

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ УКРАИНЫ  
ВОСТОЧНОУКРАИНСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ  
МИНИСТЕРСТВО АГРАРНОЙ ПОЛИТИКИ УКРАИНЫ  
ЛУГАНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ АГРАРНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

---

**Л.И. Леви**

**ОПЕРАТИВНОЕ УПРАВЛЕНИЕ  
ИНЖЕНЕРНЫМИ СЕТЕВЫМИ  
СИСТЕМАМИ**

Луганск 2001

**МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ УКРАИНЫ  
ВОСТОЧНОУКРАИНСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ  
МИНИСТЕРСТВО АГРАРНОЙ ПОЛИТИКИ УКРАИНЫ  
ЛУГАНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ АГРАРНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ**

**Л.И. Леви**

**ОПЕРАТИВНОЕ УПРАВЛЕНИЕ  
ИНЖЕНЕРНЫМИ СЕТЕВЫМИ  
СИСТЕМАМИ**

**Монография**

Издательство ВНУ  
Луганск 2001

Затверджено  
Вченою радою Луганського державного аграрного університету

Рецензенти:

**Коробецький Ю.П.**, доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри автоматизації і систем управління Східноукраїнського національного університету

**Белодєдов В.О.**, доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри сільськогосподарських машин Луганського державного аграрного університету

**Леві Л. І.**

Л 36 **Оперативне управління інженерними мережними системами:**  
Монографія. – Луганськ: вид-во СНУ, 2001. – 176 с.: бібліогр.  
151 назва.

ISBN 966-590-270-9

У монографії міститься комплекс досліджень, що дозволяють розв'язати проблему автоматизації технологічних процесів розподілу цільового продукту шляхом реалізації процесів оперативного управління ієрархічно організованими інженерними мережними системами, що має важливе народногосподарське та соціальне значення. На відміну від відомих підходів до управління інженерними мережними системами, запропоновані в монографії призначені для інженерних мережних систем із неповною інформацією про об'єкти управління і середовище їхнього функціонування.

Для наукових та інженерно-технічних працівників, викладачів, аспірантів та студентів.

УДК 681.513; 62-50

ББК 39.71-082.02

ISBN 966-590-270-9

© Леві Л.І.

© Східноукраїнський національний університет, 2001

## ПЕРЕЧЕНЬ УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ И СОКРАЩЕНИЙ

В соответствии с [54 - 84], в настоящей работе использованы следующие условные обозначения и сокращения.

АК - определенная процедура автоматической классификации.

АЭ - активный элемент, соответствующий определенной дуге ИС.

ГА - глобальный алгоритм управления ИСС, порождаемый соответствующей ГЗ.

ГЗ - глобальная задача управления ИСС, порождаемая соответствующей ГЦ.

ГСУ - глобальная система управления, реализующая соответствующий ГА в иерархически организованной ИСС.

ГЦ - глобальная цель функционирования ИСС.

ЗЛП - задача линейного программирования.

ИС - определенная инженерная сеть, рассматриваемая на одном уровне иерархии, без выделения в ней иерархической структуры.

ИСС - определенная инженерная сетевая система, имеющая иерархическую организацию (структуру).

ЛА - локальный алгоритм управления определенной ЛС, порождаемый соответствующей ЛЗ.

ЛЗ - локальная задача управления определенной ЛС, порождаемая соответствующей ЛЦ.

ЛР - локальный режим функционирования соответствующей ЛС.

ЛС - определенная локальная сеть определенного уровня иерархии, входящая как подсеть (подсистема) в состав иерархически организованной ИСС.

ЛСУ - локальная система управления определенной ЛС, реализующая соответствующий ЛА.

ЛЦ - локальная цель функционирования соответствующей ЛС.

МК - магистральный канал оросительной системы, являющийся частным случаем МС иерархически организованной ИСС.

МС - магистральная сеть, являющаяся ЛС высшего уровня иерархии в иерархически организованной ИСС.

НМ - нечеткие множества.

НЛР - нечеткий логический регулятор.

НЭ - нерегулируемый элемент, соответствующий определенной дуге ИС.

ОП - оперативная память управляющей ЭВМ.

ПК - персональный компьютер.

ППП - пакет прикладных программ, реализующих определенную программу сетевой оптимизации.

ПЦП - определенный потребитель целевого продукта.

ПЭ - пассивный элемент, соответствующий определенной дуге ИС.

РС - распределительная сеть, являющаяся ЛС более низкого уровня иерархии по отношению к МС в иерархически организованной ИСС.

СПЦП - сеть потребителей ЦП, являющаяся РС низшего уровня иерархии в иерархически организованной ИСС.

ЦП - целевой продукт (вода, воздух, газ), для транспортировки которого с последующим перераспределением между отдельными ПЦП предназначена ИСС.

УЛА - универсальный локальный алгоритм управления определенной ЛС, порождаемый соответствующей УЛЗ.

УЛЗ - универсальная локальная задача управления соответствующей ЛС.

УЛСУ - универсальная локальная система управления, реализующая УЛА в соответствующей ЛС.

## ВВЕДЕНИЕ

В соответствии с [24, 30 - 33, 62, 74, 108, 111, 114, 136], в силу общности ряда характерных свойств и особенностей, которыми, в частности, являются следующие:

- функциональное назначение;
- топологическая структура;
- модели потокораспределений;
- задачи, методы и алгоритмы управления;

системы водо- и газоснабжения, а также оросительные и вентиляционные системы могут быть отнесены к классу иерархически организованных инженерных сетевых систем (ИСС). На основании анализа существующих и проектируемых ИСС можно заключить, что такие объекты могут быть декомпозированы на определенным образом взаимосвязанные и взаимодействующие между собой в процессе функционирования отдельные локальные сети (ЛС) различного уровня иерархии. При этом реальные ИСС на высшем уровне иерархии в качестве ЛС содержат магистральные сети (МС), к которым подключены ЛС более низкого уровня иерархии - распределительные сети (РС). К РС предпоследнего уровня иерархии подключены РС низшего уровня иерархии - сети потребителей целевого продукта (СПЦП). К ним непосредственно подключены потребители целевого продукта (ПЦП), осуществляющие в конечном счете потребление целевого продукта (ЦП) - воды, воздуха, газа - из рассматриваемой иерархически организованной ИСС [62, 74, 136].

Функциональным назначением МС является потребление ЦП из внешних по отношению к ИСС источников, его транспортировка и перераспределение между РС, подключенными к рассматриваемой МС.

Функциональным назначением РС является потребление ЦП из МС, к которой подключена рассматриваемая РС, его транспортировка и перераспределение между СПЦП, подключенными к данной РС.

Функциональным назначением СПЦП является потребление ЦП из РС, к которой подключена рассматриваемая СПЦП, его транспортировка и перераспределение между ПЦП, подключенными к данной СПЦП.

Вследствие стохастически изменяющихся режимов потребления ЦП отдельными ПЦП для создания допустимых условий их функционирования является необходимой реализация процессов управления ИСС [7, 8, 10, 20, 25, 33, 37, 43, 49, 77, 81, 97, 113, 130].

В соответствии с [54, 55, 58, 60, 69, 74, 77, 81, 136], иерархическая декомпозиция ИСС как объекта оперативного управления порождает декомпозицию процесса оперативного управления ИСС на совокупность отдельных локальных процессов оперативного управления, реализуемых в соответствующих ЛС рассматриваемой ИСС. Для реализации такого процесса предполагается использовать глобальную систему управления (ГСУ) иерархически организованной ИСС.

Иерархическая организация ИСС как объекта управления и связанная с ней иерархическая декомпозиция процесса управления ИСС порождает иерархическую организацию ГСУ, реализующую соответствующий процесс оперативного управления [54, 55, 58, 60, 69, 74, 77, 81, 136].

Анализ характерных свойств и особенностей реальных ЛС как объектов управления, проведенный в соответствии с [63, 67, 70], показывает, что такие объекты характеризуются информационной неопределенностью (неполнотой информации), нестационарностью, стохастичностью, а также сложностью их математических моделей. Рассмотрим указанные свойства и особенности реальных ЛС, входящих в состав реальных ИСС.

1. Неопределенность ЛС как объектов управления. Она обусловлена неполнотой информации как об объектах управления рассматриваемого класса, так и о внешней среде их функционирования. Указанная неопределенность включает такие аспекты:

- структурная неопределенность ЛС;
- параметрическая неопределенность ЛС;
- неопределенность состояния объектов управления рассматриваемого класса.

Такая неполнота информации обусловлена практической невозможностью проведения в полном объеме и реальном масштабе времени структурной и параметрической идентификации, а также идентификации состояния ЛС как объектов управления [63, 67, 74]. Также практически не представляется возможным произвести в полном объеме идентификацию всех переменных и параметров, оказывающих существенные возмущающие воздействия на ЛС как объекты управления [63, 67, 70, 74].

2. Нестационарностью ЛС как объектов управления. Она включает такие аспекты:

- структурная нестационарность ЛС;
- параметрическая нестационарность ЛС;
- нестационарность состояния объектов управления рассматриваемого класса.

Структурная нестационарность ЛС обусловлена изменением топологической структуры реальных ЛС вследствие их реконструкции и развития [63, 67, 70, 74].

Параметрическая нестационарность ЛС обусловлена как изменением параметров, связанных с реконструкцией и развитием этих ЛС, так и таким их изменением, которое имеет вид тенденций в процессе функционирования объектов управления рассматриваемого класса (сужение трубопроводов, изменение их шероховатости, изменение русел каналов вследствие заиления, изменение аэродинамических коэффициентов шахтных выработок вследствие изменения их геометрической конфигурации, а также перемещения угледобывающих технических средств) [63, 67, 70, 74].

Нестационарность состояния ЛС обусловлена такими изменениями процессов подачи ЦП из внешней среды или ЛС высшего уровня иерархии в рассматриваемую ЛС, а также процессов потребления ЦП из рассматриваемой ЛС подключенными к ней ЛС низшего уровня иерархии или ПЦП, которые имеют характер тенденций в процессе функционирования реальных ЛС.

В частности, это связано с сезонными изменениями запасов ЦП в естественных резервуарах, изменением потребностей в ЦП вследствие сезонных изменений режимов полива, потребления воды и газа [63, 67, 70, 74].

3. Стохастичность ЛС как объектов управления. Она включает такие аспекты:

- стохастичность изменения структуры ЛС;
- стохастичность изменения параметров ЛС;
- стохастичность изменения состояния объектов управления рассматриваемого класса.

Стохастичность изменения структуры реальных ЛС обусловлена как мероприятиями, связанными с их реконструкцией, точный детальный прогноз которых практически невозможен, так и возникновением аварийных ситуаций в процессе функционирования объектов управления рассматриваемого класса [63, 67, 70, 74].

Стохастичность изменения параметров ЛС обусловлена как стохастичностью физических процессов, изменяющих свойства и характеристики отдельных элементов и конструкций реальных ЛС в процессе их функционирования, так и такими их изменениями, которые связаны с реконструкцией и развитием ЛС, а также возникновением в них аварийных ситуаций [63, 67, 70, 74].

Стохастичность изменения состояния ЛС обусловлена как стохастичностью процессов изменения структуры и параметров объектов управления рассматриваемого класса, так и стохастичностью

возмущающих воздействий внешней среды на такие объекты. В частности, к внешним возмущающим воздействиям относятся стохастические процессы подачи и потребления ЦП, скорость фильтрации и испарения ЦП, а также такие метеорологические факторы, как направление и скорость ветра, уровень солнечной радиации, атмосферные осадки [63, 67, 70, 74].

4. Сложность математических моделей реальных ЛС как объектов управления. Кроме перечисленных факторов, она обусловлена такими характерными свойствами и особенностями объектов управления рассматриваемого класса:

- большая размерность;
- распределенность параметров;
- многосвязность;
- динамичность;
- существенная сложность взаимосвязей между переменными и параметрами потокораспределений, определяемых в общем случае системами нелинейных дифференциальных уравнений в частных производных [30 - 33, 113].

Проведенный анализ характерных свойств и особенностей реальных ЛС как объектов управления позволяет заключить, что они являются нечеткими объектами управления, функционирующими в нечеткой среде [92, 93]. Поэтому такие способы реализации процессов управления ЛС, которые основаны на известных методах расчета потокораспределений, в большинстве случаев являются малоэффективными [30 - 33, 113].

С учетом специфики реальных ЛС для управления объектами рассматриваемого класса представляются адекватными подходы, учитывающие неполноту информации об объектах управления и среде их функционирования, а также сложность математических моделей указанных объектов и процессов управления.

В работах [6, 44, 105] подробно рассмотрены вопросы, связанные с технической реализацией основных типов оросительных систем, приведены технико-эксплуатационные характеристики их функциональных элементов. В работе [6] также рассмотрены вопросы планирования водораспределений на оросительных системах различных типов. В работе [7] с позиций теории автоматического управления рассмотрены технические средства и реализуемые ими процессы управления отдельными функциональными элементами оросительных систем. В частности, в этой работе рассмотрены аппаратура и технология автоматизации процессов орошения, водораспределение на открытых и закрытых оросительных системах, автоматизация мелиоративных насосных станций, а также скважин на воду.

В работе [39] рассмотрены задачи и структура службы эксплуатации водохозяйственных объектов, условия работы гидротехнических

сооружений, а также факторы, влияющие на их надежность и долговечность. В этой работе проанализированы особенности эксплуатации гидротехнических сооружений в различных возможных ситуациях.

Вопросы проектирования отдельных гидротехнических сооружений, входящих в состав мелиоративных систем, рассмотрены в [100].

В работах [96, 118] рассмотрены как общие вопросы сельскохозяйственного водоснабжения, так и специфика водоснабжения отдельных сельскохозяйственных производственных и бытовых объектов. В частности, в этих работах рассмотрены нормы и режимы водопотребления, схемы, сооружения и оборудование систем сельскохозяйственного водоснабжения, механизация подъема и транспортирования воды, а также эксплуатация и технико-экономическое обоснование выбора оборудования для таких систем.

В работе [97] рассмотрены вопросы создания информационно-вычислительных систем газотранспортных производственных объединений. В основу [97] положен опыт разработки, внедрения и эксплуатации информационно-вычислительных систем одного крупнейшего производственного объединения. При этом вначале дано представление о структуре газотранспортного объединения и функциях его подразделений, связанных с оперативным управлением газопроводами, которые подлежат автоматизации. Для этого в [97] рассматриваются различные аспекты построения информационно-вычислительных систем для диспетчерского управления газопроводами. В этой связи в [97] на основании задачи прогнозирования газопотребления построена модель для предсказания суточного потребления газа. Здесь же дано развернутое описание системы моделей для гидравлического расчета технологических объектов магистрального транспорта газа. Достаточная степень универсальности предлагаемого в [97] подхода позволяет использовать разработанные методы и алгоритмы при проведении разнообразных режимно-технологических расчетов в автоматизированных системах управления магистральными газопроводами.

В [29, 37] указано, что современный период орошаемого земледелия характеризуется переходом от орошения отдельных небольших участков к орошению больших массивов с групповым использованием высокопроизводительных машин. В этой связи в [29, 37] рассмотрены основные типы перспективных оросительных систем, их схемы и технические решения, а также условия применения. Особое внимание в [29, 37] уделено вопросам автоматизации оросительных систем, а также обеспечению их надежности.

Для формализации процессов функционирования ИСС и управления такими объектами могут быть использованы модели, методы, алгоритмы и процедуры в соответствии с [18, 35, 46, 48, 50, 53, 79, 83, 84, 98, 103, 120,

121, 122, 124, 125, 129, 133, 135, 139]. В частности, в [21, 24, 38, 49, 110, 112, 113] содержатся различные аспекты моделирования функциональных элементов и процессов функционирования систем водо- и газоснабжения, а также оросительных и вентиляционных систем. Вопросы синтеза автоматизированных систем управления объектами рассматриваемого класса содержатся в [4, 10, 20, 22, 25, 40, 52, 132].

Различные аспекты моделирования, исследования и синтеза управляющих систем сложными техническими объектами рассматриваемого класса нашли отражение в следующих работах.

В частности, в [26, 45, 47, 85, 88, 107, 109, 127, 128] предлагается использовать структурированные системы для решения системных задач проектирования, сделан вывод о целесообразности использования структурированных систем для решения системных задач проектирования, о целесообразности использования иерархических структур при проектировании сложных систем. В [26, 45, 47, 109, 127] содержатся теоретические аспекты представления структурированных сложных систем в оперативной памяти управляющих ЭВМ, а также разработаны методика и процедуры структурной и параметрической идентификации, адекватные структурированным сложным системам управления.

Методы и процедуры автоматической классификации и снижения размерностей, лежащие в основе реализации управляющих алгоритмов, содержатся в [100, 109]. В частности, наиболее эффективные из них, использующие аппарат иерархического кластер-анализа и функциональных соответствий, разработаны в [34].

Различные аспекты моделирования и исследования потокораспределений в обобщенных сетевых системах содержатся в [106, 126, 128]. Вопросы, связанные с алгоритмической и программной реализацией задач сетевой оптимизации, нашли отражение в [140 - 146].

Актуальность настоящей работы заключается в том, что в ней содержится комплекс исследований, позволяющих решить проблему автоматизации технологических процессов распределения ЦП путем реализации процессов оперативного управления иерархически организованными ИСС, имеющую важное народнохозяйственное и социальное значение. В отличие от известных подходов к управлению ИСС, предлагаемые в настоящей работе предназначены для ИСС с неполной информацией об объектах управления и среде их функционирования.

Предлагаемые подходы основаны на использовании возможности иерархической декомпозиции топологической структуры ИСС и порождаемой ею иерархической декомпозиции ГСУ, что позволяет реализовать эффективные локальные процессы оперативного управления в отдельных ЛС различного уровня иерархии.

На основании специально разработанного концептуального подхода декомпозиция иерархически организованных управляющих систем представлена как определенная система трех последовательно порождающих друг друга изменяющихся иерархических структур: УЛЗ при решении ГЗ, УЛА при реализации ГА, УЛСУ в процессе функционирования ГСУ.

Результаты, полученные в настоящей работе, нашли практическое применение при моделировании ГСУ и алгоритмизации процессов оперативного управления реальными оросительными системами, а также системами водоснабжения. Использование материалов, разработок и результатов данной работы позволяет сократить непроизводительные расходы ЦП и электроэнергии, а также повысить надежность и качество функционирования объектов управления рассматриваемого класса.

Целью настоящей работы является разработка теоретических аспектов проблемы автоматизации технологических процессов распределения ЦП путем реализации процессов оперативного управления иерархически организованными ИСС с неполной информацией об объектах управления и среде их функционирования, реализация теоретических положений рассматриваемой проблемы в виде конструктивных алгоритмов и соответствующих ППП, практически реализующих процессы оперативного управления реальными ИСС рассматриваемого класса.

Для достижения заданной цели в настоящей работе решены следующие задачи.

1. Исследование состояния проблемы оперативного управления реальными ИС в условиях неполной информации об объектах управления рассматриваемого класса и среде их функционирования.

2. Создание концептуальных основ моделирования оперативно управляемых ИС в условиях неполной информации, позволяющих дать анализ надежности и управляемости для таких объектов.

3. Разработка концептуальных основ моделирования реальных ИСС рассматриваемого класса как иерархически организованных объектов оперативного управления, учитывающих их структурные и функциональные особенности.

