

Министерство сельского хозяйства Российской Федерации
Федеральное государственное образовательное учреждение

высшего образования

«БЕЛГОРОДСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
АГРАРНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ИМ. В. Я. ГОРИНА»

УДК 681.3.06

УТВЕРЖДАЮ

Проректор по научной работе

ФГБОУ ВО БелГАУ

_____ А.В. Колесников

ОТЧЕТ

О НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ РАБОТЕ

по теме:

**РАЗРАБОТКА КОМПЛЕКСА МОДЕЛЕЙ И АЛГОРИТМОВ ДЛЯ
РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ СТРУКТУРНОГО СИНТЕЗА БОЛЬШИХ
ДИСКРЕТНЫХ СИСТЕМ**

Руководитель темы

_____ Д.А. Петросов

БЕЛГОРОД 2016

СПИСОК ИСПОЛНИТЕЛЕЙ

Руководитель темы,

доцент каф. ИиИТ,

канд. техн. наук

_____ Д.А. Петросов

Исполнители темы:

доцент, к.т.н. _____ Д.А. Петросов

проф. д.ф-м.н. _____ В.А. Ломазов

РЕФЕРАТ

Отчет 54 с., 56 источников.

РАЗРАБОТКА КОМПЛЕКСА МОДЕЛЕЙ И АЛГОРИТМОВ ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ СТРУКТУРНОГО СИНТЕЗА БОЛЬШИХ ДИСКРЕТНЫХ СИСТЕМ

В работе уделено внимание вопросу разработки моделей и методов для решения задачи структурного синтеза больших дискретных систем на основе комбинированного подхода с применением имитационного моделирования, эволюционных вычислений и теории сетей Петри.

Объектом исследования являются большие дискретные системы

Предметом исследования являются модели и методы для обеспечения процедуры структурного синтеза.

Цель исследования состоит в разработке моделей и алгоритмов, для решения задач структурного синтеза больших дискретных систем.

В работе предлагается использовать комбинированный метод интеллектуальной поддержки на основе трех актуальных научных направлений: имитационного моделирования, эволюционных методов и теории сетей Петри. В качестве основных инструментальных средств из вышеуказанных теорий будет использоваться: вычислительный эксперимент, генетические алгоритмы, нейронные сети и одно из современных направлений в теории сетей Петри – вложенные сети Петри.

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	5
1. АНАЛИЗ СУЩЕСТВУЮЩИХ ОСОБЕННОСТЕЙ В ЗАДАЧАХ СИНТЕЗА БОЛЬШИХ ДИСКРЕТНЫХ СИСТЕМ	7
1.1 Анализ существующих методов и инструментальных средств в данной предметной области	7
1.2 Выбор инструментальных средств для разработки комплекса моделей и алгоритмов решения задачи структурного синтеза больших дискретных систем	9
1.3 Анализ существующих классов сетей Петри с последующей их классификацией для создания моделей баз элементов БДС в различных предметных областях	12
2. РАЗРАБОТКА ИМИТАЦИОННОЙ МОДЕЛИ СТРУКТУРНОГО СИНТЕЗА БДС С ФИКСИРОВАННЫМИ МЕЖКОМПОНЕНТНЫМИ СВЯЗЯМИ, С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ АДАПТИРОВАННЫХ ВЛОЖЕННЫМИ СЕТЯМИ ПЕТРИ ГЕНЕТИЧЕСКИХ АЛГОРИТМОВ	16
2.1 Разработка модели представления большой дискретной системы в рамках решения задачи структурного синтеза	16
2.2 Разработка моделей и алгоритмов для решения задачи структурного синтеза больших дискретных систем с использованием выбранных инструментальных средств	23
3. МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ СТРУКТУРНОГО СИНТЕЗА БОЛЬШИХ ДИСКРЕТНЫХ СИСТЕМ	28
3.1 Структурный синтез больших дискретных систем на основе эволюционных методов	28
3.2 3.2 Применение параллельных вычислений	33
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	38
Список использованных источников	40

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время особое внимание уделяется разработке моделей и методов, которые позволяют проводить структурный синтез систем. При решении задач структурного синтеза следует учитывать расположение компонентов и взаимосвязи между ними. В данный момент времени, при создании моделей и методов структурного синтеза, следует учитывать как различные предметные области, в которых возможно их применение, так и большое количество элементов систем, которые могут использоваться при работе системы. Следует отметить, что немаловажным критерием для методов синтеза является их временная характеристика. В существующих методах уменьшение времени поиска структуры системы базировались на оптимизации по стохастическим критериям и с использованием параллельного вычисления, но в последнее время стали появляться работы, которые основывались на эволюционных методах, одним из которых является генетический алгоритм.

Объектом исследования является большие дискретные системы

Предметом исследования являются модели и методы для обеспечения процедуры структурного синтеза.

Цель исследования состоит в разработке моделей и алгоритмов, для решения задач структурного синтеза больших дискретных систем.

Основными задачами исследования, служащими для достижения поставленной цели, являются:

- Провести анализ существующих методов и инструментальных средств в данной предметной области;
- Выполнить выбор инструментальных средств для разработки комплекса моделей и алгоритмов решения задачи структурного синтеза больших дискретных систем;
- Разработать модель представления большой дискретной системы в рамках решения задачи структурного синтеза;

- Разработать модели и алгоритмы для решения задачи структурного синтеза больших дискретных систем с использованием выбранных инструментальных средств;
- Выполнить расчет возможности использования параллельных вычислений к задаче структурного синтеза;
- Разработать основы адаптивного управления процессом структурного синтеза.

Методическую основу исследования составляют модели и методы теории имитационного моделирования, теория сетей Петри и эволюционные методы поиска решений (генетический алгоритм и нейронные сети).

Научная новизна заключается в разработке и апробации новых моделей и алгоритмов для решения задачи структурного синтеза больших дискретных систем с использованием комбинированного подхода на основе трех теорий: имитационного моделирования, эволюционных методов и теории сетей Петри.

Практическая значимость

1. Предложенные модели и алгоритмы могут использоваться как при проектировании больших дискретных систем, так и при разработке интеллектуальных блоков АСУ.

2. Работа «Разработка аппаратно-программного комплекса управления климатическими условиями животноводческих предприятий АПК с функцией повышенной живучести», на основе предложенных моделей и алгоритмов, получила поддержку в программе У.М.Н.И.К. в осень 2015 (представлял работу асс. Карамышев Е.П.)

1. АНАЛИЗ СУЩЕСТВУЮЩИХ ОСОБЕННОСТЕЙ В ЗАДАЧАХ СИНТЕЗА БОЛЬШИХ ДИСКРЕТНЫХ СИСТЕМ

1.1 Анализ существующих методов и инструментальных средств в данной предметной области

Сложные системы могут быть классифицированы в соответствии с типами их состояний, поведения и идентичности. Один из практически важных классов систем представляют большие дискретные системы (БДС). Для систем этого класса характерна значительная сложность исследования ввиду их большой размерности. Системы этого класса состоят из отдельных модулей (частей, элементов, подсистем и т.д.), связанных между собой. При этом количество частей и связей дискретно (конечно или счетно), а внутренние процессы объекта протекают в условиях дискретного времени, что позволяет проводить дискретное модельное описание. К рассматриваемому классу относятся многие социально-экономические, организационно-технологические и технические системы, например, энергетические сети, элементы и устройства вычислительной техники и т.п.

В настоящее время, в современных исследованиях существует задача разработки новых универсальных моделей и методов структурно-параметрического синтеза БДС с заданным поведением является актуально в связи с тем, что данного вида системы получили большое распространение в различных предметных областях. Суть основной проблемы, с которой сталкиваются при решении задачи синтеза БДС относится к данному классу систем и заключается в том, что при наличии 10-ти компонентов и порядка 10-ти экземпляров каждого компонента количество возможных конфигураций будет равно 10^{10} , при этом не учитывается, что система может перестраиваться в процессе функционирования за счёт динамического изменения межэлементных связей или изменения параметров работы ее элементов. Данные условия способны значительно усложнить и без того

трудоемкий процесс синтеза системы, то есть осуществить поиск конфигурации системы, которая способна преобразовать заданный входной вектор в требуемый выходной.

Задача структурного синтеза, в своих многочисленных постановках, привлекает к себе внимание специалистов различного профиля. Совокупность исследований по этой проблематике можно разбить на два ведущих направления.

В первом задаче структурного синтеза решается на предметном уровне, не выходя за рамки конкретного типа, в редких случаях класса, технических объектов. Основной массив работ в этой парадигме выполнен специалистами-схемотехниками в области цифровой, вычислительной техники и информационных систем.

Второе направление, возникшее сравнительно недавно, ставит своей целью разработку универсальных методов структурного синтеза, применимых для различных технических объектов и независимых от отраслевой или цеховой специфики. Полигоном для отработки идей и проверки полученных результатов служит область теории проектирования, связанная с синтезом физических эффектов и технических принципов действия.

При синтезе систем принято представлять три основных направления:

1. Параметрический синтез;
2. Структурный синтез;
3. Синтез конструкций.

В качестве основных для решения задачи структурного синтеза приняты следующие направления:

1. Формальный синтез;
2. Специализированные методы синтеза;
3. Компьютерный синтез;
4. Эвристический синтез;
5. Комбинаторно-логические методы синтеза;

6. Интеллектуальные методы синтеза.

Работа над данным Проектом посвящена созданию универсального метода, который позволит проводить как структурный, так и параметрический синтез БДС с заданным поведением.

Наиболее распространенным математическим аппаратом для описания процедуры синтеза является теория графов (графоаналитические методы). К примеру, в комбинаторно-логических методах принято решать задачу синтеза с помощью следующих методов:

1. Морфологический синтез;
2. Синтез «Вперед»;
3. Синтез по А-деревьям;
4. Синтез по многодольным графам;
5. Синтез по ориентированным гиперграфам;
6. Логические системы синтеза.

Исходя из выше сказанного можно сделать вывод, что задача создания универсального метода структурно-параметрического синтеза БДС является актуальной. В данном Проекте предлагается применение комбинации из теории имитационного моделирования, эволюционных методов (генетических алгоритмов и генетического программирования) и теории сетей Петри для создания универсального метода структурно-параметрического синтеза БДС.

Для того, чтобы успешно провести синтез БДС следует определить структуру и параметры элементов, которые будут входить в ее состав.

1.2 Выбор инструментальных средств для разработки комплекса моделей и алгоритмов решения задачи структурного синтеза больших дискретных систем

Ввиду большой вычислительной трудоемкости решения данного класса задач предлагается использовать средства имитационное моделирование, так

как данный инструментарий позволяет описывать процессы, происходящие в БДС так, как если бы они происходили в действительности. Использование этого метода математического моделирования позволит выполнить имитацию работы синтезируемой системы как для одного, так и заданного множества испытаний.

В современном имитационном моделировании принято использовать следующие математические аппараты: 1) дифференциальные уравнения; 2) конечные автоматы; 3) цепи Маркова; 4) теорию графов; 5) сети Петри.

Данные теории получили широкое применение в системах имитационного моделирования и используются не только на этапах создания БДС, но и при проведении вычислительных экспериментов над моделями объектов и систем, которые уже существуют.

