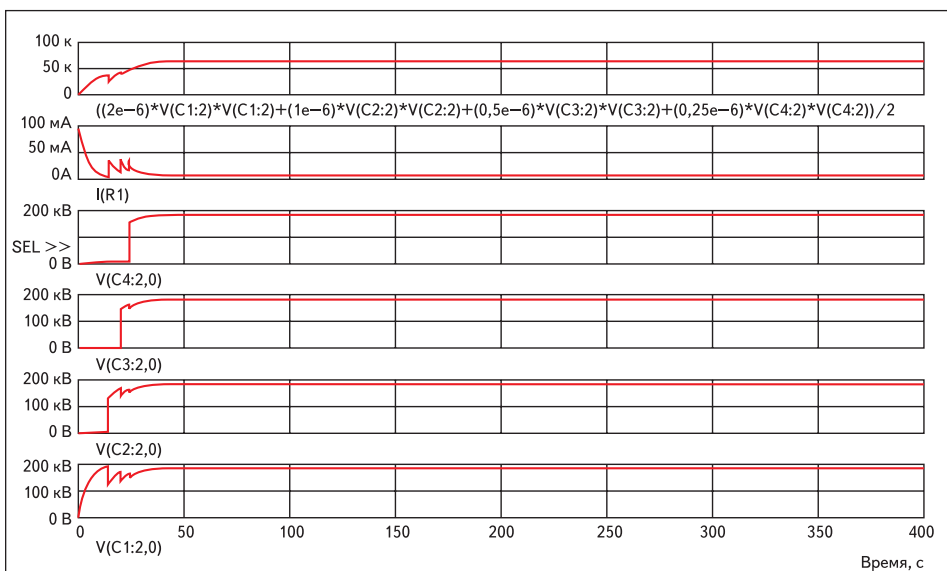


Рис. 7. Осциллограммы, поясняющие работу модели четырехканальной системы заряда накопительных емкостей в случае, если ключи не коммутируются на закрытие с учетом токов утечки

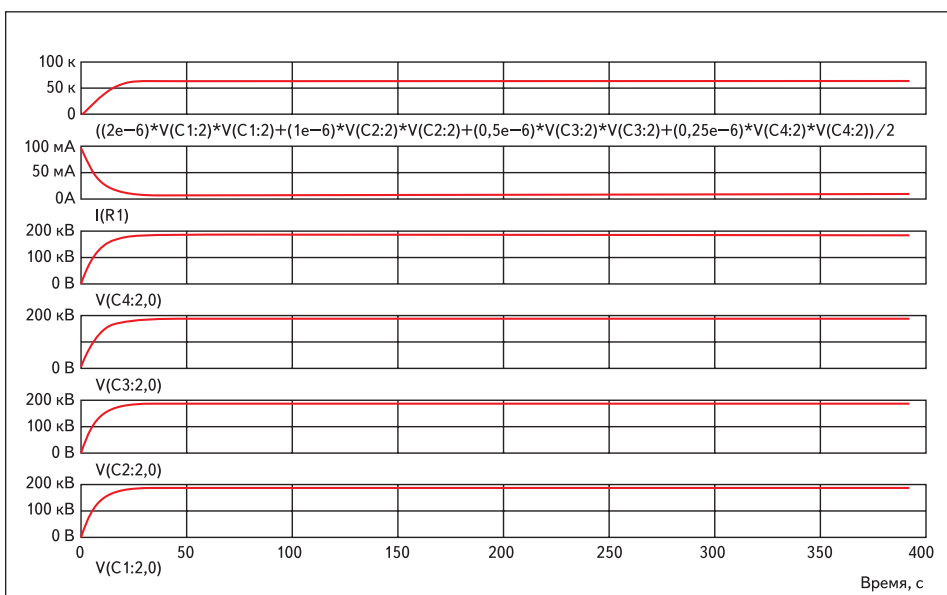


Рис. 8. Осциллограммы, поясняющие работу модели четырехканальной системы заряда накопительных емкостей в случае одновременно и постоянно открытых ключей с учетом токов утечки