4. Создание концептуальных основы моделирования иерархически организованных ГСУ, реализующих процессы оперативного управления в ИСС рассматриваемого класса.

5. Исследование проблемы координируемости в иерархически организованных оперативно управляемых ИСС.

6. Формализация, алгоритмическая и программная реализация процессов оперативного управления иерархически организованными ИСС, адекватная по отношению к существенным свойствам объектов управления рассматриваемого класса.

В качестве методов исследования в настоящей работе использованы следующие разделы современного математического аппарата системно-структурного анализа:

- теория функций и функциональный анализ, теоретико-множественные и теоретико-графовые модели;
- теория вероятностей, математическая статистика и теория случайных процессов;
- теория информации и системный анализ; кластер-анализ и функциональные соответствия;
- теория, модели и методы математического программирования;
- исследование операций, теория принятия сложных решений и теория нечетких множеств.

В настоящей работе содержатся следующие новые научные результаты.

1. Комбинаторно-графовые модели и методы, связанные с определением эффективности управляющих воздействий в ИС, а также оценок надежности и управляемости ИС.

2. Модели, формализующие реальные ИСС как иерархически организованные объекты оперативного управления с неполной информацией о таких объектах и среде их функционирования.

3. Система факторов для анализа изменения важнейших свойств и особенностей, характерных для отдельных ЛС, в зависимости от их уровня иерархии в ИСС.

4. Система моделей оптимизации проектируемых ЛС различного уровня иерархии, входящих в состав реальных ИСС, в аспекте реализации процессов оперативного управления такими объектами.

5. Модели и условия, формализующие принципы координируемости в иерархически организованных ИСС.

6. Концептуальный подход и система моделей, формализующих многоуровневые иерархически организованные управляющие системы с изменяющейся структурой.

7. Моделирование вертикальных взаимосвязей и взаимодействий подсистем в иерархически организованных управляющих системах с изменяющейся структурой.

8. Концептуальные основы и информационно-технологические взаимосвязи систем оперативного управления с объектами управления - реальными ИСС, включающие модели, методы и алгоритмы сбора и минимизации оперативной информации об объектах управления рассматриваемого класса, а также динамического распределения процессорного времени управляющей ЭВМ.

9. Модели, методы и алгоритмы реализации локальных процессов оперативного управления в отдельных ЛС иерархически организованных ИСС, использующие математико-статистические методы, кластер-анализ и функциональные соответствия, а также модели и методы теории НМ.

Практическая ценность настоящей работы обусловлена возможностью использования содержащихся в ней концептуальных подходов, методов, моделей и алгоритмов научно-исследовательскими и проектно-конструкторскими организациями, связанными с разработкой управляющих систем и процессов оперативного управления системами водо- и газоснабжения, а также оросительными и вентиляционными системами в условиях неполной информации об объектах управления рассматриваемого класса и среде их функционирования.

Научные и практические результаты, полученные в настоящей работе, широко апробированы при разработке систем и процессов оперативного управления реальными ИСС.

Концептуальные аспекты, модели, методы, процедуры и алгоритмы, содержащиеся в настоящей работе, использованы в учебном процессе при подготовке и чтении курсов, связанных с управлением оросительными и вентиляционными системами, а также системами водо- и газоснабжения, в технических и аграрных университетах.

Предлагаемые в настоящей работе модели, методы и алгоритмы реализации процессов оперативного управления ИСС использованы Институтом гидротехники и мелиорации УААН, Луганским областным производственным управлением мелиорации и водного хозяйства, Луганским областным государственным коммунальным предприятием «Луганскводоканал» при разработке и реализации управляющих систем и процессов оперативного управления оросительными системами, а также системами водоснабжения.

рассматриваемом цикле совпадает с направлением хорды  $k$ , и со знаком минус в противном случае. Элемент  $k$  является ведущим элементом подмножества  $B_k$ , принадлежит только этому подмножеству и однозначно его определяет.

Свойства матриц  $A_\alpha$ ,  $Q_\alpha$ ,  $B_\alpha$  и взаимосвязь между ними подробно изложены в [30 - 33, 106]. Не повторяя всех свойств и соотношений для перечисленных матриц, содержащихся в указанных работах, приведем только те зависимости и соотношения, которые будут использованы в настоящей работе.

Если столбцы матриц  $B_\alpha$  и  $Q_\alpha$  составлены так, что они имеют одну и ту же нумерацию ребер, то имеет место следующее соотношение:

$$B_\alpha Q'_\alpha = Q_\alpha B'_\alpha = 0. \quad (1.1)$$

При этом знак ( $'$ ), записанный в обозначении матрицы, означает операцию транспонирования соответствующей матрицы.

Столбцы матриц  $Q_\alpha$  и  $B_\alpha$  переставим таким образом, чтобы первые  $\nu-1$  из них соответствовали ветвям выбранного дерева, а остальные  $\mu$  - хордам графа  $G$ . Такая процедура перестановки соответствует перенумерации дуг графа  $G$ , в результате которой ветвям дерева присваиваются номера от 1 до  $\nu-1$ , а хордам - от  $\nu$  до  $e$ . При этом матрицы  $Q_\alpha$  и  $B_\alpha$  примут вид:

$$Q_\alpha = [Q_{\alpha 1} \quad Q_{\alpha 2}]; \quad (1.2)$$

$$B_\alpha = [B_{\alpha 1} \quad B_{\alpha 2}]; \quad (1.3)$$

где:  $Q_{\alpha 1}$  - единичная матрица размерности  $\nu-1$ ;

$Q_{\alpha 2}$  - подматрица размерности  $(\nu-1) \times \mu$ ;

$B_{\alpha 1}$  - подматрица размерности  $\mu \times (\nu-1)$ ;

$B_{\alpha 2}$  - единичная матрица размерности  $\mu$ .

Следуя [30 - 33], нумерацию, которая позволяет представить матрицы  $Q_\alpha$  и  $B_\alpha$  соответственно в виде (1.2) и (1.3), назовем упорядоченной, а любую другую - неупорядоченной. Подставляя соотношения (1.3) и (1.2) в (1.1), получим следующую зависимость:

$$Q_{\alpha 2} = -B'_{\alpha 1}. \quad (1.4)$$

Перечисленные в данном подразделе понятия, зависимости и соотношения формализуют схему соединений ИС, характеризующие ее топологическую структуру.

## 1.2. Математические модели функциональных элементов

В аспекте возможности изменения параметров дуг графа  $G$  для реализации управляющих воздействий на ИС  $N$  введем следующую классификацию дуг графа  $G$ .

Множество дуг графа  $G$ , содержащих активные элементы (АЭ), обозначим  $E^a$ , множество дуг, содержащих пассивные элементы (ПЭ), обозначим  $E^p$  и множество дуг, представляющих нерегулируемые элементы (НЭ), обозначим  $E^f$ .

В общем случае будем предполагать, что для указанных множеств на графе  $G$  выполняются следующие соотношения:

$$E^a \cap E^p \neq \emptyset; E^f \cap (E^a \cup E^p) = \emptyset; E^a \cup E^p \cup E^f = E.$$

Другими словами, во множестве дуг  $E$  графа  $G$  могут быть дуги, одновременно содержащие АЭ и ПЭ; дуги, содержащие или только АЭ, или только ПЭ; дуги, представляющие НЭ, которые не содержат ни АЭ, ни ПЭ; и никаких других видов дуг, кроме перечисленных, во множестве  $E$  нет.

Будем считать, что последовательная переменная  $q_j$  положительна, если ее направление совпадает с направлением дуги  $j$ , и отрицательна в противном случае.

Пусть дуга  $j \in E^a \setminus (E^a \cap E^p)$ , то есть содержит только один определенный АЭ и не содержит ПЭ.

В общем случае будем предполагать, что такой АЭ имеет конечное множество  $\Omega_j$  фиксированных режимов, например, регулируемый центробежный насос, имеющий несколько ступеней угловых скоростей [1, 16, 19, 116]. При этом определенному режиму работы АЭ в дуге  $j$  будет соответствовать определенный параметр  $\omega_j \in \Omega_j$ . При этом будем предполагать, что для каждого  $\omega_j \in \Omega_j$  направление последовательной переменной  $q_j$ , создаваемой АЭ в дуге  $j \in E^a$ , совпадает с направлением этой дуги  $j$ .

Параллельная переменная (падение напора)  $h_j$  в рассматриваемой дуге при фиксированном параметре  $\omega_j \in \Omega_j$  будет функцией последовательной переменной  $q_j$ :  $h_j = -h^a_j(\omega_j, q_j)$ .

В [30 - 33, 80] приведен аналитический вид функции  $h^a_j(q_j)$  для нерегулируемого АЭ; в рассматриваемом общем случае приведенная зависимость будет справедлива при фиксированном  $\omega_j \in \Omega_j$ .

В общем случае функциональная зависимость  $h^a_j(\omega_j, q_j)$  определяется нагрузочной характеристикой соответствующего АЭ, которая в заданной рабочей области - интервале  $[q^*_j, q^{**}_j]$  может быть аппроксимирована полиномом второй степени:

$$h_j^a(\omega_j, q_j) = \Psi_{0j}(\omega_j) + \Psi_{1j}(\omega_j) q_j + \Psi_{2j}(\omega_j) q_j^2 \quad (1.5)$$

Будем предполагать, что границы рабочей области - интервала  $[q_j^*, q_j^{**}]$  и коэффициенты полинома в разложении (1.5) при фиксированном  $\omega_j \in \Omega_j$  являются известными числами.

При фиксированном  $\omega_j$  зависимость (1.5) будем, согласно [30 - 33, 116], предполагать постоянной или монотонно-убывающей функцией последовательной переменной  $q_j \in [q_j^*, q_j^{**}]$ .

Численные значения коэффициентов в разложении (1.5) для нагрузочных характеристик некоторых практически применяемых АЭ приведены в [30 - 33]. В [116] приведено семейство управляющих характеристик определенного центробежного насоса при различных параметрах  $\omega_j$  - угловых скоростях вращения рабочего колеса.

Конечное множество  $\Omega_j$  будем предполагать вполне упорядоченным следующим образом. Минимальным элементом является  $\omega_j = 0$ , при котором  $q_j = 0$  и  $h_j^a(0, 0) = 0$ . Такой режим работы рассматриваемого АЭ физически соответствует отключенному АЭ в дуге  $j \in E^a$ .

Будем считать, что  $\omega_j^1 < \omega_j^2$ , если  $h_j^a(\omega_j^1, q_j) < h_j^a(\omega_j^2, q_j)$  для  $\forall q_j \in [q_j^*, q_j^{**}]$ .

Зависимости  $h_j^a(\omega_j, q_j)$  для реальных АЭ, приведенные в [30 - 33, 116, 134] таковы, что позволяют вводить порядок на конечном множестве  $\Omega_j$  указанным способом.

Пусть дуга  $j \in E^p \setminus (E^a \cap E^p)$ , то есть содержит один определенный ПЭ и не содержит АЭ. Состояние ПЭ дуги  $j$  будем определять переменным коэффициентом сопротивления  $r_j$ , относительно которого будем предполагать, что он может принимать значения в рабочем интервале  $[r_j^*, r_j^{**}]$ .

В соответствии с [5, 36, 97] будем предполагать, что границы интервала  $[r_j^*, r_j^{**}]$  являются известными числами.

При фиксированном  $r_j \in [r_j^*, r_j^{**}]$  параллельная переменная  $h_j$  в рассматриваемой дуге будет функцией последовательной переменной  $q_j$ :  $h_j = h_j^p(r_j, q_j)$ .

В [5, 30 - 33, 80] приведен аналитический вид и рассматриваются свойства функции  $h_j^p(r_j, q_j)$  для дуги, имеющей постоянный коэффициент сопротивления. В рассматриваемом общем случае приведенные зависимости будут справедливы при фиксированном  $r_j \in [r_j^*, r_j^{**}]$ . При фиксированном  $r_j$ , согласно [5, 30 - 33, 80], функция  $h_j^p(r_j, q_j)$  является монотонно возрастающей нечетной функцией последовательной переменной  $q_j$ . Зависимости  $h_j^p(r_j, q_j)$  для различных ИС, наиболее часто встречающихся на практике, приведены в [30 - 33, 80]. Формула, обобщающая эти зависимости, имеет вид:

$$h_j^p = \text{sign } q_j \cdot r_j |q_j|^{\alpha_j}; \quad (1.6)$$

где  $\alpha_j$  - коэффициент нелинейности ПЭ в дуге  $j$ ;  $\alpha_j \geq 1$ ;  $r_j \in [r_j^*, r_j^{**}]$ .

Из формул Борда и Вейсбаха [5, 16, 36, 134] следует, что коэффициент сопротивления  $r_j$  в соотношении (1.6) связан с эмпирическим коэффициентом  $\zeta_j$ , характеризующим рассматриваемый ПЭ, соотношением  $r_j = \zeta_j / 2gS_j$ , где  $g$  - ускорение свободного падения,  $S_j$  - живое сечение трубопровода, содержащего  $j$ -й ПЭ. Поскольку в последнем соотношении  $g$  - абсолютная константа, а  $S_j$  - постоянная величина для данного ПЭ, величина  $r_j$  пропорциональна  $\zeta_j$ .

Зависимости эмпирического коэффициента  $\zeta_j$ , а следовательно и коэффициента сопротивления  $r_j$ , от координат, определяющих состояние соответствующих ПЭ, для некоторых применяющихся на практике ПЭ (затвора Лудло и затворы клапана) приведены в [80].

Координатой, определяющей состояние затвора Лудло, является степень ее открытия - отношение  $a/d$ , где  $a$  - величина перемещения затвора из нижнего предельного состояния в данное;  $d$  - диаметр трубопровода, в котором находится рассматриваемая затворка. Для затвора клапана такой координатой является угол ее поворота  $\theta$  относительно оси трубопровода.

Пусть дуга  $j \in E^c$ , то есть представляет собой НЭ, которому соответствует коэффициент сопротивления  $\gamma_j$ . Очевидно, что для рассматриваемой дуги зависимость  $h_j$  от  $q_j$ , которую обозначим  $h_j^c(\gamma_j, q_j)$  является частным случаем предыдущей зависимости  $h_j^c(r_j, q_j)$ , в которой достаточно предположить  $r_j = \gamma_j = \text{const}$ :

$$h_j^c = \text{sign } q_j \cdot \gamma_j |q_j|^{\alpha_j}. \quad (1.7)$$

Наконец, если дуга  $j \in E^a \cap E^p$ , то есть содержит как АЭ, так и ПЭ, то зависимость  $h_j$  от  $q_j$  примет вид:

$$h_j = h_j^p(r_j, q_j) - h_j^a(\omega_j, q_j).$$

Учитывая соотношения (1.5) и (1.6), имеем:

$$h_j = \text{sign } q_j \cdot r_j |q_j|^{\alpha_j} - (\Psi_{0j}(\omega_j) + \Psi_{1j}(\omega_j) q_j + \Psi_{2j}(\omega_j) q_j^2); \quad (1.8)$$

где  $r_j \in [r_j^*, r_j^{**}]$ ;  $\omega_j \in \Omega_j$ .

При рассмотрении вопросов, связанных с моделированием установившихся потокораспределений и управлением ИС, необходимо оперировать состоянием всех АЭ, всех ПЭ и всех НЭ ИС  $N$ . Для этой цели введем следующие векторы.

Вектор состояния АЭ ИС  $N$ , который обозначим  $U$ , определяет режимы работы всех АЭ рассматриваемой ИС  $N$ :  $U = ((\omega_j), j \in E^a)$ ;  $\omega_j \in \Omega_j$ .

Множеством возможных значений вектора  $U$ , которое обозначим  $\Omega(U)$ , является конечное множество, определяемое следующим соотношением:

$$\Omega(U) = \prod_{j \in E^a} \Omega_j. \quad (1.9)$$

Вектор состояния ПЭ ИС  $N$ , который обозначим  $R$ , определяет значения всех регулируемых сопротивлений рассматриваемой ИС:

$$R = ((r_j), j \in E^p); r_j \in [r_j^*, r_j^{**}].$$

Областью возможных значений вектора  $R$ , которую обозначим  $\Omega(R)$ , является замкнутый  $|E^p|$ -мерный параллелепипед, определяемый декартовым произведением интервалов  $[r_j^*, r_j^{**}]$  для  $\forall j \in E^p$ :

$$\Omega(R) = \prod_{j \in E^p} [r_j^*, r_j^{**}]. \quad (1.10)$$

Вектор состояния НЭ ИС  $N$ , который обозначим  $\Gamma$ , определяет значения всех нерегулируемых сопротивлений ИС  $N$ :  $\Gamma = ((\gamma_j), j \in E^f)$ .

Будем считать, что в некоторых дугах  $j$  множества  $E^f$  сопротивления  $\gamma_j$  могут изменяться в случайные моменты времени в известных интервалах  $[\gamma_j^*, \gamma_j^{**}]$ , сохраняя постоянные значения в промежутках времени между такими изменениями. Поэтому в общем случае будем считать, что  $\Gamma \in \Omega(\Gamma)$ , где  $\Omega(\Gamma)$  - замкнутая область возможных значений вектора  $\Gamma$ , определяемая декартовым произведением интервалов  $[\gamma_j^*, \gamma_j^{**}]$  для  $\forall j \in E^f$ :

$$\Omega(\Gamma) = \prod_{j \in E^f} [\gamma_j^*, \gamma_j^{**}]. \quad (1.11)$$

### 1.3. Моделирование потокораспределений в оперативно управляемых инженерных сетях

Для аналитической записи постулатов ИС введем два  $e$ -мерных вектора ИС  $N$ : вектор последовательных переменных (потоков)  $q = ((q_j), j \in E)$  и вектор параллельных переменных (падений напоров)  $h = ((h_j), j \in E)$  рассматриваемой ИС.

В соответствии с первым постулатом ИС (первым законом Кирхгофа) алгебраическая сумма последовательных переменных, поставленных в

соответствие дугам графа  $G$ , инцидентным любой вершине  $x \in V$ , или принадлежащим любому сечению графа  $G$ , равна нулю.

В матричной форме первый постулат ИС имеет вид:

$$A_a \cdot q = 0; \quad (1.12)$$

или

$$Q_a \cdot q = 0. \quad (1.13)$$

Второй постулат ИС (второй закон Кирхгофа) утверждает равенство нулю алгебраической суммы параллельных переменных, поставленных в соответствие дугам графа  $G$ , принадлежащим любому замкнутому циклу.

В матричной форме второй постулат ИС имеет вид:

$$B_a \cdot h = 0. \quad (1.14)$$

Для более компактного математического представления постулатов ИС в матричной форме, следуя [30 - 33, 87, 94], выберем произвольное дерево графа  $G$  и относительно этого дерева введем упорядоченную нумерацию во множестве дуг  $E$  графа  $G$ . При этом ветвям дерева присвоим номера от 1 до  $\nu-1$ , а хордам от  $\nu$  до  $e$ .