Применение исключительно данных средств не позволяет уйти от проблемы высокой вычислительной трудоемкости при решении задачи структурно-параметрического синтеза, а применение методов, которые базируются на случайном поиске решения становится практически невозможным, поэтому принято вводить в них элемент детерминированности, которым обладают эволюционные методы. Среди большого числа эволюционных методов большое распространение в решении данного класса задач получили генетические алгоритмы (ГА) и генетическое программирование. Применение этих методов дает возможность уменьшить время структурно-параметрического синтеза БДС, при этом существует возможность решать задачу синтеза системы не только с фиксированными межкомпонентными связями, но и с динамическими.

ГА основываются на принципах естественного отбора и генетики, то есть наиболее перспективные особи имеют большую вероятность выжить, при этом они обладают свойствами наследования и могут подвергаться мутации. Стоит отметить, что при использовании данного подхода имеется возможность влияния на процесс поиска решений с помощью задания параметров.

Отличительной особенностью ГА от других эволюционных методов является то, что:

1. ГА оперирует с решениями, которые представляются в виде кодовой строки. Преобразование данных кодов производится без какой-либо связи со смысловым значением единиц (семантикой).

2. Поиск происходит при использовании нескольких точек в пространстве одновременно (ГА обладает свойством параллелизма), что дает возможность уйти от попадания целевой функции в нежелательный локальный экстремум.

3. При поиске решений генетический алгоритм использует информацию только о допустимых значениях параметров и целевой функции, а это в свою очередь позволяет добиться повышения быстродействия при синтезе системы.

4. При использовании генетического алгоритма синтез новых точек происходит по вероятностным правилам, при этом переход от одной точки к другой (в пространстве решений) используются детерминированные правила. Использование данного комбинированного подхода является значительно более эффективным, чем их применение по отдельности.

Генетические алгоритмы требуют адаптации к предметной области, в которой они будут применяться, а соответственно следует произвести выбор математического аппарата, на основе которого будет существовать возможность не только описать работу адаптированного ГА для решения задачи структурного синтеза БДС с фиксированными и динамическими межэлементными связями, но и в дальнейшем позволить выполнять параметрический синтез системы.

Наиболее подходящий математический аппарат, который удовлетворяет выдвинутым требованиям – теория сетей Петри. Данное инструментальное средство имеет большое количество разновидностей: вложенные сети Петри, цветные сети Петри, временные сети Петри, ингибиторные сети Петри, помеченные сети Петри и т.д., – то есть данный

инструментарий дает возможность создать модель (в зависимости от предметной области требуется проводить выбор класса сетей Петри для моделирования элементов) для любого элемента БДС. При этом данный математический аппарат позволяет объединить в себе два выделенных эволюционных метода: генетическое программирование и генетические алгоритмы. Это достигается за счет использования свойств вложенности (описание генетического алгоритма на верхнем уровне и представление меток последующих уровней в виде генотипов – моделей, синтезируемых БДС) и построения деревьев достижимых маркировок (древовидное кодирование в генетическом программировании).

1.3 Анализ существующих классов сетей Петри с последующей их классификацией для создания моделей баз элементов БДС в различных предметных областях

В данной работе проведем обзор расширений математического аппарата СП, который позволит в дальнейшем определять то или иное расширение, для моделирования элементной базы на основе которой будет проходить структурный или параметрический синтез системы с заданным поведением.

Оригинальные СП, описанные в своих работах К.А. Петри, оказались не совсем состоятельны при моделировании БДС. Значительно усложняет процесс моделирования и анализа синтезируемых моделей то, что в них дуга способна перемещать из одной позиции в другую только одну метку, а в задачах синтеза БДС часто необходимо удалять и добавлять несколько меток. Решая подобного рода задачи с помощью данного расширения СП следует, водить дополнительные дуги и переходы, что значительно увеличивает размерность модели и усложняет ее анализ. Однако, при моделировании логических элементов (таких как «И», «ИЛИ», «НЕ» и т.д.), которые могут использоваться для слоя межкомпонентной шины, применение оригинальных сетей Петри может быть оправданным.

Если на этапе создания имитационной модели элемента, встает задача перемещать более одной метки из одной позиции в другую, то целесообразно использовать обобщенные сети Петри (сети с кратными дугами). В данном расширении сетей Петри дугам может быть присвоен вес сколько меток может переместить дуга в соответствующую позицию.

При моделировании перемещения ресурсов внутри системы возникают сложности с разделением типов ресурсов (меток). В данном случае целесообразно использовать цветные сети Петри. Однако, цвет метки является лишь одним ее параметром, а это приводит к появлению дополнительных позиций в модели и увеличению размерности. Поэтому на этапе выбора типа сети для моделирования элементной базы БДС могут использоваться нагруженные СП. Они позволяют меткам, которые описывают ресурс, нести более одного атрибута (сложная метка).

При моделировании БДС одним из факторов, по которому может происходить процесс структурного или параметрического синтеза системы, может быть время. То есть, для проектировщика становится важным не только правильность поведения системы, но и время, за которое система способна обработать заданный входной вектор в требуемый выходной. В этом случае следует использовать временные сети Петри.

Элементы БДС могут обладать изменяющейся структурой, в этом случае проектировщик может столкнуться с проблемой фиксированной топологии СП. Теория данного математического аппарата позволяет преодолеть и это ограничение, при этом несколько направлений решения этой задачи. Первым механизмом, который может быть применен, является изменение кратности дуг, которое используется в обобщенных СП. Переменная кратность достигается разметкой некоторой позиции. Такого рода сети называются самодифференцируемыми. Вторым механизмом является изменение правил запуска переходов. В таких сетях правило запуска перехода зависит от разметки его входных позиций, которая определяет, сколько меток из каких входных позиций надо удалить, и сколько меток в какие выходные позиции

необходимо добавить при запуске данного перехода. Примером такой СП может служить E-сеть. Третьим механизмом, который направлен на изменение топологии сети является мета сеть. В данном случае управление изменением ее структуры задается также СП. В данном типе сетей связи между позициями и переходами одной СП определяются наличием определенного числа меток в соответствующей позиции другой СП.

При моделировании работы БДС нередко требуется использование приоритетов. Для этого в теории СП введен определенный тип дуги. Данная дуга, направленная от позиции к переходу, не дает ему возможности запустить, если в позиции присутствует хотя бы одна метка (для срабатывания перехода позиция должна быть пустой). Такого рода дуги принято называть ингибиторные или сдерживающие. Данный подход получил продолжение и в отношении к дуге стали сопоставлять одно из шести отношений на множестве целых неотрицательных чисел ($>$, $<$, $=$, \neq , \geq , \leq) и вес. Эта дуга также не связана с перемещением меток, всегда направлена из позиции в переход и запрещает его запуск, если количество меток в соответствующей позиции и вес этой дуги не находятся в соответствующем отношении. Такие дуги называются аналитическими.

Применение ингибиторных и аналитических дуг при моделировании БДС с приоритетами значительно упрощает процесс создания и анализа полученных моделей, но не является единственным. Существует подход, который основан на понятии конфликта переходов. В этом случае принято говорить о том, что между переходами существует конфликт, если общая входная позиция. При этом сутью конфликта является то, что запуск одного из переходов перемещает из позиции такое количество меток, которое не дает возможности второму переходу выполнить условие срабатывания. Для разрешения конфликта на множестве переходов задается отношение порядка. При возникновении конфликтной ситуации запускается переход, порядок которого больше. Такие СП получили название сетей с приоритетами переходов. Из сказанного можно сделать вывод, что при моделировании

элементов БДС, на основе которых будет проводится структурный или параметрический синтез системы, существует возможность учитывать приоритетность срабатывания переходов. Это может быть полезно, к примеру, при синтезе систем массового обслуживания.

При работе с моделями БДС на основе СП эффективно применение метода выделения подсети. Суть метода заключается в разбиении общей модели БДС на основе СП на подсети, которые моделируют работу реальных подсистем. Далее каждой подсети ставится в соответствие два флага активности. Первый флаг сигнализирует о приходе в подсистему события, т.е. активизации одного из внешних переходов. Второй флаг соответствует активизации внутреннего перехода, т.е. событие возникает внутри подсистемы БДС. Использование данного подхода дает возможность на определенном этапе модельного времени не моделировать работу подсистем БДС, которые на предыдущем шаге моделирования не получили хотя бы один из флагов активности. Это позволяет значительно сэкономить машинный ресурс при проведении вычислительного эксперимента над моделью, синтезируемой БДС.

Стоит отметить, что в настоящее время в теории СП появилась еще одна возможность упростить работу, связанную с моделированием процессов, протекающих как в самой синтезируемой системе, так и на этапах синтеза. Этот подход основан на представлении сети на разных уровнях (свойство вложенности). В этом случае метка верхнего уровня сети сама является сетью, это упрощает этап проектирования и анализа модели.

Адекватное описание элементов синтезируемой БДС и самой системы в целом соответствующей СП является немаловажной стороной для успешного структурного или параметрического синтеза. Поэтому в данной работе приведен краткий анализ существующих расширений СП, который дает возможность определиться с выбором инструментального средства для моделирования различных элементов БДС, так как данный класс систем получил в настоящее время довольно широкое распространение

2. РАЗРАБОТКА ИМИТАЦИОННОЙ МОДЕЛИ СТРУКТУРНОГО СИНТЕЗА БДС С ФИКСИРОВАННЫМИ МЕЖКОМПОНЕНТНЫМИ СВЯЗЯМИ, С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ АДАПТИРОВАННЫХ ВЛОЖЕННЫМИ СЕТЯМИ ПЕТРИ ГЕНЕТИЧЕСКИХ АЛГОРИТМОВ

2.1 Разработка модели представления большой дискретной системы в рамках решения задачи структурного синтеза

Перейдём к рассмотрению следующего класса простейших задач – задача синтеза БДС, на конечном количестве элементов с фиксированными межкомпонентными связями.

Допустим, что дано:

$$O = \langle S, C \rangle, \quad (1)$$

где O – система, синтез которой следует провести, S – структура синтезируемой системы, C – состав системы, синтез которой следует провести.

$$C = (C_1, \dots, C_R), \quad (2)$$

где C_i – i -ый элемент синтезируемой системы, R – количество элементов синтезируемой системы O .

$$C_i = \left\{ C_{ij} \right\}_{j=1}^{M_i}, \quad (3)$$

где C_{ij} – j -ый экземпляр i -го элемента синтезируемой системы O , M_i – количество существующих (допустим в элементной базе) экземпляров i -го элемента.

$$P = \left\{ P_k \right\}_{k=1}^L, \quad (4)$$

где P – множество свойств, которыми потенциально может обладать большая дискретная система синтез которой следует провести, P_k – k -ое

свойство из приведенного множества P , L – количество свойств из множества P .

Допустим, что на этапе синтеза БДС требуется: для заданного свойства P_{k_0} (которым должна обладать синтезируемая система O) найти структуру системы в которой будет использоваться по одному экземпляру $C_{ij(k_0)}$ каждого компонента C_i , при этом полученная в результате структурного синтеза БДС

$$O = \langle S, (C_{1j(k_0)}, \dots, C_{Rj(k_0)}) \rangle \quad (5)$$

должна обладать заданным свойством P_{k_0} .

Повышение эффективности методов случайного поиска достигается за счет введения в них элементы детерминированности. Одним из направлений таких методов являются генетические алгоритмы (ГА) и генетическое программирование.