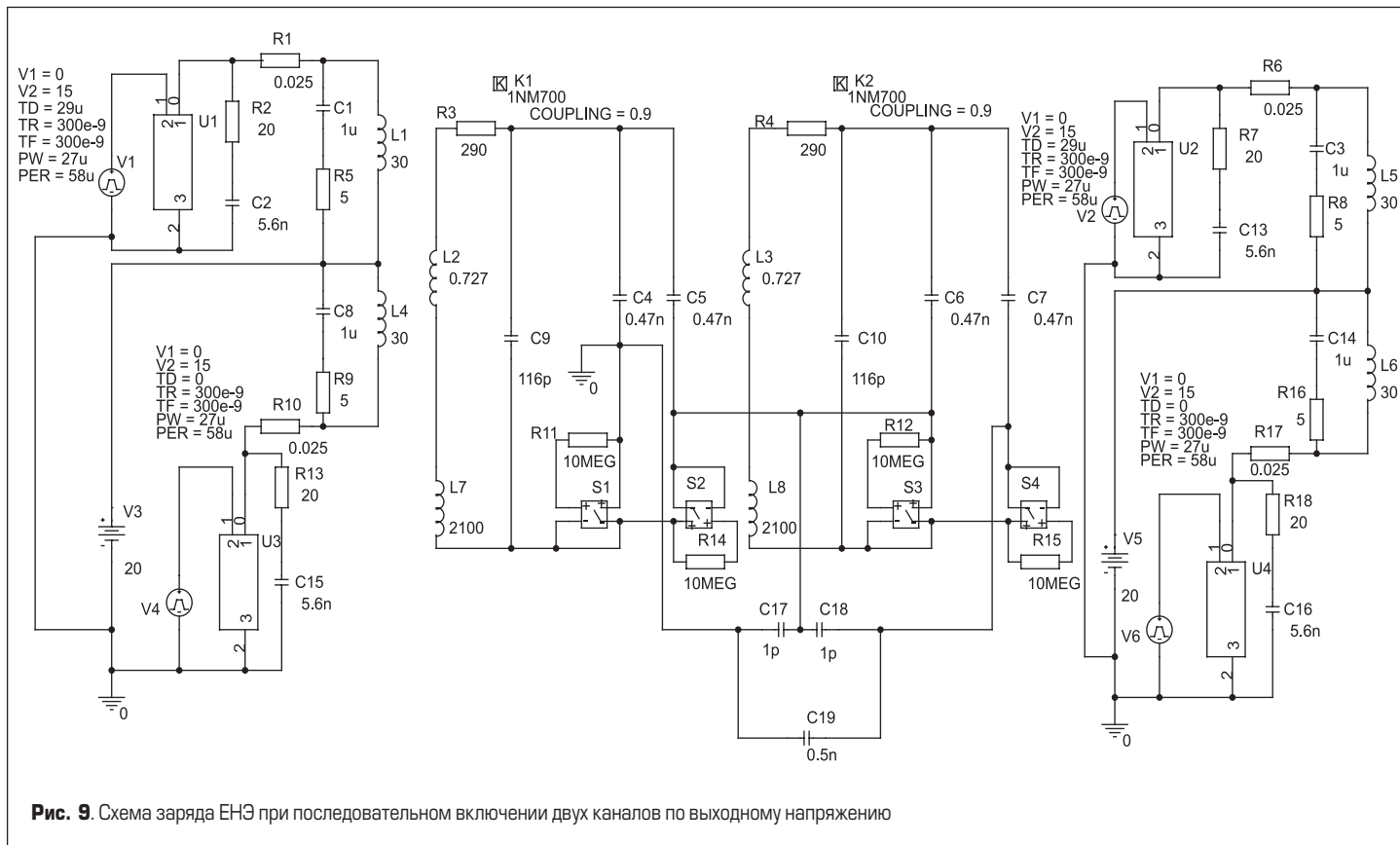


Рис. 9. Схема заряда ЕНЭ при последовательном включении двух каналов по выходному напряжению

типа Sbreak или транзистора, управление которыми осуществлялось от источника VPulse. На рис. 14 приведены осциллограммы, иллюстрирующие процессы в схеме при пробое накопительной емкости C19.

Судя по осциллограммам, пробой накопительной емкости не вызывает аварийных токов в транзисторах схемы. Очевидно, что ограничение токов в транзисторах осуществляется за счет емкостей С4–С7. Данный аварийный

режим не предъявляет повышенных требований по быстродействию к системе защиты.

На рис. 15 приведены осциллограммы токов и напряжений на элементах схемы, происходящих при пробое транзистора U1.

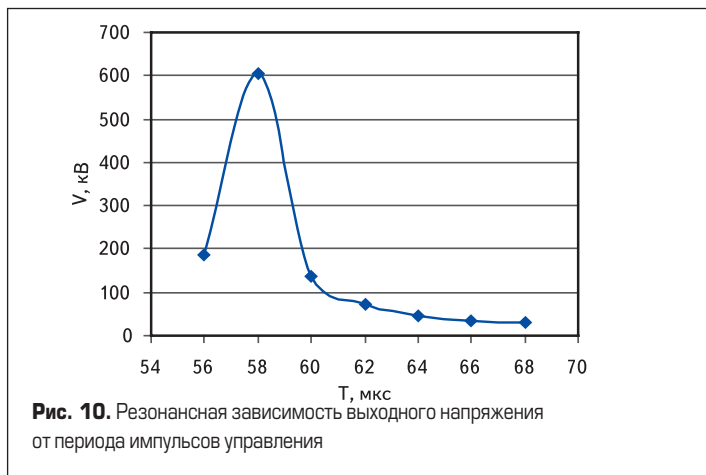


Рис. 10. Резонансная зависимость выходного напряжения от периода импульсов управления

