

# О СПОСОБЕ ФОРМАЛИЗАЦИИ ПРИМЕНЕНИЯ ЗАКОНОВ ОМА И КИРХГОФА ДО УРОВНЯ ПРОГРАММНЫХ АЛГОРИТМОВ

Н.В. Клиначев, Н.В. Клиначева

Применение законов Ома и Кирхгофа формализовано до уровня программных алгоритмов более двадцати лет назад и составляет ноу-хау программ Spice-семейства. Решением данной задачи является универсальный алгоритм полной деинкапсуляции произвольной физической принципиальной схемы через уровень схем замещения к уровню математической блок-схемы. Разработанная авторами библиотека SimLib4Visio - это первый инструмент, визуально демонстрирующий решение этой задачи.

Гибридный чертеж, состоящий из совокупности условно графических обозначений (УГО) физических элементов и математических блоков - это новая концепция представления математических моделей (рис. 1). Первая его особенность заключается в том, что на одном чертеже одновременно присутствуют два типа связей [1]. Связь первого типа (направленная) определяет схему передачи возвращаемых значений между математическими блоками. Связь второго типа (ненаправленная) предназначена для соединений физических элементов.

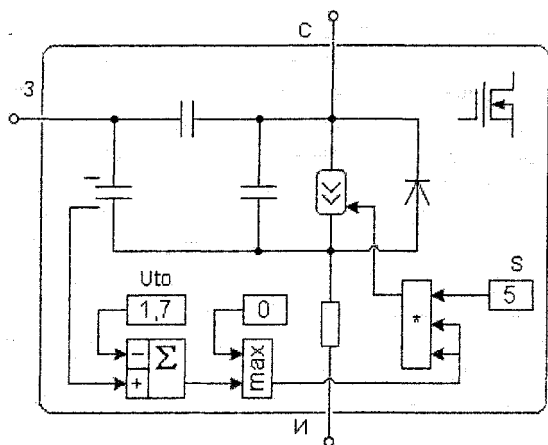


Рис. 1. Гибридная схема замещения n-Mos транзистора

Состояние любого элемента, преобразующего энергию, определяется двумя физическими величинами (разностью потенциалов и током), поэтому ненаправленные проводники можно воспринимать как шину из двух проводников первого типа. Вторая особенность гибридных чертежей математических моделей состоит в том, что УГО RLC и EJ-элементов могут варьироваться в зависимости от того, являются ли элементы пограничными (между блок-схемой и схемой физической принципиальной) или нет. На рис. 2 первый R-элемент особенностей не имеет. Основным параметр второго эле-

мента (номинал сопротивления) можно контролировать направленным графом. Третьим представлен элемент, чье состояние может быть передано направленному графу.

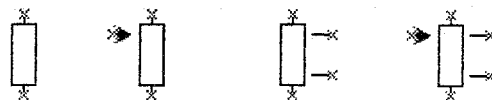


Рис. 2. Варианты УГО R-элемента

Техника моделирования поведения систем может быть основана на итерации токов или на итерации потенциалов. Последний вариант имеет ряд преимуществ. Авторами разработаны соответствующие модели: RLC, EJ-элементов, узла энергоцепи и идеального математического диода (D-элемент). Ниже приведено их подробное описание. Это универсальные математические модели с идеальными свойствами. Закрепленные за ними УГО допустимо менять для моделирования цепей с другой энергонесущей материей.

## 1. Активное сопротивление (R-элемент)

Модель R-элемента показана на рис. 3. Из верхнего и нижнего шинных проводников от модели узлов в блок-схему R-элемента поступают величины потенциалов. Сумматор вычисляет их разность, уточняя напряжение на элементе. Для вычисления тока выходной сигнал сумматора делится на параметр (сопротивление элемента). Далее, величина тока возвращается в шинные проводники для передачи к моделям узлов. Причем в один из узлов ток возвращается с инверсным знаком (раз из одного вытекает, значит в другой втекает).

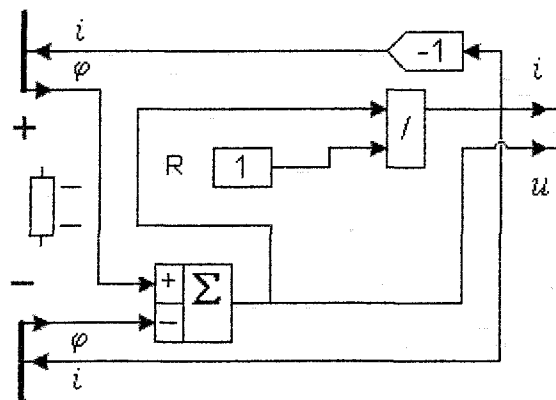


Рис. 3. Модель R-элемента

При смене полярности включения дополнительно меняется знак разности потенциалов (входы сумматора имеют разный знак). Таким обра-

зом, модель R-элемента не является несимметричной относительно выводов. Однако внутренние координаты модели  $i$  и  $u$  остаются чувствительными к полярности включения, и этот факт позволяет использовать их в качестве выходов датчика тока и разности энергетических потенциалов.

