

должны быть рассмотрены как другой тип ресурса. Так как каждая вычислительная операция является облачным сервисом, оплачиваемым пользователями, многие поставщики облачных сервисов помещают их контроль в руках своих клиентов. Решение о запуске нового сервиса и их число может быть кардинально важным по отношению наращивания трафика транзакций и вычислительных способностей, что в пиковых ситуациях могли бы закончить неэффективностью в возможностях облака.

Настоящая статья пытается предложить набор принципов для эффективного планирования возможности облачных вычислений.

Ключевые слова: *планирование, облачные вычисления, ресурсы.*

Отримано 25.05.10

УДК 681.3.057:518.12:621.314.6:537:312.62

А. А. Верлань, канд. техн. наук
НТУУ «КПИ», г. Киев.

ОБ ОДНОМ ПОДХОДЕ К РАСЧЕТУ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ В СЛОЖНЫХ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ И СВЕРХПРОВОДНИКОВЫХ ВЕНТИЛЬНЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯХ

Описаний та проаналізований підхід до розв'язування задач динаміки складних напівпровідникових та надпровідникових вентильних перетворювачів на основі декомпозиції схеми, що розраховується, і застосування інтегральних рівнянь як динамічних моделей утворених лінійних підсхем. Показана ефективність даного підходу, що обумовлена згладжуючими властивостями інтегральних моделей та обчислювальною економічністю відповідних чисельних алгоритмів.

Ключові слова: *комп'ютерне моделювання, вентильні перетворювачі, динамічні моделі, інтегральні рівняння, декомпозиція*

Введение. Задачи анализа динамики устройств преобразовательной техники в современных энергетических полупроводниковых (ПП) и сверхпроводниковых (СП) объектах и системах является одной из наиболее сложных. Безальтернативным путем к эффективному решению данной задачи является применение методов и средств компьютерного моделирования. Компьютеризация научно-исследовательских и проектно-конструкторских работ все больше внедряется в практику разработки новых ПП и СП преобразователей, оказывает большое влияние на совершенствование методов научных исследова-

ний, сокращение сроков разработок, уменьшение материальных затрат и улучшение качественных показателей разрабатываемых изделий. Основой компьютеризации являются алгоритмические и программные средства анализа электромагнитных процессов ПП и СП преобразовательных устройств [1—7].

К настоящему времени разработан и используется ряд программ анализа преобразовательных схем [8—11]. Эти программы используют описание исходного объекта системой алгебро-дифференциальных уравнений и хорошо себя зарекомендовали при анализе ряда схем ПП и СП преобразователей. Однако в настоящее время требуется анализ не только одной схемы преобразователя, но и систем, содержащих один или несколько преобразователей (в случае СП — систем, расположенных в различных температурных зонах), фильтрокомпенсирующих и распределительных устройств, устройств защиты, различных видов нагрузок, подсистем с распределенными параметрами. Эквивалентные схемы таких систем содержат большое количество линейных двухполюсников (индуктивностей, емкостей, сопротивлений, источников), описываются как правило дифференциальными уравнениями высоких порядков и требуют значительных затрат машинных ресурсов для их решения.

Специфика все шире используемых СП преобразовательных систем (в частности для энергообеспечения СП магнитных комплексов (СПМК)) заключается в том, что исполнительные элементы, выполненные из СП материалов, расположены в зоне криогенных температур, а согласование параметров первичного источника питания и СПМК осуществляется при помощи ПП автономного инвертора в ПП зоне. При этом значительно снижаются потери энергии в криозоне системы.

Решение вопросов моделирования и расчёта наиболее эффективных параметров такой системы, определения энергетически экономичных режимов эксплуатации, расчета оптимальных алгоритмов управления, предотвращения аварийных ситуаций осложнено новизной и сложностью такого рода систем, обладающих иерархической структурой силовых цепей и содержащих нелинейные элементы со скачкообразно изменяющимися параметрами. Эти характерные факторы обуславливают принадлежность данного класса СП преобразовательных систем к классу устройств, моделируемых электрическими цепями с изменяющейся структурой. Специфика СП преобразовательных систем предъявляет повышенные требования к точности решаемых задач (до 10^{-5} — 10^{-7}), которые могут быть обеспечены методами, применение которых осложнено отсутствием эффективных алгоритмов вычисления градиентов функционалов. Таким образом, разработка методов и средств моделирования электромагнитных процессов в СП преобразовательных системах является весьма важной и актуальной проблемой.

