

УДК 621.314.632.001.57

## ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ МЕТОДОВ АНАЛИЗА УСТРОЙСТВ СИЛОВОЙ ЭЛЕКТРОНИКИ

Мустафа Г.М.

ВЭИ им. В.И. Ленина, г. Саранск

Федотов Ю.Б.

МГУ им. Н.П. Огарева, г. Саранск

Тел. +7(834-2) 490608, E-mail: [fedyb@lenta.ru](mailto:fedyb@lenta.ru)

**Аннотация.** Рассмотрена проблема представления больших схем устройств силовой электроники при моделировании на вычислительных машинах. Установлено, что разбиение на части по принципу минимизации связей или выделению линейных и не линейных частей еще не обеспечивает эффективности. Предложено использовать комбинации эквивалентных преобразований и разбиений специально класса. Выявлено, что при этом произвольная вентильная схема приводится к канонической форме, состоящей из коммутаторов с замещающими ветвями и линейной цепи соединений.

### Постановка задачи

Силовая электроника является одной из наиболее быстро развивающихся отраслей электротехники. Потребность народного хозяйства в устройствах силовой электроники ежегодно увеличивается. Наряду с ростом единичной мощности и количества, работающих в различных электротехнических системах устройств силовой электроники растут и технические требования к ним, усложняются схемы и режимы их работы. В этих условиях проектирование преобразовательных устройств, отвечающих современным требованиям, должно основываться на более полном и точном учете процессов, протекающих во всей системе электроснабжения, требует всестороннего анализа расчетным путем и без применения электронно-вычислительной техники и программ моделирования становится затруднительным.

С увеличением размеров схем объем вычислений при моделировании быстро нарастает. Для схем замещения преобразователей наряду с общими факторами роста (увеличение размеров произведений матрица векторы), действует еще и мощный дополнительный фактор – с ростом числа ключей растет количество переключений, а с ним – количество переформирований уравнений.

### Метод решения

Средством для сохранения затрат на приемлемом уровне является разбиение на части (диакоптика [1-2]). Разумеется, моделирование связанной системы не может быть сведено к моделированию частей; при разбиении всегда появляются дополнительные этапы расчетов, отображающие взаимодействие частей. Решающее влияние на эффективность оказывает принцип, по которому производятся разбиения.

### Полученные результаты

При рассмотрении графов цепей представляется, что наилучшим является рассечение их по местам на меньшей узловой связности. При выполнении разбиений по этому принципу обеспечивается минимальное количество дополнительных уравнений, описывающих взаимодействие.

Однако они оказываются неявными уравнениями общего вида. Уравновешивание взаимодействий [3], то есть решение этих неявных уравнений, оказывается затруднительным, в особенности в тех случаях, когда входящие в уравнения взаимодействия функции скачкообразно изменяются в моменты переключений. Поэтому для схем с ключами разбиение по принципу минимума узловой связности лишь в редких случаях оказывается полезным.

Второй принцип разбиения предусматривает отделение линейной и нелинейной или неизменной и изменяющейся частей схемы. Для схем замещения преобразователей он приводит к разбиению на коммутаторы и линейные многополюсники и к описанию системы инте-

гральными уравнениями [4]. В экстремальных условиях, когда линейные многополюсники очень велики, а число входов их мало, такие разбиения позволяют построить весьма эффективные процедуры моделирования. Однако в рядовых случаях и этот второй тип разбиений пользы не приносит.

Положив в основу разбиений принцип минимума операций по описанию взаимодействия частей, приходим к третьему типу разбиений. Применительно к схемам замещения преобразователей они характеризуются тем, что уравнения частей формируются независимо друг от друга, при переключениях формируются заново уравнения только той части, где произошло переключение, а операции по взаимодействию сводятся к простой подстановке.

В [5] рассмотрен алгоритм разделения цепей на части - алгоритм E - разделения, обладающий тем свойством, что при переключении любого ключа уравнения переформируются только той части, в которую этот ключ входит. Это свойство требует, чтобы расчетные уравнения взаимодействия частей не зависели от собственных параметров ветвей, а в качестве них использовались только структурные уравнения замещающей цепи. В этом случае уравнения соединения частей не изменяются при изменении параметров в какой либо части, поскольку они не зависят от параметров вообще, и тем более, изменение параметров внутри одной части не может передаться через замещающую цепь в другую часть и потребовать изменения уравнений этой другой части. Из этого свойства следует, что разделение относится к E - классу тогда и только тогда, когда при объединении частей не возникают новые R- или C-контурные или новые L-сечения, т.е. все R-, C-контурные и все L-сечения целиком входят в ту часть, в которую входит хотя одна их ветвь. Достаточность сформулированного условия становится ясной при рассмотрении последовательности расчета ELRCJ - цепи (цепи без идеальных ключей).