В представленном случае решением задачи структурного синтеза должна являться система O , определение (1)-(3) которой дано в постановке задачи, представленной выше. Согласно представленному определению, система O описывается в виде строки (5) символов. Что бы получить описание (1) для БДС O в виде сетей Петри, следует определить ее структуру S , а также состав C , который будет также описан с помощью математического аппарата сетей Петри.

Согласно (2) и (3) видно, что состав большой дискретной системы C может быть полностью определен ее элементами, следовательно, каждый элемент C_i следует описать с использованием инструментария математического аппарата сетей Петри, и как следствие, каждый экземпляр элемента C_i будет представлен в виде модели на основе предложенного к использованию математического аппарата сетей Петри.

Перейдем к рассмотрению экземпляров элементов C_{ij} , на основе которых будет проходить процедура структурного синтеза большой

дискретной системы. Допустим, что сеть Петри, которая моделирует экземпляр элемента будет обозначаться через PN_{ij} . Так как экземпляры элементов будут взаимодействовать между собой, выделим у каждого экземпляра входы и выходы. Для моделирования входов и выходов целесообразно использовать позиции сети PN_{ij} . Входных и выходных позиций объединим в два разных множества и обозначим через IN_{ij} и OUT_{ij} , где IN_{ij} – множество входных позиций, а OUT_{ij} – множество выходных позиций.

Перейдем к рассмотрению элемента C_i . Структура элемента будет полностью определяться экземпляром C_{ij} , который его представляет. Взаимодействие между элементами происходит через входы и выходы, моделируемые множеством входных и выходных позиций IN_{ij} и OUT_{ij} соответственно. Элементами множеств IN_{ij} и IN_i , а также OUT_{ij} и OUT_i обладают взаимно однозначными соответствиями $F_{IN}^{ij}: IN_{ij} \rightarrow IN_i$ и $F_{OUT}^{ij}: OUT_{ij} \rightarrow OUT_i$. Иллюстрация взаимоотношений (соответствие) между элементами большой дискретной системы и экземплярами (на основе которых будет проходить решение задачи структурного синтеза БДС) показана на рисунке рис. 1.

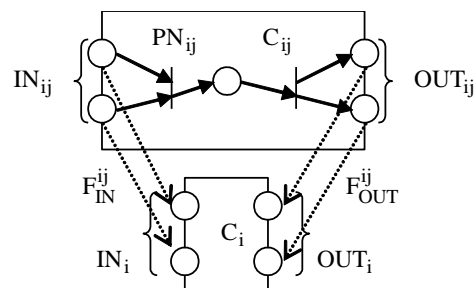


Рисунок 1. Соответствие между элементами и экземпляром

Сеть Петри, которая моделирует работу элемента C_i , обозначим через PN_i . Соответственно, если элемент C_i , представлен в процессе структурного синтеза экземпляром C_{ij} , то $PN_i = PN_{ij}$.

Теперь перейдём к рассмотрению структуры S большой дискретной системы O . Структура будет полностью определяться взаимосвязями между элементами, данные взаимосвязи будут моделироваться переходами сетей Петри. Множество данных переходов обозначим через T . Переход $t_q \in T$ выполняет функцию соединения выходных позиции некоторых элементов большой дискретной системы $C_{i_1}, C_{i_2}, \dots, C_{i_A}$ с входными позициями других элементов $C_{i_{A+1}}, C_{i_{A+2}}, \dots, C_{i_{A+B}}$, как показано на рис. 2.

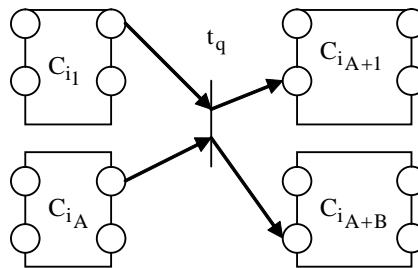


Рисунок 2. Связь между элементами

Соответствие $F: T \rightarrow \bigcup_{i=1}^R (IN_i \cup OUT_i)$ полностью определяет структуру S большой дискретной системы O .

Запишем сеть Петри, которая будет моделировать большую дискретную систему в виде кодовой строки:

$$PN = \langle PN_1, \dots, PN_i, \dots, PN_R, T, F \rangle,$$

где PN_i – модель элемента C_i ,

T - множество переходов,

F - соответствие.

Т и F позволяют определять структуру S большой дискретной системы O.

В данной работе рассматривается задача, при которой структура S БДС неизменна. Тогда количество M всех моделей большой дискретной системы O, которые потенциально возможны, определяется по формуле

$$M = \prod_{i=1}^R M_i,$$

где M_i – количество экземпляров элементов C_i , R – количество элементов большой дискретной системы O. Можем рассчитать количество возможных моделей большой дискретной системы O. При $R=10$ и $M_1=M_2=\dots=M_{10}=10$ $M=M^{10}$. Как видно из примера, даже при относительно небольшом количестве элементов, и соответственно экземпляров количество моделей синтезируемой большой дискретной системы O достаточно велико.

В постановке задачи сказано, что из всех возможных моделей большой дискретной системы O, нам следует выбрать такое решение, которое обладало бы заданным свойством (или поведением, то есть способностью обрабатывать заданное множество входных векторов в требуемое множество выходных векторов). В качестве свойства системы можно рассматривать ее реакцию на входные сигналы. Выделим у большой дискретной системы O входы и выходы, смоделированные позициями сети PN. Множества IN и OUT – входные и выходные позиций.

$$IN \subset \bigcup_{i=1}^R IN_i \text{ и } OUT \subset \bigcup_{i=1}^R OUT_i.$$

Свойством системы O будем называть пару целочисленных векторов, так как количество меток в позициях не может быть отрицательным и вещественным

$$Z_{IN} = (z_1^{IN}, \dots, z_{v_0}^{IN}) \text{ и } Z_{OUT} = (z_1^{OUT}, \dots, z_{w_0}^{OUT}),$$

где z_v^{IN} – число меток, которые поступили в v-ую входную позицию перед тем, как была запущена сеть PN, z_w^{OUT} – число меток, которые

появились в w -ой выходной позиции, на момент, когда произошла остановка сети PN, V_0 и W_0 – число элементов множеств IN и OUT.

Определим, что множество свойств P , которыми может обладать синтезируемая система, будет моделироваться множеством $Z = \{Z_k\}_{k=1}^L$, где $Z_k = (Z_{IN}^k, Z_{OUT}^k)$ – модель свойства P_k в виде пары неотрицательных целочисленных векторов.

Следовательно, поставленную задачу можно свести к следующей. Требуется найти такую модель PN большой дискретной системы O на основе сетей Петри, которая будет обладать заданным свойством Z_k .

Для того что бы определить обладает ли модель PN свойством Z_k , следует синтезировать данную модель, затем в ее входные позиции IN поместить подать вектор Z_{IN}^k , затем выполнить запуск модели PN, и выполнить сравнение количестве и качества меток, которые образовались в позициях OUT в следствии работы модели с вектором Z_{OUT}^k .

Допустим, что вычислительная машина будет выполнять данные действия в течении 1 секунды. Если требуется выполнить синтез системы из 10 элементов, а каждому элементу в соответствие поставлено по 10 экземпляров, то для решения задачи структурного синтеза системы O с использованием метода прямого перебора уйдет $M=10^{10}$ секунд (что соответствует примерно 317 годам). И это не гарантирует, что на основе предложенной элементной базы возможно осуществить синтез системы с заданным поведением.

Конечно прямой перебор гарантирует рассмотрение всех возможных вариантов, но его использование в задачах структурного синтеза на основе конечного количества элементов не является эффективным с точки зрения оптимальности затраченного времени.

Следовательно, следует переопределить задачу – в пространстве гипотетически существующих моделей PN системы O, которая будет наиболее приближена к свойству Z_k .

При такой постановке задачи следует определить меру близости модели PN к заданному свойству Z_k . Для этого следует подать на вход модели системы вектор Z_{IN}^k , выполнить запуск модели PN и снять на выходе модели вектор Z_{OUT} .

При определении меры близости будем использовать понятия метрического пространства, рассматривая полученный на выходе модели вектор Z_{OUT} и заданный эталонный вектор Z_{OUT}^k как элементы евклидова пространства \mathfrak{R}^{W_0} – множества упорядоченных наборов из W_0 действительных чисел $x = (x_1, \dots, x_{W_0})$ с расстоянием

$$\rho_1(x, y) = \sum_{w=1}^{W_0} |x_w - y_w|, \quad (6)$$

где $y = (y_1, \dots, y_{W_0})$.

Чем меньше $\rho_1(Z_{OUT}, Z_{OUT}^k)$, тем ближе модель PN к свойству Z_k . Если $\rho_1(Z_{OUT}, Z_{OUT}^k) = 0$, то модель PN обладает свойством Z_k . Естественно рассматривать расстояние ρ_1 как целевую функцию.

В качестве инструментального средства, для решения задачи структурного синтеза больших дискретных систем будем использовать генетические алгоритмы (ГА). ГА обладает операторами, действия которых направлено на манипуляцию генотипами (в нашем случае это модели большой дискретной системы на основе сетей Петри) в виде кодовой строки символов.

Так как в данной работе в качестве основного инструментального средства выбран математический аппарат сетей Петри, то можно сказать, что моделирование работы операторов генетического алгоритма целесообразно осуществлять с помощью переходов.

Переходы сетей Петри оперируют с метками, следовательно требуется выбрать такое расширение сетей Петри, которое позволит метке производить моделирование кодовой строки символов. Примером такого

расширения могут служить нагруженные сети Петри. Так как представленная ранее кодовая строка, описывающая большую дискретную систему, представлена с помощью сетей Петри, следовательно, нагруженных сетей Петри с макромечкой, а данное расширение сетей Петри получило название Вложенных сетей Петри (ВСП).

2.2 Разработка моделей и алгоритмов для решения задачи структурного синтеза больших дискретных систем с использованием выбранных инструментальных средств

Применяя предложенный математический аппарат можно определить, что работа операторов генетического алгоритма возможно проводить с помощью переходов ВСП, а представление генотипов предоставить макромечками ВСП.

Генетический алгоритм обрабатывает генотипы, которые множество которых получило название популяция. Первая популяция носит название начально и может быть сформирована либо случайным образом, либо задается проектировщиком большой дискретной системы.

Представим начальную популяцию с использованием математического аппарата сетей Петри:

$$G^0 = (PN^1, \dots, PN^{2n}),$$

где PN^i – i -ая модель системы на основе сетей Петри, синтез которой следует выполнить, $2n$ – размер начальной популяции. Для упрощения дальнейшего описания будем говорить, что количество особей в начальной популяции является четным.

На рисунке 3 показана имитационная модель генетического алгоритма. В начале работы модель PN^i помещается в соответствующую позицию A_i , при этом она представлена в виде макромечки вложенной сети Петри.

Работа оператора SELECT моделируется переходом SEL. Его функция заключается в следующем: выполнить перенос PN^i из позиции A_i и размещение обработанных копий в слое позиций $B_1, B_2, \dots, B_{2i-1}, B_{2i}, \dots, B_{2n-1}, B_{2n}$.

Обозначим макрометки, размещенные в позициях B_{2i-1} и B_{2i} , через $PN^{j_{2i-1}}$ и $PN^{j_{2i}}$. Макрометки размещаются в позициях B_1, \dots, B_{2n} в соответствии со значением целевой функции (6) по правилу: чем меньше значение функции (6), тем меньше номер позиции, в которой размещается макрометка. Таким образом, в позиции B_1 размещается самая лучшая макрометка, в позиции B_2 – чуть худшая макрометка и т.д. до позиции B_{2n} , в которой будет находиться самая плохая макрометка.