Тогда векторы  $q$  и  $h$  примут вид:

$$q = (q_1, q_2); \quad (1.15)$$

$$h = (h_1, h_2), \quad (1.16)$$

где  $q_1$  и  $h_1$  -  $(\nu-1)$ -мерные векторы, определяемые следующими соотношениями:

$$q_1 = ((q_j), j=1, 2, \dots, \nu-1); h_1 = ((h_j), j=1, 2, \dots, \nu-1).$$

В результате подстановки соотношений (1.12) и (1.2) в (1.10), а (1.13) и (1.3) в (1.11) получим соотношения, выражающие первый и второй постулаты ИС и определяющие взаимосвязь между векторами  $q_1$  и  $q_2$ , а также между  $h_1$  и  $h_2$ :

$$q_1 = -Q_{a2} \cdot q_2; \quad (1.17)$$

$$h_2 = -B_{a1} \cdot h_1. \quad (1.18)$$

Из соотношений (1.14) и (1.15) следует, что для любого дерева графа  $G$  значение последовательной переменной в каждой ветви дерева является линейной комбинацией значений последовательных переменных в каждой хорде относительно рассматриваемого дерева, а значение параллельной

переменной в каждой хорде - линейной комбинацией значений параллельных переменных в ветвях рассматриваемого дерева.

Из соотношений (1.12), (1.13) и (1.14), а также эквивалентных соотношений (1.17) и (1.18), в различной форме выражающих первый второй постулаты ИС, следует, что взаимосвязь между компонентами вектора  $q$  и взаимосвязь между компонентами вектора  $h$  однозначно определяются схемой соединений ИС  $N$ , задаваемой графом  $G$  и не зависят от параметров и свойств участков рассматриваемой ИС (параметров дуг графа  $G$ ).

Моделирующий граф  $G$  топологической структуры ИС  $N$  с выделением на нем ветвей дерева и хорд приведен в [80].

Математическая модель установившегося потокораспределения включает следующие аналитические зависимости:

1. Первый постулат ИС (первый закон Кирхгофа), устанавливающий взаимосвязь между компонентами  $e$ -мерного вектора  $q$ , определяемому графом  $G$  ИС  $N$ . Аналитически он может быть выражен любым из соотношений: (1.12), (1.13) или (1.17).

2. Второй постулат ИС (второй закон Кирхгофа), устанавливающий взаимосвязь между компонентами  $e$ -мерного вектора  $h$ , определяемому графом  $G$  ИС  $N$ . Аналитически он может быть выражен одним из соотношений: (1.14) или (1.18).

3. Совокупность взаимосвязей между параллельной переменной  $h_j$ , последовательной переменной  $q_j$  для  $\forall j \in E$ , то есть между соответствующими компонентами  $e$ - мерных векторов  $q$  и  $h$ .

В зависимости от вида дуг графа  $G$  в соответствии с классификацией приведенной в подразделе 1.2 настоящей работы, такие зависимости определяются одним из соотношений: (1.5) - (1.8).

Используя построенную математическую модель, сформулируем условия однозначного определения установившегося потокораспределения в оперативно управляемой ИС. Для этой цели поставим следующую задачу

Пусть задан граф  $G$ , на котором имеют место соотношения, выражающие рассматриваемую математическую модель установившегося потокораспределения, и зафиксированы векторы  $U \in \Omega(U)$ ,  $R \in \Omega(R)$ ,  $\Gamma \in \Omega(\Gamma)$ . При заданных условиях необходимо найти значения векторов  $q$  и  $h$ , определяющих установившееся потокораспределение в ИС  $N$ .

В соответствии с результатами, полученными в [30 - 33, 89, 123, 126] поставленная задача имеет единственное решение: при таких условиях значения векторов  $q$  и  $h$  определяются однозначно.

Пользуясь математической моделью установившегося потокораспределения в ИС  $N$ , определим некоторые понятия, которые будут необходимы для формализации процесса оперативного управления ИС.

Под изменением установившегося потокораспределения в ИС  $N$  будем понимать переход от одного установившегося потокораспределения  $(h^{(1)}, q^{(1)})$  к другому  $(h^{(2)}, q^{(2)})$ .

Величину максимального промежутка времени затухания переходного процесса в ИС  $N$  при изменении установившегося потокораспределения (по любой из причин такого изменения) назовем временем переходного процесса в ИС  $N$  и обозначим  $\tau$ .

Переход от одного установившегося потокораспределения  $(h^{(1)}, q^{(1)})$  к другому  $(h^{(2)}, q^{(2)})$  возможен, по крайней мере, по одной из следующих причин [81, 99, 134]:

1. Изменение вектора  $U \in \Omega(U)$ .
2. Изменение вектора  $R \in \Omega(R)$ .
3. Изменение вектора  $\Gamma \in \Omega(\Gamma)$ .

Изменение установившегося потокораспределения в реальной оперативно управляемой ИС  $N$  рассмотрено в [80].

Изменение векторов  $U$  и  $R$  в областях  $\Omega(U)$  и  $\Omega(R)$  соответствует реализации с помощью АЭ и ПЭ управляющих воздействий в ИС  $N$ . Величину максимального промежутка времени между получением информации о необходимости изменения установившегося потокораспределения в ИС  $N$  и соответствующим изменением векторов  $U$  и  $R$  с целью изменения установившегося потокораспределения назовем временем реализации управляющих воздействий в ИС  $N$  и обозначим  $\tau'$ .

Изменение вектора  $\Gamma$  в области  $\Omega(\Gamma)$  происходит в случайные моменты времени и соответствует изменению режимов потребления из множества выходных вершин  $V'$  ИС  $N$ .

Величину минимального промежутка времени, соответствующую такому изменению вектора  $\Gamma$ , которое приводит к необходимости реализации управляющих воздействий в ИС  $N$ , назовем временем возмущающих воздействий и обозначим  $\tau''$ .

Анализ переходных процессов, происходящих в ИС  $N$  [99, 134], физических свойств и характеристик применяемых АЭ и ПЭ [5, 16, 19, 36, 51, 116], а также условий функционирования реальных ИС [1 - 3, 6, 8 - 11, 14, 24, 29, 49], позволяет установить следующие соотношения между величинами  $\tau$ ,  $\tau'$  и  $\tau''$ :  $\tau \ll \tau' \ll \tau''$ .

Поскольку  $\tau \ll \tau'$ , то рассматривать переходный процесс при изменении установившегося потокораспределения в ИС  $N$  нецелесообразно, имеет смысл рассматривать лишь установившиеся потокораспределения. Другими словами, указанное соотношение между величинами  $\tau$  и  $\tau'$  позволяет ограничиться рассмотрением статических режимов в ИС  $N$  и не рассматривать относительно быстро затухающие переходные процессы [41,

120], возникающие при изменении статических режимов рассматриваемой ИС в случайные моменты времени [12, 120].

Управление ИС  $N$ , для которого выполняется условие  $\tau \ll \tau^*$ , называемое оперативным управлением [77, 81], а ИС  $N$  - оперативно управляемой (в смысле указанного условия). Таким образом, под оперативным управлением ИС  $N$  будем понимать целенаправленное (в соответствии с определенным критерием) изменение установившегося потокораспределения, осуществляемое путем изменения вектора  $U \in \Omega(U)$  и  $R \in \Omega(R)$ , и при этом время реализации управляющих воздействий  $\tau$  намного меньше времени возмущающих воздействий  $\tau^*$  происходящих под влиянием изменения вектора  $\Gamma \in \Omega(\Gamma)$ .

В целях формализации ИС как объектов оперативного управления алгоритмизации процессов оперативного управления объектам рассматриваемого класса введем следующие определения и понятия.

Каждой вершине  $x \in V$  ИС  $N$  поставим в соответствие величину напора  $z_x$ . Фиктивной вершине  $w$  графа  $G$  будет соответствовать значению  $z_w = 0$ . Тогда напор в каждой входной вершине  $x \in V$  ИС  $N$  определится параллельной переменной соответствующего источника  $j=wx$  по следующему соотношению:  $z_x = -h_j$ .

Напор в каждой выходной вершине  $x \in V'$  ИС  $N$  определится параллельной переменной соответствующего стока  $j=xw$ .

Векторы напоров во входных, выходных и промежуточных вершинах ИС  $N$  обозначим соответственно  $Z, Z',$  и  $Z''$ , и определим следующим соотношениями:  $Z = ((z_x), x \in V)$ ;  $Z' = ((z_x), x \in V')$ ;  $Z'' = ((z_x), x \in V'')$ .

#### 1.4. Обобщенная задача оперативного управления

Разработке конструктивных алгоритмов оперативного управления предшествует этап постановки соответствующей задачи на рассматриваемом объекте - ИС. При этом такой алгоритм (или иерархическая система взаимосвязанных и взаимодействующих алгоритмов) существенным образом определяется принципом постановки задачи оперативного управления объектом рассматриваемого класса.

Исходя из главной цели настоящей работы, рассмотрим постановку обобщенной задачи оперативного управления ИС и соответствующие алгоритмы процесса оперативного управления.

Пусть дана ИС  $N$ , топология которой определена оргграфом  $G$ , и для установившегося потокораспределения  $(q, h)$  на которой справедливы первый и второй постулаты ИС, определенные соотношениями (1.12) - (1.13), (1.14), а также соотношения (1.5) - (1.8), выражающие взаимосвязь

между параллельной  $h$  и последовательной  $q$  переменными в зависимости от вида дуги графа  $G$ .

Анализ допустимых режимов функционирования отдельных ПЦП, подключенных к выходным вершинам  $x \in V'$  ИС, выполненный на основании [6, 8-11, 14, 15, 42], позволяет считать справедливым следующее утверждение. Все ПЦП будут функционировать в допустимых режимах, если для  $\forall x \in V'$  будет выполняться условие  $z_x \in [z_x^*, z_x^{**}]$ , где  $z_x^*$  и  $z_x^{**}$  - соответственно нижняя и верхняя границы напора  $z_x$  для графа  $G$  ИС  $N$ .

Целью функционирования ИС  $N$  является обеспечение допустимых режимов функционирования для всех подключенных к ней ПЦП [1 - 3, 6 - 11, 14, 25, 56, 77]. Такое условие определяет структуру и характер экстремизации целевой функции задачи оперативного управления.

Пусть режим функционирования ПЦП, подключенного к выходной вершине  $x \in V'$ , характеризуется функцией  $f_x$ , определенной следующим соотношением:

$$f_x = \begin{cases} 0, & \text{если } z_x \in [z_x^*, z_x^{**}]; \\ z_x^* - z_x, & \text{если } z_x < z_x^*; \\ z_x - z_x^{**}, & \text{если } z_x > z_x^{**} \end{cases} \quad (1.19)$$

где  $z_x^*$  и  $z_x^{**}$  - соответственно нижняя и верхняя границы напора  $z_x$  в выходной вершине  $x$  графа  $G$  ИС  $N$ .

Из соотношения (1.19) следует, что функция  $f_x$  неотрицательна для  $\forall x \in V'$ :  $f_x \geq 0$  при  $\forall z_x \in R$ , где  $R$  - область вещественных чисел. Кроме того, минимальное значение рассматриваемой функции, которое обозначим  $f_{x \min}$ , удовлетворяет условию:  $f_{x \min} = 0$  и соответствует допустимому режиму функционирования рассматриваемого ПЦП:  $z_x \in [z_x^*, z_x^{**}]$ .

Целевую функцию обобщенной задачи оперативного управления определим следующим соотношением:

$$f = \sum_{x \in V'} f_x \quad (1.20)$$

Из соотношений (1.19) и (1.20) следует, что функция  $f$  неотрицательна:  $f \geq 0$  при  $\forall z_x \in R$ . Кроме того, минимальное значение функции  $f$ , которое обозначим  $f_{\min}$ , удовлетворяет условию:  $f_{\min} = 0$  и соответствует допустимым режимам функционирования одновременно для всех ПЦП, подключенных к рассматриваемой ИС:  $\forall x \in V', z_x \in [z_x^*, z_x^{**}]$ .

Целью оперативного управления ИС  $N$  естественно считать создание допустимых режимов функционирования одновременно для всех ПЦП, подключенных к рассматриваемой ИС.

В этой связи с учетом введенных в настоящем подразделе определений и понятий обобщенная задача оперативного управления ИС может быть формализована следующим образом.

Необходимо найти такие значения векторов состояния  $A \in U \in \Omega(U)$ ,  $P \in R \in \Omega(R)$ , чтобы целевая функция  $f$ , определенная соотношением (1.20), стремилась к минимуму:  $f \rightarrow \min$ .

Целью дальнейших подразделов настоящего раздела будет исследование данной постановки обобщенной задачи и известных методов ее решения в аспекте алгоритмизации процесса оперативного управления ИС.

### 1.5. Система показателей для оценки алгоритмов оперативного управления

Поставленная обобщенная задача и выбранный метод ее решения порождают класс алгоритмов, реализующих процесс оперативного управления ИС. В зависимости от постановки задачи и выбранного метода ее решения можно получить некоторое множество классов управляющих алгоритмов. Анализ соответствующих литературных источников [27, 30, 33, 43, 138] показывает, что нет единого глобального критерия оценки классов управляющих алгоритмов с целью выбора технически наиболее удобореализуемого. В связи с этим представляется целесообразным ввести систему показателей, являющихся оценками отдельных сторон различных классов управляющих алгоритмов, чтобы, во-первых, дать заключение о возможности технической реализации управляющих алгоритмов рассматриваемого класса, во-вторых, выбрать из этого числа приемлемый в данных условиях управляющий алгоритм.

Рассмотрим каждый из показателей для оценки класса управляющих алгоритмов, входящих в такую систему. Целесообразность именно такого набора показателей обусловлена их успешным использованием по отдельности для соответствующих оценок управляющих алгоритмов [1 - 3, 7, 30 - 33, 43, 138].

1. Объем информации о топологии ИС, который будем обозначать  $K_1$ .

В зависимости от постановки задачи и применяемых методов ее решения может использоваться информация о топологии ИС  $N$ , задаваемая графом  $G$ , либо в полном объеме, либо часть соответствующей информации. В зависимости от этого показатель  $K_1$  принимает определенное числовое значение, равное количеству машинных слов ОП управляющей ЭВМ, необходимых для хранения такой информации.

2. Объем априорной информации о НЭ, содержащихся в дугах ИС  $N$ .

В полном объеме такая информация определяется заданием вектора состояния НЭ  $G$ . Показатель  $K_2$  определяет количество машинных слов ОП управляющей ЭВМ, необходимых для хранения указанной информации в полном объеме или определенной его части в зависимости от постановки задачи и выбранного метода ее решения.

3. Необходимость получения априорной информации об элементах ИС путем идентификации. Количественно данный показатель можно выразить логической (булевой) переменной  $K_3$ , которую определим следующим образом. Если для реализации рассматриваемого класса управляющих алгоритмов необходимо иметь такую информацию, то  $K_3 = 1$ , если такой необходимости нет, то  $K_3 = 0$ .

4. Возможность получения априорной информации об элементах ИС путем идентификации. Данный показатель характеризует возможность идентификации отдельных элементов ИС с позиций технической реализации и может быть количественно выражен логической переменной  $K_4$  следующим образом. Если идентификация элементов может быть выполнена технически доступными средствами по известной методике [5, 19, 30 - 33, 130, 134], то будем считать, что в данном случае  $K_4 = 1$ . Если же при этом имеются значительные трудности конструктивно-технологического характера, то  $K_4 = 0$ .

5. Объем априорной информации об управляемых переменных  $K_5$ . Данный показатель  $K_5$  численно выражает количество машинных слов ОП управляющей ЭВМ, необходимое для хранения такой информации; значение  $K_5$  определяется в зависимости от постановки задачи и метода ее решения [24, 29, 30 - 33, 44].

6. Объем рабочей информации об управляемых переменных  $K_6$ . Показатель  $K_6$  численно выражает как количество датчиков и каналов связи для сбора и передачи такой информации, так и количество машинных слов ОП управляющей ЭВМ, необходимых для ее хранения в зависимости от постановки и метода решения задачи оперативного управления [24, 29, 30 - 33, 44].

7. Возможность получения рабочей информации об управляемых переменных. Количественно данный показатель может быть выражен логической переменной  $K_7$ , которую определим следующим образом. Если указанная возможность реализуема с помощью имеющихся стандартных средств, то  $K_7 = 1$ ; в противном случае  $K_7 = 0$ .

8. Объем априорной информации об управляющих переменных  $K_8$ . Показатель  $K_8$  определяет число машинных слов ОП управляющей ЭВМ, необходимое для хранения такой информации. Величина  $K_8$  зависит от постановки задачи оперативного управления и метода ее решения [24, 29, 30 - 33, 44].

9. Объем рабочей информации об управляющих переменных  $K_9$ .

Показатель  $K_9$ , численно характеризует количество машинных слов ОП управляющей ЭВМ, необходимое для размещения такой информации, а также количество устройств, которые физически реализуют определенные значения управляющих параметров, и каналов связи с этими устройствами. Показатель  $K_9$  зависит от постановки и выбранного метода решения задачи оперативного управления ИС [24, 29, 30 - 33, 44].

10. Возможность локализации изменений установившегося потокораспределения и управляющих воздействий в ИС. Необходимость введения данного показателя в систему показателей для сравнения и оценки возможных классов управляющих алгоритмов обусловлена следующими факторами.

Реальная ИСС как объект оперативного управления не является однородной по своей структуре, а состоит из определенных образом взаимосвязанных и взаимодействующих между собой ЛС [42, 43, 62, 67, 81, 136]. В связи с этой естественной для объекта рассматриваемого класса иерархической декомпозицией является возможность получить в МС как ЛС высшего уровня иерархии более детерминированный процесс изменения потокораспределения по сравнению с соответствующими процессами в РС как ЛС низшего уровня иерархии, в которых потокораспределения непосредственно изменяются в зависимости от изменения допустимых режимов функционирования соответствующих ПЦП. Это объясняется тем, что определенное фиксированное установившееся потокораспределение в МС может обеспечить некоторое множество сочетаний установившихся потокораспределений в РС при соответствующем оперативном управлении ими [30 - 33, 43, 59, 61, 81, 136]. Такая возможность иерархической декомпозиции ИСС весьма ценна, поскольку она позволяет получить следующие результаты.

1. Минимизация регулирующих воздействий в МС в процессе оперативного управления объектом рассматриваемого класса.

Это весьма существенно, поскольку в силу конструктивных и функциональных особенностей МС (крупные трубопроводы, потоки большой мощности, наличие АЭ в некоторых трубопроводах) частые регулирующие воздействия в МС весьма нежелательны [6 - 11, 20 - 22, 62, 69, 75, 136].

2. Создание допустимых условий для функционирования АЭ. В силу конструктивных и функциональных особенностей АЭ весьма желательно, чтобы каждый из них работал в более детерминированном режиме [6 - 11, 20 - 22, 62, 69, 75, 136]. Возможность выполнения этого требования обуславливается возможностью получения более детерминированного потокораспределения в МС и минимизации регулирующих воздействий в ней в процессе оперативного управления.

Перечисленные факторы обуславливают важность данного показателя  $K_{10}$ . Будем считать, что количественно  $K_{10}$  выражается логической (булевой) переменной, которая определена следующим образом. Если управляющий алгоритм рассматриваемого класса реализует возможность локализации изменений установившегося потокораспределения и управляющих воздействий в ИС, то  $K_{10} = 1$ ; в противном случае  $K_{10} = 0$ .

11. Время расчета управляющих воздействий  $K_{11}$ . Показатель  $K_{11}$  определяется величиной промежутка времени, необходимого для вычисления значений управляющих переменных. Эта величина зависит от объема перерабатываемой информации и структуры управляющего алгоритма, которые в свою очередь определяются постановкой и методом решения задачи оперативного управления объектом рассматриваемого класса.