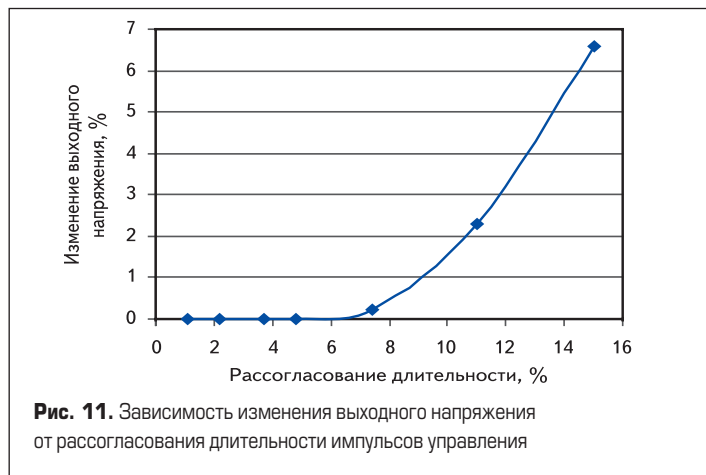


Рис. 11. Зависимость изменения выходного напряжения от рассогласования длительности импульсов управления

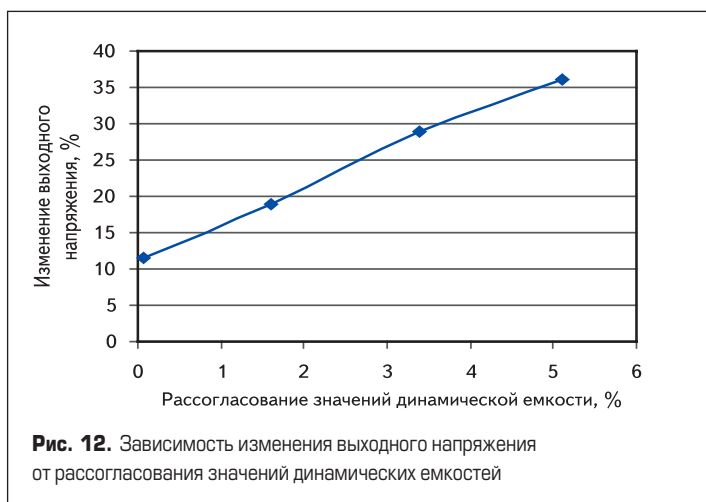


Рис. 12. Зависимость изменения выходного напряжения от рассогласования значений динамических емкостей



Рис. 13. Зависимость изменения выходного напряжения от рассогласования значений индуктивностей рассеяния

Для данной аварии характерно скачкообразное увеличение тока в противофазном пробитому транзисторе I (X\_U3.RER). Ограничение этого тока величиной в 200 А объясняется свойством модели IGBT-транзистора IRG4PH50U, которая стабилизирует ток в случае, если его величина превосходит максимально допустимое паспортное значение. Поскольку крутизна тока в транзисторе очень велика, требования к быстродействию защиты для предотвращения выхода из строя транзистора U3 составляют несколько микросекунд. Осциллограммы показывают, что пробой транзистора U1 практически не отразился на токах транзисторов U2, U4, это объясняет устойчивость схемы к аварии типа пробоя одного из транзисторов.

На рис. 16 показано поведение схемы при аварийном режиме, вызванном пробоем между первичной и вторичной обмотками трансформатора K1.

Судя по осциллограммам, авария этого типа не приводит к увеличению токов и напряжений на элементах схемы, которые превосходили бы паспортные значения. Авария практически не оказала влияния на работу второй ячейки. Специфических требований к системе защиты такая авария не предъявляет.

Аварийный режим, вызванный пробоем между выводами первичной обмотки L1, показан на рис. 17.

Осциллограммы показывают, что, хотя авария вызвала увеличение токов в транзисторах U1, U3, значения этих токов не превосходят паспортных. Так же как и в предыдущих авариях, изменения режимов работы второй ячейки практически не наблюдается. В этом случае к защите также не предъявляется повышенных требований по быстродействию. Приведенные примеры доказывают, что в целом ряде случаев рассматриваемая схема является достаточно устойчивой при возникновении аварии. Однако быстродействие защиты должно быть высоким, так как выявлены случаи аварий, при которых выход из строя одного из транзисторов при недостаточном быстродействии (медленнее 5–7 мкс) приводит к выходу из строя второго транзистора.