Работа оператора скрещивания (CROSS) моделируется переходом $CROSS_i$. При функционировании он перемещает макрометки $PN^{j_{2i-1}}$ и $PN^{j_{2i}}$ из B_{2i-1} и B_{2i} , выполняет работу по скрещиванию (созданию потомков особей) и помещает новые макрометки $PN_*^{j_{2i-1}}$ и $PN_*^{j_{2i}}$ в слое позиций D_{2i-1} и D_{2i} . Правила скрещивания макрометок можно представить следующим образом:

1. Из множества $\{1, 2, \dots, R\}$ случайным образом происходит выбор некоторого числа g .

2. В $PN^{j_{2i-1}}$ и $PN^{j_{2i}}$ выделяем модель g -го элемента

$$PN^{j_{2i-1}} = \langle PN_1^{j_{2i-1}}, \dots, PN_g^{j_{2i-1}}, \dots, PN_R^{j_{2i-1}}, T, F \rangle$$

$$PN^{j_{2i}} = \langle PN_1^{j_{2i}}, \dots, PN_g^{j_{2i}}, \dots, PN_R^{j_{2i}}, T, F \rangle$$

3. Происходит взаимная замена выделенных моделей, что приводит к появлению новых макрометок (потомков)

$$PN_*^{j_{2i-1}} = \langle PN_1^{j_{2i}}, \dots, PN_g^{j_{2i-1}}, \dots, PN_R^{j_{2i-1}}, T, F \rangle$$

$$PN_*^{j_{2i}} = \langle PN_1^{j_{2i-1}}, \dots, PN_g^{j_{2i-1}}, \dots, PN_R^{j_{2i-1}}, T, F \rangle$$

Работу оператора мутации (MUTATION) моделирует переход MUT_{2i} . Принцип работы заключается в следующем, он забирает макрометку $PN_*^{j_{2i}}$ из

слоя позиций позиции D_{2i} , выполняет функцию по мутации особи и передает новую макрометку $PN_{**}^{j_{2i}}$ в слой позиций E_{2i} .

Правила обработки макрометок при работе оператора мутации можно представить следующим образом:

1. Из множества $\{1, 2, \dots, R\}$ случайным образом выбирается некоторое число r .

2. В $PN_*^{j_{2i}}$ выделяется модель r -го элемента

$$PN_*^{j_{2i}} = \langle PN_1^{j_{2i}}, \dots, PN_r^{j_{2i}}, \dots, PN_R^{j_{2i}}, T, F \rangle$$

3. Из $\{PN_{ij}\}_{j=1}^{M_r}$ моделей экземпляров r -го элемента выбирается случайным образом новую модель $PN_{r_{new}}^{j_{2i}}$, ею заменяется модель $PN_r^{j_{2i}}$ в итоге получается новая макрометка

$$PN_{**}^{j_{2i}} = \langle PN_1^{j_{2i}}, \dots, PN_{r_{new}}^{j_{2i}}, \dots, PN_R^{j_{2i}}, T, F \rangle$$

Работа оператора REDUCTION моделируется переходом RED, который перемещает макрометки из слоя позиций E_1, \dots, E_{2n} , а также из слоя позиций A_1, \dots, A_{2n} , запускает полученные модели, сравнивает с эталонным выходным вектором и удаляет худшие макрометки, макрометки, удовлетворяющие критериям структурного синтеза, или наиболее приближенные к ним размещает в слое позиций A_1, \dots, A_{2n} .

Удаление макрометок предлагается выполнять по следующему правилу:

1. Вычисляется целевая функция (6) для каждой макрометки.

2. В позицию A_1 перемещается макрометка, которая максимально приближена к критериям синтеза, в позицию A_2 – макрометка с чуть худшим показателем и т.д. до A_{2n} . В A_{2n} будет находиться макрометка с наихудшим показателем (макрометку в позиции A_i , обозначим через PN_*^i).

3. Остальные макрометки, которым не досталось места хранения (позиций в слое A_1, \dots, A_{2n}) макрометки удаляются.

Алгоритм работы при использовании представленного метода можно представить следующим образом:

1. Каждому элементу C_i требуется построить модели PN_{ij} для каждого экземпляра C_{ij} .
2. Выполнить построение моделей структуры S (для этого следует определить множество переходов T и соответствие F).
3. Задать поведение (свойство) P_k , для синтезируемой системы O (пара векторов $Z_k = (Z_{IN}^k, Z_{OUT}^k)$).
4. Выполнить формирование начальной популяции G^0 .

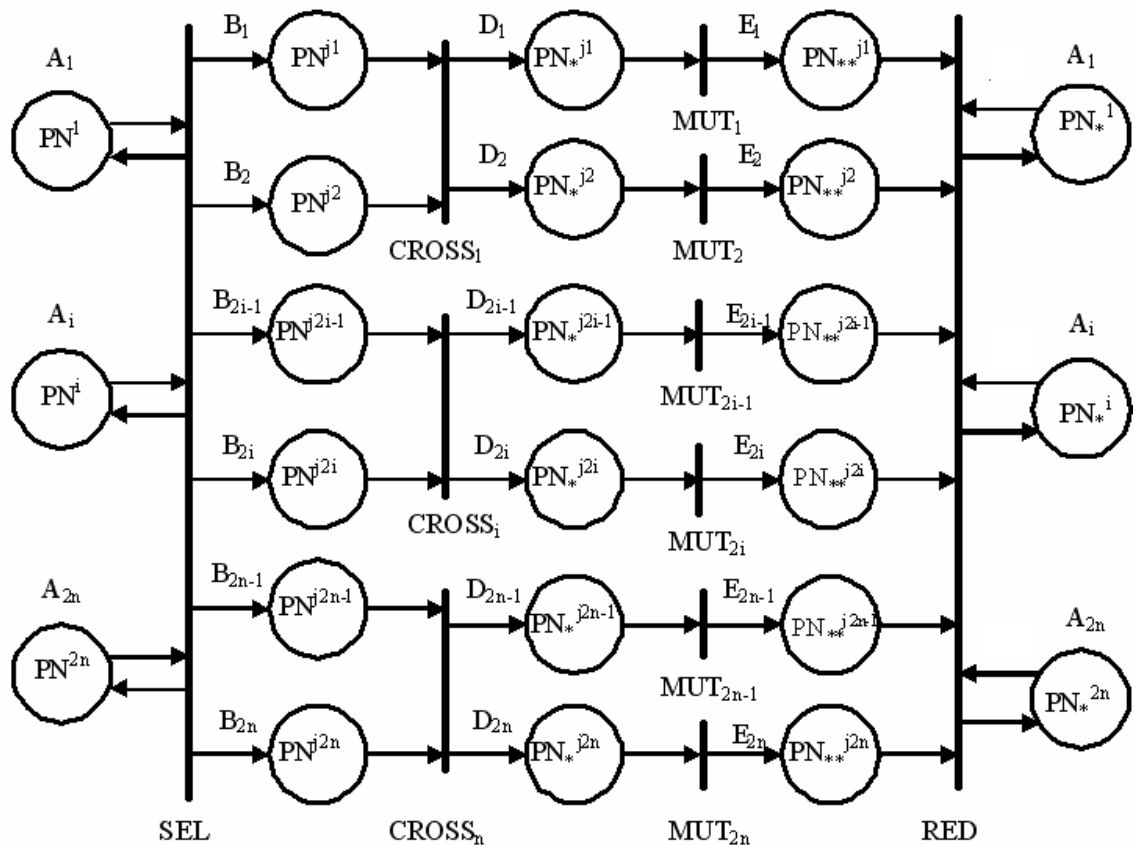


Рисунок 3. Формализация генетического алгоритма с помощью ВСП

5. Задать условие при котором работа модели на основе ВСП остановиться.
6. Поместить начальную популяцию G^0 в слой A_1, \dots, A_{2n} предложенной модели ГА на основе ВСП.

7. Провести вычислительный эксперимент на основе предложенной модели.

8. По окончании вычислительного эксперимента в позиции A_1 будет находиться модель PN системы O , которая лучше всех удовлетворяет заданному свойству Z_k .

Задача полностью решена.

3. МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ СТРУКТУРНОГО СИНТЕЗА БОЛЬШИХ ДИСКРЕТНЫХ СИСТЕМ

3.1 Структурный синтез больших дискретных систем на основе эволюционных методов

Структурно-параметрический синтез больших дискретных систем с заданным поведением (БДСЗП) является разновидностью более общей научной и практической проблемы: синтеза систем с заданным поведением, которые способны преобразовывать заданный входной вектор (данные, вещество, энергия и т.д.) в требуемый выходной вектор [1-3], при этом возможны ситуации, когда система должна проходить через заранее заданные состояния.

Для разработки методологического аппарата структурно-параметрического синтеза БДСЗП следует:

- создать модели и методы, которые позволяют формировать структуру синтезируемой БДСЗП;
- создать модели и методы, которые позволят синтезировать параметры функционирования элементов структуры БДСЗП;
- разработать единый аппарат описания процессов структурного и параметрического синтеза БДСЗП.

В данной работе будут предложены модели и методы, которые позволяют решить задачу структурно-параметрического синтеза больших дискретных систем с заданным поведением, базирующиеся на трех современных теориях: имитационное моделирование, эволюционные методы и теория сетей Петри. Применение этих инструментальных средств к решению задачи структурно-параметрического синтеза обусловлено тем, что большинство задач в данной области можно отнести к классу многокритериальных и многоэкстремальных, то есть помимо большого числа факторов, которые влияют, как на само решение, так и на его ход, возможно

существование более одного решения, удовлетворяющего критериям синтеза. Стоит отметить, что при решении данного класса задач внимание уделяется как структуре системы, совокупности элементов и связей между ними, так и поиску настроек режимов функционирования элементов системы в возможном диапазоне функционирования. Если считать, что дискретная система – это система, состоящая из конечного числа компонентов (элементов подсистем), то даже при наличии 10-ти компонентов и порядка 10-ти экземпляров каждого компонента количество возможных конфигураций будет равно 10^{10} [1]. Понятно, что это достаточно трудоемкая задача для решения ее прямым перебором, а если учесть еще все возможные параметры функционирования элементов системы, то она становится еще более трудоемкой и справиться с ней с учетом современных вычислительных возможностей практически невозможно. Поэтому, для решения данного рода задач принято использовать методы случайного поиска, в которые принято вводить элементы детерминированности. Наиболее подходящими для этого являются эволюционные методы [4-6].

В настоящее время, один из методов, который достаточно хорошо зарекомендовал себя при решении задач синтеза, оптимизации и моделирования путем случайного подбора, комбинирования и вариаций искомых структур и параметров является генетический алгоритм. Его применение позволит уменьшить время синтеза конфигурации большой дискретной системы при работе не только с изменением элементов системы, но и изменениями настроек элементов, входящих в состав модели системы.

