1. * 1. Анализ топологии структурной схемы

Анализируя информационные потоки в структурной схеме, можно определить сам факт взаимосвязи входа одного блока с выходом другого блока, но нельзя ничего сказать о характере этой связи. Характер связи определяется особенностями модели самого блока, а именно тем, как влияет тот или иной вход блока на его выход.

Если выход блока явно зависит от его входов, то на момент расчета этого блока все его входы должны быть определены. В математической модели таких блоков уравнения для выходов имеют следующий вид:

|  |  |
| --- | --- |
|  | (2.9) |

Примером блоков такого типа является усилитель сигнала, передаточная функция общего вида, где порядок числителя равен порядку знаменателя, блок *Переменные состояния* с ненулевой матрицей D и т.д.

Если в математической модели блока уравнение для выхода имеет вид

|  |  |
| --- | --- |
|  | (2.10) |

то такой блок называется приоритетным. Выходы приоритетных блоков являются функцией только их внутренних атрибутов (параметров и состояний блока). Примерами приоритетных блоков являются источники сигнала, динамические блоки и т.д.

Объединяя уравнения вида (2.9), (2.10) всех блоков структурной схемы и, учитывая, что входным сигналом блока является выход другого блока или переменная, зависящая от модельного времени *t*, получим уравнения всей системы в виде:

|  |  |
| --- | --- |
|  | (2.11) |
|  | (2.12) |

где *х* - вектор всех переменных состояния, *y* - вектор выходных переменных всех блоков модели.

При реализации методов численного интегрирования необходимо получить уравнения моделируемой системы в нормальной форме Коши, то есть в виде

|  |  |
| --- | --- |
|  | (2.13) |
|  | (2.14) |

Опишем процедуру приведения уравнений к форме Коши. Отметим, что не обязательно получать явные выражения в виде (2.13-2.14), достаточно сформировать процедуру, которая позволяет по заданным значениям модельного времени *t* и вектора переменных состояния *x* вычислить вектор производных *x*’ и вектор выходов *у*. Идея этой процедуры – упорядочение (сортировка) всех блоков таким образом, чтобы выход очередного блока мог быть рассчитан по уже имеющейся к этому моменту информации. Практически сортировка позволяет получить уравнения выходов блоков в виде (2.14). Затем производные могут быть рассчитаны с использованием (2.11).

Перед началом сортировки будем считать, что нам известны *t* и *x*. В процессе сортировки будет сформирован упорядоченный список, содержащий в общем случае **5 групп блоков** и соответствующих им выходных переменных.

* 1. Сначала выделим и упорядочим все блоки, выходы которых могут быть рассчитаны по известному модельному времени *t*:

|  |  |
| --- | --- |
|  | (2.15) |

* 1. Далее выделим и упорядочим все блоки, выходы которых могут быть рассчитаны по известным . Это соответствует записи

|  |  |
| --- | --- |
|  | (2.16) |

Этот этап завершает первичную сортировку. Если система не имеет алгебраических контуров, то все блоки структурной схемы к этому моменту станут упорядоченными, и процедура будет завершена, если нет – следует продолжить упорядочение.

* 1. Выделим все блоки, непосредственно входящие в алгебраические контуры. Из них выделим определяющие (). Выходы остальных входящих в алгебраические контуры блоков () можно рассчитать по известным выходам уже упорядоченных и определяющих блоков:

|  |  |
| --- | --- |
|  | (2.17) |

Метод выделения определяющих переменных рассматривается ниже.

* 1. Поместим в список определяющие блоки, выходы которых запишутся в виде

|  |  |
| --- | --- |
|  | (2.18) |

Можно исключить из (2.18), однако приведенная запись позволяет лучше понять рассмотренные ниже схемы расчета алгебраических контуров.

* 1. В последнюю очередь рассчитываются блоки, не входящие в алгебраические контуры, но выходы которых зависят от блоков, входящих в алгебраические контуры:

|  |  |
| --- | --- |
|  | (2.19) |

В результате сортировки будет получен такой порядок расчета блоков, который соответствует использованию формул (2.15)…(2.19). Если в модели нет алгебраических контуров, можно по известным найти выходы всех блоков, в противном случае следует решать алгебраические уравнения относительно определяющих переменных .

Расчет алгебраических контуров можно выполнить по следующим итерационным схемам.

Метод простых итераций:

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | (2.20) |

Метод Ньютона:

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | (2.21) |

В общем случае матрица Якоби может не обновляться в течение нескольких итераций (модифицированный метод Ньютона).