### Моделирование процессов функционирования многоканальной системы преобразования энергии

Функционирование многоканальной системы преобразования энергии для заряда ЕНЭ может быть реализовано по различным алгоритмам. Одним из таких алгоритмов является параллельная работа каналов для заряда общей емкости. При этом ставятся различные цели: уменьшение времени заряда, увеличение выходного напряжения и т. д. Далее рассматривается алгоритм объединения каналов для заряда накопительной емкости до заданной величины за минимально возможное время (применительно к системе питания эксимерного лазера).

Одним из способов заряда емкости до высоких напряжений является применение резонанс-трансформатора. Характерной особенностью этих трансформаторов является то,

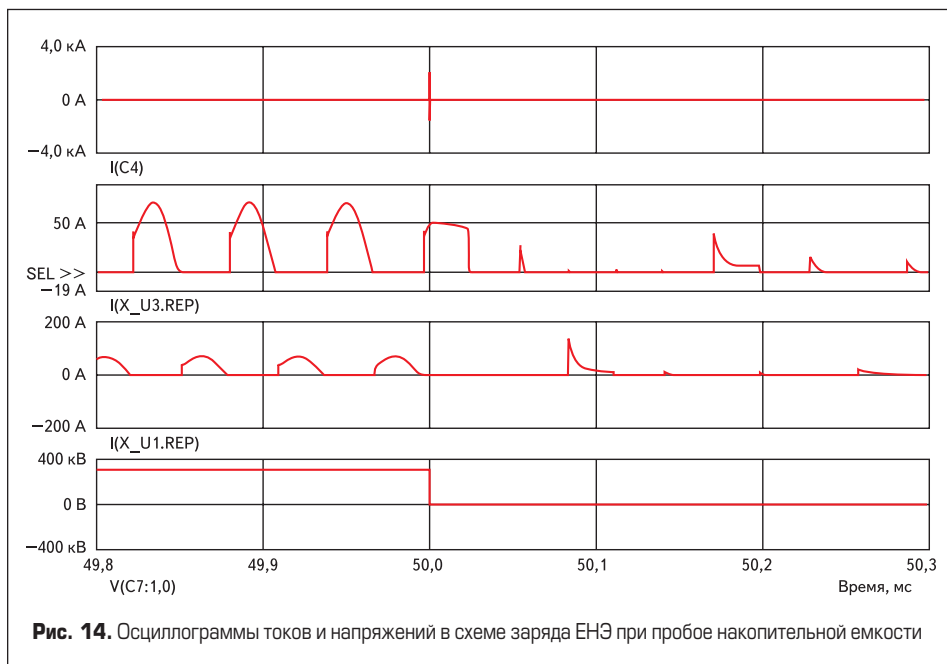


Рис. 14. Осциллограммы токов и напряжений в схеме заряда ЕНЭ при пробое накопительной емкости

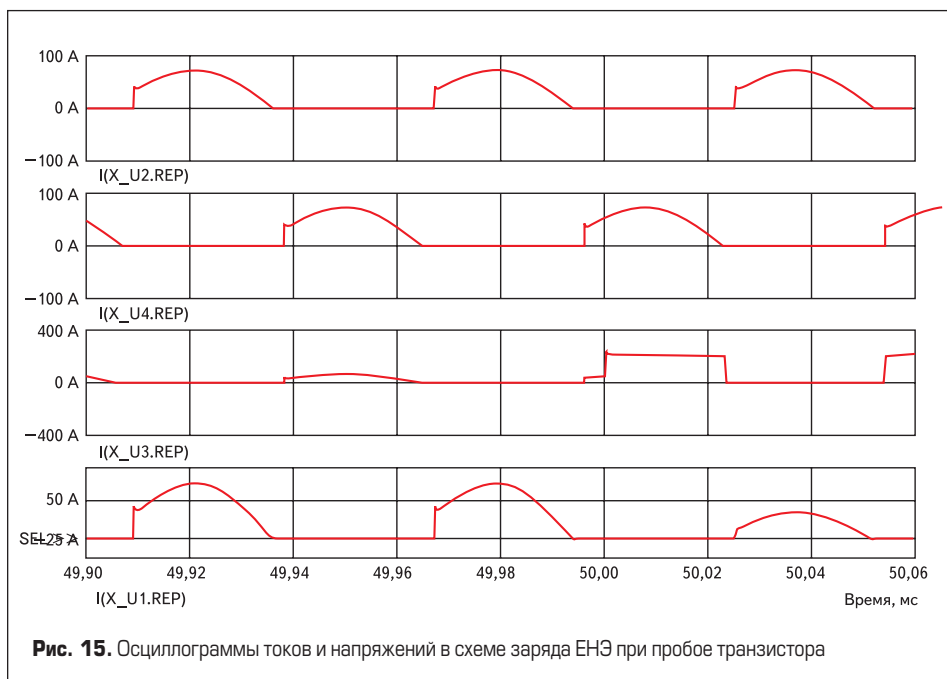


Рис. 15. Осциллограммы токов и напряжений в схеме заряда ЕНЭ при пробое транзистора