Генетический алгоритм требует адаптации к области его применения, в нашем случае это структурно-параметрический синтез больших дискретных систем. Поэтому, большое внимание следует уделить инструменту описания моделей синтезируемых систем, то есть математическому инструментарию, который должен учитывать возможности параллелизма процессов, протекающих в синтезируемой системе, а также обладающим как свойством детерминированности, так и свойством стохастичности. Не следует забывать,

что при структурном синтезе большой дискретной системы особое внимание следует уделять описанию структуры полученной в результате синтеза модели большой дискретной системы. Математическим аппаратом, который позволяет учесть все выше описанные требования является теория сетей Петри. Данный математический аппарат, так же как и генетический алгоритм, обладает свойством параллелизма, что дает возможность адаптации к предметной области, а также среди его расширений есть так называемые вложенные сети Петри, которые допускают использование меток в качестве сете. Данное свойство позволяет нам представлять модели синтезируемой системы в виде сети Петри [14-23] и проводить над ними вычислительные эксперименты. Кроме этого теория сетей Петри дает возможность отслеживания поведения системы за счет построения к полученной в результате синтеза модели либо дерева достижимых маркировок, либо графа достижимых маркировок (в зависимости от класса решаемых задач).

Выбранные нами инструментальные средства обладают свойством параллелизма, поэтому будет целесообразным выполнить расчеты, которые покажут целесообразность применения параллельных вычислений при использовании предложенных моделей.

2. Методика

2.1 Генетические алгоритмы

Выбранный в качестве инструментального , реализующего процесс структурно-параметрического синтеза, генетический алгоритм отражает принципы естественного отбора, то есть выживание наиболее перспективные особей, наследование и мутации. Данное инструментальное средство позволяет настраивать работу своих операторов (селекции, скрещивания, мутации и редукции), что дает возможность влиять на скорость осуществления синтеза моделей, удовлетворяющих критериям поиска [3-6].

В качестве основных отличий генетических алгоритмов от традиционных методов стоит выделить следующие:

1. В генетическом алгоритме решения представляются в виде кодовой строки, при этом преобразование данных кодов производится вне какой-либо связи с их семантикой [4-11].

2. Генетический алгоритм использует свойство параллелизма, то есть на этапе поиска используются несколько точек пространственного решения, дает возможность избежать нежелательного попадания в локальный экстремум целевой функции, не являющейся унимодальной.

3. При правильном кодировании генетический алгоритм будет использовать только допустимые значения структур и параметров, что даст возможность значительно повысить быстродействия процесса структурно-параметрического синтеза.

4. При синтезе новых точек в пространстве решений генетический алгоритм использует вероятностные правила, а при осуществлении перехода от одних точек к другим – детерминированные. Объединение двух этих правил показывает себя более эффективным, чем их раздельное использование.

Теория генетических алгоритмов использует ряд биологических терминов.

Кодовая строка, описывающая возможное решение, и ее структура называются генотипом. Интерпретация кода с позиции решаемой задачи – фенотипом. В нашей предметной области под фенотипом будем понимать некоторое проектное решение, которое было получено в результате структурно-параметрического синтеза в виде структурной схемы с заданными параметрами функционирования БДСЗП. Код также называют хромосомой.

Совокупность хромосом, одновременно используемых генетическим алгоритмом на каждом этапе поиска, называется популяцией. Размер популяции (число хромосом) обычно фиксируется и является одной из характеристик генетического алгоритма. Популяция обновляется созданием

новых хромосом и уничтожением старых. Таким образом происходит смена поколений популяций.

Генерация новых хромосом основана на моделировании процесса размножения: пара родителей порождает пару потомков. За генерацию отвечает оператор скрещивания, который в общем случае применяется к каждой родительской паре с некоторой вероятностью. Значение этой вероятности наряду с размером популяции является одной из характеристик генетического алгоритма.

К хромосомам новой популяции применяется оператор мутации. Вероятность применения этого оператора к хромосоме также является параметром генетического алгоритма.

Оператор отбора осуществляет выбор родительских хромосом для порождения потомков, а оператор редукции – выбор хромосом, подлежащих уничтожению. В обоих случаях выбор делается на основании качества хромосомы, которое определяется значением целевой функции на этой хромосоме.

Генетический алгоритм прекращает свою работу в следующих случаях:

1. Обработано определенное число поколений, заданных пользователем перед началом работы алгоритма.
2. Качество всех хромосом превысило значение, заданное пользователем до начала работы алгоритма.
3. Хромосомы стали однородными до такой степени, что их улучшение от поколения к поколению происходит очень медленно.

Функционирование генетического алгоритма, в рассматриваемой предметной области структурно-параметрического синтеза БДСЗП, может быть представлена следующим образом.

Начальная популяция может быть сформирована как случайным образом, так и с привлечением экспертов. Полученные хромосомы представлены в виде бинарной строки одинаковой длины. На данном этапе надо понимать, что, исходя из предметной области, длина хромосом должна быть

одинаковой, так как различные системы могут иметь разное количество элементов и связей между ними и работа операторов генетического алгоритма может привести к появлению не существующих в природе моделей систем. Поэтому должен допускаться бит повтора, то есть для выравнивания длины хромосомы допускается повторная запись элементов и связей, но на этапе вычислительного эксперимента, данный элемент не попадет в модель БДСЗП на основе сети Петри.

Выбор родительских хромосом для размножения и уничтожение хромосом происходит в соответствии с природным принципом «выживает сильнейший». На данном этапе актуальна проблема задания операторов отбора и редукции, отражающие особенности структурно-параметрического синтеза БДСЗП. Аналогичная проблема возникает при задании оператора скрещивания, в котором необходимо моделировать передачу свойств между различными структурными схемами БДСЗП и параметров функционирования элементов структуры.

При работе генетического алгоритма возможно использование стратегии элитизма, которая позволяет переход лучшей хромосомы из одного поколения популяции в другое без изменений, что позволяет поддержку высокого уровня качества популяции. [6- 13]

Оператор мутации вносит случайные изменения в хромосомы, расширяя область пространства поиска.

Применение операторов генетического алгоритма многократно, направлено на улучшение начальной популяции в целом и улучшение качества отдельных хромосом в частности. Основным результатом работы генетического алгоритма при решении задачи структурно-параметрического синтеза является хромосома или ряд хромосом в конечной популяции, у которых значение целевой функции принимает экстремальное значение.

2.2 Применение и адаптация генетических алгоритмов в различных предметных областях

Как говорилось ранее, генетический алгоритм является стратегическим подходом и требует адаптации к конкретной предметной области. Рассмотрим одну из основных проблем, которая возникает при адаптации – кодирование хромосомы. От правильного кодирования зависит устойчивость, сходимость и скорость работы генетического алгоритма.

На данном этапе надо понимать, что, исходя из предметной области, длина хромосом должна быть одинаковой, так как различные системы могут иметь разное количество элементов и связей между ними и работа операторов генетического алгоритма может привести к появлению не существующих в природе моделей систем. Поэтому в кодовой строке должен допускаться бит повтора, то есть для выравнивания длины хромосомы допускается повторная запись элементов и связей, но на этапе вычислительного эксперимента, данный элемент не попадет в модель БДСЗП на основе сети Петри.

Допустим, что у нас имеется три разновидности элемента памяти: RS, T и D триггеры. Построим для них модели на основе выбранного математического аппарата сетей Петри (см. рис. 4)

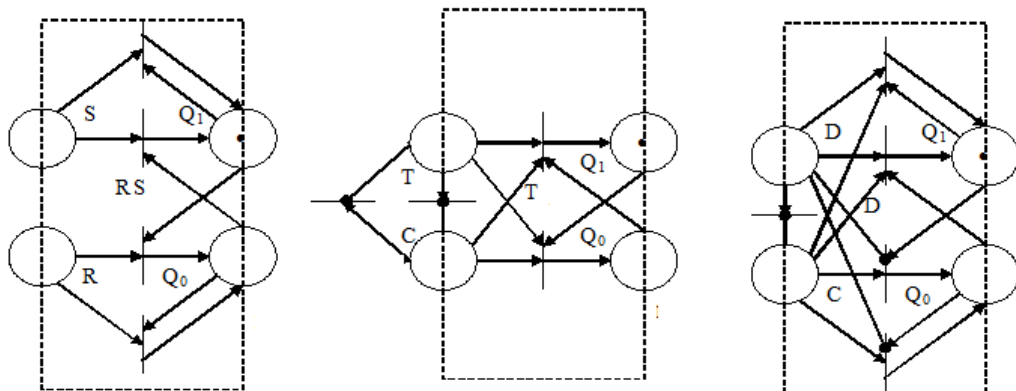


Рисунок 4. Пример моделей триггеров RS, T и D

Требуется произвести кодирование каждого из элементов с использованием бинарного дерева с ветвями одинаковой длины, так как количество разрядов для каждого из элементов должно быть одинаковым. Использование бинарного дерева также обусловлено тем, что в генетических

алгоритмах есть возможность использования данного представления хромосом, а также то, что в результате движения по ветвям данного вида дерева можно сформировать бинарный код.

Так как количество элементов у нас равно трем, то количество разрядов, которое нам понадобится равно двум. Следовательно, возможна ситуация, при которой одна ветвь бинарного дерева не будет иметь смысла, это не допустимо, значит продублируем один компонент в дереве еще раз (компонент RS по ветви [1 1]), как это показано на рисунке 2(A). При составлении дерева следует учитывать сложность элемента, т.е. эксперт располагает их от простого к сложному слева направо. Данный подход может пригодиться при оценке популяции.

Повтор элемента дает возможность предупредить ситуацию, при которой в кодовой строке на месте элемента появится запись [1 1], которая не будет иметь смысла, то есть такого элемента не существует в базе компонентов.

По тому же принципу построим бинарное дерево для межкомпонентных связей (см. рис. 5(B)). Исходя из предложенного правила самое простое соединение – обычная дуга, код [0 0], ингибиторная дуга является более сложным соединением и имеет код [0 1], обычная дуга имеющая функцию сложнее предыдущих двух и имеет код [0 1] и самое сложное соединение это ингибиторная дуга с функцией, она имеет код [1 1]. В данном примере показано каким образом должно происходить кодирование хромосомы с помощью бинарных деревьев.