Отсюда следует необходимость разработки новых методов, алгоритмов и программ анализа переходных процессов электрических цепей [12—15], позволяющих повысить эффективность использования вычислительных средств при анализе сложных СП и ПП преобразовательных схем.

В данной работе исследуется один из возможных подходов к построению алгоритмов анализа больших ПП и СП преобразовательных схем и автономных систем электроснабжения. Он характеризуется следующими особенностями:

- 1) исходное описание системы с преобразователями в нем формируется в виде системы интегральных уравнений;
- 2) является методом анализа по частям (декомпозиционным);
- 3) относится к классу численно-аналитических методов.

Основой подхода является так называемый **метод интегральных уравнений (или интегральный метод)** моделирования и анализа динамических объектов и систем [16—19].

Вопросы численного исследования кусочно-непрерывных процессов в ПП и СП преобразовательных устройствах методом интегральных уравнений рассматривались в работах [2, 8—11]. Однако его возможности в данном направлении используются еще далеко не в полной мере.

Целесообразность дальнейшего развития и применения метода интегральных уравнений к анализу переходных процессов в ПП и СП вентильных преобразователях обусловлена, прежде всего, сглаживающими свойствами интегральных операторов, а также возможностью построения ненасыщаемых и оптимальных с точки зрения точности вычислительных алгоритмов решения изучаемых уравнений.

Теоретические исследования, вычислительные эксперименты и сравнение их результатов с результатами других методов, основанных на дифференциальной форме математических моделей, приведенные в работах [2, 9, 12], а также в данной работе, свидетельствуют о высокой эффективности и ряде алгоритмических преимуществ метода интегральных уравнений. Представляется, что он является перспективным средством компьютерного исследования процессов в преобразовательных устройствах, хорошо дополняющим, а возможно в ряде случаев превосходящим существующие методы, в зависимости от предъявляемых требований к их основным вычислительным характеристикам: точности, быстродействию и объему памяти.

Математическая модель. ПП и СП электроэнергетические системы с преобразовательными устройствами являются сложными, существенно нелинейными системами, обладающими разнообразными свойствами и связями как внутри самого устройства, так и вне его. При анализе таких систем разрабатывается идеальная математическая

модель устройства, которая с достаточной точностью отображает реальные процессы.

Устройства преобразовательной техники можно отнести к динамическим кусочно-непрерывным и, в частности, кусочно-полиномиальным системам. Системы этого класса соединяют в себе черты непрерывных и дискретных динамических систем. Во избежание громоздкости основное внимание будет уделено достаточно простым кусочно-линейным расщепленным (КЛР) системам.

Однако при решении многих задач анализа систем с преобразовательными устройствами понятие КЛР-системы является слишком широким. Оно не учитывает такой особенности этих ПП или СП систем, как наличие в их эквивалентных схемах большого количества линейных двухполюсников и идеальных ключей. Основные затраты машинного времени, как показано в [19], приходятся на формирование и решение уравнений КЛ-цепи, и доходят до 80% от всего машинного времени. Причем с увеличением количества элементов в модели эта доля увеличивается. Для того чтобы программное обеспечение было экономичным и в то же время достаточно универсальным, соответствующая ему математическая модель реального объекта должна быть по возможности простой и достаточно общей, чтобы иметь возможность отображать различные системы с разным уровнем идеализации и в различных режимах их работы.

Одним из самых мощных приемов повышения эффективности процедур анализа является применение метода разделения больших систем на части. Несмотря на глубокое теоретическое изучение и широкое применение этого метода при анализе электронных схем и электроэнергетических систем [20—22], применение его при анализе схем преобразовательной техники имеет свои существенные особенности, связанные с наличием в их эквивалентных схемах большого числа идеальных ключей.

Состав КЛ-цепи очень разнороден. В нее входят как линейные, так и кусочно-линейные ПП и СП элементы (трансформаторы, идеальные ключи), функциональные цепи, отображающие как силовую схему, так и систему управления.

Одна возможность разбиения КЛ-цепи связана с тем, что система управления ПП или СП статического преобразователя определяет только моменты изменения состояния его вентильных элементов, поэтому из КЛ-цепи структурно можно выделить две функциональные цепи: одну — для отображения аналоговой части системы управления, а другую — для отображения аналоговой части силовой схемы. Хотя существенного выигрыша в затратах машинного времени от выделения двух функциональных цепей ожидать трудно, это позволит упростить математическое описание и программное обеспечение.

