

УДК 621.3

**ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРОГРАММ МОДЕЛИРОВАНИЯ
УСТРОЙСТВ СИЛОВОЙ ЭЛЕКТРОНИКИ****Федотов Юрий Борисович**

кандидат технических наук

Нестеров Сергей Александрович

кандидат технических наук

Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарева, Саранск

Мустафа Георгий Маркович

кандидат технических наук

Всероссийский электротехнический институт им. В.И. Ленина, Москва

author@apriori-journal.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 не обеспечивает эффективности. Предложено использовать комбинации эквивалентных преобразований и разбиений специально класса. Выявлено, что произвольная вентильная схема приводится к форме, состоящей из коммутаторов с замещающими ветвями и линейной цепи соединений. Разработана структура данных и комплекса программ с гибкой связью, в котором в зависимости от типа задачи процедуры разбиения-перестройки либо применяются, либо нет.

Ключевые слова: вентильная схема; кусочно-линейный коммутатор; диакоптика; эквивалентные цепи; многополюсники; замещающая цепь; программы моделирования; процедуры разбиения – перестройки; структура данных; структура программы.

INCREASE IN EFFICIENCY OF MODELLING PROGRAMS OF POWER ELECTRONIC DEVICES

Fedotov Yury Borisovich

candidate of technical sciences

Nesterov Sergey Aleksandrovich

candidate of technical sciences

Ogaryov Mordovia State University, Saransk

Moustapha Georgy Markovic

candidate of technical sciences

All-Russian electrotechnical institute of V.I. Lenin, Moscow

Abstract. The article deals with the problem representation of big schemes of power electronic devices while modeling on computers. It is established that splitting into parts on the principle of links minimization or singling out linear or non-linear parts does not provide efficiency yet. We offer to use combination of equivalent transformations and splittings of special class. Our investigation has revealed that any arbitrary valve scheme comes to it form which consist of some switches with replacement branches and a linear commutation circuit. We have also developed the structure of data and of a program complex with a flexible link which, depending on the type of a given problem, splitting procedures are either applied or not.

Key words: valve circuit; piecewise-linear and linear switch; diacoptics; equivalent circuit; multiterminal network; replacement circuit; valve scheme; modeling programs; splitting-reorganization procedures; data structure; program structure.

Постановка задачи

Силовая электроника является одной из наиболее быстро развивающихся отраслей электротехники. 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 интегральными 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.

Известен алгоритм разделения цепей на части [5] – 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-контуров или новые L-сечения, т.е. все R-, C-контуров и все L-сечения целиком входят в ту часть, в которую входит хоть 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 осуществимо 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 подсхемы 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 коммутато-

ра; совокупность присоединенных к коммутатору ветвей может рассматриваться как некая оболочка его.

Для каждой подсхемы по ее контурной матрице обычным образом составляется система уравнений. Для формулировки ее введем следующие смешанные векторы:

$q_i = \begin{bmatrix} u_{C,D} \\ i_{L,X} \end{bmatrix}_i$ – вектор переменных состояния i -ой подсхемы, составленной

из напряжения емкостей дерева и токов индуктивностей хорд;

$V_{q,i} = \begin{bmatrix} u_\lambda \\ i_\xi \end{bmatrix}_i$ – вектор зависимых источников, непосредственно связанных

с переменными состояния;

$V_{r,i} = \begin{bmatrix} u_\rho \\ i_\eta \end{bmatrix}_i$ – вектор зависимых источников, связанных с резистивными

ветвями;

$W_{q,i} = \begin{bmatrix} i_\lambda \\ u_\xi \end{bmatrix}_i$ – вектор дополнительных переменных источников V_q ;

$W_{r,i} = \begin{bmatrix} i_\rho \\ u_\eta \end{bmatrix}_i$ – вектор дополнительных переменных источников V_r .