Введенная система показателей использована в настоящей работе для оценок различных классов управляющих алгоритмов, порождаемых различными постановками задач оперативного управления ИС и методами их решения.

## 1.6. Проблема синтеза управляющих алгоритмов, порождаемых обобщенной задачей оперативного управления инженерными сетями

Рассмотрим класс управляющих алгоритмов, основанный на решении задачи расчета потокораспределения в ИС  $N$  одним из общеизвестных и ставших классическим методов: Ньютона, (включая обобщенный и модифицированный), Лобачева-Кросса, сопряженных направлений Флетчера-Ривса, а также переменной метрики Дэвидона-Пауэлла, которые исчерпывающе исследованы в [30 - 33].

Для оценки рассматриваемого класса управляющих алгоритмов применим введенную в предыдущем подразделе систему показателей. Все перечисленные выше методы решения поставленной задачи используют информацию о топологической структуре ИС  $N$  в полном объеме. Наиболее удобной для использования в процессе вычислений и компактной формой представления информации о графе  $G$  является множество узловых пар  $A'$ , полученное в результате транспонирования множества узловых подмножеств [30 - 33]. Множество  $A$  содержит  $2e$  элементов, где  $e$  - число дуг графа  $G$ . Этой величиной и будем характеризовать показатель  $K_7$ :  $K_7 = 2e$ .

Поскольку реальные объекты управления рассматриваемого класса могут содержать порядка  $10^6 \dots 10^7$  дуг [6, 8 - 11, 30 - 33, 42 - 44, 138], то для представления такой информации требуется значительный объем ОП

управляющей ЭВМ, численная величина которого имеет порядок  $10^6 \dots 10^7$  машинных слов.

Для реализации управляющих алгоритмов рассматриваемого класса необходима в полном объеме информация о состояниях НЭ, поэтому  $K_2 = |E^r|$ , где  $E^r$  - множество дуг графа  $G$  ИС  $N$ , соответствующих НЭ. В соответствии с результатами подраздела 1.2, имеет место соотношение  $|E^a \cup E^p| + |E^r| = |E|$ , откуда  $|E^r| = |E| - |E^a \cup E^p|$ , где  $E$ ,  $E^a$ ,  $E^p$  соответственно множество всех дуг графа  $G$ ; множество дуг графа  $G$  содержащих АЭ; множество дуг графа  $G$ , содержащих ПЭ.

Поскольку для реальных ИС имеет место соотношение  $|E^a \cup E^p| \ll |E|$  [6, 8 - 11, 30-33, 44, 49 118], то справедливо следующее приближенное соотношение  $|E^r| \approx |E|$ . Отсюда имеем приближенную численную оценку параметра  $K_2$ :  $K_2 = |E|$ . Для реальной ИС, которая может содержать порядка  $10^6 \dots 10^7$  дуг [6, 8 - 11, 30 - 33, 44, 49 118], необходимый объем ОП управляющей ЭВМ для размещения соответствующей информации весьма велик.

Поскольку указанные методы решения поставленной задачи используют в полном объеме априорную информацию об элементах ИС, имеет место необходимость получения соответствующей априорной информации путем идентификации; поэтому  $K_3 = 1$ .

Анализируя возможность идентификации элементов рассматриваемого объекта, необходимо учитывать, что реальная ИСС содержит как МС, для которой такая процедура вполне реализуема технически, так и совокупность иерархически взаимосвязанных РС и СПЦП, для которых идентификация элементов встречает весьма большие технические затруднения и на реальных объектах не производится [6, 8 - 11, 30 - 33, 44, 49 118]. По этой причине идентификация объекта в целом весьма затруднительна, следовательно,  $K_4 = 1$ .

В данной постановке задачи априорной информацией об управляемых переменных являются нижние  $z_x^*$  и верхние  $z_x^{**}$  границы напоров  $z_x$  в выходных вершинах  $x \in V'$  ИС  $N$ .

Следовательно, численное значение показателя  $K_5$  определится соотношением:  $K_5 = |\{z_x^*, x \in V'\} \cup \{z_x^{**}, x \in V''\}|$ , где  $z_x^*$  и  $z_x^{**}$  соответственно верхняя и нижняя границы напоров в вершине  $x \in V'$ ; откуда  $K_5 = 2|V'|$ .

Поскольку в реальных объектах число выходных вершин, равное числу ПЦП, подключенных к рассматриваемой ИС, весьма велико и может иметь порядок  $10^6 \dots 10^7$  [6, 8 - 11, 24, 30 - 33], объем ОП управляющей ЭВМ для хранения такой информации весьма велик, порядок его численной величины -  $10^7 \dots 10^8$  машинных слов.

В данной постановке задачи рабочей информацией об управляемых переменных являются координаты вектора напоров в выходных вершинах ИС  $N$ . Поэтому показатель  $K_6$ , численно характеризующий объем рабочей информации об управляемых переменных, выражается соотношением:  $K_6 = |\{z_x, x \in V''\}|$ , где  $z_x$  - напор в выходной вершине  $x \in V''$ , откуда  $K_6 = |V''|$ .

Исходя из анализа класса управляющих алгоритмов по показателю  $K_6$ , можно сделать вывод, что для представления рассматриваемой информации ОП управляющей ЭВМ, потребуется весьма значительный ее объем, порядок которого  $10^6 \dots 10^7$  машинных слов. Кроме того установка порядка  $10^6 \dots 10^7$  датчиков напоров для получения такой информации и реализации связей для ее передачи в управляющую ЭВМ встречает технические трудности по следующим причинам: весьма большая трудоемкость установки датчиков и каналов передачи информации от них в управляющую ЭВМ, весьма большая стоимость и малая надежность этих устройств ввиду значительного их числа и значительной протяженности объектов управления. Следовательно,  $K_7 = 0$ .

Априорной информацией об управляющих переменных являются область допустимых значений вектора состояния АЭ  $\Omega(U)$  и ПЭ  $\Omega(R)$  ИС  $N$ .

Исходя из соотношения (1.9), определяющего  $\Omega(U)$ , а также учитывая, что  $\Omega(R)$  является  $|E^p|$ -мерным параллелепипедом, определяемым соотношением (1.10), показатель  $K_8$ , численно выражающий объем такой информации, определится следующим соотношением:

$$K_8 = \sum_{j \in E^a} |\Omega_j| + 2|E^p|.$$

Для реальных ИС величины  $|E^a|$  и  $|\Omega_j|$  имеют порядок  $10^2 \dots 10^3$  [19, 30-33, 100, 106]. Величина  $E^p$  также относительно невелика, ее порядок  $10^2 \dots 10^3$ . Следовательно, порядок значения параметра  $K_8$  для реальных ИС может составлять  $10^3 \dots 10^4$ .

Рабочей информацией об управляющих переменных в данной постановке задачи являются координаты векторов состояния АЭ  $U$  и ПЭ  $R$ . Поэтому объем такой информации, численно определяющий величину показателя  $K_9$ , выражается соотношением:  $K_9 = |\{\omega_j, j \in E^a\} \cup \{r_j, j \in E^p\}|$ , где  $\omega_j$  - параметр, определяющий режим работы АЭ в дуге  $j$  из множества дуг, содержащих АЭ  $E^a$ ;  $r_j$  - переменный коэффициент сопротивления в дуге  $j$  из множества дуг, содержащих ПЭ  $E^p$ .

Из этого соотношения следует, что  $K_9 = |E^a \cup E^p|$ .

Из тех же соображений, которые имели место относительно верхней оценки показателя  $K_8$  для реальных ИС, можно предположить, что верхняя

оценка показателя  $K$ , имеет порядок  $10^3 \dots 10^4$ . Эта оценка характеризует как объем ОП управляющей ЭВМ в машинных словах, необходимый для хранения такой информации, так и суммарное количество регулирующих элементов, находящихся в дугах оперативно управляемой ИС.

Данная постановка задачи и порождаемый ею класс алгоритмов оперативного управления не используют возможность локализации изменений установившегося потока распределения и управляющих воздействий в ИС; при этом  $K_{10} = 0$ .

В соответствии с данной постановкой рассматриваемая задача является одноуровневой, она не декомпозирована на задачи управления отдельными ЛС, скоординированные между собой. Единственный управляющий алгоритм оказывает управляющие воздействия одновременно на всю ИС.

При этом если, например, по какой-либо причине не будет выполнено допустимое условие функционирования:  $z_x \in [z_x^*, z_x^{**}]$ , где  $z_x$  - напор в выходной вершине  $x \in V$ ,  $z_x^*$  и  $z_x^{**}$  - соответственно нижняя и верхняя границы напора в рассматриваемой вершине, для одного ПЦП из общего числа порядка  $10^7 \dots 10^8$ , управляющий алгоритм будет рассчитывать и реализовывать управляющие воздействия на все АЭ и ПЭ, содержащиеся в дугах ИС  $N$ , общее число которых имеет порядок  $10^6 \dots 10^7$ . Следовательно, принцип минимизации управляющих воздействий в МС и принцип создания допустимых условий функционирования АЭ будут нарушены, что приведет к быстрому выходу из строя АЭ и ПЭ рассматриваемой ИС  $N$ , а также к повышенным энергозатратам для обеспечения требуемых потоко-распределений.

Кроме того, для расчета управляющих воздействий такой алгоритм использует в полном объеме априорную информацию, как о топологии ИС, так и о ее элементах. Исходя из численных оценок показателей  $K_1, K_2, K_5$  и  $K_6$ , можно заключить, что этот объем весьма велик и имеет порядок  $10^8 \dots 10^9$  машинных слов ОП управляющей ЭВМ.

Использование управляющим алгоритмом таких больших массивов входной (априорной и рабочей) информации для формирования не менее значительного объема выходной управляющей (рабочей) информации требует значительного промежутка времени для расчета управляющих воздействий (параметр  $K_{11}$ ).

В соответствии с [30 - 33, 69, 89, 136] для ИС, имеющих число вершин порядка  $10^7 \dots 10^8$ , величина показателя  $K_{11}$  может иметь порядок  $10^2 \dots 10^3$  минут. Исходя из определения, сформулированного в подразделе 1.3 настоящей работы, можно заключить, что такой алгоритм в общем случае не обеспечит оперативного управления объектами рассматриваемого класса.

Оценки класса управляющих алгоритмов, порождаемого обобщенной задачей, приведены в [80].

Анализ управляющих алгоритмов для реальных объектов, проведенный с помощью введенной для этой цели системы показателей, позволяет сделать следующие выводы.

1. Для сбора и передачи рабочей информации требуется весьма большое число датчиков и каналов связи, порядок которого составляет  $10^6 \dots 10^7$ .

2. Для хранения всей необходимой априорной и рабочей информации требуемый объем ОП управляющей ЭВМ весьма велик; порядок этой величины составляет  $10^7 \dots 10^8$  машинных слов.

3. По техническим причинам весьма затруднительна идентификация параметров элементов РС и СПЦП, входящих в состав реальных ИСС рассматриваемого класса.

4. Управляющий алгоритм не использует принципов минимизации управляющих воздействий в МС и создания допустимых условий функционирования АЭ, что приведет к преждевременному выходу из строя АЭ и ПЭ, а также к неоправданно высоким энергозатратам.

5. Время для расчета управляющих воздействий велико и не обеспечивает оперативного управления объектами рассматриваемого класса.

Из полученных результатов следует, что известные и ставшие классическими методы решения поставленной в подразделе 1.4 обобщенной задачи не позволяют получить класс эффективных управляющих алгоритмов. Это происходит вследствие того, что постановка и известные методы решения обобщенной задачи не учитывают сложности и специфики структуры и функциональных взаимосвязей между отдельными ЛС, входящими в состав реальных ИСС в процессе функционирования и оперативного управления объектами рассматриваемого класса.

Исследование ИСС в таком аспекте с целью построения эффективных управляющих алгоритмов является предметом последующих разделов настоящей работы.

## 1.7. Выводы

1. Произведена формализация структуры и функциональных элементов оперативно управляемых ИС и сделана постановка обобщенной задачи оперативного управления такими объектами.

2. Разработана система показателей для оценки управляющих алгоритмов, порождаемых известными методами реализации поставленной обобщенной задачи оперативного управления ИС.

3. Проведен анализ управляющих алгоритмов, порождаемых обобщенной задачей, с использованием для этой цели системы показателей для оценки управляющих алгоритмов.

4. Показано, что известные традиционные методы реализации обобщенной задачи оперативного управления ИС не позволяют получить эффективные управляющие алгоритмы. На основании этого сделан вывод о необходимости таких новых подходов к управлению ИС, которые бы учитывали существенные структурные и функциональные особенности объектов управления рассматриваемого класса и порождали эффективные алгоритмы оперативного управления.

## Раздел 2 КОНЦЕПТУАЛЬНЫЕ ПОДХОДЫ К АНАЛИЗУ НАДЕЖНОСТИ И УПРАВЛЯЕМОСТИ ИНЖЕНЕРНЫХ СЕТЕЙ

### 2.1. Комбинаторно-графовый подход к управлению инженерными сетями

При исследовании ИС как объектов оперативного управления в разделе 1 данной работы были выполнены следующие разработки и при этом были получены следующие результаты.

1. Произведена формализация структуры и функциональных элементов оперативно управляемых ИС и сделана постановка обобщенной задачи оперативного управления такими объектами.

2. Разработана система показателей для оценки управляющих алгоритмов, порождаемых известными методами реализации поставленной обобщенной задачи оперативного управления ИС.

3. Проведен анализ управляющих алгоритмов, порождаемых обобщенной задачей, с использованием для этой цели системы показателей для оценки управляющих алгоритмов.

4. Показано, что известные методы реализации обобщенной задачи оперативного управления ИС не позволяют получить эффективные управляющие алгоритмы. На основании этого сделан вывод о необходимости таких новых подходов к управлению ИС, которые бы учитывали существенные структурные и функциональные особенности объектов управления рассматриваемого класса и порождали эффективные алгоритмы оперативного управления.

Эти результаты использованы в настоящей работе при исследовании ИС в аспекте оперативного управления такими объектами.

Известны различные способы реализации процессов управления ИС, не использующие различные методы расчета установившихся потокораспределений в ИС. К ним, в частности, относятся метод Ньютона, модифицированный метод Ньютона, метод Лобачева-Кросса, обобщенный метод Ньютона, метод покоординатного спуска, метод сопряженных

направлений Флетчера-Ривса, а также метод переменной метрики Девидона-Флетчера-Пауэлла [30 - 33].

Практическая реализация управляющих процессов, основанных на перечисленных методах, встречает следующие трудности [30 - 33, 56].

1. Необходим весьма большой объем ОП управляющей ЭВМ для хранения участвующих в вычислительном процессе данных: априорной информации о параметрах всех дуг ИС и рабочей информации промежуточных величин, используемых в вычислительном процессе.

2. Необходимы значительные затраты процессорного времени управляющей ЭВМ для выполнения весьма большого числа итераций цикла расчета управляющих воздействий, обеспечивающих требуемое потокораспределение.

Поэтому в данном подразделе предлагается другой подход к управлению ИС, непосредственно не связанный с необходимостью расчета установившихся потокораспределений в ИС [56, 79, 80].

Являясь комбинаторно-графовым, предлагаемый подход учитывает существенные структурные и функциональные особенности объекта управления рассматриваемого класса. Этим он позволяет существенно уменьшить объем ОП и сократить количество процессорного времени управляющей ЭВМ, необходимые для формирования управляющих воздействий в ИС.

Для рассмотрения предлагаемого в данном подразделе комбинаторно-графового подхода к управлению ИС в соответствии с [56] введем следующие обозначения и понятия.

Множество вершин графа  $G$ , соответствующее узлам ИС, подключенным к АЭ, обозначим  $A$  и назовем множеством входных вершин графа  $G$ . В реальных ИС входными вершинами являются лишь некоторые из множества всех вершин  $V$ . Поэтому будем считать, что между множеством входных вершин  $A$  и множеством всех вершин  $V$  имеет место следующее соотношение:  $A \subset V$ . Определенный АЭ, биактивный соответствующий входной вершине  $x$ , обозначим  $S_x$ , где  $x \in A$ . В соответствии с математической моделью потокораспределения в ИС [30 - 33], в результате функционирования АЭ  $S_x$  создаются определенные напоры (уровни) ЦП  $Z_y$  в вершинах  $y$ , где  $x \in A$ ,  $y \in V$ .

Каждой дуге  $j \in E$  моделирующего графа  $G$  поставим в соответствие величину  $l_j$ , формализующую гидравлическое или аэродинамическое сопротивление соответствующего участка рассматриваемой ИС. Существуют различные способы расчета значений  $l_j$  для реальных ИС. Эти величины также могут быть определены в процессе идентификации ИС как объектов управления [30 - 33, 123, 126].

Пусть вершины  $x, y \in V$  моделирующего графа  $G$  связаны цепью  $P_{xy}$ . Тогда длина цепи  $P_{xy}$ , выражающая сопротивление соответствующего участка ИС  $N$ , может быть определена соотношением:

$$L_{xy} = \sum_{j \in P_{xy}} l_j.$$

В общем случае рассматриваемые вершины  $x, y \in V$  графа  $G$  могут быть связаны несколькими цепями  $P_{xy}$ , что обусловлено наличием нескольких участков в ИС  $N$ , соединяющих соответствующие узлы. Тогда кратчайшей цепью  $K_{xy}$  назовем такую цепь  $P_{xy}$ , которая имеет наименьшую длину  $L_{xy}$ . Длину  $L_{xy}$  кратчайшей цепи  $K_{xy}$  обозначим  $M_{xy}$ . Величина  $M_{xy}$  определяется следующим соотношением:  $M_{xy} = \min \{L_{xy}\}$ .

Моделирующий граф  $G$  топологической структуры ИС  $N$ , формализующий комбинаторно-графовый подход к управлению объектом рассматриваемого класса, приведен в [79, 80].

Исходя из математической модели потокораспределения в ИС  $N$ , процесс управления объектом рассматриваемого класса включает направленные воздействия на все или некоторые АЭ  $S_x$ , где  $x \in A$ , для реализации необходимых изменений напоров (уровней) ЦП  $Z_y$ , где  $y \in V$ , в соответствии с определенными критериями управления [30-33, 123, 126]. Для реализации процесса управления ИС в данном подразделе предлагается использовать следующие эвристики.

1. Для изменения величины  $Z_y$  необходимо в первую очередь использовать те АЭ  $S_x$ , которые наиболее эффективно воздействуют на величину  $Z_y$ , где  $x \in A$ ,  $y \in V$ .

2. Степень воздействия АЭ  $S_x$  на величину напора  $Z_y$  будем характеризовать длиной  $M_{xy}$  кратчайшей цепи  $K_{xy}$  из вершины  $x$  в вершину  $y$ , где  $x \in A$ ,  $y \in V$ . При этом чем меньше длина кратчайшей цепи, тем степень воздействия определенного АЭ на напор (уровень) ЦП в рассматриваемой вершине считается большей.

Справедливость данных эвристик обусловлена утверждениями 1 и 2, устанавливающими взаимосвязи между управляющими переменными и параметрами установившихся потокораспределений в ИС, которые сформулированы и доказаны в разделе 3 настоящей работы.

В соответствии со спецификой математической модели потокораспределения в ИС, данные эвристики способствуют уменьшению энергетических затрат при создании допустимых условий функционирования для ПЦП, подключенных к рассматриваемой ИС, что способствует реализации обобщенной задачи оперативного управления рассматриваемой ИС, формализованной в разделе 1 настоящей работы.