Вторая, и самая существенная возможность разбиения КЛ-цепи, непосредственно приводящая к необходимости использования интегральных уравнений, связана с выделением линейных элементов в один или несколько линейных многополюсников (ЛМП) и объединением идеальных ключей в один или несколько коммутаторов. При этом выделение ЛМП должно быть выполнено таким образом, чтобы связь между ними осуществлялась только посредством токов и напряжений внешних полюсов. Линейные многополюсники в этом случае описываются системой алгебро-дифференциальных уравнений с постоянными коэффициентами, которые формируются только один раз при решении задачи. Для упрощения математического описания элементы с кусочно-постоянными параметрами в состав теоретической модели могут не включаться. Такой запрет на применение элементов с кусочно-постоянными параметрами не ограничивает возможностей математической модели, поскольку любую кусочно-линейную характеристику можно отобразить набором линейных элементов и идеальных ключей.

Таким образом, структура математической модели систем со статическими ПП и СП преобразователями (рис. 1) определяется следующими блоками: коммутатором (КОММ), составленным из идеальных ключей; линейными многополюсниками (ЛМП_k, k = 1,2,...); источниками напряжения и тока; функциональной цепью (ФЦ-1, определяющей значение источников; обрабатывавшей функциональной цепью (ФЦ-2); компараторами (КОМП); конечными автоматами (АВТ).

Блоки КОМП и АВТ управляют состоянием ключей, входящих в КОММ, ФЦ-1 и ФЦ-2. Основу модели составляет часть структуры, состоящая из коммутатора и линейных многополюсников к ней и относится метод интегральных уравнений.

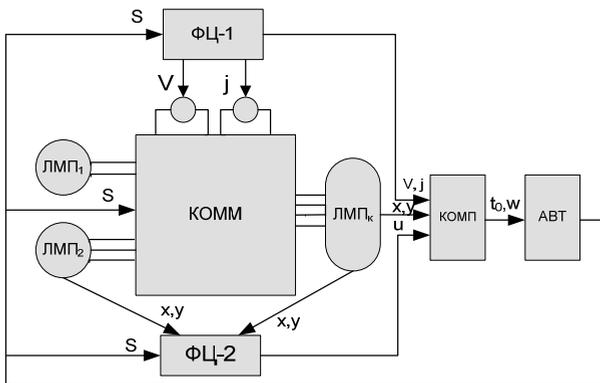


Рис. 1. Функциональная схема системы со статическими преобразователями

Для иллюстрации рассмотрим анализ системы, состоящей из двух ЛМП (рис. 2 а).

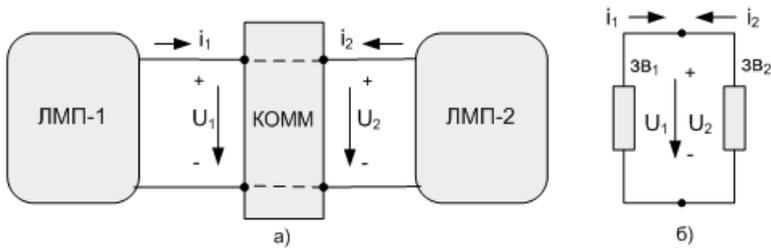


Рис 2. Функциональная схема и цепь замещения системы с двумя ЛМП.

Линейные многополюсники описываются системой линейных дифференциальных уравнений с постоянными коэффициентами, решение которой можно записать в виде:

$$X_i(t) = \Phi_i(t)X_i(0) + \int_0^t \Phi_i(t-\tau)B_iU_i(\tau)d\tau, \quad (1.1)$$

где X — вектор переменных состояния; U — вектор источников; B — матрицы коэффициентов; Φ — фундаментальное решение; i — индекс, указывающий на принадлежность к многополюснику. Реакцию ЛМП на воздействие источника можно представить в виде:

$$i_i = C_i\Phi_i(t)X_i(0) + \int_0^t g_i(t-\tau)U_i(\tau)d\tau + D_iU_i(t), \quad (1.2)$$

где $g_i = C_i\Phi_iB_i$ — переходная характеристика t -го ЛМП.

При анализе системы в целом каждый линейный двухполюсник можно заменить одной замещающей ветвью, описываемой уравнением (1.2). При этом от исходной цепи переходим к рассмотрению замещающей цепи. В отличие от ветвей исходной цепи ветви замещающей цепи описываются интегральными соотношениями. Для каждого состояния коммутатора после удаления разомкнутых ключей и объединения вершин, связанных замкнутыми ключами, получается частная замещающая цепь, которая для системы, изображенной на рис. 2 а, состоит только из двух замещающих ветвей, соединенных так, как показано на рис. 2 б.