**2. Реактивное сопротивление индуктивного характера (L-элемент)**

Из верхнего и нижнего шинных проводников, от моделей узлов, в блок-схему L-элемента, поступают величины потенциалов (рис. 4). Сумматор вычисляет их разность, уточняя напряжение на элементе.

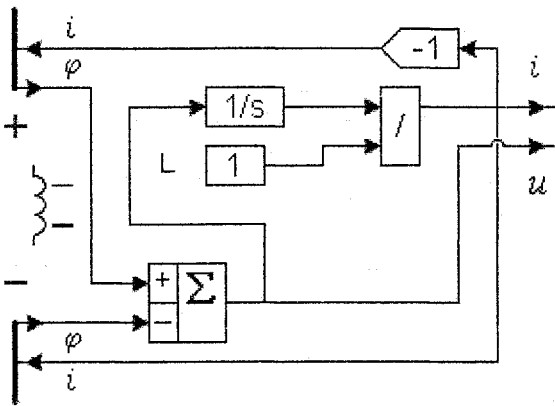


Рис. 4. Модель L-элемента

Для вычисления тока выходной сигнал сумматора интегрируется и делится на параметр (индуктивность элемента). Далее, величина тока возвращается в шинные проводники для передачи к моделям узлов.

**3. Реактивное сопротивление емкостного характера (C-элемент)**

Из верхнего и нижнего шинных проводников, от моделей узлов, в блок-схему C-элемента, поступают величины потенциалов (рис. 5).

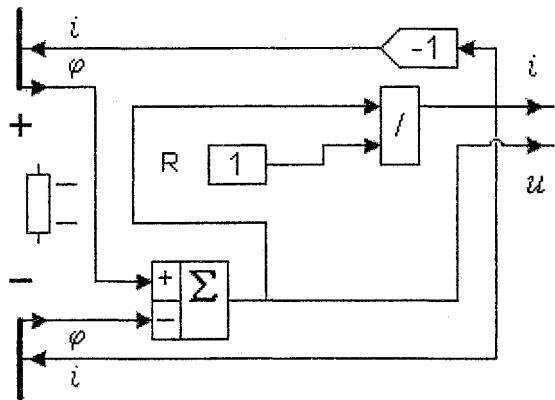


Рис. 5. Модель R-элемента

Сумматор вычисляет их разность, уточняя напряжение на элементе. На дополнительный (верхний) вход сумматора поступает подбираемая вели-

чина, уравниваемая блок-схемой с напряжением на элементе, поскольку на выходе сумматора должен наблюдаться нулевой баланс. Упомянутое напряжение (выходная координата интегратора) является функцией другой итерированной с помощью блока *unknown* координаты - тока элемента, который, после деления на параметр (емкость элемента), поступает на вход интегратора. Величина тока возвращается в шинные проводники для передачи к моделям узлов.

**4. Источник движущей силы (E-элемент)**

Из верхнего и нижнего шинных проводников, от моделей узлов, в блок-схему E-элемента, поступают величины потенциалов (рис. 6).

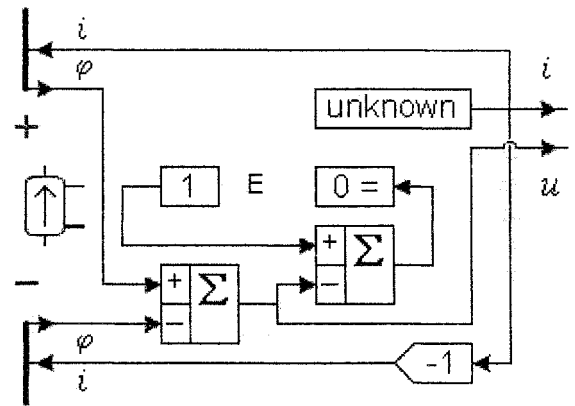


Рис. 6. Модель E-элемента

Первый сумматор вычисляет их разность, уточняя напряжение на элементе. Вторым сумматор используется для итеративного уравнивания вычисленного напряжения с заданным значением, которое поступает с блока *const* (на выходе этого сумматора должен наблюдаться нулевой баланс). На величину уравниваемой разности потенциалов влияет другая итерированная с помощью блока *unknown* координата - ток элемента, которая через шинные проводники передается к моделям узлов и влияет на разницу потенциалов. В один из узлов ток возвращается с инверсным знаком. Если сравнить модель источника, с моделями пассивных элементов, то можно заметить, что инверсии подвергается знак тока в другом шинном проводнике. Это объясняется тем фактом, что для активных и пассивных элементов условно положительное направление тока разное.