В систему уравнений подсхемы входят дифференциальные уравнения

$$\frac{d}{dt} q_i = \bar{A}_i q_i + \bar{B}_i V_{q,i} + \bar{C}_i V_{r,i}, \quad (1)$$

и алгебраические уравнения для дополнительных переменных

$$W_{q,i} = \bar{D}_i q_i. \quad (2)$$

$$W_{r,i} = \bar{F}_i q_i + \bar{H}_i V_{r,i}. \quad (3)$$

Система уравнений такого вида составляется для каждой подсхемы $i = 1, 2 \dots N$ независимо от всех прочих подсхем. Каждая из них является незамкнутой. Недостающие уравнения взаимодействия подсхем зада-

ются непосредственно контурной матрице схемы межсоединений (30).

Введем «глобальные» векторы

$$\begin{cases} V_q = \text{col}(V_{q,1}, V_{q,2} \dots V_{q,m}), \\ V_r = \text{col}(V_{r,1}, V_{r,2} \dots V_{r,m}), \\ W_q = \text{col}(W_{q,1}, W_{q,2} \dots W_{q,m}), \\ W_r = \text{col}(W_{r,1}, W_{r,2} \dots W_{r,m}). \end{cases} \quad (4)$$

Структурные уравнения схемы межсоединений связывают эти векторы следующим образом

$$V_r = XW_q, \quad (5)$$

$$V_q = YW_r + WW_q. \quad (6)$$

При численном решении системы (1-6) вычисления вводятся в последовательности, указанной на алгебраической диаграмме рис. 1. В узлах диаграммы указаны вычисляемые величины – а у ребер соответствующие множители из (1-6) характерной чертой диаграммы является чередование «локальных» этапов, при которых вычисляются поочередно переменные, определяемые внутри подсхем, с «глобальными» этапами, на которых вычисляются переменные, определяемые схемой межсоединений. Сами «локальные» этапы выполняются в точности так же, как и при расчете одной независимой схемы. Отличие лишь в том, что между локальными этапами вкраплены подстановки по структурным уравнениям схемы межсоединений. В случае произвольных разбиений процедура расчета по частям существенно сложнее. Возможность выполнять все этапы расчета подсхем так, будто они независимы, и лишь чередовать эти этапы подстановками в неизменные уравнения схемы межсоединений, обеспечивается только при разбиениях E-типа. Необходимо подчеркнуть, что в определениях и доказательствах нигде не оговаривалась линейность или стационарность ветвей, но лишь постоянство структуры; при переходе к нелинейным схемам изменяется лишь характер расчетов подсхем, в целом же процедура сохраняется. Именно

при расчете нелинейных схем E-разбиение имеет особое значение, позволяя заменить решение больших систем нелинейных алгебраических уравнений поочередным решением малых систем и замкнуть итерационные процедуры внутри E-частей.