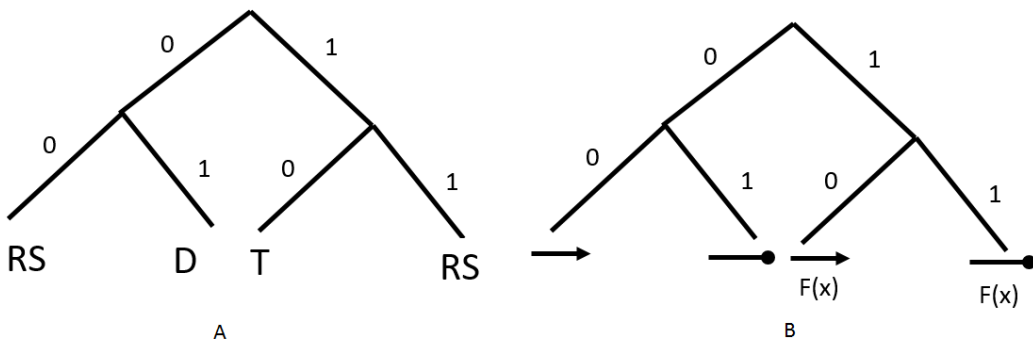


Рисунок 5. – Пример кодирования элементов и связей с помощью бинарного дерева

Проиллюстрируем пример закодированной конфигурации системы (см. рис. 6)

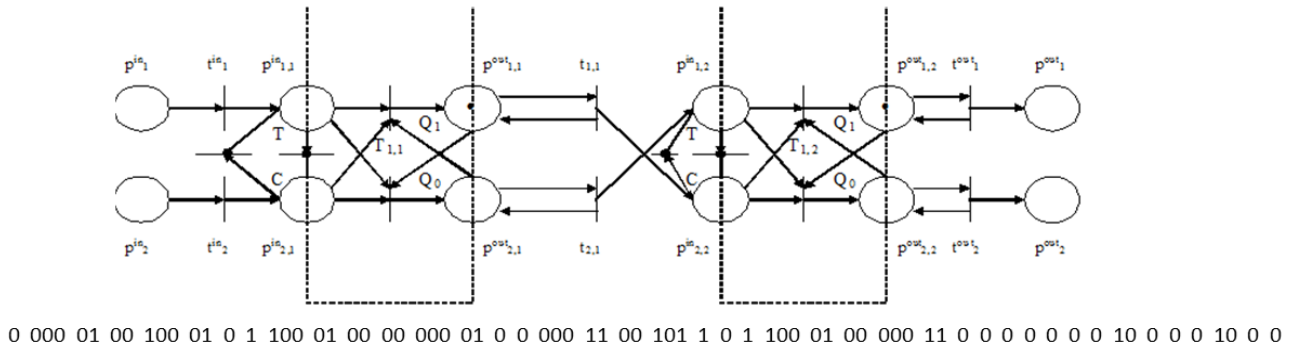


Рисунок 6 – Пример кодирования системы размерностью 1X2

Для полного описания хромосомы при решении задачи структурно-параметрического синтеза следует создать следующие деревья:

- дерево элементов;
- дерево межкомпонентных связей (может быть выделен слой межкомпонентной шины, в которую будут входить как виды соединения, так и элементы);
- дерево параметров элементов.

Если элемент или связь, или параметр не используется то перед ним ставится контрольный бит, который говорит об этом при восстановлении сети из кодовой строки.

Таким образом, бинарная строка для генетического алгоритма будет иметь одинаковую длину и всегда иметь смысл.

2.3 Применения сетей Петри для описания генетических алгоритмов

При реализации генетического алгоритма сетями Петри следует учитывать то, что потребуется не один уровень сети. Верхний уровень должен описывать работу самого генетического алгоритма, а нижнии уровни содержать модели синтезируемых БДСЗП. Следовательно, из всего многообразия расширений сетей Петри следует выбрать тот, который будет поддерживать:

- независимость предметной области;
- параллелизм;
- вероятность и детерминированность;
- структурность;
- многоуровневость.

Таким расширением являются вложенные сети Петри. В данном расширении метки каждого уровня могут быть представлены сетью Петри, что позволяет описывать БДСЗП с моделями различной вложенности.

3. Результаты

3.1 Постановка задачи

Рассмотрим следующий класс задач структурно-параметрического синтеза БДСЗП.

Дано:

$$S = \langle Input, C, O_f, MK, T_f, M, Output \rangle$$

где S – БДСЗП, синтез которой следует выполнить;

$Input$ – входы БДСЗП;

$Output$ – выходы БДСЗП;

C – элементы, входящие в состав БДСЗП;

O_f – связи элемента C_i функции которых влияют на параметр функционирования;

MK – элемент межкомпонентной шины системы S ;

T_f – функциональные компоненты элемента C_i и MK_i , значение которых влияют на параметр его функционирования;

M – начальное состояние элементов C_i системы S .

Распишем элементы, входящие в состав БДСЗП:

$$C = (C_1, \dots, C_R)$$

где C_i – i -ый компонент большой дискретной системы, R – количество компонентов БДСЗП.

$$C_i = \{C_{ij}\}_{j=1}^{M_i}$$

где C_{ij} – j -ый экземпляр i -го компонента, M_i – количество экземпляров i -го компонента.

$$P = \{P_k\}_{k=1}^L$$

где P – множество свойств, которыми может обладать синтезируемая большая дискретная система с заданным поведением, P_k – k -ое свойство множества P , L – количество свойств множества P .

Распишем связи системы:

$$O = (O_1, \dots, O_R)$$

$$O_i = \{O_{ij}\}_{j=1}^{M_i}$$

$$O_{ij} = \langle \text{Type}O_{start}, NE_{start}, N_{outstart}, \text{Type}O, NE_{end}, N_{inend} \rangle,$$

где $\text{Type}O_{start}$ – тип связи дуги;

NE_{start} – номер элемента из которого выходит связь (должна определяться порядковым номером элемента C_i или номером элемента межкомпонентной шины MK_i);

$N_{Out_{start}}$ – номер выхода элемента из которого выходит связь;

$\text{Type}O$ – тип связи;

NE_{end} – номер конечного элемента для связи должна определяться порядковым номером элемента C_i или номером элемента межкомпонентной шины MK_i);

$N_{In_{end}}$ – номер входа элемента C_i или номер входа элемента межкомпонентной шины MK_i .

Распишем элементы межкомпонентной шины:

$$MK = \langle \text{Type}MK, \langle \text{Type}MK_f \rangle \rangle,$$

где $\text{Type}MK$ – тип межкомпонентного элемента;

T_{MKf} – компонент элемента межкомпонентной шины, значение которого влияет на его функционирование (не учитывается при кодировании).

Распишем функциональные компоненты элемента C_i и MK_i , значение которых влияют на параметр его функционирования:

$$T_f = \langle \text{Type}E, \langle T_{Ef} \rangle \rangle,$$

где $\text{Type}E$ – тип элемента;

T_{Ef} – компонент элемента, значение которого влияет на его функционирование (не учитывается при кодировании).

$$M = \langle \text{Type}E, \langle M_0 \rangle \rangle$$

где $\text{Type}E$ – тип элемента;

M_0 – начальное состояние элемента.

Требуется: для заданного поведения, которым должна обладать БДСЗП S , подобрать по одному экземпляру каждого компонента C_i и параметр его функционирования так, чтобы большая дискретная система обладала заданным поведением.

3.2 Решение задачи

Для решения задачи структурно-параметрического синтеза требуется подготовить элементную базу моделей компонентов на основе сетей Петри. В данных моделях выделить функциональные дуги и переходы, которые влияют на работу модели элемента. Выделить возможные начальные маркировки для каждого элемента, которые будут отображать начальное состояние элемента, входящего в состав синтезируемой системы.

После подготовки моделей элементов следует построить следующие бинарные деревья:

1. бинарное дерево для множества элементов C , которые могут входить в состав БДСЗП;
2. бинарное дерево функциональных связей O_f , которые влияют на параметр функционирования C_i в частности и всей системы S в целом;
3. бинарное дерево элементов межкомпонентной шины MK , которые могут входить в состав БДСЗП S ;

4. бинарное дерево функциональных переходов T_f элемента C_i и MK_i , значение которых влияют на параметр функционирования элемента в частности и системы в целом;

5. бинарное дерево, отражающее возможные начальные состояния M (начальные маркировки моделей элементов на основе сетей Петри) элементов C_i и MK_i начальное состояние которых влияет как на работу элементов C_i , так и на параметр функционирования системы S .

После этого выполнить формирование хромосом начальной популяции в виде бинарной кодовой строки. Которая в свою очередь может быть развернута в сеть Петри за счет матриц P/T , T/P и M_0 .

Целевая функция может рассчитываться по:

- степени обеспечения необходимого результирующего отклика БДСЗП;

- степени обеспечения заданного поведения.

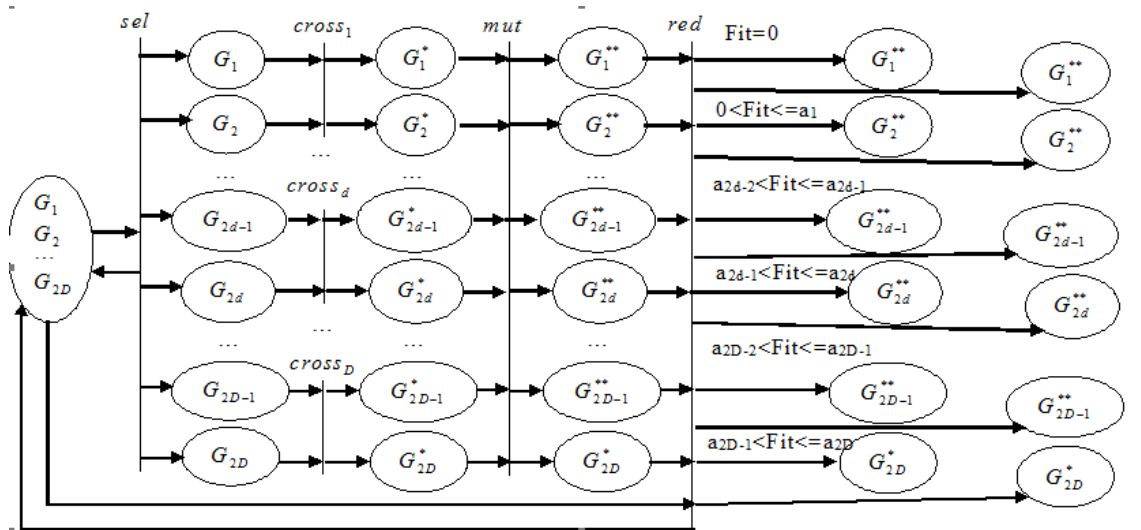


Рисунок 7. – Модель генетического алгоритма на основе вложенных сетей Петри

Для этого следует задать ряд входных векторов и ряд выходных векторов, а так же промежуточные состояния для синтезируемой БДСЗП.

Для оценки приближенности к искомому решению можно использовать расстояние Хеммига и дерево или граф достижимых

маркировок (по ним можно будет отслеживать, проходит ли модель через требуемые состояния). Также можно использовать функцию штрафов.

Структурно-параметрический синтез будет выполнять сеть Петри следующего вида (см. рис. 7)

Таких моделей в общей сети Петри будет четыре (см. рис. 8). Для структурного синтеза:

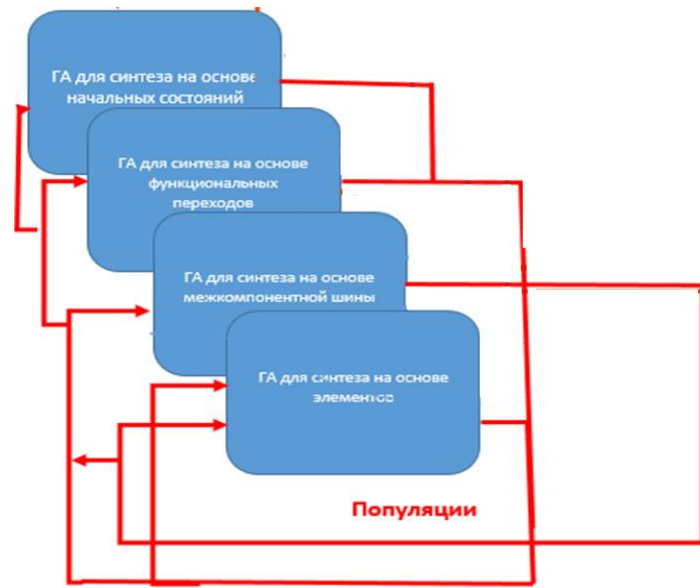


Рисунок 8. – Модель, обеспечивающая структурно-параметрический синтез БДСЗП

- синтез на основе элементов БДСЗП;
- синтез на основе межкомпонентной шины.