Уравнения соединения замещающих ветвей здесь имеют простой вид:

$$i_1 + i_2 = 0, U_1 + U_2 = 0. \quad (1.3)$$

Решая совместно уравнения (1.2) и (1.3), получим:

$$\int_0^t G(t-\tau)U(\tau)d\tau + DV(t) = F(t), \quad (1.4)$$

где $G = g_1 + g_2$, $V = U_1 = U_2$, $D = D_1 + D_2$, $F(t) = S(t)X(0)$,
 $S(t) = [C_1\Phi_1(t) \ C_2\Phi_2(t)]$, $X_0 = \text{col}(i_1(0), i(0))$.

Уравнение (1.4) является интегральным уравнением относительно только одной неизвестной функции V . Таким образом, получено описание схемы с двумя линейными блоками линейным интегральным уравнением с одной неизвестной функцией и формулами для переменных состояния (1.1) каждого двухполюсника в отдельности. А использование структурных особенностей анализируемой системы (анализ ее по частям) приводит к формулировке задачи в виде линейных интегральных уравнений вместо обычно применяемых дифференциальных.

Решение интегрального уравнения (1.4) может вестись любым из известных методов, в частности, методом квадратурных формул. Например, при использовании квадратурной формулы второго порядка (Симпсона и половинной Симпсона) решение интегрального уравнения можно записать в виде:

$$\begin{bmatrix} V(h) \\ V(2h) \end{bmatrix} = RZ,$$

где

$$R = \begin{bmatrix} \frac{8h}{12}G(h) + D & -\frac{h}{12}G(0) \\ \frac{16h}{12}G(h) & \frac{4h}{12}G(0) + D \end{bmatrix}^{-1}, \quad Z = \begin{bmatrix} F(h) - \frac{5h}{12}G(2h)V(0) \\ F(2h) - \frac{4h}{12}G(2h)V(0) \end{bmatrix}.$$

Для определения вектора V в точках h и $2h$ требуется умножить не изменяющуюся на всем межкоммутационном интервале матрицу R размерностью 2×2 на вектор Z . При использовании квадратурной формулы второго порядка необходимо хранить в оперативной памяти компьютера значения матриц Φ , g , S в трех точках.

Особенностью уравнений, описывающих анализируемую систему, является наличие, кроме интегрального уравнения (1.4), еще и формул (1.1) для переменных состояния ЛМП. Поэтому в процедуру решения необходимо ввести второй этап, для которого характерны все преимущества метода анализа по частям. Здесь, по уже вычисленным значениям возбуждающего источника, из формулы (1.1) определяются переменные состояния каждого ЛМП в отдельности, независимо друг от друга. Интеграл вычисляется по тем же квадратурным формулам,

что и на первом этапе. При вычислениях внутри межкоммутационного участка нет необходимости определять переменные состояния ЛМП в каждой точке, поскольку токи и напряжения идеальных ключей могут вычисляться, исходя из переменных внешних полюсов ЛМП. Поэтому можно определять их только в последней точке.

Затраты машинного времени определяются в основном количеством операций умножения. Если проследить за последовательностью вычислений, то общее количество операций умножения, приведенное к шагу h , для метода интегральных уравнений (ИУ) будет следующим:

$$P_n = \left[l^2 + n_1^2 + n_2^2 + (l+1)(n_1 + n_2) \right] / l,$$

где l — порядок квадратурной формулы; n_1, n_2 — порядок системы дифференциальных уравнений первого и второго линейных двухполюсников соответственно.