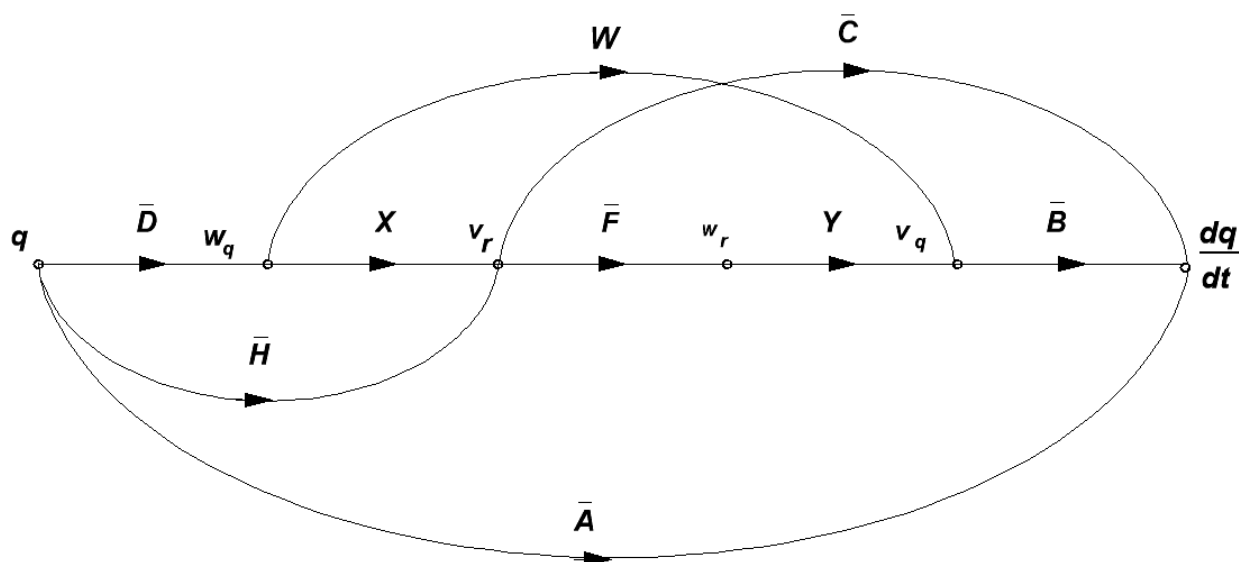


Рис. 1. Чередующая диаграмма вычислений при анализе по частям

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.

По комплексу показателей разложение это является оптимальной формой представления больших преобразовательных схем для анализа их на вычислительных машинах.

Разработанный формальный аппарат позволяет строить на основе его программное обеспечение, осуществляющее каноническое разложение автоматически. Тем самым теоретическая возможность превращается в практическое средство повышения эффективности решения трудоемких задач анализа больших схем.

Остановимся несколько подробнее на применении программ разбиения и перестройки. Было бы неверным строить универсальный жестко связанный программный комплекс моделирования с встроенными процедурами разбиения-перестройки, ибо на массовых задачах небольшого размера последние только снижают эффективность. С другой стороны – нецелесообразно и построение отдельного специализированного комплекса для анализа больших схем. Правильным является компромиссное решение, заключающееся в построении комплекса программ с гибкой связью, в котором в зависимости от типа задачи процедуры разбиения-перестройки либо применяются, либо нет.

Базовая система программ моделирования (MODEL) в первую очередь должна, разумеется, обеспечивать эффективное решение массовых задач анализа небольших схем. Наряду с этим, для использования в комплексе с программами разбиения-перестройки (RPS), в базовой системе MODEL должны быть предусмотрены некоторые дополнительные возможности. Комплекс с гибкой связью может быть эффективен только в том случае, если необходимые дополнения несущественно усложняют базовую систему.

Блок-схема, отображающая это разложение, представлена на рис. 2. От общей блок-схемы кусочно-непрерывной расщепленной системы [8] она отличается более детализированной структурой аналоговой подсистемы. Схемная часть (СХ) аналоговой подсистемы расщеплена на коммутаторы (КОМ) с их оболочками (ОБ). Кроме того, явно показан блок межсоединений (СМС). Существенно, что многополюсники с неизменной структурой (МП), отделенные при перестройках от коммутато-

ров, введены в состав функциональной аналоговой подсистемы (ФБ). Это обусловлено тем, что при E-разбиениях МП могут быть представлены на функциональном уровне, т.е. своими уравнениями.