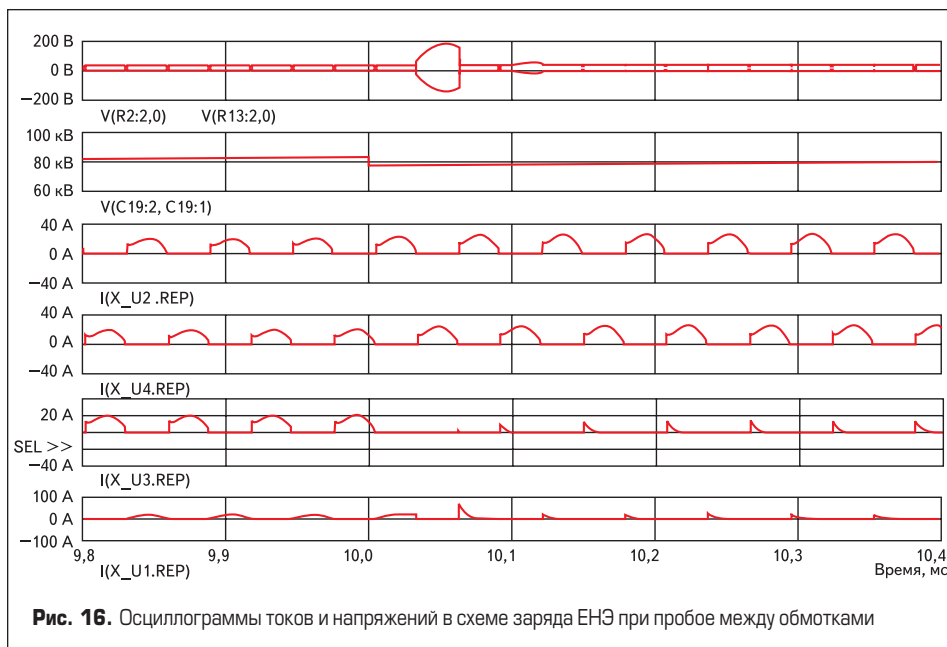


Рис. 16. Осциллограммы токов и напряжений в схеме заряда ЕНЭ при пробое между обмотками

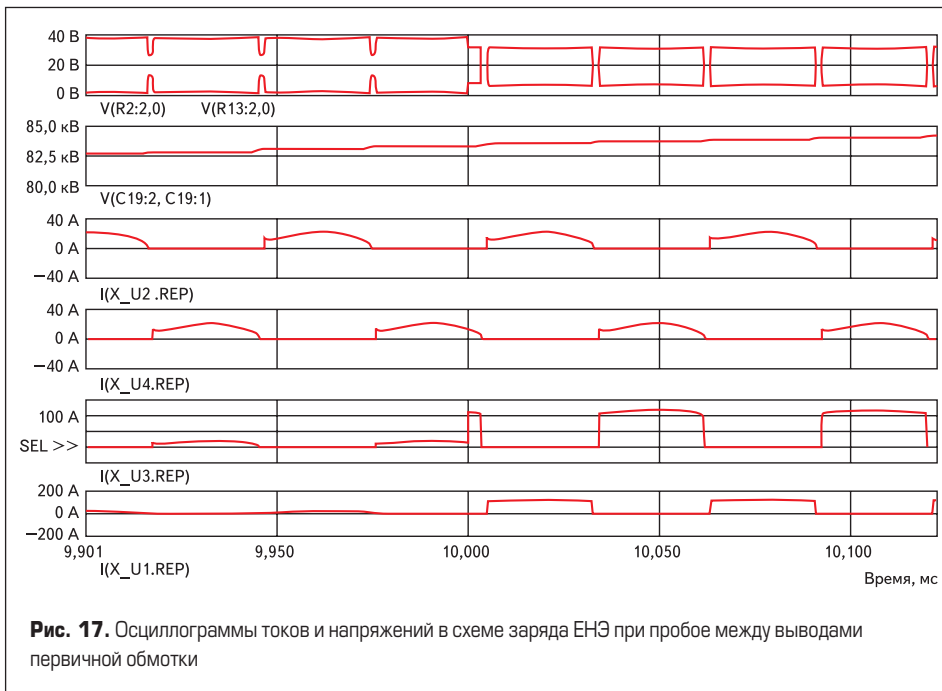


Рис. 17. Осциллограммы токов и напряжений в схеме заряда ЕНЭ при пробое между выводами первичной обмотки

что при определенных соотношениях рассеяния и емкости во вторичной цепи могут получаться выходные напряжения, которые во много раз превышают вторичное напряжение при холостом ходе. Для определения основных закономерностей применения таких трансформаторов построим их математическую модель.