Предлагаемый в данном подразделе комбинаторно-графовый подход к управлению ИС формализуем следующим образом. Пусть множества  $V$  и  $A$

Дальнейшая формализация ИС как объекта управления предполагающая использование статистического подхода, выполнена на основании предположения, что в ИС имеет место определенное значение вектора для которого из условия (2.27) определен соответствующий индекс класса  $k \in K$ .

Анализ моделей потокораспределений в реальных ИС [30 - 33, 61, 74] позволяет сделать предположение о том, что при определенном  $k \in K$  каждая управляемая переменная  $y_i^k$  связана с управляющими параметрами следующим соотношением:

$$y_i^k = \sum_{j \in J} (a_{ij}^k x_j^2 + b_{ij}^k x_j) + c_i^k. \quad (2.28)$$

В соотношении (2.28) коэффициенты  $a_{ij}^k$ ,  $b_{ij}^k$  и  $c_i^k$  характеризуют взаимосвязь между определенной управляемой переменной  $y_i^k$  и всеми управляющими параметрами  $x_j$  при определенном  $k \in K$ .

Будем предполагать, что концептуально выражение (2.28) при определенном  $k \in K$  является уравнением множественной параболической регрессии [23, 24], в котором управляющие параметры  $x_j$  являются факторами, а управляемая переменная  $y_i^k$  - зависимой переменной. При определенном  $k \in K$  для  $\forall k \in K$  выражения (2.28) образуют систему квадратных уравнений. На основании анализа, содержащегося в [23, 30 - 34], будем предполагать, что для  $\forall k \in K$ ,  $\forall i \in I$  коэффициенты  $a_{ij}^k$ ,  $b_{ij}^k$  и  $c_i^k$  в уравнениях (2.28) являются известными.

Анализ реальных ИС [30 - 33, 61, 74] показывает, что для определенного  $k \in K$ , характеризующего величины потоков в рассматриваемой ИС, общие энергозатраты  $Z^k$  всех АЭ определяются следующим соотношением:

$$Z^k = \sum_{j \in J} (f_j^k x_j^3 + g_j^k x_j^2 + p_j^k x_j) + t^k. \quad (2.29)$$

В соотношении (2.29) коэффициенты  $f_j^k$ ,  $g_j^k$ ,  $p_j^k$  и  $t^k$  характеризуют взаимосвязь между всеми управляющими параметрами

определяющими режимы функционирования соответствующих АЭ, и общими энергозатратами  $Z^k$  при определенном  $k \in K$ .

Аналогично (2.28), выражение (2.29) при определенном  $k \in K$  является уравнением множественной параболической регрессии [23, 61, 74], в котором факторами являются управляющие параметры  $x_j$ , а зависимой переменной - величина общих энергозатрат  $Z^k$ . Будем предполагать, что для  $\forall k \in K$  коэффициенты  $f_j^k$ ,  $g_j^k$ ,  $p_j^k$  и  $t^k$  в уравнениях (2.29) являются известными.

На основании проведенной формализации поставим следующую задачу управления ИС.

При определенном  $k \in K$  необходимо найти такие значения управляющих параметров  $x_j$ , которые удовлетворяют системе уравнений (2.28), ограничениям (2.25), (2.26) и минимизируют целевую функцию, выраженную уравнением (2.29). Вид указанных соотношений позволяет заключить, что при определенном  $k \in K$  поставленная задача является задачей сепарабельного программирования. В качестве метода решения такой задачи был использован метод штрафов и барьеров [17, 122].

Значения управляющих параметров  $x_j$ , входящие в оптимальный план при определенном  $k \in K$ , обозначим  $x_{j \min}^k$ , где  $j \in J$ .

На основании предложенной формализации был построен следующий управляющий алгоритм.

1. На объекте оперативного управления - ИС выполняется измерение текущих значений управляемых переменных  $y_i$  для  $\forall i \in I$ .
2. На основании измеренных значений  $y_i$  осуществляется проверка выполнения ограничений (2.25) для  $\forall i \in I$ . Если все они выполняются, то осуществляется переход к шагу 1. Иначе выполняется шаг 3.
3. Определяется текущее значение вектора потоков  $q$  путем измерения значений его координат.
4. На основании текущего значения вектора  $q$  из условия (2.27) определяется соответствующий индекс класса  $k$ .
5. На основании определенного значения индекса  $k$  для  $\forall i \in I$ ,  $\forall j \in J$  выбираются соответствующие значения коэффициентов  $a_{ij}^k$ ,  $b_{ij}^k$  и  $c_i^k$  в уравнениях (2.28).
6. На основании определенного значения индекса  $k$  для  $\forall j \in J$  выбираются соответствующие значения коэффициентов  $f_j^k$ ,  $g_j^k$ ,  $p_j^k$  и  $t^k$  в уравнениях (2.29).

## 2.5. Разработка и реализация статистических методов для управления инженерными сетями

В отличие от [30 - 33], рассмотрим такой подход к управлению ИС, который основан на использовании современных прикладных математических статистических методов [61]. В частности, для этой цели предлагается использовать иерархический кластерный анализ, а также нелинейный параболический множественный регрессионный анализ [23, 28, 34, 86].

Концептуально статистический подход к управлению ИС обусловлен необходимостью создания допустимых условий функционирования отдельных ПЦП, подключенных к рассматриваемой ИС, в условиях стохастически изменяющихся их режимов потребления. В реальных ИС допустимые условия функционирования подключенных к ним ПЦП могут быть выполнены, если в некоторых вершинах величины напоров (уровней ЦП находятся в определенных интервалах [30 - 33, 74, 77]. Такие вершины ИС назовем вершинами с управляемыми напорами (уровнями) ЦП.

Для реализации предлагаемого подхода проведем соответствующую формализацию ИС как объекта управления. При этом будем использовать модель установившегося потокораспределения в ИС в соответствии с разделом 1 данной работы.

Будем считать, что во множестве всех вершин рассматриваемой ИС выделено подмножество вершин с управляемыми напорами (уровнями) ЦП. Множество индексов вершин с управляемыми напорами рассматриваемой ИС обозначим  $I$ . Каждой вершине с индексом  $i$  поставим в соответствие величину напора (уровня) ЦП  $y_i$ , где  $i \in I$ . Величины  $y_i$  для  $\forall i \in I$  рассматриваемом подходе назовем управляемыми переменными. Будем предполагать, что для каждой вершины с индексом  $i \in I$  величина  $y_i$  должна находиться в интервале, определенном соответственно нижней границей  $y_i^{**}$  и верхней границей  $y_i^*$ . Формально данное утверждение имеет следующий вид:

$$\forall i \in I, y_i \in [y_i^*, y_i^{**}]. \quad (2.25)$$

Будем предполагать, что величины  $y_i^*$  и  $y_i^{**}$  являются известными для  $\forall i \in I$ . В частности, они могут быть определены, исходя из функционального назначения ИС [30 - 33].

Будем предполагать, что для создания необходимых напоров (уровней ЦП) рассматриваемая ИС содержит определенное множество АЭ. Множество индексов таких АЭ обозначим  $J$ . Будем считать, что каждый АЭ

индексом  $j$  характеризуется соответствующим параметром  $x_j$ , определяющим режим функционирования рассматриваемого АЭ, при этом  $x_j$  может быть, например, угловая частота, потребляемая мощность, напряжение, ток, а также уровень воды в гидродинамической башне. Параметры  $x_j$  для  $\forall j \in J$  назовем управляющими параметрами рассматриваемой ИС. Будем предполагать, что для каждого АЭ с индексом  $j \in J$  величина параметра находится в интервале, определенном соответственно нижней  $x_j^*$  и верхней  $x_j^{**}$  границами.

Формально данное утверждение имеет следующий вид:

$$\forall j \in J, x_j \in [x_j^*, x_j^{**}]. \quad (2.26)$$

Будем предполагать, что величины  $x_j^*$  и  $x_j^{**}$  являются известными для  $\forall j \in J$ . Такие величины определяются технико-эксплуатационными характеристиками используемых АЭ [30 - 33, 79, 80].

Возмущающее воздействие, оказываемое на ИС как объект управления со стороны подключенных к ней ПЦП, будем характеризовать вектором потоков  $q$ , координатами которого являются потоки в дугах рассматриваемой ИС. Для реальных ИС  $q \in Q$ , где  $Q$  - область значений вектора потоков  $q$ . Будем предполагать, что в области  $Q$  выделено множество классов - подобластей  $Q_k$ ; при этом  $k \in K$ , где  $K$  - множество индексов таких классов. Будем считать, что для определенного индекса  $k \in K$   $\forall q \in Q_k$  являются близкими в смысле оказываемого возмущающего воздействия на управляемые переменные рассматриваемой ИС. Также будем считать, что для каждого значения вектора  $q \in Q$  однозначно определяется индекс класса  $k \in K$ , исходя из выполнения следующего условия:

$$q \in Q_k, Q_l \subset Q \Rightarrow k \in K. \quad (2.27)$$

Концептуальной и методологической основой сделанных предположений могут послужить известные процедуры кластерного анализа, к которым, в частности, относятся быстродействующие алгоритмы иерархической восходящей и нисходящей классификации, а также алгоритмы формирования разбиений и пересекающихся кластеров [34, 86, 119].

Будем считать, что для рассматриваемой ИС реализована процедура формирования множества подобластей  $Q_k$  в области  $Q$ , где  $k \in K$ . Процедура нахождения индекса класса из условия (2.27) предполагается известной и готовой к программной реализации.

В соответствии с соотношением (2.17), остаточные значения пропускных способностей дуг  $j \in J$  данной ИС  $N$  в конце  $i$ -го шага рассматриваемого алгоритма, являющиеся координатами указанного вектора  $C_i$ , могут быть вычислены следующим образом:

$$C_{ij} = C_{i-1,j} - f_{ij}. \quad (2.18)$$

По завершении выполнения первых  $n$  шагов рассматриваемого алгоритма выполняется его последний,  $(n - 1)$ -й шаг. Целью реализации данного шага является определение вектора планируемого потокораспределения в ИС  $N$ , векторов планируемых значений потоков дефицитов ЦП для отдельных ПЦП, подключенных к соответствующим стокам ИС  $N$ , величины потока, которую планируется потреблять источнике ИС  $N$  из внешней среды, а также вектора остаточных значений пропускных способностей дуг ИС  $N$  при условии реализации рассматриваемой ИС  $N$ -вектора планируемого потокораспределения.

Координатами вектора планируемого исходного потокораспределения в ИС  $N$  являются планируемые потоки  $f_j$  в соответствующих дугах  $j \in J$  ИС  $N$ , поэтому указанный вектор  $F$  может быть формализован следующим соотношением:

$$F = (f_j, j \in J). \quad (2.19)$$

В соответствии со спецификой математической модели потокораспределения в ИС [30 - 33, 123, 126], планируемый поток  $f_j$  соответствующей дуге  $j \in J$  ИС  $N$  определяется как аддитивная функция всех планируемых частичных потоков  $f_{ij}$  в указанной дуге  $j \in J$  данной ИС  $N$ , определенных в результате реализации первых  $n$  шагов рассматриваемого алгоритма и обеспечивающих планируемые значения потоков  $q_i$  для соответствующих ПЦП  $Z_i$ , где  $i = 1, \dots, n$ .

Поэтому планируемые потоки  $f_j$  в соответствующих дугах  $j \in J$  рассматриваемой ИС  $N$  могут быть определены следующим соотношением:

$$f_j = \sum_{i=1}^n f_{ij}. \quad (2.20)$$

Из соотношения (2.20) следует, что вектор планируемого потокораспределения  $F$  в ИС  $N$  аддитивно связан с векторами планируемых частичных потокораспределений  $F_i$  в рассматриваемой ИС  $N$ , обеспечивающими планируемые значения потоков  $q_i$  для соответствующих ПЦП  $Z_i$ , где  $i = 1, \dots, n$ , и определенными на первых  $n$  шагах рассматриваемого алгоритма. Поэтому искомым вектор  $F$  планируемого

потокораспределения в рассматриваемой ИС  $N$  может быть определен следующим соотношением:

$$F = \sum_{i=1}^n F_i. \quad (2.21)$$

Координатами вектора  $Q$  планируемых значений потоков для ПЦП, подключенных к стокам ИС  $N$ , являются планируемые значения потоков  $q_i$  для отдельных ПЦП  $Z_i$ , подключенных к соответствующим стокам  $t_i$  рассматриваемой ИС  $N$ , где  $i = 1, \dots, n$ . Поэтому указанный вектор  $Q$  может быть определен следующим соотношением:

$$Q = (q_i, i = 1, \dots, n). \quad (2.22)$$

В соответствии со спецификой математической модели потокораспределения в ИС [30 - 33, 123, 126] можно заключить, что величина потока  $q_i$ , которую планируется потреблять из внешней среды в источнике  $S$  рассматриваемой ИС  $N$ , является аддитивной функцией координат указанного вектора  $Q$ . Поэтому рассматриваемая величина  $q_i$  может быть определена следующим соотношением:

$$q_i = \sum_{j=1}^n q_{ij}. \quad (2.23)$$

Координатами вектора  $\Delta$  планируемых дефицитов ЦП для отдельных ПЦП, подключенных к стокам ИС  $N$ , являются планируемые величины  $\delta_i$  дефицитов ЦП для отдельных ПЦП  $Z_i$ , подключенным к соответствующим стокам  $t_i$  рассматриваемой ИС  $N$ . Поэтому указанный вектор  $\Delta$  может быть определен следующим соотношением:

$$\Delta = (\delta_i, i = 1, \dots, n). \quad (2.24)$$

Вектор остаточных значений пропускных способностей дуг рассматриваемой ИС  $N$  при условии реализации вектора планируемого потокораспределения  $F$  в данной ИС  $N$  определяется в конце  $n$ -го шага рассматриваемого алгоритма с использованием соотношения (2.17).

Рассмотренный алгоритм, в процессе реализации которого используются соотношения (2.3) - (2.24), формализует предлагаемый в данном разделе подход к планированию исходных потокораспределений в ИС. Апробация данного подхода показала эффективность его использования для реализации итерационных процессов оперативного управления системой городского водоснабжения.

превосходит величину потока  $q_i^r$ , требуемого для ПЦП  $Z_i$ . Указанное условие может быть формализовано следующим соотношением альтернативным соотношению (2.7):

$$q_i^{\max} > q_i^r. \quad (2.10)$$

В данном случае возможно удовлетворение потребностей ПЦП  $Z_i$  в ЦП в полном объеме, что обусловлено достаточными величинами остаточных значений пропускных способностей  $C_{i-1,j}$  дуг  $j \in J$  ИС  $N$  на начало  $i$ -го шага рассматриваемого алгоритма, являющихся координатами вектора  $C_{i-1}$ . При этом планируемое значение потока  $q_i$  для ПЦП  $Z_i$  определяется требуемым его значением  $q_i^r$ :

$$q_i = q_i^r. \quad (2.11)$$

Исходя из специфики математической модели потокораспределения в ИС [30 - 33, 74, 77], можно заключить следующее. Для обеспечения требуемого ПЦП  $Z_i$  значения потока  $q_i^r$  при наличии возможности обеспечения максимального в данных условиях значения потока  $q_i^{\max}$  и отсутствия дефицита ЦП при обеспечении им указанного ПЦП. Указанное условие может быть формализовано следующим соотношением:

стока  $t_i$  ИС  $N$ , удовлетворяющего соотношению (2.10), достаточно пропорционально уменьшить максимальные частичные потоки  $f_{ij}^{\max}$  в дугах  $j \in J$  рассматриваемой ИС  $N$ , приведя их к искомым планируемым потокам  $f_{ij}$ , удовлетворяющим следующему условию:

$$f_{ij} = f_{ij}^{\max}. \quad (2.12)$$

Указанную процедуру назовем процедурой приведения максимального частичного потокораспределения в ИС  $N$  к планируемому частичному потокораспределению в данной ИС  $N$  на  $i$ -м шаге рассматриваемого алгоритма при условии выполнения соотношения (2.10).

В соответствии со спецификой математической модели потокораспределения в ИС [30 - 33, 74, 77], указанная процедура может быть реализована следующим образом. Вначале определяется коэффициент приведения максимального частичного потокораспределения к

планируемому при условии выполнения соотношения (2.10). Указанный коэффициент  $k_i$  может быть вычислен по следующей формуле:

$$k_i = \frac{q_i^r}{q_i^{\max}}. \quad (2.13)$$

В соответствии со спецификой математической модели потокораспределения в ИС [30 - 33, 74, 77], из соотношений (2.4), (2.6) и (2.13) следует, что искомым вектор планируемого частичного потокораспределения  $F_i$  связан с вектором максимального частичного потокораспределения  $F_i^{\max}$  в рассматриваемой ИС  $N$  следующим соотношением:

$$F_i = k_i F_i^{\max}. \quad (2.14)$$

Векторное соотношение (2.14) позволяет вычислить искомые планируемые частичные потоки  $f_{ij}$  в дугах  $j \in J$  ИС  $N$ , которые связаны с максимальными частичными потоками  $f_{ij}^{\max}$  следующим соотношением:

$$f_{ij} = k_i f_{ij}^{\max}. \quad (2.15)$$

В данном случае в соответствии с соотношением (2.10) имеет место удовлетворение потребностей ПЦП  $Z_i$  в ЦП в полном объеме, поэтому отсутствует дефицит ЦП при обеспечении им указанного ПЦП. Указанное условие может быть формализовано следующим соотношением:

$$\delta_i = 0. \quad (2.16)$$

4. В заключение  $i$ -го шага определяется вектор  $C_i$  остаточных значений пропускных способностей дуг рассматриваемой ИС  $N$ , который вычисляется с учетом реализации планируемых частичных потокораспределений на  $i$  первых шагах данного алгоритма. Указанный вектор  $C_i$  в случае необходимости может быть использован при выполнении следующего,  $(i + 1)$ -го, шага.

В соответствии со спецификой математической модели потокораспределения в ИС [30 - 33, 74, 77], для определения указанного вектора  $C_i$  в конце  $i$ -го шага рассматриваемого алгоритма может быть использовано следующее соотношение:

$$C_i = C_{i-1} - F_i. \quad (2.17)$$

алгоритма такая информация является априорной, поскольку величины  $q_i^r$  предполагаются заданными (известными) для всех ПЦП  $Z_i$  ИС  $N$  до начала вычислительного процесса, где  $i = 1, \dots, n$ .

2. Вектор  $C_{i-1}$  остаточных значений пропускных способностей дуг рассматриваемой ИС  $N$ , определенный с учетом реализации аналогичных процедур по планированию частичных потокораспределений на предыдущих  $i - 1$  шагах рассматриваемого алгоритма для всех тех ПЦП, которые имеют более высокий приоритет по сравнению с данным ПЦП  $Z_i$  в заданной системе приоритетов. Поскольку координатами рассматриваемого вектора  $C_{i-1}$  являются остаточные значения  $C_{i-1,j}$  пропускных способностей дуг  $j \in J$  ИС  $N$  с учетом реализации всех планируемых частичных потокораспределений на предыдущих  $i - 1$  шагах, указанный вектор  $C_{i-1}$  может быть определен следующим соотношением:

$$C_{i-1} = (C_{i-1,j}; j \in J). \quad (2.5)$$

Для рассматриваемого алгоритма такая информация является рабочей, поскольку она определяется как совокупность промежуточных величин, полученных в ходе вычислительного процесса, порождаемого реализацией этого алгоритма.