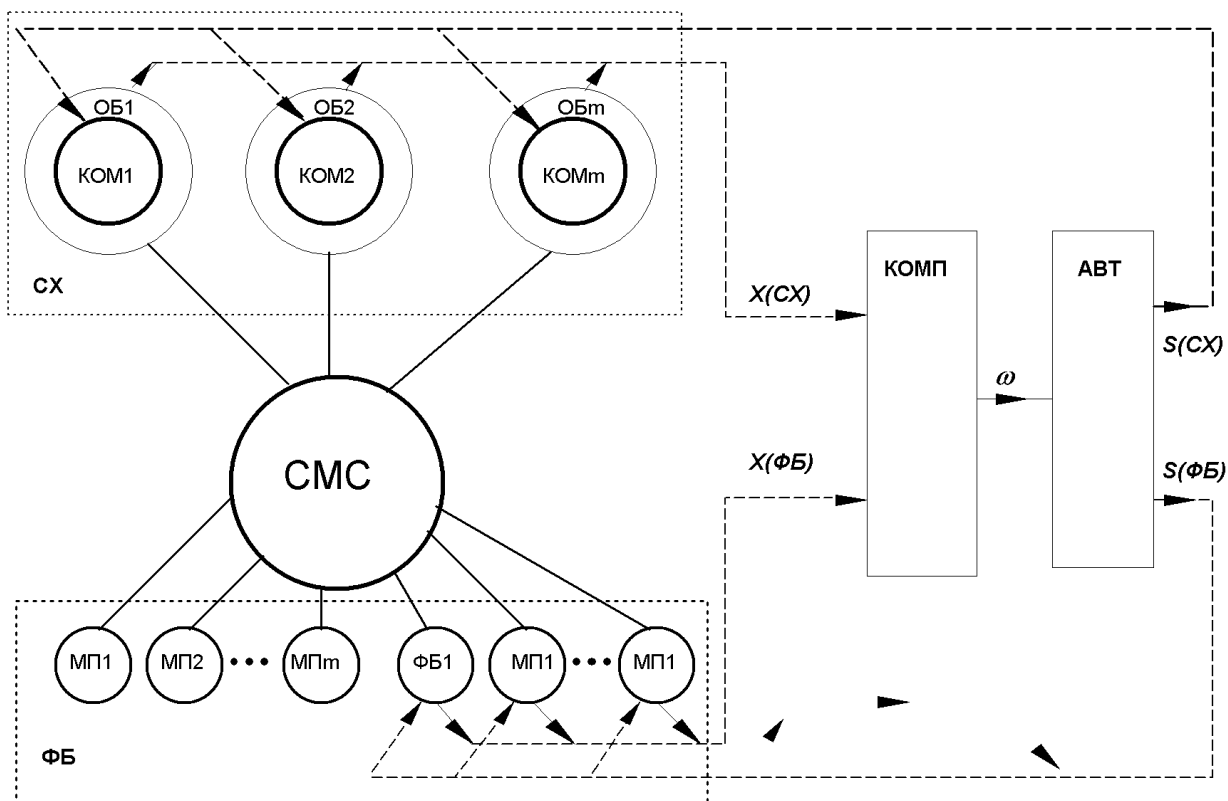


Рис. 2. Разложение непрерывной подсистемы

Первое дополнение, которое должно быть внесено в базовую систему MODEL для обеспечения анализа по частям, это дифференциация структуры данных все массивы базовой системы должны быть разделены на блоки соответственно с разбиением на подсхемы. Кроме того, дополнительно нужно хранить матрицу связей схемы межсоединений.

Второе дополнение относится к последовательности расчетов. Оно иллюстрируется рис. 3б на примере последовательности действий при вычислении производных переменных состояния.

Для сравнения на рис. 3а показана обычная последовательность действий, когда расчет ведется в целом. В блоках LOC-R, LOC-L, LOC-C поочередно обрабатываются однородные составляющие $G^{(R)}$, $G^{(C)}$, $G^{(L)}$, анализируемой схемы. Значения переменных состояния берутся для

этого из массива X , а коэффициент уравнений – из массива CUR . Результаты расчета частично – в массив производных DX . Коэффициенты уравнений GUR вычисляются процедурой формирования уравнений исходя из значений в массивах связи (SV) и параметров (PAR). При переходе к анализу разложенной на E -части схемы, программы $LOC-R$, $LOC-L$, $LOC-C$ не изменяются. Каждая из них выполняет расчеты для подсхем поочередно так, будто бы подсхемы эти полностью независимы в соответствии с этим на рис. 3б программы эти охвачены циклом по номерам подсхем. Между «локальными» программами, выполняемыми для отдельных подсхем, в соответствии с чередующейся диаграммой рис. 1, вкраплены «глобальные», программы, осуществляющие подставки по уравнениям схемы межсоединений. Процедура формирования расчетных уравнений при переходе к анализу разделенной на E -части схемы не изменяется вообще, т.к. при каждом подключении формируются уравнения одной только E -части.