Для методов, использующих дифференциальные уравнения, рассматривается последовательность частных линейных эквивалентных схем. Для каждой из них составляется и решается система дифференциальных уравнений с постоянными коэффициентами. Блочная структура системы при этом не учитывается. Для изображенной на рис. 2, а схемы порядок частной системы дифференциальных уравнений близок к $N = n_1 + n_2$. Решение дифференциальных уравнений выполняется методами численного интегрирования. Поскольку все частные системы дифференциальных уравнений линейны, можно применять явную формулу их решения (1.1), как это делается в [13]. Для вычисления переменных состояния в новой точке необходимо матрицу Φ порядка $(N \times N)$ умножить на вектор X_i порядка N . Количество операций умножения на одном шаге при этом составит $P_\Phi = (n_1 + n_2)^2$. Если порядок обоих ЛМП принять равным $n_1 = n_2 = 5$, то при использовании формул второго порядка метод интегральных уравнений окажется более чем в два раза экономичнее метода численного интегрирования дифференциальных уравнений, а при использовании квадратурных формул пятого порядка — почти в четыре раза. Дальнейшее увеличение порядка квадратурной формулы является нецелесообразным. Оптимальное значение порядка квадратуры для каждого ЛМП можно оценить по формуле $t_{opt} = n / m$, где n — порядок системы дифференциальных уравнений ЛМП; m — количество его внешних полюсов. С увеличением порядка системы дифференциальных уравнений (увеличением размеров ЛМП) эффективность использования интегральных уравнений по сравнению с дифференциальными будет возрастать.

При решении частной системы линейных дифференциальных уравнений методами численного интегрирования типа Рунге-Кутта количество операций умножения также сильно возрастает при увеличении порядка системы. Однако матрицы коэффициентов для моделей с большими линейными частями часто являются разреженными. Количество операций умножения при использовании алгоритмов работы с разреженными матрицами можно уменьшить пропорционально коэффициенту заполнения. В этом случае метод Рунге-Кутта четвертого порядка становится сравним с методом интегральных уравнений при коэффициенте заполнения матриц коэффициентов ниже 5%, что для систем с преобразователями бывает не часто.

Таким образом, интегральный метод при расчете на межкоммутационных интервалах систем с большими линейными частями экономичнее методов, основанных на использовании дифференциальных уравнений. Процедуры формирования уравнений на новом межкоммутационном интервале для интегрального метода будут также экономичнее, поскольку количество замещающих ветвей (а операции формирования производятся только с ними) значительно меньше всех элементов в системе.

Для широкого применения интегральных уравнений при анализе систем с ПП и СП преобразователями необходимо решить следующие задачи.

Разработать методы и алгоритмы автоматического формирования уравнений в интегральной форме.

Иметь методику выбора или построения удовлетворительного по затратам машинного времени и точности численного метода решения уравнений.

Разработать алгоритм запуска численного алгоритма после переключения ключей.

Разработать алгоритм расчета для особых состояний цепи, когда в результате переключения идеальных ключей в дискретные моменты времени возникают контуры с ненулевым напряжением и бесконечным сопротивлением.

Первые две задачи возникают при использовании любого метода в программе, ориентированной на инженера-пользователя. Третья задача возникает из-за использования идеальных ключей в математической модели систем с СП и/или ПП преобразователями. Последняя может возникнуть при моделировании систем с заранее неизвестной последовательностью переключений идеальных ключей.

Заключение. Таким образом, в статье изложен и проанализирован подход к решению задач динамики сложных полупроводниковых и сверхпроводниковых вентильных преобразователей на основе декомпозиции рассчитываемой схемы и применения интегральных уравнений в качестве динамических моделей образованных линей-

ных подшем. Представляется, что для многих практических задач эффективность данного подхода определяется сглаживающими свойствами интегральных моделей и вычислительной экономичностью соответствующих численных алгоритмов.