**5. Источник тока энергонесущей материи (J-элемент)**

Из верхнего и нижнего шинных проводников, от моделей узлов, в блок-схему J-элемента, поступают величины потенциалов (рис. 7). Сумматор вычисляет их разность, уточняя напряжение на элементе. Выходная координата блока *const* (ток элемента) через шинные проводники передается к моделям узлов.

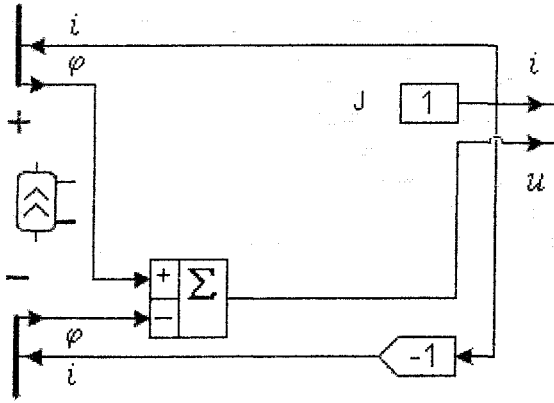


Рис. 7. Модель J-элемента

### 6. Узел энергоцепи

Узел энергоцепи - это место разветвления энергонесущей материи. Процесс разветвления подчиняется постулату о сохранении материи. Условное графическое обозначение узла энергоцепи - это точка в месте соединения элементов на схеме физической принципиальной. Модель узла энергоцепи показана на рис. 8. Как видно, она является свободно масштабируемой (количество шинных проводников поступающих от элементов цепи может быть любым). Из каждого шинного проводника на сумматор, поступает информация о токе элементов» подключенных к узлу. На выходе сумматора должен наблюдаться нулевой баланс, что отвечает требованию постулата о сохранении энергонесущей материи. Баланс обеспечивается итерацией потенциала узла с помощью блока *unknown*, выходной сигнал которого поступает ко всем подключенным к узлу моделям элементов энергоцепи. Вариация потенциала узла вызывает вариацию токов элементов, чем и достигается нулевой баланс.

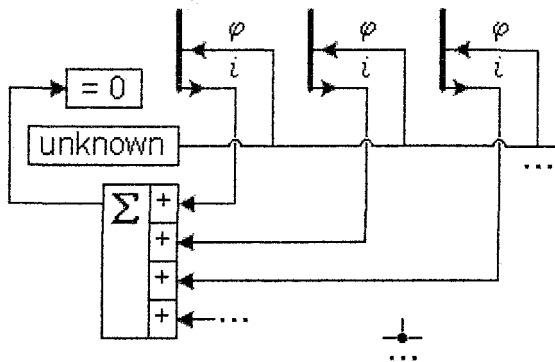


Рис. 8. Модель узла

Сравним по блок-схемам терминалы шинных проводников у моделей узлов и у моделей элементов. Все модели элементов (*RLC* и *EJ*) имеют одинаковые терминалы шинных проводников - от модели в шину поступает координата тока, а из шины к модели передается координата потенциала. Таким образом, модели элементов невозможно соединить между собой. Ответным для термина-

лов элементов является только терминал узла. В частном случае это приводит к тому, что место соединения двух элементов, в котором не происходит ответвление энергонесущей материи, при математическом моделировании должно быть представлено моделью узла.

### 7. Идеальный математический диод (D-элемент)

Идеальный или математический диод - это идеализированная математическая модель пассивного элемента энергоцепи, который беспрепятственно пропускает энергонесущую материю в прямом направлении и не пропускает или оказывает очень большое сопротивление её движению в обратном направлении.

Модель математического диода невозможно построить на параметрической модели R-элемента. Такая модель конфликтует с методическим ограничением итерационного решателя математических ядер, в случае если  $Rd \rightarrow 0$  или  $Rdb \rightarrow \infty$ . Причина заключается в том, что использовать только разность потенциалов для переключений нельзя - на прямом участке характеристики она колеблется в итерациях вокруг нуля (погрешность решателя). Ток нельзя использовать на обратном участке по той же причине. Ситуация усложняется тем, что идея построения моделей на основе итерации потенциалов накладывает свое ограничение - ток должен быть сформирован самой моделью элемента.