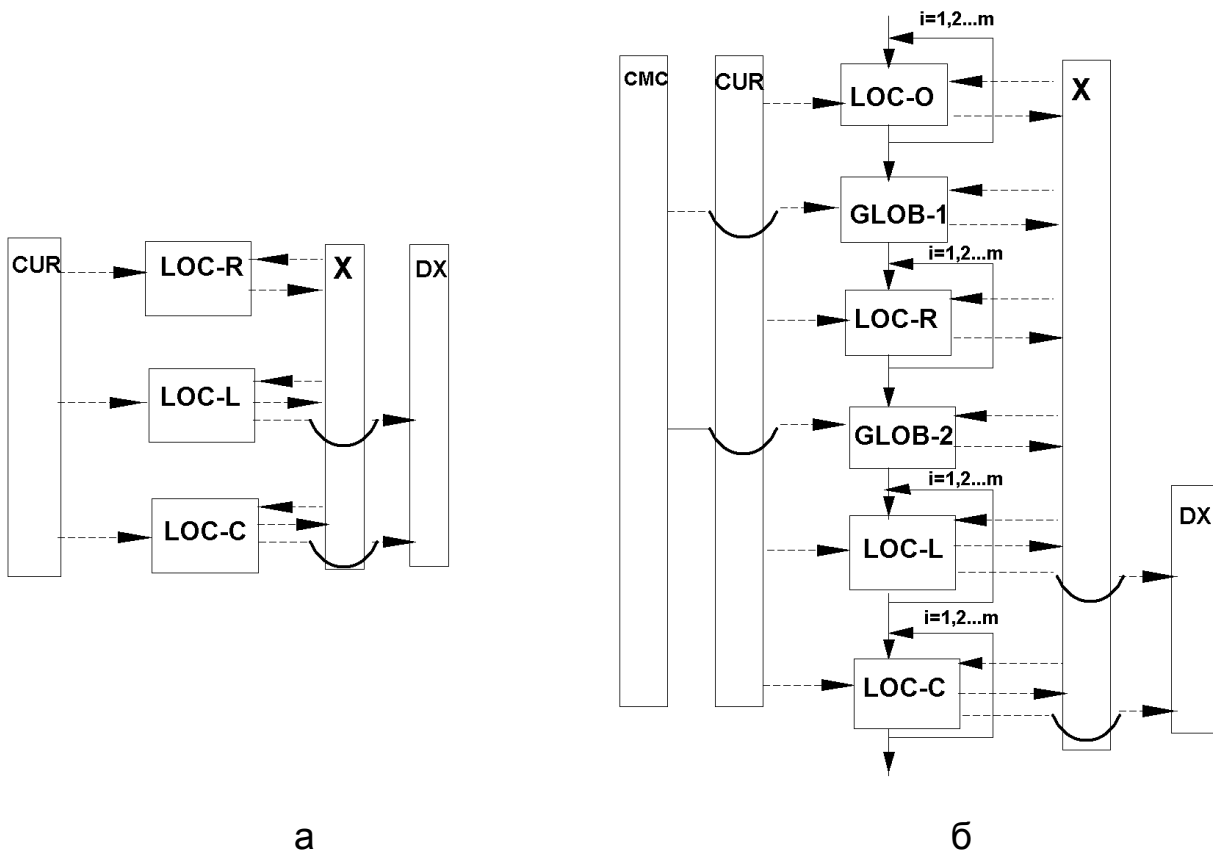


Рис. 3. Последовательность вычислений производных при анализе в целом (а) и при разбиении на E -части

Введение в систему MODEL дополнительных блоков GLOB 1, 2, осуществляющих подстановки в уравнения межсоединений, является совершенно несущественным усложнением ее. Единственным заслуживающим упоминания усложнением, обусловленным рассматриваемым здесь расширением функций, является добавление еще одного уровня иерархии в структуру данных. Это усложнение не является слишком обременительным, и полностью окупается теми преимуществами, которые дает комплекс моделирования с гибкой связью (рис. 4), позволяющий достаточно эффективно рассчитывать малые схемы, не привлекая разбиений и перестроек, и в то же время – в случае необходимости переходить к анализу по частям с использованием программ разбиения – перестройки.