Сущность  $i$ -го шага рассматриваемого алгоритма заключается в выполнении совокупности следующих процедур.

1. На основании информации о топологической структуре ИС  $N$ , определяемой моделирующим графом  $G$ , используя вектор  $C_{i-1}$  остаточных значений пропускных способностей дуг ИС  $N$ , вычисленных в начале  $i$ -го шага рассматриваемого алгоритма, определяется вектор  $q_i^{\max}$  максимального частичного потокораспределения в ИС  $N$ , обеспечивающий максимально возможный в данных условиях поток  $q_i^{\max}$  из стока  $t_i$  ИС  $N$ , а также сама величина  $q_i^{\max}$  этого максимального потока. Поскольку координатами вектора максимального частичного потокораспределения  $F_i^{\max}$  являются максимальные частичные потоки  $f_{ij}^{\max}$  в дугах  $j \in J$  ИС  $N$ , обеспечивающие максимальную величину потока  $q_i^{\max}$  из стока рассматриваемой ИС  $N$ , указанный вектор  $F_i^{\max}$  может быть определен следующим соотношением:

$$F_i^{\max} = (f_{ij}^{\max}, j \in J). \quad (2.6)$$

При этом для расчета координат  $f_{ij}^{\max}$  вектора  $F_i^{\max}$ , а также максимальной величины потока  $q_i^{\max}$  из источника  $t_i$  рассматриваемой ИС  $N$  в качестве стандартной служебной процедуры на  $i$ -м шаге рассматриваемого алгоритма предполагается использовать алгоритм решения известной задачи о максимальном потоке в ИС [123, 126].

2. Пусть имеет место случай, когда максимальная величина потока  $q_i^{\max}$  из стока  $t_i$  ИС  $N$ , определенная на первом этапе  $i$ -го шага рассматриваемого алгоритма, не превышает величины потока  $q_i^r$ , требуемого ПЦП  $Z_i$ . Указанное условие может быть формализовано следующим соотношением:

$$q_i^{\max} \leq q_i^r. \quad (2.7)$$

Исходя из соотношения (2.7), в данном случае возможен дефицит ЦП для ПЦП  $Z_i$ , который обусловлен ограничениями по остаточным значениям пропускных способностей  $C_{i-1,j}$  дуг  $j \in J$  ИС  $N$  на начало  $i$ -го шага рассматриваемого алгоритма, являющихся координатами вектора  $C_{i-1}$ .

В данном случае дальнейшие вычислительные процедуры на  $i$ -м шаге рассматриваемого алгоритма выполняются в такой последовательности. Планируемое значение потока  $q_i$  для ПЦП  $Z_i$  определяется максимальной величиной потока  $q_i^{\max}$  из стока  $t_i$  рассматриваемой ИС  $N$ :

$$q_i = q_i^{\max}. \quad (2.8)$$

При этом для ПЦП  $Z_i$  в общем случае может иметь место дефицит ЦП, величина которого  $\delta_i$  определяется как разность между требуемым для данного ПЦП  $Z_i$  значением потока  $q_i^r$  и планируемым его значением  $q_i$ :

$$\delta_i = q_i^r - q_i. \quad (2.9)$$

3. Пусть максимальная величина потока  $q_i^{\max}$  из стока  $t_i$  ИС  $N$ , определенная на первом этапе  $i$ -го шага рассматриваемого алгоритма,

планируемого частичного потокораспределения в рассматриваемой ИС для максимально возможного в данных условиях удовлетворения потребности в ЦП определенного ПЦП, имеющего соответствующий данному этапу приоритет в заданной системе приоритетов. Ограничениями при расчете такого планируемого частичного потокораспределения на рассматриваемом этапе являются остаточные значения пропускных способностей дуг ИС определенные в результате расчетов планируемых частичных потокораспределений для ПЦП более высоких приоритетов, выполненных на предыдущих этапах. При этом в качестве стандартной служебной процедуры, применяемой на каждом этапе для расчета соответствующего планируемого частичного потокораспределения, предполагается использовать алгоритм решения известной задачи о максимальном потоке ИС [123, 126].

При завершении последовательности расчетов планируемых частичных потокораспределений для всех ПЦП в порядке убывания их приоритетов определяется планируемое потокораспределение в ИС. В соответствии со спецификой математической модели потокораспределения в ИС [30 - 33, 123, 126], искомое планируемое потокораспределение в ИС определяется как аддитивная функция планируемых частичных потокораспределений, предназначенных для удовлетворения потребности в ЦП отдельных ПЦП, подключенных к стокам рассматриваемой ИС.

На основании такой общей концептуальной установки выполним формализацию предлагаемого подхода к планированию потокораспределений в ИС. С этой целью введем следующие обозначения и понятия.

Будем предполагать, что топологическая структура рассматриваемой ИС формализована моделирующим графом  $G$ , дуги  $j$  которого, соответствующие участкам ИС  $N$ , образуют множество дуг  $j$  указанного графа  $G$ . На моделирующем графе  $G$  дан источник  $S$ , в котором происходит потребление ЦП рассматриваемой ИС  $N$  из внешней среды. Кроме того, на моделирующем графе  $G$  дано множество стоков  $\{t_i, i = 1, \dots, n\}$ , которому биективно соответствует множество ПЦП  $\{Z_i, i = 1, \dots, n\}$ , где  $n$  - общее число ПЦП, подключенных к стокам данной ИС  $N$ , равное вследствие биекции  $t_i \leftrightarrow Z_i$  общему числу стоков рассматриваемой ИС  $N$ .

Анализ реальных ПЦП [30 - 33, 74, 77] показывает, что для обеспечения допустимых условий своего функционирования каждый ПЦП  $Z_i$  должен потреблять из биективно соответствующего ему стока  $t_i$  ИС  $N$  требуемое этим ПЦП  $Z_i$  значение потока  $q_i^r$ , где  $i = 1, \dots, n$ . Будем предполагать, что на множестве ПЦП  $\{Z_i, i = 1, \dots, n\}$  определена (задана)

система их приоритетов по отношению к потреблению ЦП из соответствующих стоков рассматриваемой ИС  $N$  следующим образом. Не уменьшая общности, удобно предположить, что все ПЦП занумерованы  $n$  первыми последовательными натуральными числами в порядке убывания их приоритетов по отношению к потреблению ЦП из соответствующих им стоков рассматриваемой ИС  $N$ . В этом случае приоритет каждого ПЦП  $Z_i$  в указанной системе приоритетов определяется его индексом  $i$ , где  $i = 1, \dots, n$ .

Будем предполагать, что координатами вектора  $C_0$  начальных (исходных) значений пропускных способностей дуг ИС  $N$  являются исходные (начальные) значения  $C_{0j}$  пропускных способностей дуг  $j \in J$  рассматриваемой ИС  $N$ . В этом случае указанный вектор  $C_0$  может быть определен следующим соотношением:

$$C_0 = (C_{0j}, j \in J). \quad (2.3)$$

Моделирующий граф  $G$  к задаче планирования исходных потокораспределений в ИС  $N$  приведен в [79, 80].

Предлагаемый в данном разделе алгоритм планирования исходных потокораспределений в рассматриваемой ИС  $N$  содержит  $n + 1$  шаг.

Рассмотрим  $i$ -й шаг указанного алгоритма из числа первых  $n$  шагов.

Целью выполнения  $i$ -го шага рассматриваемого алгоритма является определение искомого вектора планируемого частичного потокораспределения  $F_i$  в ИС  $N$ , обеспечивающего планируемое значение потока  $q_i$  для ПЦП  $Z_i$ , а также самой величины этого потока  $q_i$ . Поскольку координатами искомого вектора планируемого частичного потокораспределения  $F_i$  в ИС  $N$  являются планируемые частичные потоки  $f_{ij}$  в дугах ИС  $N$ , обеспечивающие планируемое значение потока  $q_i$  для ПЦП  $Z_i$ , указанный вектор  $F_i$  может быть определен следующим соотношением:

$$F_i = (f_{ij}, j \in J). \quad (2.4)$$

Для реализации  $i$ -го шага рассматриваемого алгоритма предполагается использовать следующую информацию.

1. Требуемое ПЦП  $Z_i$  значение потока  $q_i^r$ , которое он должен потреблять из соответствующего ему стока  $t_i$  ИС  $N$  для обеспечения допустимых условий своего функционирования. Для рассматриваемого

$K_{xy}$  и управляемостью  $M_{xy}$ , если существует  $K_{xy}$  таких кратчайших путей  $P$ , что их длины  $L_{xy}$  удовлетворяют условию  $L_{xy} \leq M_{xy}$ . Величина  $K_{xy}$ , выражающая в рассматриваемой эвристике количество определенных путей, может принимать значения в области натуральных чисел. Величины  $L_{xy}$  и  $M_{xy}$ , выражающие сопротивления соответствующих путей  $P_{xy}$  и их максимально допустимую рассматриваемой эвристикой границу, являются как это следует из соотношения (2.2), неотрицательными вещественными числами.

Предлагаемый в данном разделе комбинаторно-графовый подход к оценкам надежности и управляемости ИС практически реализован посредством решения задачи о  $K$  кратчайших путях, содержательная постановка, алгоритмическая и программная реализация которой рассмотрены в [57, 123]. При этом в основу программы, реализующей указанную задачу, положен известный алгоритм двойного поиска использующий две обобщенные двухместные операции над векторами минимизации и сложения.

Моделирующий граф  $G$  к задаче оценок надежности и управляемости ИС  $N$  приведен в [79, 80]. Алгоритм двойного поиска реализован в виде программы, которая локализована как подпрограмма KSHORT в ППП сетевой оптимизации. Указанная программа способна обрабатывать ИС содержащие до 50 узлов и 50 дуг. При этом размеры ИС можно увеличить посредством изменения границ массивов в операторах размерности записанных в подпрограмме KSHORT и в основной программе. В соответствии с [123] входные данные имеют следующий вид.

Набор 1. Состоит из одной записи с именем алгоритма KSRT в формате (A4).

Набор 2. Содержит одну запись с числом узлов и числом дуг в ИС в формате (2I10).

Набор 3. Он состоит из трех разделов.

С каждой записи раздела 1 считываются следующие величины:

- 1) номер начального узла дуги;
- 2) номер конечного узла дуги;
- 3) длина дуги.

Для каждой дуги соответствующие величины должны быть введены в формате (3I10). Указанные записи располагаются в порядке возрастания конечных узлов дуг.

В разделе 2 входит запись, содержащая число  $K$  искомых кратчайших путей, номер начального узла  $K$  искомых кратчайших путей, а также максимально допустимое число итераций в алгоритме двойного поиска. Перечисленные величины должны быть введены в формате (4X, 3I5).

В раздел 3 входит запись, содержащая номер конечного узла  $K$  искомых кратчайших путей, а также максимальное число путей из заданных начального и конечного узла, которое должно быть сгенерировано.

Если рассматриваемую задачу требуется последовательно решать для различных начальных и (или) конечных узлов ИС, то исходные данные следует изменить только в разделах 2 и 3.

Набор 4. Данный набор состоит из одной записи, содержащей слово END в формате (A4), которая указывает конец задачи.

Набор 5. Данный набор состоит из одной записи, содержащей слово EXIT в формате (A4), которая указывает конец входных данных.

Программа нахождения  $K$  кратчайших путей состоит из следующих подпрограмм: KSHORT (ввод данных и вычисления), DSWP (печать длин  $K$  кратчайших путей из начального узла во все остальные узлы), TRACE (печать узлов  $K$  кратчайших путей из начального узла ИС в заданный конечный узел). Если по условию задачи требуется рассматривать пути, не содержащие циклов, то в соответствии с [123] подпрограмма TRACE может быть модифицирована таким образом, что поиск пути завершится при обнаружении цикла.

Апробация данного подхода показала эффективность его использования для оценок надежности и управляемости реальных ИС [79, 80].

## 2.4. Особенности планирования исходных потокораспределений

Одной из задач, порождаемых проблемой оперативного управления ИС, является задача нахождения таких потокораспределений, которые могут быть использованы в качестве исходных для реализации итерационных алгоритмов оперативного управления объектами рассматриваемого класса [30-33, 69, 74, 77]. Такую задачу назовем задачей планирования исходных потокораспределений в ИС.

Рассмотрим такой подход к планированию исходных потокораспределений в ИС, в котором предполагается, что участки (дуги) ИС имеют ограниченные пропускные способности, а для отдельных ПЦП задана система их приоритетов по отношению к потреблению ЦП из соответствующих им стоков рассматриваемой ИС. Основная идея предлагаемого подхода заключается в последовательном поэтапном расчете планируемых частичных потокораспределений для всех ПЦП, подключенных к стокам рассматриваемой ИС, в порядке убывания приоритетов этих ПЦП по отношению к потреблению ЦП. При этом предполагается, что на определенном этапе производится расчет

Набор 2. Содержит одну запись с числом узлов и числом дуг в ИС формате (2И10).

Набор 3. Общее число записей в данном наборе равно числу дуг в ИС. При этом каждая запись содержит следующие данные в формате (4X, И10, F10.2):

1. номер начального узла дуги;
2. номер конечного узла дуги;
3. длину дуги.

Набор 4. Состоит из одной записи, содержащей слово PEND в формате (A4), которая указывает конец задачи.

Набор 5. Состоит из одной записи, содержащей слово EXIT в формате (A4), которая указывает конец входных данных.

Предлагаемый в данном подразделе комбинаторно-графовый подход к определению эффективности управляющих воздействий в ИС на основании использования ППП сетевой оптимизации апробирован для объектов управления рассматриваемого класса [78, 80].

### 2.3. Методика оценки надежности и управляемости инженерных сетей

Актуальность вопросов надежности и управляемости реальных ИС рассматриваемого класса обусловлена усложнением их топологической структуры, а также повышением требований к качеству обеспечения ЦП подключенных к ним отдельных ПЦП.

Следуя [30 - 35, 57], будем считать, что ИС  $N$  удовлетворяет допустимым условиям функционирования, если в каждом ее узле соответствующем определенной вершине  $y \in V^r$  моделирующего графа  $G$  величина напора (уровня) ЦП  $Z_y$  находится в заданных для рассматриваемой вершины  $y$  границах:

$$Z_y \in [Z_y^*, Z_y^{**}]; \quad (2.1)$$

где  $Z_y^*$  и  $Z_y^{**}$  - соответственно нижняя и верхняя границы величины  $Z_y$ . В соответствии с [30 - 25, 57] условие (2.1) формализует цель управления рассматриваемой ИС  $N$ .

Каждой дуге  $j \in E$  моделирующего графа  $G$  поставим в соответствие величину  $l_j$ , формализующую гидравлическое или аэродинамическое сопротивление соответствующего участка ИС  $N$ . Пусть вершины  $x, y \in V^r$  моделирующего графа  $G$  связаны некоторым путем  $P_{xy}$ . Тогда длин

рассматриваемого пути  $P_{xy}$ , выражающая сопротивление соответствующего участка ИС  $N$ , может быть выражена следующим соотношением:

$$L_{xy} = \sum_{j \in P_{xy}} l_j; \quad (2.2)$$

где  $L_{xy}$  - длина пути  $P_{xy}$ ;  $l_j$  - величина сопротивления участка ИС  $N$ , соответствующего дуге  $j$ , входящей в рассматриваемый путь  $P_{xy}$ . В общем случае рассматриваемые вершины  $x, y \in V$  моделирующего графа  $G$  могут быть связаны несколькими путями  $P_{xy}$ , что обусловлено наличием нескольких участков в ИС  $N$ , соединяющих соответствующие узлы. Тогда кратчайшим из них назовем такой путь  $P_{xy}$ , который имеет наименьшую длину  $L_{xy}$ , определенную соотношением (2.2).

Исходя из функционального назначения ИС  $N$ , под ее надежностью будем подразумевать возможность снабжения АЭ  $S_x$ , где  $x \in V^a$ , вершин  $y \in V^r$  ЦП в случае, если некоторые из путей  $P_{xy}$  перестанут существовать (будут выведены из строя соответствующие участки ИС  $N$  вследствие аварии, профилактики, ремонта).

В соответствии с целевой установкой и критерием управления ИС  $N$  под управляемостью объектом рассматриваемого класса будем подразумевать возможность эффективно воздействовать на величины  $Z_y$  со стороны АЭ  $S_x$ , где  $x, y \in V^r$ , для реализации соотношения (2.1).

В отличие от [30 - 33, 57], в данном разделе предлагается другой подход к оценкам надежности и управляемости ИС, непосредственно не связанный с необходимостью расчета потокораспределений. Являясь комбинаторно-графовым, предлагаемый подход учитывает существенные структурные и функциональные свойства и особенности объектов управления рассматриваемого класса. Этим он позволяет существенно уменьшить объем ОП и сократить количество процессорного времени управляющей ЭВМ, необходимые для формирования оценок надежности и управляемости ИС.

Для формулировки эвристики, выражающей сущность предлагаемого подхода, рассмотрим две такие вершины  $x$  и  $y$  моделирующего графа  $G$ , для которых в соответствии с приведенной выше формализацией ИС  $N$  как объекта оперативного управления, справедливо следующее утверждение:

вершине  $y \in V^r$  биективно соответствует определенный АЭ  $S_x$ , а вершине  $x \in V^a$  - определенная величина управляемого напора (уровня) ЦП  $Z_y$  в соответствующем узле ИС  $N$ . Тогда по отношению к рассматриваемым АЭ  $S_x$  и управляемой величине напора  $Z_y$  ИС  $N$  характеризуется надежностью

Эффективность управляющего воздействия, оказываемого АЭ  $S_x$  на величину  $Z_y$ , будем определять (измерять, оценивать) длиной  $M_{xy}$  кратчайшей цепи  $K_{xy}$  на моделирующем графе рассматриваемой ИС, где  $x \in V^a$ ,  $y \in V^r$ .

При этом предполагается, что концептуальные понятия длины  $M_{xy}$  кратчайшей цепи  $K_{xy}$  на моделирующем графе ИС определены и формализованы в соответствии с [56, 59].

Справедливость такой эвристики обусловлена утверждениями 1 и 2 устанавливающими взаимосвязи между управляющими переменными (параметрами) и переменными (параметрами) установившихся потокораспределений в ИС, которые сформулированы и доказаны в разделе 3 данной работы.

Исходя из специфики математической модели потокораспределения в ИС, можно заключить, что такая эвристика позволяет уменьшать энергетические затраты при создании допустимых условий функционирования ПЦП, подключенных к рассматриваемой ИС  $N$ . Эту эвристику можно использовать для реализации обобщенной задачи оперативного управления ИС  $N$ , формализованной в разделе 1 данной работы.

Указанная модель ИС как объекта управления и сформулированная на ее основании эвристика позволяют поставить следующие задачи, связанные с определением эффективности управляющих воздействий в ИС.

#### Задача 1.

Необходимо определить эффективность управляющих воздействий, оказываемых АЭ  $S_x$ , который соответствует определенной входной вершине  $x \in V^a$ , на величины напоров  $Z_y$  во всех вершинах с управляемыми параметрами  $y \in V^r$ .

#### Задача 2.

Необходимо определить эффективность управляющих воздействий, оказываемых АЭ  $S_x$ , которые соответствуют всем входным вершинам  $x \in V^a$ , на величину напора  $Z_y$  в определенной вершине с управляемыми параметрами  $y \in V^r$ .