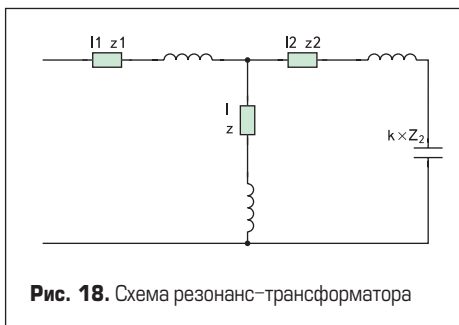


Рис. 18. Схема резонанс-трансформатора

Предположим, что во внешней цепи имеется лишь одна переменная емкость (рис. 18), реакцию которую выразим через (1).

$$k \times Z_2 = \frac{k}{j\omega C} = \frac{k}{\omega C} \times e^{-j\frac{\pi}{2}} \quad (1)$$

Известно, что для первичного тока:

$$I_1 = \frac{\bar{V}_1}{\bar{z} + \bar{z}_1} + \frac{\bar{V}_1 \times \bar{z}^2}{(\bar{z} + \bar{z}_1)^2 \times \bar{Z}_{k2} (1 + \frac{k \times \bar{Z}_2}{\bar{Z}_{k2}})} = \frac{\bar{V}_1}{\bar{z} + \bar{z}_1} + \frac{\bar{V}_1 \times \bar{z}^2}{(\bar{z} + \bar{z}_1)^2 \times \bar{Z}_{k2} (1 + \frac{k \times Z_2}{Z_{k2}}) \times e^{-j(\frac{\pi}{2} + \phi_{k2})}} \quad (2)$$

Конец вектора  $\bar{I}_1$  будет при разных емкостях перемещаться по окружности, которая находится по двум точкам (рис. 19) по концам векторов  $\bar{I}_{10}$  при холостом ходе:

$$I_{10} = \bar{V}_1 / (\bar{z} + \bar{z}_1) \quad (3)$$

при  $k = \infty$  и  $\bar{I}_{1k}$  при коротком замыкании:

$$\bar{I}_{1k} = \frac{\bar{V}_1 (\bar{z} + \bar{z}_1)}{\bar{z} \times \bar{z}_1 + \bar{z}_1 \times \bar{z}_2 + \bar{z}_2 \times \bar{z}} \quad (4)$$

когда  $k = 0$ , и по направлению касательной, которая с продолжением  $I_{10}I_{1k}$  образует угол  $\pi/2 + \phi_{k2}$ , откладываемый по стрелке часов. Если от линии  $I_{10}I_{1k}$  отложить тот же угол в другую сторону, то на соответствующей линии  $I_{1k}A$  линия  $I_{10}I_1$  отсекает отрезок  $I_{1k}B$ , представляющий  $k \times Z_2$  в том же масштабе, в каком  $I_{10}I_{1k}$  представляет  $Z_{k2}$ .

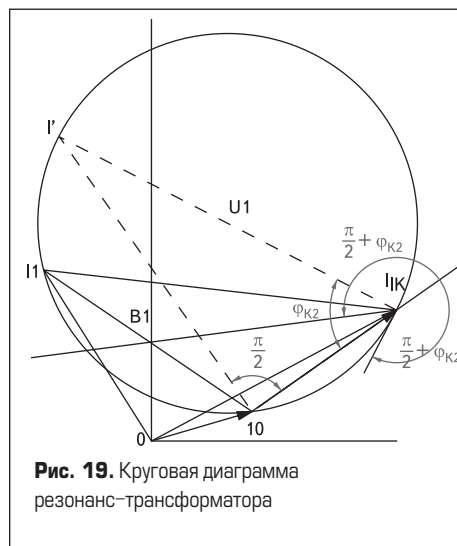


Рис. 19. Круговая диаграмма резонанс-трансформатора

По мере включения емкости во вторичную цепь первичный ток будет уменьшаться. Сдвиг фаз в первичной обмотке также будет уменьшаться, одновременно с этим будет увеличиваться вторичное напряжение (измеряемое отрезком  $I_{1k}I_1$ ). При дальнейшем увеличении емкости первичный ток начнет увеличиваться, опережая первичное напряжение. Наконец, при вполне определенной емкости вторичное напряжение достигнет своего максимума, при ко-

тором будет иметь место резонанс напряжений. Это произойдет тогда, когда конец вектора первичного тока будет лежать на диаметре  $I_{1k}O_1I_1$ . При этом вторичное напряжение будет:

$$I'_1 I_{1k} = \frac{I_{1k} I_{10}}{\cos \phi_{k2}} = V_1 \times \frac{\sqrt{r^2 + x^2}}{\sqrt{(r_1 + r)^2 + (x_1 + x)^2}} \times \frac{1}{\cos \phi_{k2}} \quad (5)$$

и получится оно тогда, когда величина емкости, присоединенной к вторичным клеммам, будет удовлетворять уравнению:

$$k \times Z_2 = \frac{k}{\omega C} = \frac{I_{10} I_{1k}}{\cos(\pi - (\frac{\pi}{2} + \phi_{k2}))} = \frac{z_{k2}}{\sin \phi_{k2}} \quad (6)$$

откуда определяется искомое значение емкости:

$$\frac{C}{k} = \frac{\sin \phi_{k2}}{\omega Z_{k2}}$$

Относительное изменение вторичного напряжения в зависимости от реакции емкости представлено на рис. 20.