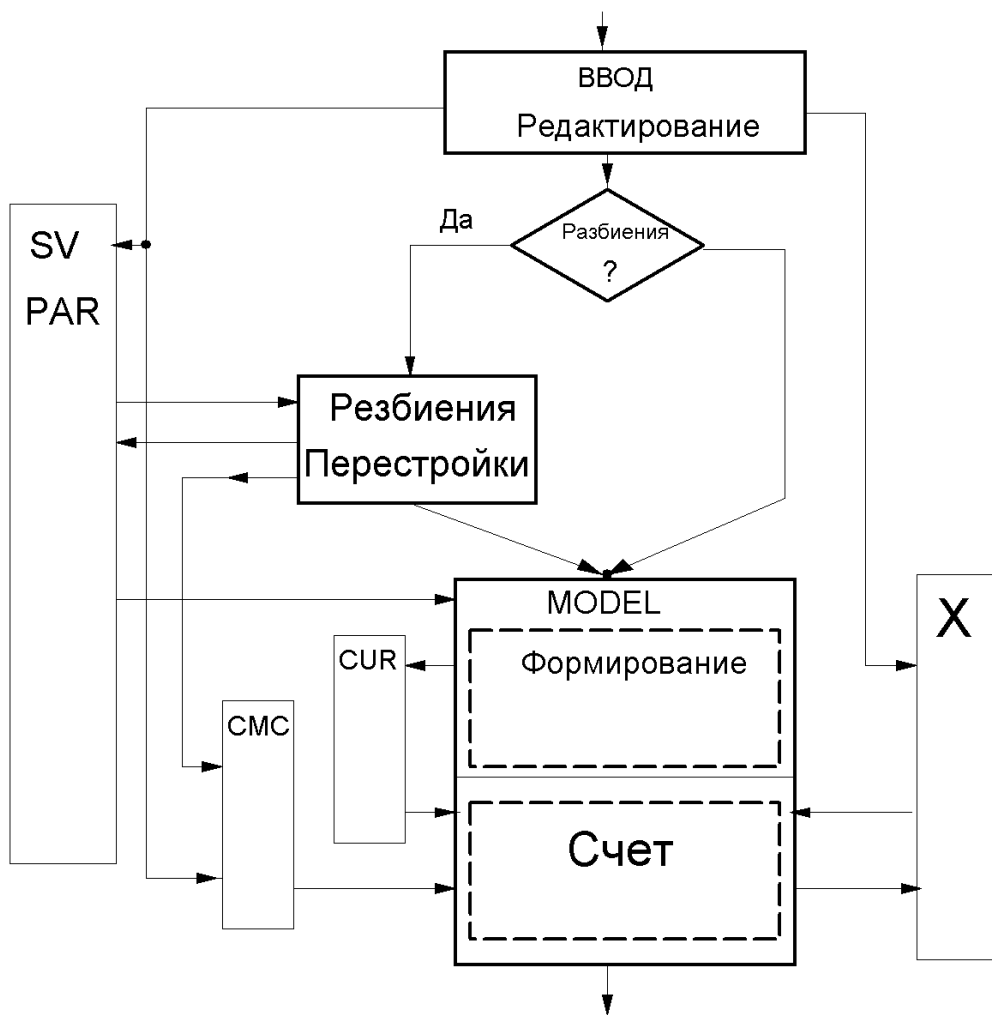


Рис. 4. Комплекс программ моделирования с гибкой связью системы разбиения – перестройки с базовой системой MODEL

Выводы

Исходя из интуитивных представлений о разбиениях с особо простыми законами взаимодействия и о перестройках, выделяющих из многополюсников асимптотические значения их входных сопротивлений, выработаны строгие формальные понятия, а затем установлены связи между ними и вытекающие из них следствия. Главным результатом развитой теории является то, что для произвольной схемы с ключами выявлено существование канонического разложения, которое представляет собой совокупность коммутаторов с минимальными оболочками, взаимодействие между которыми относится к простому E-типу.

Список использованных источников

1. Крон Г. Исследование сложных систем по частям – диакоптика. М.: Наука, 1972.
2. Хэпп Г.Х. Диакоптика и электрические цепи. М.: Мир, 1974.
3. Пухов Г.Е. Анализ электрических цепей методом уравнивания // Электронное моделирование. 1982. № 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.
7. Карни Ш. Теория цепей. Анализ и синтез. М.: Связь, 1973.
8. Федотов Ю.Б. Математическое моделирование вентильных преобразователей. Саранск: Изд-во Мордов. ун-та, 1994. 92 с.