В содержательном аспекте поставленные задачи 1 и 2 являются взаимно-обратными. На основании сформулированной эвристики решение задачи 1 сводится к нахождению длин  $M_{xy}$  кратчайших цепей  $K_{xy}$  для определенной вершины  $x \in V^a$  и  $y \in V^r$  на моделирующем графе рассматриваемой ИС  $N$ . Аналогично, решение задачи 2 сводится

к нахождению длин  $M_{xy}$  кратчайших цепей  $K_{xy}$  для  $x \in V^a$  и определенной вершины  $y \in V^r$  на моделирующем графе  $G$  рассматриваемой ИС  $N$ .

Специфика поставленных задач позволяет для их решения использовать известную задачу о многополюсной кратчайшей цепи [59, 123]. Суть такой задачи заключается в нахождении кратчайших цепей между всеми парами узлов (вершин) на заданной сети, а также их длин. Алгоритм решения задачи о многополюсной кратчайшей цепи первоначально был разработан Флойдом. В [123] приведен усовершенствованный вариант такого алгоритма, принадлежащий Ху. В основу указанного алгоритма положен метод, заключающийся в следующем. Первоначально в качестве оценки длины кратчайшей цепи из узла  $I$  в узел  $K$  выбирается длина дуги из  $I$  в  $K$ . На итерации с номером  $J$  производится сравнение длины цепи из  $I$  в  $K$ , содержащей промежуточные узлы из множества  $\{1, 2, \dots, J\}$ , с длиной цепи, проходящей через узел  $J$  и содержащей промежуточные узлы из множества  $\{1, 2, \dots, J - 1\}$ . Если использование узла  $J$  позволяет получить более короткую цепь, то длина последней принимается за новую оценку длины кратчайшей цепи.

Моделирующий граф  $G$  к задаче определения эффективности управляющих воздействий в ИС  $N$  приведен в [79, 80].

Реализация задачи о многополюсной кратчайшей цепи осуществляется с помощью ППП сетевой оптимизации [52, 123]. В частности, программа решения этой задачи включает основную программу такого пакета, а также подпрограммы MULTSH, PRNTRX, PRNTRY. Подпрограмма MULTSH реализует ввод исходных данных и вычисления в соответствии с алгоритмом решения указанной задачи. С помощью подпрограммы PRNTRX осуществляется печать как исходной матрицы длин кратчайших путей, так и матрицы длин кратчайших путей, соответствующих оптимальному решению рассматриваемой задачи. Подпрограмма PRNTRY предназначена для выдачи на печать матрицы кратчайших маршрутов, содержащей промежуточные узлы кратчайших путей, соответствующих оптимальному решению рассматриваемой задачи.

Указанная программа позволяет обрабатывать ИС, содержащие до 50 узлов и 50 дуг. Для обработки ИС большей размерности необходимо изменить границы массивов в операторах размерности, содержащихся в основной программе и в подпрограмме MULTSH.

В соответствии с [59, 123] для реализации программы решения рассматриваемой задачи необходимы следующие входные данные.

Набор 1. Состоит из одной записи с именем алгоритма MTSC в формате (A4).

содержат соответственно  $v$  и  $a$  вершин:  $|V| = v$ ,  $|A| = a$ . Из условия  $A \subset V$  следует, что  $a < v$ . Не уменьшая общности, все вершины множества  $V$  занумеруем  $v$  последовательными натуральными числами так, что первые  $a$  из них соответствуют подмножеству  $A \subset V$ . Поскольку каждой входной вершине  $x \in A$  биективно соответствует АЭ  $S_x$ , соединенный рассматриваемой входной вершиной, будем считать, что каждый АЭ имеет номер, соответствующий входной вершине  $D_x$ . В этом случае все АЭ  $S_x$  будут так же, как и входные вершины  $x \in A$ , занумерованы первыми натуральными числами.

Для каждой вершины  $y \in V$  упорядочим множество номеров всех АЭ по степени их воздействия на величину  $Z_y$ , где  $x \in A$ . Степень воздействия АЭ  $S_x$  на величину  $Z_y$  в соответствии с принятыми эвристиками будем оценивать длиной  $M_{xy}$  кратчайшей цепи  $K_{xy}$ , где  $x \in A$ ,  $y \in V$ . Для этого каждой вершине  $y \in V$  поставим в соответствие вектор  $D_y$ , координатами которого являются номера всех АЭ  $S_x$ , упорядоченные по возрастанию величины  $M_{xy}$ , где  $x \in A$ . Такой вектор назовем вектором упорядоченных номеров АЭ по степени их воздействия на величину  $Z_y$  в вершине  $y \in V$ . Размерность вектора  $D_y$  для каждой вершины  $y \in V$ , определяемая числом его координат, равна общему количеству АЭ рассматриваемой ИС  $N$ .

Вектор  $D_y$  может быть использован для определения тех АЭ  $S_x$ , которые нужно воздействовать в первую очередь при необходимости изменения величины  $Z_y$  в вершине  $y$  в процессе управления ИС  $N$ , где  $x \in A$ ,  $y \in V$ .

Совокупность векторов  $D_y$  для всех вершин  $y \in V$  образует матрицу  $D = \{D_y\}$ . Матрицу  $D$  назовем матрицей упорядочения АЭ  $S_x$ , где  $x \in A$ , по степени их воздействия на напоры  $Z_y$  во всех вершинах  $y \in V$  графа  $G$ . Каждой строкой матрицы  $D$  является вектор  $D_y$ , соответствующий определенной вершине  $y \in V$ . Поэтому число элементов в строке матрицы  $D$  определяющее количество ее столбцов, соответствует размерности вектора  $D_y$  и равно числу  $a$ . Число строк матрицы  $D$  определяется количеством всех вершин  $y$ , входящих во множество  $V$ , и поэтому равно числу  $v$ . Следовательно, матрица  $D$  имеет размерность  $v \times a$ .

Матрица  $D$  формализует предлагаемый в данном подразделе комбинаторно-графовый подход к управлению ИС  $N$ .

Предлагаемый комбинаторно-графовый подход может быть использован при синтезе систем, реализующих процессы управления ИС рассматриваемого класса. В отличие от известных способов управления основанных на численных методах расчета потокораспределений в ИС предлагаемый подход в общем случае не обеспечивает оптимального управления объектами рассматриваемого класса. Однако предлагаемый комбинаторно-графовый подход учитывает существенные структурные

функциональные особенности таких объектов. Это позволяет по сравнению с известными методами значительно уменьшить требуемый объем оперативной памяти и сократить необходимое количество процессорного времени управляющей ЭВМ.

## 2.2. Методика оценки эффективности управляющих воздействий

Одной из задач, порождаемых проблемой управления ИС, является оценка эффективности управляющих воздействий, оказываемых АЭ, включающими насосные агрегаты, насосные и компрессорные станции, вентиляторы, водонапорные башни, на величины напоров (уровней) ЦП, создаваемых этими АЭ в определенных вершинах ИС. Для решения такой задачи в данном подразделе предлагается использовать соответствующий комбинаторно-графовый подход. Концептуализация, формализация, а также прикладные аспекты комбинаторно-графового подхода к управлению ИС рассмотрены в [56]. Настоящий подход является логическим продолжением, развитием и обобщением предлагаемого в [56] комбинаторно-графового подхода в целях его использования для определения эффективности управляющих воздействий, оказываемых АЭ напоры (уровни) ЦП в определенных вершинах ИС [59, 79, 80].

Для рассмотрения предлагаемого в данном подразделе комбинаторно-графового подхода к определению эффективности управляющих воздействий будем использовать формализацию ИС  $N$  в соответствии с [56, 79, 80]. В частности, будем считать, что каждой входной вершине  $x$  моделирующего графа  $G$  рассматриваемой ИС  $N$  биективно соответствует АЭ  $S_x$ ; при этом  $x \in V^a$ , где  $V^a$  - множество входных вершин на моделирующем графе  $G$  рассматриваемой ИС  $N$ . Также будем предполагать, что исходя из функционального назначения рассматриваемой ИС  $N$ , на ее моделирующем графе  $G$  определено множество вершин с управляемыми напорами (давлениями, уровнями, депрессиями) ЦП, которое обозначим  $V^r$ . При этом будем считать, что каждой вершине с управляемым напором  $y \in V^r$  соответствует определенная величина управляемого напора  $Z_y$ . Для реализации процесса управления ИС  $N$  необходимо иметь возможность определить (измерить, оценить) эффективность воздействия АЭ  $S_x$ , оказываемого на величины управляемых напоров  $Z_y$ , где  $x \in V^a$ ,  $y \in V^r$ . С этой целью в соответствии с [56, 59] будем использовать следующую эвристику.

### Раздел 3

## ИНЖЕНЕРНЫЕ СЕТЕВЫЕ СИСТЕМЫ КАК ИЕРАРХИЧЕСКИ ОРГАНИЗОВАННЫЕ ОБЪЕКТЫ ОПЕРАТИВНОГО УПРАВЛЕНИЯ: МОДЕЛИРОВАНИЕ И ИССЛЕДОВАНИЕ

### 3.1. Концептуальная модель иерархической организации инженерных сетевых систем

В настоящем разделе рассмотрим изменение следующих важнейших характерных свойств и особенностей ЛС в зависимости от их уровня иерархии в ИСС.

1. Функциональное назначение.
2. Геометрические размеры.
3. Конструктивно-технологические особенности реализации.
4. Топологическая структура моделирующих графов.
5. Энергетическая характеристика потокораспределений.
6. Режимы потребления ЦП.
7. Степень стохастичности потокораспределений.
8. Элементный состав дуг.
9. Возможность практической реализации различных видов идентификации.

На основании работ [30 - 33, 95, 118, 136], содержащих материалы и результаты по различным аспектам исследования ИСС как объектов управления, рассмотрим важнейшие свойства и особенности, характерные для отдельных ЛС различного уровня иерархии.

Конструктивно МС состоят из крупных трубопроводов большого сечения, способных выдержать большие напоры и пропускать большие потоки ЦП. МС имеют большую протяженность. Моделирующие графы МС либо являются деревьями, либо имеют относительно небольшое количество циклов, поэтому цикломатические числа таких графов равны или ненамного превосходят нулевое значение. Конструктивно РС состоят из трубопроводов меньшего диаметра, рассчитанных на передачу меньших потоков ЦП с напорами, меньшими относительно соответствующих величин в МС. Реальные РС характеризуются меньшей по сравнению с МС

протяженностью. Моделирующие графы РС содержат большее по сравнению с моделирующими графами МС количество циклов, поэтому соответствующие цикломатические числа принимают большие значения, чем для моделирующих графов МС.

Конструктивно СПЦП представляют весьма разветвленные и кольцеванные сети мелких трубопроводов низкого давления, имеющие большую протяженность. Цикломатические числа, соответствующие моделирующим графам реальных СПЦП, принимают большие значения, чем для моделирующих графов РС.

Режимы потребления ЦП из вышестоящих ЛС нижестоящими ЛС или ПЦП определяются величинами потоков ЦП, а также значениями напоров, при которых потребляются эти потоки. Для реальных ПЦП имеет место стохастический характер режимов потребления, обусловленный целым рядом случайных факторов, к которым, в частности, можно отнести погодные условия, биологические потребности организмов, а также субъективные соображения [30 - 33, 35, 118, 136]. В соответствии с математической моделью потокораспределения в рассматриваемой ЛС определяется режимами потребления ЦП подключенных к ней нижестоящих ЛС или ПЦП. Поэтому стохастичность режимов потребления ПЦП порождает стохастичность потокораспределений в отдельных ЛС различного уровня иерархии. Однако в силу той же стохастичности режимов потребления ПЦП или нижестоящих ЛС различные случайные изменения (возмущения) таких режимов взаимно компенсируются, выравниваются, сглаживаются при их воздействии на вышестоящие ЛС. Поэтому потокораспределения в вышестоящих ЛС и режимы потребления ЦП являются детерминированными в большей степени, чем в нижестоящих ЛС.

Особенностью элементного состава дуг реальных МС является наличие в них мощных АЭ и отсутствие или минимальное количество ПЭ. целесообразность размещения крупных АЭ в дугах МС обусловлена наличием в них потокораспределений с высокими энергетическими параметрами (потоками и напорами), обладающих высокой степенью детерминированности, что позволяет применить более мощные, а следовательно и более экономичные конструкции и типоразмеры АЭ, создав при этом для них относительно более благоприятные условия функционирования. Размещение же ПЭ в дугах МС представляется менее целесообразным, поскольку в условиях мощных потокораспределений это приводит к существенным энергетическим потерям [30 - 33, 96, 118].

В дугах реальных РС могут содержаться как АЭ, так и ПЭ. Однако относительное количество АЭ здесь меньше, чем в дугах МС, а мощность ЦП ниже. Это объясняется тем, что энергетические параметры потокораспределения в РС ниже, чем в МС, а степень его стохастичности -

выше. В таких условиях становится затруднительным создать допустимые условия для функционирования реальных АЭ, в особенности обладающих большой мощностью. Наличие же здесь ПЭ является допустимым в большей мере, чем в других МС, поскольку соответствующие энергетические параметры потокораспределения здесь ниже, следовательно ниже и энергетические потери в ПЭ [30 - 33, 96, 118].

В дугах же реальных СПЦП вследствие высокой стохастичности низких энергетических параметров потокораспределения содержатся лишь ПЭ [30 - 33, 96, 105, 118].

Таким образом, иерархичность структуры реальных ИСС обусловлена необходимостью согласования небольшого числа в основном детерминированных процессов потребления ЦП из внешней среды, обладающих высокими энергетическими параметрами, с весьма большим числом стохастических процессов его потребления ПЭ, характеризующихся низкими энергетическими параметрами.

Для реализации процессов управления ИСС большое значение имеет возможность их структурной и параметрической идентификации, а также идентификации состояния таких объектов [30 - 33]. На основании рассмотренных свойств МС, РС и СПЦП определим возможности практической реализации различных видов идентификации этих ЛС.

В частности, МС характеризуются относительно небольшим числом относительно устойчивых переменных и параметров, взаимосвязанных между собой в относительно меньшей степени, чем аналогичные величины в РС и СПЦП, и в достаточной степени доступных для измерения. Поэтому можно заключить, что для МС указанные виды идентификации являются практически реализуемыми [30 - 33, 96, 105, 118].

РС характеризуются значительно большим числом переменных параметров, стохастичность которых существенно выше, чем аналогичных величин в МС. Кроме этого, указанные величины в РС взаимосвязаны между собой в большей степени, чем в МС, и в меньшей степени доступны для измерения. Поэтому можно заключить, что в РС практическая реализация рассматриваемых видов идентификации встречает известные трудности [96, 105, 118]. В связи с этим будем предполагать, что в РС могут быть идентифицированы лишь существенные структурные взаимосвязи, а также важнейшие переменные и параметры.

СПЦП характеризуются весьма большим числом переменных параметров, степень стохастичности которых высока. В силу структурно-топологических особенностей моделирующих графов и конструктивно-технологических особенностей реализации СПЦП, эти величины весьма сильно взаимосвязаны между собой и труднодоступны для измерения. Поэтому можно заключить, что указанные виды идентификации в СПЦП реализовать практически не представляется возможным [96, 105, 118].

В качестве примера, конкретизирующего основные положения настоящего раздела, следуя [105, 118], рассмотрим систему высококачественного водоснабжения, состоящую из МС, к которой включены РС.

МС, входящая в рассматриваемую систему, характеризуется следующими основными свойствами и параметрами. Ее протяженность находится в пределах от нескольких сотен метров до нескольких километров. По своей конфигурации МС протяженностью до 200 м являются тупиковыми, а МС большей протяженности имеют несколько впадин. Участками МС являются стальные, чугунные или асбестоцементные трубы диаметром от 100 мм до 500 мм. В качестве АЭ в рассматриваемой МС используются центробежные насосы типа К и КМ с подачей от 45 м<sup>3</sup>/ч до 360 м<sup>3</sup>/ч и напорами от 8,8 м до 98 м, а также многоступенчатые секционные насосы типа МС с подачей от 22 м<sup>3</sup>/ч до 100 м<sup>3</sup>/ч и напорами от 30 м до 1230 м. Рассматриваемая МС в качестве ПЭ содержит несколько задвижек, находящихся на участках, инцидентных АЭ. Уточненная неравномерность процесса водопотребления из МС, имеющая определенную тенденцию, представлена соответствующим почасовым графиком в [79, 80]. Он имеет два максимума, достигающих 10 м<sup>3</sup>/ч, а также минимум, соответствующий 1 м<sup>3</sup>/ч. Идентификация рассматриваемой МС как объекта управления осуществляется с помощью измерительных преобразователей давлений и расходов. В качестве преобразователей давлений используются преобразователи «Сапфир», имеющие погрешность измерения  $\pm 1,5\%$  и время установления сигнала от 0,5 с до 2,5 с. Измерение расходов в рассматриваемой МС реализуется с помощью электромагнитного преобразователя расхода ИР-51, погрешность измерения которого составляет  $\pm 1\%$ , а типовое время установления выходного сигнала - от 0,6 с до 2,3 с.

Каждая из РС, подключенных к рассматриваемой МС, характеризуется следующими основными свойствами и параметрами. Протяженность рассматриваемой РС находится в пределах от нескольких десятков до нескольких сотен метров. Участками РС являются стальные трубы диаметром от 50 мм до 100 мм. Рассматриваемая РС не содержит АЭ, в качестве ПЭ используются вентили, находящиеся на участках, инцидентных как МС, так и ПЦП. При этом скорости движения воды на участках РС составляют от 0,7 м/с до 1,4 м/с, а напоры могут достигать 60 м. Ввиду сложности процессов водопотребления из РС, обусловленной, в частности, субъективными факторами, связанными с ПЦП, их статистическое моделирование в виде соответствующих графиков не производится. Также не производится идентификация рассматриваемых РС как объектов управления.

Указанные важнейшие характерные свойства и особенности отдельных ЛС различного уровня иерархии могут быть использованы для постановки соответствующих ЛЗ и выбора адекватных ЛА их реализации. В частности, полученные результаты использованы при синтезе управляющих алгоритмов МС опросительной системы.

### 3.2. Принципы иерархической организации реальных двухуровневых инженерных сетевых систем

Под функционированием ИСС  $N$ , а также отдельных ЛС различного уровня иерархии  $N_b$ ,  $i \in I$ , будем понимать реализацию установившегося потокораспределения соответственно в ИСС  $N$  или ЛС  $N_b$ ,  $i \in I$ .

Основными признаками, характеризующими многоуровневые иерархические структуры, являются следующие [74, 75, 88].

1. Последовательное вертикальное расположение подсистем составляющих данную систему (вертикальная декомпозиция, вертикальная соподчиненность).
2. Приоритет действий (право вмешательства подсистем верхнего уровня).
3. Зависимость действий подсистем верхнего уровня от фактического исполнения нижними уровнями своих функций (взаимозависимость действий, обратная связь в иерархической системе).

Покажем, что в рассматриваемом объекте оперативного управления все перечисленные признаки иерархических систем выполняются.

Анализ существующих и проектируемых ИСС показывает, что объекты управления рассматриваемого класса состоят из определенных образом взаимосвязанных и взаимодействующих между собой ЛС [24, 33, 62, 74, 75, 108, 111, 136]:

1. Магистральной сети (МС)  $N_0$ ;
2. Распределительных сетей (РС)  $N_b$ .