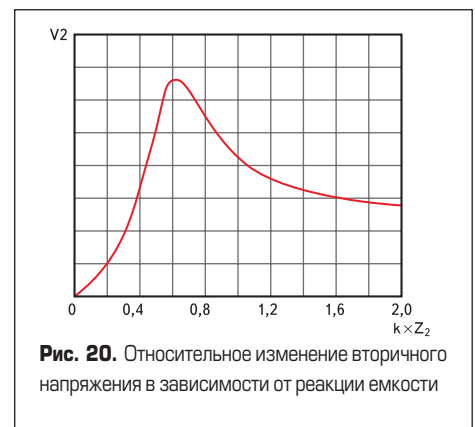


Рис. 20. Относительное изменение вторичного напряжения в зависимости от реакции емкости

Чем больше рассеяние в обмотках трансформатора и чем меньше потери, тем угол  $\phi_{k2}$  будет ближе к  $\pi/2$ , и тем самым будет увеличиваться диаметр окружности, что в свою очередь увеличит максимальное напряжение у вторичных клемм при емкостной нагрузке.

Для повышения величины выходного напряжения системы заряда или для сокращения времени его заряда можно использовать несколько резонанс-трансформаторов, первичные обмотки которых включены на выходное переменное напряжение различных каналов, а вторичные включены последовательно.

Рассмотренная математическая модель резонанс-трансформатора построена с учетом предположения о постоянстве магнитной проницаемости. Реальные трансформаторы в системах заряда ЕНЭ основаны на материалах, магнитные свойства которых описываются петлей гистерезиса (магнитная проницаемость не постоянна). В связи с этим возникает задача проверки возможности получения раскочки напряжения на резонанс-трансформаторах с сердечниками и последовательным включе-

нием вторичных обмоток. Для решения этой задачи необходимо построение имитационной модели резонанс-трансформатора и выяснения свойств резонанс-трансформаторов с сердечниками на этой модели.

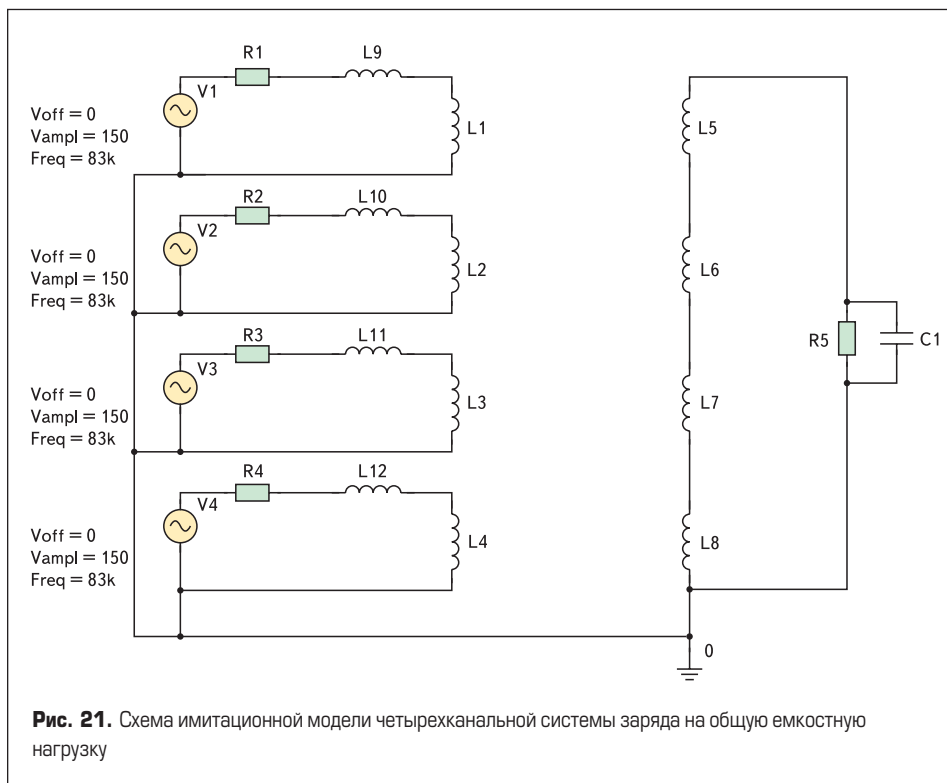
**Имитационное моделирование процессов функционирования многоканальной системы преобразования энергии**

В данном разделе приводится построение упрощенной имитационной модели работы четырехканальной системы заряда на общую емкостную нагрузку. Схема модели приведена на рис. 21.