Список использованной литературы

1. Чиженко И. М. Основы преобразовательной техники / И. М. Чиженко, В. С. Руденко, В. И. Сенько. — М. : Высш. шк., 1974. — 430 с.
2. Мустафа Г. М. Математическое моделирование тиристорных преобразователей / Г. М. Мустафа, И. М. Шаранов // Электричество. — 1978. — №1. — С. 40—45.
3. Тонкаль В. В. Вентильные преобразователи переменной структуры / В. В. Тонкаль, В. С. Руденко, В. Я. Жуйков [и др.] ; отв.ред. А. К. Шидловский. — К. : Наук.думка, 1989. — 336 с.
4. Бондаренко В.М. Вопросы анализа нелинейных электрических и электронных цепей / В. М. Бондаренко. — К. : Наук.думка, 1967. — 160 с.
5. Демирчян К. С. Проблемы численного моделирования процессов в электрических цепях / К. С. Демирчян, Ю. В. Ракитский, П. А. Бутырин, Е. Н. Карташев, Н. В. Коровкин // Изв. АН СССР. Энергетика и транспорт. — 1982. — № 2. — С. 94—114.
6. Петренко А. И. Развитие методов численного интегрирования в подсистемах автоматизированного проектирования электронных схем (аналитический обзор) / А. И. Петренко, А. И. Цирфа // Электрон. моделирование. — 1991. — 13, №1. — С. 30—38.
7. Чуа Л. О. Машинный анализ электронных схем: Алгоритмы и вычислительные методы / Чуа Л. О. Пен-Мин Лин : пер. с англ. — М. : Энергия, 1980. — 640 с.
8. Брон Л. П. Алгоритмическая система анализа электромагнитных процессов в системах, содержащих преобразовательные устройства / Л. П. Брон, В. З. Манусов, В. Ш. Пасик // Современные задачи преобразовательной техники. — К. : Институт электродинамики АН УССР, 1975. — Т. 3. — С. 110—118.
9. Мустафа Г. М. Система программ для моделирования устройств преобразовательной техники / Г. М. Мустафа, И. М. Шаранов, В. Н. Тингаев // Электротехника. — 1978. — №6. — С. 6—10.
10. Poch H. A general digital computer simulation programme for thiristor static converters (programme SACSO) : Applications examples Contr. Power Electron, and Elec. Drever.-Proc. 2-nd IFAC Sgmp / H. Poch, C. Rebovlet, J. Shonek. — Düsseldorf, 1977. — P. 1—5.
11. Кучеренко Н. К. Алгоритм и программа анализа вентильных преобразователей / Н. К. Кучеренко, А. С. Толстоухов // Автоматизация проектирования в электронике. — 1978. — Вып. 8. — С. 15—23.
12. Верлань А. Ф. Интегрс-аппроксимационный алгоритм анализа переходных процессов в нелинейных электрических цепях / А. Ф. Верлань, В. И. Биленко, П. Т. Передерий // Электричество. — 1990. — №11. — С. 45—49.

13. Годлевский В. С. Экспоненциальный метод для решения систем обыкновенных дифференциальных и конечных уравнений при моделировании электрических цепей / В. С. Годлевский // Электрон. моделирование. — 1960. — № 2. — С. 60—65.
14. Ронто Н. Й. Использование дифференциальных преобразований для расчета электрических цепей с кусочно-линейными характеристиками / Н. Й. Ронто, Э. П. Сеагина // Математическое и программное обеспечение цифрового моделирования вентиляных преобразователей. — К. : Наук. думка, 1973. — С. 27—29.
15. Пухов Г. Е. Перспективні методи математичного моделювання енергетичних об'єктів / Г. Е. Пухов // Вісн. АН УРСР. — 1988. — № 1. — С. 10—20.
16. Пухов Г. Е. Интегральные методы расчета электрических цепей / Г. Е. Пухов // Теоретическая электротехника. — 1966. — Вып. 2. — С. 5—14.
17. Верлань А. Ф. Методы интегральных уравнений в задаче описания и расчета электрических цепей / А. Ф. Верлань // Электрон. моделирование. — 1983. — 5, № 5. — С. 8—12.
18. Мустафа Г. М. Расщепленная кусочно-линейная система как модель устройств преобразовательной техники / Г. М. Мустафа, И. М. Шаранов // Электронные цепи, передача и обработка информации. — К. : Наук. думка, 1979. — С. 197—209.
19. Агапова Н. Б. Моделирование трехфазного мостового выпрямителя на ЦВМ / Н. Б. Агапова, Ю. Б. Федотов, И. М. Шаранов // Силовые полупроводниковые приборы и преобразовательные устройства : Моделирование процессов в приборах и преобразователях. — Саранск : Морд. гос. ун-т, 1982. — С. 79—84.
20. Хэпп Х. Диакоптика и электрические цепи / Х. Хэпп. — М. : Мир, 1974. — 344 с.
21. Петренко А. И. Анализ сложных электронных схем методом разбиения / А. И. Петренко, А. И. Власов, А. П. Тимченко // Вычислительная техника в конструировании и технологии приборостроения. — М. : Знание. — 976 с.
22. Чабан В. И. К применению метода диакоптики в электроэнергетических расчетах / В. И. Чабан // Изв. ВУЗов СССР. Энергетика. — 1983 — №8. — С. 43—47.

An approach to resolving complex semiconducting and superconducting switch converters, based on decomposing the calculated circuit and applying integral equations as the dynamic models for the formed linear sub-circuits, is described and analyzed in the article. The efficiency of the given approach, resulting from the smoothing properties of the integral models and computational economy of the corresponding numeral algorithms, is shown.

Key words: *computer modeling, switch converters, dynamic models, integral equations, decomposition.*

Отримано 16.06.10