Модель D-элемента показана на рис. 9. Ключом к пониманию принципа построения модели является тот факт, что когда выходной сигнал блока *unknown* меньше нуля, он ассоциируется с обратным напряжением на элементе, в противном случае - с прямым током.

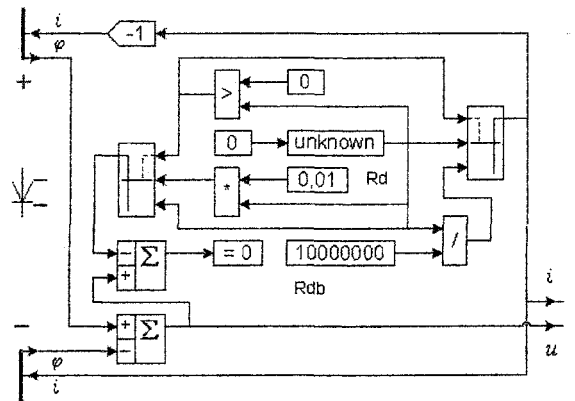


Рис. 9. Модель D-элемента

Если математическое ядро находит баланс при положительном значении сигнала на выходе блока *unknown*, то состояние модели расшифровывается следующим образом. На выходе компаратора будет логический ноль, и мультиплексоры будут пропускать сигналы со среднего входа. Таким образом, выходной сигнал блока *unknown* -

прямой ток диода - через правый мультиплексор будет возвращён в шинные проводники для передачи к моделям узлов. Через левый мультиплексор прямое падение напряжения (полученное по закону Ома умножением тока на параметр  $Rd$ ) поступит на верхний сумматор для итерационного уравнивания разностью потенциалов, которая поступает с узлов и вычисляется нижним сумматором.

Если же математическое ядро находит баланс при отрицательном значении сигнала на выходе блока *unknown*, то состояние модели расшифровывается иначе. На выходе компаратора будет логическая единица, и мультиплексоры будут пропускать сигналы с нижнего входа. Следовательно, выходной сигнал блока *unknown* - обратное напряжение на диоде - через левый мультиплексор поступит на верхний сумматор для итерационного уравнивания с поступающей с узлов разностью потенциалов вычисленной нижним сумматором. Через правый мультиплексор обратный ток диода (полученный по закону Ома делением напряжения на параметр  $Rdb$ ) будет возвращён в шинные проводники для передачи к моделям узлов.

И в том и в другом случае, к одному из узлов ток возвращается с инверсным знаком. Возможны вариации представленной блок-схемы. Например, при построении моделей более сложных устройств, на один из двух контрольных выходов удобней подавать не разность энергетических потенциалов  $u$ , а выходную координату компаратора, которая (в отличие от координат  $i$  и  $u$ ) однозначно свидетельствует о том, на каком участке характеристики работает модель.

### 8. Унарный ввод в бинаправленную шину (B2W-элемент)

B2W-элемент - это терминал бинаправленной шины, для того ее конца, который подходит от узла к элементу (рис. 10). Он используется для графического представления деинкапсулирован-

ных до уровня блок-схемы моделей элементов схем замещений или физических устройств (см. рис. 3-7, 9, но не 8). Типовой ситуацией применения B2W-элемента является отладка новой модели физического устройства или разработка альтернативной для «защиты» в математическом ядре. При использовании элемента к направленным терминалам следует корректно подключать координаты тока и энергетического потенциала.

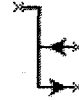


Рис. 10. B2W-элемент

Для проверки адекватности представленных моделей составлялись и тестовые схемы, состоящие из 40-70 элементов (в эквиваленте до 400 математических блоков). Используемое для симуляции моделей математическое ядро [2] конфигурировалось неоднократно, по-разному, и достаточно масштабно. Исследования проводились как во временном домене, так и в частотном. Опираясь на статистику, авторы сделали вывод об отсутствии ошибок в представленном методе формализации применения законов Ома и Кирхгофа.

### Литература

1. Клиначев КВ., Клиначева Н.В. Использование бинаправленных графов в мультидоменном физическом моделировании // Физико-математическое моделирование систем: Материалы II Междунар. семинара. Ч. 2: Моделирование технических систем. Математическое и программное обеспечение систем компьютерного моделирования. - Воронеж, 2005. - С. 107-111.
2. Клиначев Н.В., Клиначева Н.В. Разработка математического ядра моделирующей программы: Препринт. — Челябинск: Изд-во ЮУрГУ, 2006. - 30 с.