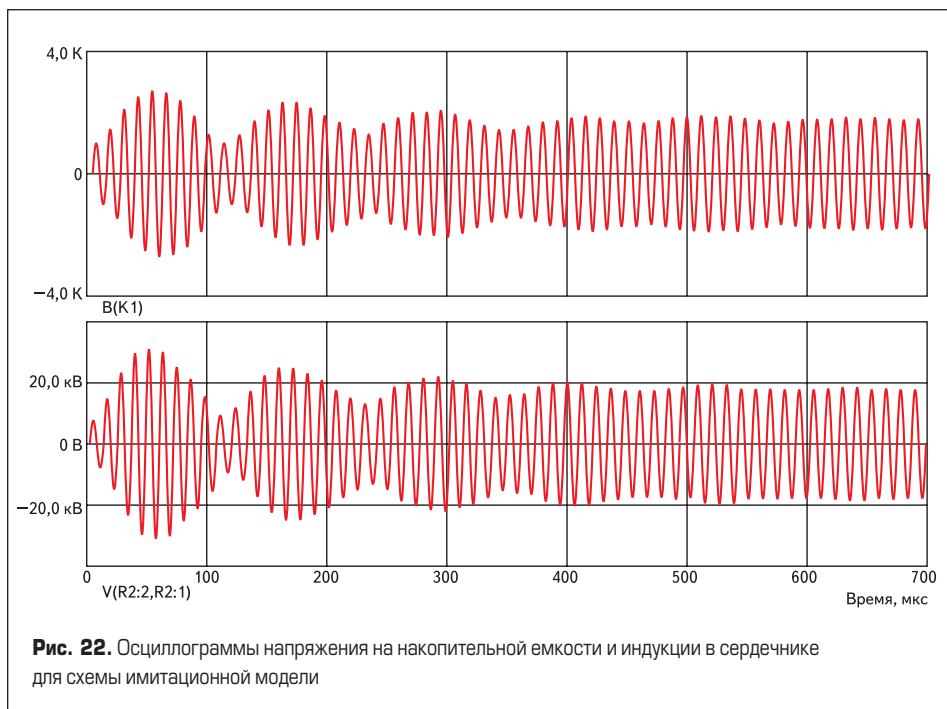
В данной модели источники переменного напряжения VSIN с частотой 83 кГц и амплитудой 150 В (V1–V4) имитируют выходные напряжения четырех каналов преобразования энергии, резисторы R1–R4 — потери в обмотках трансформаторов, резистор R5 — утечку нагрузочных конденсаторов. Обмотки L1–L4 и обмотки L5–L8 представляют собой, соответственно, первичные и вторичные обмотки четырех резонанс-трансформаторов, сердечниками которых являются модели сердечников K1–K4 (площадь поперечного сечения 25,6 см<sup>2</sup>, длина средней линии магнитопровода 34,2 см, сердечник без зазора, материал сердечника — феррит NM2000). Индуктивности L9–L12 представляют собой индуктивности рассеяния соответствующих трансформаторов, а емкость C1 является емкостным накопителем энергии. В данном случае динамические емкости не учитываются.

При коэффициенте трансформации 5,5 (W1 = 4, W2 = 22) и амплитуде входного напряжения 150 В четыре последовательно включенные вторичные обмотки должны были обеспечить амплитуду напряжения на накопительном конденсаторе 150×5,5×4 = 3300 В. Результаты моделирования показывают, что амплитуда напряжения на накопительной емкости в данном режиме работы составляет 18 800 В (рис. 22), что указывает на резонансную раскачку напряжения в данной схеме. Параметры схемы (частота 83 кГц, передний фронт 3 мкс, напряжение 18 800 В, величина накопительной емкости — 25 нФ) соответствуют требованиям, предъявляемым к напряжениям на накопительной емкости.

Из изложенного следует, что применение многоканальных систем заряда емкостных накопительных элементов открывает широкие возможности для улучшения функциональных характеристик таких систем в целом.



**Рис. 21.** Схема имитационной модели четырехканальной системы заряда на общую емкостную нагрузку



**Рис. 22.** Осциллограммы напряжения на накопительной емкости и индукции в сердечнике для схемы имитационной модели

**Литература**

1. Болотовский Ю. И., Таназлы Г. И. OrCAD 9.x. OrCAD 10.x. Практика моделирования, М.: СОЛОН-Пресс, 2008.
2. Болотовский Ю. И., Таназлы Г. И., Вашкевич Е. И., Никитин А. В. Разработка систем заряда емкостных накопителей энергии. Часть 3 // Силовая электроника. 2009. №2