Для параметрического синтеза:

- синтез на основе функциональных соединений и переходов;
- синтез на основе начальных состояний элементов БДСЗП.

Каждая из четырех моделей генетического алгоритма может быть запущена как отдельно, так и в комбинации.

Так как предложенные инструментальные средства используют свойство параллелизма, о будет целесообразным выполнить расчет использования параллельных вычислений для представленного подхода.

Исходя из представленной модели можно сказать, что самыми трудоемкими по вычислению являются два оператора генетического

алгоритма – оператор селекции и оператор редукции. Так как размер популяции и размер самих моделей может быть очень большим, соответственно и проведение вычислительного эксперимента является трудоемким.

3.2 Применение параллельных вычислений

В настоящее время становится актуальной разработка универсальных методов, способных решать задачи структурно-параметрического синтеза дискретных систем. В работах [1-3] был предложен подход, основанный на трех современных направлениях исследований: теория сетей Петри, эволюционные методы и имитационное моделирование. В ходе исследований была получена модель генетического алгоритма, построенная с помощью вложенных сетей Петри (см. рис. 9).

Предложенная модель использует вычислительный эксперимент для оценки приспособленности полученной в результате синтеза модели дискретной системы на сетях Петри. В начале процедуры структурно-параметрического синтеза должно быть задано поведение синтезируемой системы в виде кортежа входных и выходных векторов. Для оценки приспособленности модели требуется провести вычислительный эксперимент, то есть на вход полученным моделям подается входной вектор, модель обрабатывает его и полученные на выходе вектор сравнивается с эталонным.

Исходя из представленной модели можно сказать, что самыми трудоемкими по вычислению являются два оператора генетического алгоритма – оператор селекции и оператор редукции. Так как размер популяции и размер самих моделей может быть очень большим, соответственно и проведение вычислительного эксперимента является трудоемким.

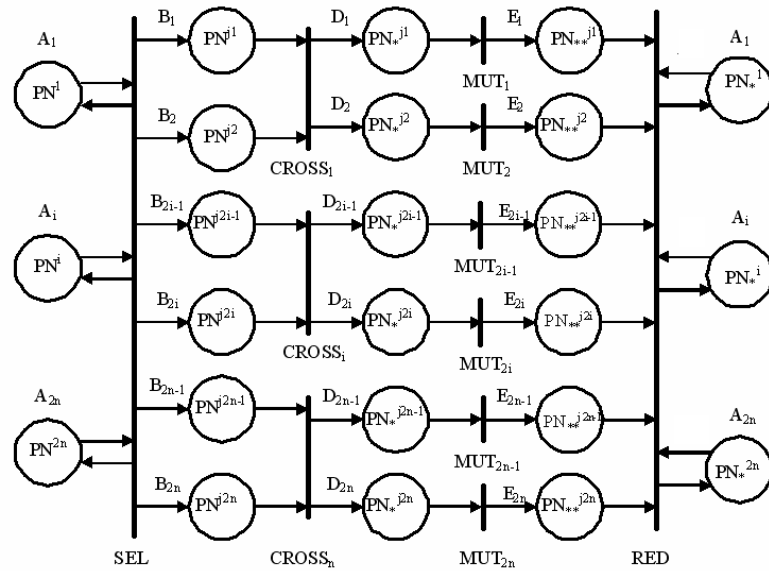


Рисунок 9 - Модель генетического алгоритма на основе вложенных сетей Петри

Для увеличения скорости работы представленной модели генетического алгоритма предлагается использовать подход, основанный на параллельных вычислениях [4, 5]. Данный подход позволяет использовать свойства параллелизма, которое присутствует как в теории сетей Петри, так и в генетических алгоритмах. Применение параллельных вычислений должно способствовать построению эффективной программной и аппаратной реализации предлагаемого подхода.

В данной статье проведем вычисления, которые должны показать, существует ли возможность увеличения быстродействия, предложенной модели структурно-параметрического синтеза дискретных систем на основе вложенных сетей Петри, с применением параллельных вычислений и на сколько данный подход будет эффективен. Для этого воспользуемся законом Амдала, который иллюстрирует ограничение роста производительности вычислительной системы с увеличением количества вычислителей $S_p =$

$$\frac{1}{\alpha + \frac{1-\alpha}{p}}$$

где α – доля от общего вычисления, которая может быть получена только последовательными расчетами;

$(1 - \alpha)$ – доля которая может быть распараллелена идеально (то есть время вычисления будет обратно пропорционально числу задействованных узлов p);

p – количество процессоров в вычислительной системе.

Рассмотрим процессы, которые должны происходить при работе предложенной модели генетического алгоритма на основе вложенных сетей Петри и проведем их классификацию с учетом возможности распараллеливания.

Оператор SEL при своей работе должен:

- Рассчитать функцию приспособленности для каждой особи (операция, которая может выполняться на разных вычислителях);
- Подготовить родительские пары (операция которой, требуются все значения, т.е. выполняется на одном вычислителе).

Оператор Cross:

- Выполняет скрещивание родителей с целью получения потомков (данную операцию можно выполнять как на одном вычислителе, так и с использованием разных вычислителей. В данной работе рассмотрим случай, когда выполнение оператора CROSS является последовательным).

Оператор MUT:

- Выполняет изменение генетического кода у полученных потомков (операция, которая может выполняться на разных вычислителях).

Оператор RED:

- Рассчитывает функцию приспособленности для каждого потомка (операция, которая может выполняться на разных вычислителях);
- Выполняет уничтожение особей, функция приспособленности которых не удовлетворяет заданным критериям (операция которой, требуются все значения, т.е. выполняется на одном вычислителе).

Таким образом, в представленном варианте модели получаем шесть операций из которых три операции должны выполняться последовательно и

три операции, которые могут быть распараллелены, т.е. $N=6$, $N_{\text{POSL}}=3$, $N_{\text{RASP}}=3$.

В нашем случае $\alpha = N_{\text{POSL}}/N = 3/6 = 0,5$.

Проведем расчет, который покажет, во сколько раз быстрее выполнится программный код (или аппаратная реализация) с долей последовательных вычислений α при использовании p вычислителей (процессоров). Полученные значения представлены в таблице.

Таблица

Возможность увеличения скорости работы модели ГА на ВСП при использовании параллельных вычислений

P	1	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
S_p	1	1,818	1,904	1,935	1,951	1,960	1,967	1,971	1,975	1,978	1,980

Как видно из полученных в результате вычислений данных, с учетом не распараллеленного оператора CROSS быстроедействие реализации предложенной модели увеличивается практически в два раза, что говорит о целесообразности применения параллельных вычислений.

Стоит отметить, что в данном расчете не учитывается трудоемкость операций, ведь восстановление сети из полученного в результате синтеза кода особи популяции и проведение вычислительного эксперимента над ней (операции, которые могут быть распараллелены в операторах SEL и RED) занимает больше вычислительных ресурсов, чем к примеру работа оператора MUT (даже с учетом применения многоточечной мутации), а значит реальное ускорение процесса будет еще больше.

В соответствии с приведенными вычислениями можно сделать вывод, что применение параллельных вычислений при реализации модели генетического алгоритма на основе вложенных сетей Петри для решения задачи структурно-параметрического синтеза дискретных систем является актуальным и может дать значительные результаты при увеличении быстроедействия программной или аппаратной реализации.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе выполнения исследования была достигнута поставленная цель - разработаны модели и алгоритмы, для повышения качества процедуры структурного синтеза больших дискретных систем.

Для этого были решены следующие задачи:

1. Проведен анализ существующих методов и инструментальных средств в данной предметной области;
2. Выполнен выбор инструментальных средств для разработки комплекса моделей и алгоритмов решения задачи структурного синтеза больших дискретных систем;
3. Разработана модель представления большой дискретной системы в рамках решения задачи структурного синтеза;
4. Разработаны модели и алгоритмы для решения задачи структурного синтеза больших дискретных систем с использованием выбранных инструментальных средств;
5. Выполнен расчет возможности использования параллельных вычислений к задаче структурного синтеза;
6. Разработаны основы адаптивного управления процессом структурного синтеза.

Методическую основу исследования составляют модели и методы теории имитационного моделирования, теория сетей Петри и интеллектуальные методы поиска решений.

Научная новизна заключается в разработке и апробации новых моделей и алгоритмов для решения задачи структурного синтеза больших дискретных систем с использованием комбинированного подхода на основе трех теорий: имитационного моделирования, эволюционных методов и теории сетей Петри

Практическая значимость

1. Предложенные модели и алгоритмы могут использоваться как при проектировании больших дискретных систем, так и при разработке интеллектуальных блоков АСУ.

2. Работа «Разработка аппаратно-программного комплекса управления климатическими условиями животноводческих предприятий АПК с функцией повышенной живучести», на основе предложенных моделей и алгоритмов, получила поддержку в программе У.М.Н.И.К. в осенью 2015 (представлял работу асс. Карамышев Е.П.)

Список использованных источников

1. Котов В.Е. Алгебра регулярных сетей Петри // Кибернетика. – 1980. – № 5. – С. 10-18.
2. . АДАПТИВНЫЙ СТРУКТУРНО-ПАРАМЕТРИЧЕСКИЙ СИНТЕЗ ДИСКРЕТНЫХ СИСТЕМ С ЗАДАННЫМ ПОВЕДЕНИЕМ: монография/ Петросов Д.А., Ломазов В.А., Игнатенко В.А., Добрунова А.И.// - Белгород: Изд-во Белгородского ГАУ, 219 с.
3. EVOLUTIONARY SELECTION OF THE MODELS OF INTERACTING PROCESSES ON THE BASIS OF EXPERT ASSESSMENTS / Ломазов В.А., Маторин С.И., Петросов Д.А., Ломазова В.И., Добрунова А.И.//International Journal of Applied Engineering Research.– 2016, № 3, С. 1867-1873.
4. SELECTING THE INNOVATIVE PROJECTS TAKING INTO ACCOUNT THE SENSITIVITY OF MULTI CRITERIA EVALUATION FROM THE CHANGES OF EXPERT JUDGMENTS/ Ломазов В.А., Ломазова В.И., Нестерова Е.В., Игрунова С.В., Петросов Д.А // International Business Management.- 2016.- Vol.10(16).- P.3354-3358
5. ВОЗМОЖНОСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ ПАРАЛЛЕЛЬНЫХ ВЫЧИСЛЕНИЙ В ЗАДАЧАХ СТРУКТУРНО-ПАРАМЕТРИЧЕСКОГО СИНТЕЗА ДИСКРЕТНЫХ СИСТЕМ НА ОСНОВЕ ЭВОЛЮЦИОННЫХ МЕТОДОВ/ Петросов Д.А.// Успехи современной науки. 2016. №11. С. 85-91 (AGRIS)
6. ПРИМЕНЕНИЕ ГЕНЕТИЧЕСКИХ АЛГОРИТМОВ К РЕШЕНИЮ ЗАДАЧИ ПАРАМЕТРИЧЕСКОГО СИНТЕЗА БОЛЬШИХ ДИСКРЕТНЫХ СИСТЕМ С ЗАДАННЫМ ПОВЕДЕНИЕМ./Д.А. Петросов, В.А. Ломазов, В.А. Игнатенко, Е.П. Карамышев, Д.А. Басавин// Научные ведомости Белгородского государственного университета. Серия: Экономика. Информатика. 2016. Т. 34. № 7-1. С. 116-124.