Алгоритм расчета выходов блоков и производных переменных состояния запишется следующим образом:

1. По известным *t, x*, используя (2.15), (2.16), рассчитать .
2. Используя итерационную схему (2.20) или (2.21), найти .
3. Используя (2.19), вычислить .
4. Рассчитать производные переменных состояния всех динамических блоков.
   * 1. Развязка алгебраических контуров

Наличие в структурной схеме алгебраических контуров означает, что входы блоков неявным образом (через другие блоки и линии связи) зависят от их выходов. В математической форме уравнение алгебраического контура выражается в виде неявной функции от выходов:

|  |  |
| --- | --- |
|  | (2.22) |

На рисунке 2.3 приведен пример структурной схемы без алгебраического контура, а на рисунке 2.4 – при его наличии. На рисунке 2.3 обратная связь идет с выхода интегратора 4 на вход сумматора 2, который зависит только от его состояния:

|  |  |
| --- | --- |
|  | (2.23) |

поэтому при порядке расчета блоков 1, 4, 2, 3 входы сумматора 2 и усилителя 3 на момент их расчета определены. На рисунке 2.4 обратная связь идет с выхода усилителя 3 на вход сумматора 2, и при любом порядке расчета сумматора и усилителя их входы не могут быть однозначно определены.

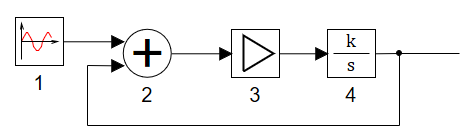


Рисунок 2.3 – Пример структурной схемы без алгебраического контура

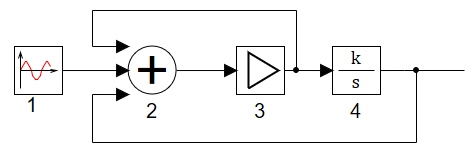


Рисунок 2.4 – Пример структурной схемы с алгебраическим контуром

При наличии в схеме алгебраических контуров необходимо определить их число и выделить выходы блоков, относительно которых будет решаться система нелинейных уравнений. Для этого используется метод определяющих переменных [21]. Суть метода заключается в том, что в алгебраических контурах определяется минимальное число выходных сигналов блоков, при удалении которых из схемы размыкаются все обратные связи в контурах. Рассмотрим этот метод на примере системы НАУ вида:

|  |  |
| --- | --- |
|  | (2.24) |

Если бы и были известны, то из 3-го, 4-го, 5-го уравнений можно было бы последовательно определить , , . Неизвестные и называют определяющими, поскольку по ним легко могут быть определены все остальные неизвестные. Подставляя последовательно 5-е, 4-е, 3-е уравнения в 1-е и 2-е, получим систему уравнений для определяющих неизвестных:

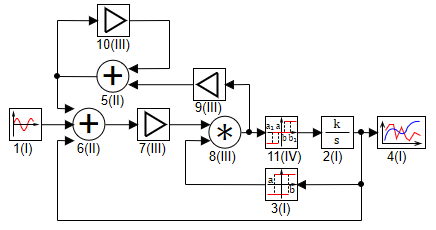
|  |  |
| --- | --- |
|  | (2.25) |

решая которую, находим и . Остальные неизвестные находим из (2.25) прямой подстановкой. В рассмотренном примере решение системы алгебраических уравнений с пятью неизвестными свелось к решению системы с двумя неизвестными. Таким образом, метод определяющих неизвестных позволяет уменьшить размер решаемой системы, используя топологию структурной схемы.

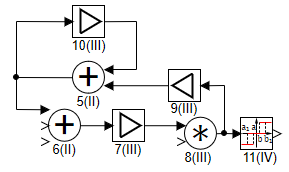
Алгоритм выделения минимального числа определяющих блоков рассмотрен на примере структурной схемы, приведенной на рисунке 2.5.

Структурная схема представляется в виде ориентированного графа, где вершинами графа являются блоки, а дугами графа – линии связи. Алгоритм заключается в последовательном исключении вершин графа.

В процессе первичной сортировки исключаются (вместе со всеми принадлежащими им дугами) вершины, соответствующие приоритетным (на рисунке обозначены номерами 1 и 2) и первично отсортированным блокам (3 и 4). В результате исходный граф приводится к виду, представленному на рисунке 2.5(б).



а) Исходная структурная схема



б) Структурная схема после первичной сортировки

|  |  |
| --- | --- |
|  |  |
| в) Образования петли при исключении вершины 10 | г) Определяющие блоки |

Рисунок 2.5 – Выделение определяющих переменных

Затем начинается собственно процесс выявления определяющих блоков. В качестве очередной исключаемой вершины выбирается вершина, имеющая наименьшее значение из произведения числа входящих и выходящих дуг. На рисунке 2.5(б) – это блок с номером 10. Если после исключения очередной вершины образовалась петля, то вершина с петлей и принадлежащими ей дугами удаляется из графа, соответствующая этой вершине переменная включается в список определяющих, а блок считается отсортированным. На рисунке 2.5(в) таким блоком является сумматор 5. Результат процесса выявления определяющих блоков показан на рисунке 2.5(г). К этому моменту все определяющие блоки отсортированы, и дальнейший процесс упорядочения блоков в структурной схеме аналогичен первичной сортировке.

Итоговый порядок расчета блоков структурной схемы, представленной на рисунке 2.5, соответствует их нумерации на схеме (примечание: отображение нумерации включается опцией Главного Окна, пункт меню Вид – Отображать номера блоков на схеме).