Нетривиальные E - разбиения можно найти, если рассмотреть последовательность вычислений при численном интегрировании уравнений цепи. При использовании явных методов интегрирования дифференциальных уравнений цепи, расчетные уравнения выражают производные переменных состояния через их значения. Рациональная последовательность вычисления производных имеет многоступенчатый характер. На первой ступени вычисляются переменные R-ветвей; на этой ступени остальные ветви (L, C) рассматриваются как источники тока и напряжения. Затем рассматривается C-цепь, получаемая из исходной цепи заменой R-, L-ветвей источниками тока, и L-цепь, получаемая заменой C-, R-ветвей источниками напряжения.

Сама исходная цепь, как правило, двухсвязна и «разделяющих» источников не содержит. Однако вспомогательные цепи, рассматриваемые на каждой ступени, часто распадаются на несвязные или односвязные части или делятся "разделяющими" источниками. Для цепи без ключей именно эти части являются минимальными E-частями.

Не каждая схема с ключами имеет разбиения E-типа, но во всех случаях, когда они существуют, применение их полезно. Подытоживая можно охарактеризовать ситуацию так:

- разбиение двух типов осуществимы для любой схемы, однако оказывается полезными только в сравнительно редких экстремальных ситуациях;

- E-разбиения полезны всегда, когда возможны, но возможность их практического применения ограничена.

Таким образом, идея разбиения сама по себе еще не дает общего средства для эффективного моделирования больших схем. Необходимым дополнением ее оказались идея перестройки схем замещения. С нею в процедуры моделирования привносятся понятия и методы синтеза цепей. Одну и ту же входную или передаточную функцию можно реализовать различными схемами [6, 7], и любую схему можно рассматривать как одно из воплощений класса эквивалентных схем. Исходя из этого можно ставить вопрос о перестройки схемы замещения, то есть переходе от исходной первоначально заданной схемы к эквивалентной ей более удобной для моделирования схеме. Перестройка многополюсников, входящих в схемы с коммутаторами, заключается в выделении из многополюсников подсхем, асимптотически отображающих их в окрестности бесконечно большой частоты. Эти подсхемы присоединяются к

коммутатору. Остатки многополюсников при этом оказываются  $E$  – отделимыми частями схемы. Широкое использование перестроек возможно лишь при условии, что они выполняются автоматически и не усложняют постановку задачи. Для этого нужно произвести разработку общих формализованных алгоритмов. Предпринятое исследование показало, что всякая схема с ключами может быть перестроена так, что она распадается на  $E$  - отделимые под-схемы двух типов:

-многополюсники без ключей, то есть подсхемы с постоянной структуры;

- коммутаторы с присоединенным к ним минимальным числом собственных ветвей, не более одной ветви на каждый вход коммутатора; совокупность присоединенных к коммутатору ветвей может рассматриваться как некая оболочка его.

Такая формулировка задачи анализа больших схем, очевидно, является оптимальной как с вычислительной точки зрения, так и по своей физической наглядности, поскольку она явно проявляет влияние переключений на процессы, которое и составляет существо преобразователей. Можно отметить, что коммутаторы с их оболочками оказываются часто классическими схемами преобразовательной техники, освобожденными за счет перестройки и разбиения от второстепенных деталей. Исходя из сказанного, представление больших преобразовательных схем в виде совокупности  $E$  – отделимых коммутаторов с минимальными оболочками на них, можно рассматривать как каноническое.

### Литература

1. Крон Г. «Исследование сложных систем по частям – диакоптика» М. «Наука» 1972г.
2. Хэпп Г.Х. Диакоптика и электрические цепи. М., «Мир» 1974 г.
3. Пухов Г.Е. Анализ электрических цепей методом уравнивания – электронное моделирование, 1982г., №6.
4. Мустара Г.М., Федотов Ю.Б. Метод интегральных уравнений для машинного анализа переходных процессов преобразовательных устройств. Электротехника, 1983, №9, с. 11-14.
5. Мустара М.Г. Анализ по частям электрических цепей с идеальными ключами. Электричество, 1980, №11, с. 39-44.
6. Гиллемин Э.А. Синтез пассивных цепей М., «Связь». 1970 г.
7. Карни Ш. Теория цепей. Анализ и синтез. М., «Связь» 1973 г.