7. СТРУКТУРНО-ПАРАМЕТРИЧЕСКАЯ КЛАСТЕРИЗАЦИЯ МОДЕЛЕЙ ВЗАИМОСВЯЗАННЫХ ОРГАНИЗАЦИОННО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ /Ломазов В.А., Ломазова В.И., Михайлова В.Л., Петросов Д.А.// Естественные и технические науки. 2016. № 5 (95). С.

8. ПРИМЕНЕНИЕ ИНФОРМАЦИОННЫХ СЕТЕЙ ПЕТРИ ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ НЕЙРОННОЙ СЕТИ В ЗАДАЧЕ УПРАВЛЕНИЯ АДАПТИРОВАННЫМ ГЕНЕТИЧЕСКИМ АЛГОРИТМОМ ПРИ РЕШЕНИИ ЗАДАЧ СТРУКТУРНО-ПАРАМЕТРИЧЕСКОГО СИНТЕЗА ДИСКРЕТНЫХ СИСТЕМ/ Петросов Д.А.// Успехи современной науки и образования. 2016. №12. С. 40-47 (AGRIS)

9. ЭВОЛЮЦИОННЫЙ ВЫБОР ПОКАЗАТЕЛЕЙ ПРИ ОЦЕНИВАНИИ СИСТЕМ /Ломазов А.В., Ломазов В.А., Петросов Д.А.// В сборнике: Фундаментальные и прикладные вопросы науки и образования сборник научных трудов по материалам международной научно-практической конференции: в 2-х частях. 2016. С. 33-34.

10. КЛАСТЕРИЗАЦИЯ ПРОСТРАНСТВА ОЦЕНОЧНЫХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ СЛОЖНЫХ СИСТЕМ МЕТОДОМ КЛОНАЛЬНОЙ СЕЛЕКЦИИ/
Ломазов В.А., Ломазова В.И., Петросов Д.А.// Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. 2016. № 7-1. С. 127.

11. Лановой А.Ф. О методах имитационного моделирования дискретных технологических процессов // 2-я Международная конференция "Теория и техника передачи, приема и обработки информации"; Тез. докл. / ХТУРЭ, Харьков-Туапсе, 1996. – С. 180.

12. Кучеренко Е.И., Кучеренко В.Е. К проблеме анализа сложных технических систем с использованием сетевых моделей // 2-я Международная конференция "Теория и техника передачи, приема и обработки информации"; Тез. докл. / ХТУРЭ, Харьков-Туапсе, 1996. – С. 165.

13. Котов В.Е. Сети Петри. – М.: Наука, 1984. – 160 с.
14. Мурогов В.Н. Имитационное моделирование микропроцессорных систем на базе Е-сетей для ПЭВМ // Микропроцессорные средства и системы. – 1990. – № 1. – С. 36-37.
15. Feldbrugge F. Petri Net Tools // LNCS, vol. 222. – Springer-Verlag, 1986. – P. 58-102.
16. Feldbrugge F., Jensen K. Petri Net Tool Overview 1986 // LNCS, vol. 255. – Springer-Verlag, 1987. – P. 213-255.
17. Feldbrugge F. Petri Net Tool Overview 1992 // LNCS, vol. 674. – Springer-Verlag, 1993. – P. 156-202.
18. <http://www.dsi.unimi.it/Users/Tesi/trompede/petri/home.html>
19. Ceska M. Tools for net model applications // System Science XI (International Conference), Wroclaw, Poland, 1992. – P. 69-80.
20. Grönberg P., Tiusanen M., Varpaaniemi K. PROD - A Pr/T-Net Reachability Analysis Tool // Digital Systems Laboratory, series B: Technical Report No. 11, June 1993. – P. 52-75.
21. Котов В.Е., Черкасова Л.А. Структурированные сети // Кибернетика. – 1981. – № 4. – С. 33-41.
22. Bondi M. HYPERNET - Manuale Utente. – DSI Univ. Stat. Milano, 1990. – 51 p.
23. Suraj Z. GRAPH: A graphical system for Petri Net design and simulation // Petri Net Newsletter. – 1990. – no. 35. – P. 79-93.
24. Damm W., Döhmen G. AADL: a net based specification method for computer architecture design // Languages for parallel architectures: design semantics and implementation models. – John Wiley and sons, 1989. – P. 147-164.
25. <http://www.daimi.aau.dk/designCPN/>
26. Burns F.P., Koelmans A.M., Yakovlev A.V. Analysing superscalar processor architectures with coloured Petri nets // International Journal on Software Tools for Technology Transfer. – Vol. 2. – Issue 2. – Springer-Verlag, 1998. – P. 182-191.

27. Semenov A., Koelmans A.M., Lloyd L., Yakovlev A. Designing an asynchronous processor using Petri nets // IEEE Micro. – 17(2). – March 1997. – P. 54-64.
28. Razouk R.R. The Use of Petri Nets for Modeling Pipelined Processors // Technical Report 87-29, University of California, Department of Information and Computer Science, 1987. – P. 166-179.
29. Dennis J.B. Modular, Asynchronous Control Structures for a High Performance Processor // Proceedings of Project MAC Conference on Concurrent Systems and Parallel Computation, June 1970. – P. 55-92.
30. Ельчанинов Д.Б., Кривуля Г.Ф., Лобода В.Г., Механа Сами Применение генетических алгоритмов и многоуровневых сетей Петри при проектировании компьютерной техники // Радиоэлектроника и информатика. 2002. № 1. С. 89-97.
31. Колмогоров А.Н., Фомин С.В. Элементы теории функций и функционального анализа: Учебник для вузов. М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1989. 624 с.
32. Березнев В., Юдин Д. Пути повышения интеллектуального потенциала вычислительной техники // "Вопросы моделирования и анализа в задачах принятия решений". Сборник статей Вычислительного центра РАН. 2000. С. 106-124.
33. Денисов В., Тарасенко В., Митник Т. Идеи должны зарабатывать // Наука и жизнь. 2002. №1. С. 55.
34. Колмогоров А.Н., Фомин С.В. Элементы теории функций и функционального анализа: Учебник для вузов. – 6-е изд., испр. – М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1989. – 624 с.
35. Рассел С., Норвиг П. Искусственный интеллект: современный подход (AIMA). – М.: Вильямс, 2007. – 1408 с.
36. Джарратано Д., Райли Г. Экспертные системы: принципы разработки и программирование. – М.: Вильямс, 2006. – 1152 с.

37. Гладков Л.А., Курейчик В.В., Курейчик В.М. Генетические алгоритмы. – М.: Физматлит, 2006. – 320 с.
38. Воеводин В.В., Жуматий С.А. Вычислительное дело и кластерные системы. – М.: Изд-во МГУ, 2007. – 150 с.
39. Панфилов И.А. Модели и алгоритмы выбора эффективной конфигурации многопроцессорных систем обработки информации и управления: Дис. ... канд. техн. наук: 05.13.01. – Красноярск, 2006. – 122 с.
40. Ройзензон Г.В. Многокритериальный выбор вычислительных кластеров // Методы поддержки принятия решений: Т.12. – М.: Едиториал УРСС, 2005. – С. 68-94.
41. René David, Hassane Alla Discrete, Continuous, and Hybrid Petri Nets. – Springer, 2005. – 524 p.
42. Эволюционная обработка информации в задачах графоаналитического синтеза больших дискретных систем управления: монография/ Игнатенко В.А., Добрунова А.И., Ломазов В.А., Петросов Д.А.// - Белгород: Изд-во Белгородского ГАУ, 196 с.
43. Large discrete systems evolutionary synthesis procedure /D. A. Petrosov, A.I. Dobrunova, V.A. Lomazov, V.I. Lomazova, S. I. Matorin// Biosciences Biotechnology Research Asia, August 2015. Vol. 12(2), 1767-1775.
44. Evolutionary synthesis of large discrete systems with dynamic structure/D. A. Petrosov, A.I. Dobrunova, V.A. Lomazov, V.I. Lomazova, S. I. Matorin// Biosciences Biotechnology Research Asia, December 2015. Vol. 12(3)
45. Эволюционный синтез систем на основе заданной элементной базы компонентов/ Петросов Д.А., Ломазов В.А., Басавин Д.А.// Научные ведомости Белгородского государственного университета. Экономика. Информатика. 2015, Т. 34. № 7-1, с.116-124.
46. Формирование иерархии оценочных показателей сложных динамических систем на основе экспертных технологий/Ломазов А.В., Ломазов В.А., Петросов Д.А.// Фундаментальные исследования. 2015. № 7-4. С. 760-764.

47. Имитационное моделирование с использованием системно-объектного подхода/ Маторин С.И. , Жихарев А.Г., Зайцева Н.О.//Прикладная информатика.2015. № 6 (60).

48. Инструментальная поддержка синтеза математических моделей взаимосвязанных процессов на основе нечеткого анализа областей применимости/Ломазов А.В., Ломазова В.И.// Естественные и технические науки, 2015, № 7 (85), с. 86-87.

49. Системно-объектное имитационное моделирование транспортных и технологических процессов / Маторин С.И. , Жихарев А.Г., Зайцева Н.О. //Научные ведомости Белгородского государственного университета. Экономика. Информатика. 2015, № 7 (204), вып. 34/1, с.159-169.

50. Обзор графоаналитических инструментальных средств моделирования в задачах синтеза систем/ Ломазов В.А., Петросов Д.А., Игнатенко В.А. //Новая наука: опыт, традиции, инновации: Международное научное периодическое издание по итогам Международной научно-практической конференции (24 ноября 2015 г., г. Стерлитамак).- Стерлитамак: РИЦ АМИ, 2015. 167-170

51. О новом методе имитационного моделирования технологических процессов/ Маторин С.И., Зайцева Н.О.// В сборнике: Информационно-аналитические системы и технологии Белгородский университет кооперации, экономики и права. Белгород, 2015. С. 36-46.

52. Анализ графоаналитической модели генетического алгоритма синтеза систем со статическими и динамическими межэлементными связями/Петросов Д.А., Ломазов В.А., Оганова И.Б.// В сборнике статей Международной научно-практической конференции: Роль инноваций в трансформации современной науки. Уфа, 2015. С. 31-35.

53. Моделирование процесса структурного синтеза больших дискретных систем с заданным поведением/ Петросов Д.А., Ломазов В.А.// В сборнике: Международной научно-практической конференции: Проблемы

управления, обработки и передачи информации «УОПИ 2015». Саратов, 22 сентября 2015 г.

54. Методика вычислительных экспериментов по оценке устойчивости управленческих решений от изменений экспертных суждений/ В.А. Ломазов, Михайлова В.Л., Петросов Д.А., Тюкова Л.Н.// Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. 2015. № 5-3. С. 521.

55. Имитационное моделирование с использованием системно-объектного подхода на примере транспортных и технологических процессов/ Маторин С.И., Жихарева А.Г., Зайцева Н.О.// Материалы X научно-практической конференции: Объектные системы – 2015. 10-12 мая 2015г. С. 51-57

56. Ельчанинов Д.Б., Петросов Д.А., Механа Сами Применение генетических алгоритмов при проектировании компьютерной техники // Вестник Херсонского государственного университета. № 2 (18). 2003. – С. 146-148.