МС  $N_0$  - это сеть крупных трубопроводов, функциональное назначение которой - транспортировка ЦП из внешних относительно рассматриваемой сети питающих резервуаров к РС [1 - 4, 21, 44, 130 - 132]. Анализ существующих и проектируемых МС, сделанный на основании данных [1 - 4, 21, 44, 130 - 132], позволяет заключить следующее. Конструктивно МС  $N_0$  состоит из трубопроводов большого сечения, способных выдерживать большие напоры и пропускать большие потоки. МС имеют сравнительно большую протяженность, большое число дуг и сравнительно небольшое число вершин; при этом величина отношения  $|V_0^*|/|E_0^*|$  сравнительно невелика. В других МС  $N_0$  содержатся АЭ, создающие и поддерживающие установившееся потокораспределение в ИСС  $N$ .

РС  $N_b$  - это сеть более мелких (по сравнению с МС) трубопроводов, функциональное назначение которой - перераспределение потоков, полученных из МС, между подключенными к ней ПЦП [1 - 4, 21, 44, 130 - 132].

Конструктивно РС  $N_b$  состоит из трубопроводов небольшого диаметра, рассчитанных на передачу сравнительно небольших потоков ЦП с напорами, меньшими, чем в МС  $N_0$ . Анализ существующих и проектируемых РС, проведенный на основании данных [1 - 4, 21, 44, 130 - 132], позволяет заключить, что каждая из РС  $N_b$  имеет сравнительно небольшую протяженность и более высокое по сравнению с МС значение отношения  $|V_b^*|/|E_b^*|$ .

Пример моделирующего графа топологической структуры иерархически организованной ИСС приведен в [79, 80].

Наличие в составе ИСС  $N$  МС  $N_0$  и РС  $N_b$ ,  $i \in I$ , характеризующихся перечисленными выше функциональными, конструктивными и энергетическими особенностями, обуславливает вертикальную соподчиненность (декомпозицию) рассматриваемого объекта.

Исходя из свойств математической модели установившегося потокораспределения в ИС  $N$ , установившееся потокораспределение в МС  $N_0$  обуславливает и определяет соответствующие установившиеся потокораспределения во всех РС  $N_b$ ,  $i \in I$ . При этом одному установившемуся потокораспределению  $(q_0, h_0)$  в МС  $N_0$  при фиксированных параметрах может соответствовать некоторое множество установившихся потокораспределений  $\{(q_b, h_b)\}$  в каждой РС  $N_b$ ,  $i \in I$ , подключенной к МС  $N_0$ .

Изменение установившегося потокораспределения в МС  $N_0$  приводит к соответствующим изменениям одновременно во всех РС  $N_b$ ,  $i \in I$ .

Такая взаимосвязь установившихся потокораспределений в МС  $N_0$  и РС  $N_b$ ,  $i \in I$ , обуславливает приоритет действий сети МС  $N_0$  по отношению к РС  $N_b$ ,  $i \in I$ , в иерархически организованном объекте оперативного управления рассматриваемого класса.

Поскольку целью функционирования МС  $N_0$  является обеспечение определенных условий функционирования всех РС  $N_b$ ,  $i \in I$ , подключенных к рассматриваемой МС  $N_0$ , установившееся потокораспределение (в силу свойства математической модели установившегося потокораспределения в ИС) должно определяться с учетом соответствующих потокораспределений во всех РС  $N_b$ ,  $i \in I$ . В этом заключается принцип взаимозависимости действий МС  $N_0$  с РС  $N_b$ ,  $i \in I$ .

Координация РС  $N_b$ ,  $i \in I$ , относительно МС  $N_0$  в иерархически организованном объекте оперативного управления - ИСС  $N$  состоит в выборе такого установившегося потокораспределения в МС  $N_0$ , которое

обеспечивает допустимые установившиеся потокораспределения во всех  $N_i, i \in I$ .

Физической основной координации в рассматриваемом объеме является выполнение постулатов ИС для ИСС  $N$  в целом.

В соответствии с [58, 74, 75, 88] формально координируемость отношению к глобальной задаче (ГЗ) реализуется соответствующей постановкой локальных целей функционирования (ЛЦ) и локальных задач оперативного управления (ЛЗ) ЛС различного уровня иерархии  $N_i, i \in I$  входящими в состав ИСС  $N$ , а также глобальной цели функционирования (ГЦ) и глобальной задачи оперативного управления (ГЗ) ИСС.

В последующих подразделах настоящей работы проведено моделирование отдельных ЛС различного уровня иерархии  $N_i, i \in I$  формализованы ЛЦ и ГЦ, ЛЗ и ГЗ, а также показано выполнение условий координируемости ЛЗ по отношению к ГЗ в иерархически организованном объекте оперативного управления - ИСС  $N$ .

### 3.3. Моделирование распределительных сетей как локальных сетей нижнего уровня иерархии

Анализ свойств и особенностей существующих и проектируемых РС проведенный на основании данных [1 - 4, 21, 44, 130 - 132], позволяющий выделить основные условия и ограничения, которым подчинены такие объекты. Наиболее существенные из таких условий и ограничений перечислены ниже.

1. Графы  $G_i^*$  различных РС  $N_i, i \in I$ , разделены собой вершинами [129]  $\forall i, j \in I, i \neq j \Rightarrow V_i^* \cap V_j^* = \emptyset$ , где  $V_i^*, V_j^*$  - множество вершин графов  $G_i^*$  и  $G_j^*$  соответственно.

Из этого условия следует, что графы  $G_i^*$  различных РС  $N_i, i \in I$  разделены между собой ребрами [129]:  $\forall i, j \in I, i \neq j \Rightarrow E_i^* \cap E_j^* = \emptyset$ .

Данное ограничение обусловлено характером относительного расположения РС в ИСС. В реальных ИСС РС обычно располагаются кольцах, образуемых МС, в силу этого РС непосредственно не соединяются между собой и не имеют общих элементов.

2. Дуги графа  $G_i^*$  РС  $N_i$  не содержат АЭ:  $E_i^a \cap E_i^* = \emptyset$ , где  $E_i^a$  и  $E_i^*$  соответственно множество дуг графа  $G_i^*$  РС  $N_i$ , содержащих АЭ, и множество всех дуг графа  $G_i^*$ .

Это ограничение имеет место в силу принципа создания допустимых условий функционирования АЭ, который рассмотрен в подразделе 1 настоящей работы. Поскольку в РС изменение установившегося потокораспределения происходит весьма часто, устанавливая АЭ в

таких нецелесообразно. АЭ целесообразно устанавливать в дугах МС  $N_i$ , где такие изменения происходят значительно реже.

3. Каждая фиктивная дуга  $j \in E_i^*$  графа  $G_i^*$ , где  $E_i^*$  - множество источников графа  $G_i^*$ , содержит фиктивный АЭ:  $E_i^a = E_i^*, i \in I$ .

Поскольку в силу ограничения 2 дуги графа  $G_i^*$  не содержат АЭ, установившееся потокораспределение в РС  $N_i$  поддерживается за счет задания определенных напоров МС  $N_i$  во входных вершинах РС  $N_i$ . Этот результат можно получить формально, предположив, что дуги множества источников  $E_i^*$  ЛС  $N_i, i \in I$ , имеют фиктивные АЭ.

4. Каждая фиктивная дуга  $j \in E_i^*$ , где  $E_i^*$  - множество стоков графа  $G_i^*$  РС, соответствует одному определенному ПЦП, подключенному к рассматриваемой РС  $N_i$ .

5. Граф  $G_i^*$ , а следовательно и граф  $G_i$ , не содержит дуг, соединяющих между собой входные вершины множества  $V_i^*$  РС  $N_i$ .

Это ограничение для реальных ИСС справедливо в силу того, что входные вершины графа  $G_i^*$  РС  $N_i$  соединены (совпадают) с выходными вершинами сети МС  $N_i$ .

При этом входные вершины РС  $N_i$  оказываются соединенными между собой дугами МС  $N_i$ , и в силу этого дуг, параллельных указанному, РС  $N_i$  не содержит.

6. ПЭ, принадлежащие РС  $N_i$ , могут находиться только в тех дугах графа  $G_i^*$ , которые инцидентны входным вершинам  $x \in V_i^*$ , где  $V_i^*$  - множество входных вершин. Такое расположение ПЭ имеет место в реальных РС и обусловлено определенными соображениями. К ним можно отнести минимизацию количества ПЭ, поскольку число дуг РС  $N_i$ , инцидентных входным вершинам, незначительно по отношению к общему их числу; отсутствие реализации управляющих воздействий; возможность перекрытия всех потоков ЦП из МС  $N_i$  в случае создания в РС  $N_i$  аварийной ситуации [1, 4, 8, 20, 21, 43, 44, 130 - 132].

С учетом предложений 5 и 6 множество  $E_i^p$  дуг, содержащих ПЭ, удовлетворяет следующим условиям:  $E_i^p \subset E_i^*$ ,  $E_i^p = \{xi, \forall x \in V_i^*, u \in V_i^* \setminus V_i^*\}$ ; где  $E_i^*$  - множество дуг графа  $G_i^*$  РС  $N_i$ ;  $E_i^*$  и  $E_i^*$  - соответственно множество источников графа  $G_i^*$  и множество всех дуг графа  $G_i^*$  РС  $N_i$ .

7. Множество дуг  $E_i^{\Gamma}$  графа  $G_i^*$  РС  $N_i$ , представляющих НЭ, удовлетворяет условию:  $E_i^{\Gamma} = (E_i^* \setminus E_i^p) \cup E_i^*$ ; где  $E_i^*$ ,  $E_i^p$  и  $E_i^*$  - соответственно множество всех дуг графа  $G_i^*$ ; множество дуг графа  $G_i^*$ , содержащих ПЭ; множество стоков графа  $G_i^*$  РС  $N_i, i \in I$ .

Данное условие означает, что во множество дуг  $E_i^{\Gamma}$  будем относить дуги графа  $G_i^*$ , не являющиеся инцидентными множеству входных вершин  $V_i^*$  и следовательно на основании ограничений 5, 6 не входящие во множество дуг  $E_i^p$ , содержащих ПЭ, а также дуги, соответствующие

отдельным ПЦП и на основании ограничения 4 входящие во множество стоков  $E_i^\Gamma$ . При этом никаких входных дуг множество  $E_i^\Gamma$  не содержит.

Пример моделирующего графа топологической структуры удовлетворяющего перечисленным выше ограничениям 1 - 7, приведен [79, 80].

8. В течение времени выполнения измерений, расчета и реализации необходимых управляющих воздействий в РС  $N_i$  значения вектора напора во входных вершинах  $Z_i'$  и вектора напоров в выходных вершинах остаются неизменными.

Это условие порождено свойством оперативности управляющего алгоритма, которое сформулировано в подразделе 1.3 настоящей работы.

9. Целью функционирования РС  $N_i$  является создание допустимого условия функционирования для всех подключенных к ней ПЦП.

Анализ реальных объектов, выполненный на основании исследований [1 - 4, 6 - 11, 19 - 22, 111 - 115] показывает, что все потребители, подключенные к РС  $N_i$ , функционируют в допустимых режимах, если в установленном потокораспределении в соответствующей РС выполняется следующее условие:  $\forall x \in V_i''', z_x \in [z_i^*, z_i^{**}]$ ; где  $z_i^*$  и  $z_i^{**}$  соответственно нижняя и верхняя границы напора  $z_x$  в промежуточной вершине  $x \in V_i'''$ ;  $V_i'''$  - множество промежуточных вершин РС  $N_i$ .

В соответствии с исследованиями [1 - 4, 6 - 11, 19 - 22, 111 - 115] можно считать, что величины  $z_i^*$  и  $z_i^{**}$  определяются режимами функционирования ПЦП, подключенных к сети РС  $N_i$  и являются известными числами для  $\forall i \in I$ . Приведенное условие формализует условие функционирования РС  $N_i, i \in I$ .

При всех возможных установившихся потокораспределениях в РС не может существовать двух таких вершин  $x, u \in V_i'''$ , где  $V_i'''$  - множество промежуточных вершин рассматриваемой РС, для которых одновременно были бы справедливы следующие соотношения:  $z_x < z_i^*, z_u > z_i^{**}, i \in I$ .

Это предположение справедливо в силу конструктивных функциональных особенностей РС [1 - 4, 6 - 11, 19 - 22, 111 - 115]. Выполнение этого предположения обусловлено установленной в схеме соединений дуг РС и расположением ПЭ в ее дугах. Данное предположение необходимо для относительно равномерного распределения напоров в выходных вершинах подключения ПЦП для создания допустимых режимов их функционирования.

Используя перечисленные в настоящем подразделе ограничения, налагаемые на РС  $N_i, i \in I$ , формализуем взаимосвязь между напорами в вершинах  $x \in V_i^* \setminus V_i'$  и координатами  $r_j$  вектора состояния ПЭ  $R_i \in \Omega(R_i)$  рассматриваемой РС  $N_i$ .

Пусть в рассматриваемой РС  $N_i, i \in I$ , имеет место установившееся потокораспределение. Тогда при фиксированном значении вектора напоров во входных вершинах  $Z_i'$  и вектора состояния ПЭ  $\Gamma$  напор  $z_x$  в любой вершине  $x \in V_i^* \setminus V_i'$  является функцией координат  $r_j, j \in E_i^p$ , вектора состояния ПЭ  $R_i$ . ДС  $N_i: z_x = z_x(R_i) = z_x(r_j, j \in E_i^p)$ .

Областью определения каждой такой функции  $z_x, x \in V_i^* \setminus V_i'$ , является область возможных значений  $\Omega(R_i)$  вектора  $R_i$ . При этом имеет место следующее утверждение.

Утверждение 1. Для РС  $N_i, i \in I$ , при фиксированных значениях векторов  $Z_i'$  и  $\Gamma_i$  все  $z_x$ , где  $x \in V_i^* \setminus V_i'$ , являются ограничениями и непрерывными функциями по любому аргументу  $r_j \in [r_j^*, r_j^{**}]$ . Причем все либо монотонно возрастают по выбранному аргументу  $r_j$ , либо монотонно убывают.

Доказательство справедливости утверждения 1 содержится в [80]. Построенная в настоящем подразделе модель оперативно управляемой РС использована в данной работе при синтезе глобальной системы оперативного управления (ГСУ) иерархически организованной ИСС.

### 3.4. Моделирование магистральной сети как локальной сети верхнего уровня иерархии

В результате анализа свойств и особенностей существующих и проектируемых МС можно выделить основные условия и ограничения, относящиеся к объектам такого класса. Ниже перечислены наиболее существенные из них.

1. Каждая выходная вершина  $x \in V_o''$  графа  $G_o$  МС  $N_o$  одновременно является входной вершиной  $x \in V_i'$  графа  $G_i$  какой-либо РС  $N_i, i \in I$ , и никаких других вершин граф  $G_o$  не содержит:  $\bigcup_{i \in I} V_i' = V_o''$ .

Данное ограничение выражает взаимосвязь между МС и РС в реальных ИСС [1, 38, 44, 74, 75, 96]. Исходя из ограничения 1 для РС нижнего уровня иерархии, сформулированного в подразделе 3.3 настоящей работы, и данного ограничения для МС верхнего уровня иерархии, можно заключить, что совокупность множеств исходных вершин РС  $\{V_i', i \in I\}$  образует разбиение на множестве выходных вершин МС  $V_o''$ .

2. Дуги графа  $G_o$  МС  $N_o$  не содержат ПЭ:  $E_o^p = \emptyset$ , где  $E_o^p$  - множество дуг графа  $G_o$  МС  $N_o$ , содержащих ПЭ. Это ограничение налагается в силу следующих причин. МС в силу функциональных особенностей конструктивно представляет собой сеть крупных трубопроводов, которая пропускает потоки относительно большой величины при относительно

высоких напорах (потоки большой мощности) по сравнению соответствующими величинами в распределительных сетях.

Поэтому в рассматриваемой МС управление потокораспределением помощью ПЭ приводит к существенным энергетическим потерям и в связи с этим является нецелесообразным.

Выполнение данного условия соответствует реализации принципа минимизации регулирующих воздействий в магистральной сети, который рассмотрен в подразделе 1.5 настоящей работы.

3. Граф  $G_0$  МС  $N_0$ , а следовательно и граф  $G_0$ , не содержит дуг соединяющих между собой входные вершины множества рассматриваемой МС.

Пусть какие-нибудь две входные вершины соединены дугой представляющей НЭ. В этом случае последовательная переменная (поток) этой дуге определяется соотношением  $q_j = 0$  вследствие равенства напоров в рассматриваемых входных вершинах. Отсюда следует, что соединяющие входные вершины такими дугами нецелесообразно. Другим видом дуг, которые в соответствии с ограничением 2, могут иметь место, являются дуги, содержащие АЭ. Такими дугами соединять входные вершины МС также нецелесообразно, поскольку фактически АЭ будет перекачивать поток из одного внешнего резервуара в другой.

Из проведенного анализа следует справедливость налагаемого условия в целом.

4. Все дуги графа  $G_0^*$  МС  $N_0$ , инцидентные входным вершинам  $x \in V_0^*$  содержат АЭ, причем никаких других АЭ МС  $N_0$  не содержит:  $E_0^a \subset E_0^*$ ; где  $E_0^a = \{xi, \forall x \in V_0^*, u \in V_0^* \setminus V_0^*\}$ ; где  $V_0^*$  и  $V_0^*$  - множество входных вершин и множество всех вершин графа  $G_0^*$  МС  $N_0$  соответственно.

Такое расположение АЭ имеет место в реальных МС и обусловлено следующими причинами. Для напоров во входных вершинах  $x \in V_0^*$  и вершинах  $u \in V_0^* \setminus V_0^*$ , не являющихся входными, графа  $G_0^*$ , имеет место соотношение:  $\forall x \in V_0^*, \forall u \in V_0^* \setminus V_0^*, z_x < z_u$ .

Направление потоков  $q_j$  в дугах  $j = xi$ , инцидентных входным вершинам, совпадают с направлением соответствующих дуг. Для реализации условия, когда потоки направлены от вершин с меньшими напорами к вершинам с большими напорами, необходимо в соответствующие дуги установить АЭ. Этим и обусловлена необходимость установки АЭ во всех дугах графа  $G_0^*$  МС  $N_0$ , инцидентных входным вершинам.

Проведенный на основании [1, 3, 6, 14, 30 - 33, 75] анализ реальных конструкций МС показывает, что АЭ располагаются только в дугах инцидентных входным вершинам. Расположение АЭ в других дугах МС создает неравномерность распределения напоров в вершинах

рассматриваемой МС, что ухудшает условия функционирования РС, а также уменьшает надежность МС  $N_0$ .

5. Во множество дуг  $E_0^*$ , являющихся НЭ, входят все дуги графа  $G_0^*$ , не содержащие АЭ, а также все фиктивные дуги графа  $G_0$  МС  $N_0$  - все источники и все стоки:  $E_0^* = E_0^* \cup (E_0^* \setminus E_0^a) \cup E_0^a = E_0^* \setminus E_0^a$ .

Все дуги множества  $E_0^* \setminus E_0^a$ , являясь участками МС  $N_0$ , в которых в силу ограничений 1 и 2, перечисленных в настоящем подразделе, отсутствуют как АЭ, так и ПЭ, представляют реальные НЭ и войдут во множество  $E_0^*$ . Поскольку в действительности потребление потока МС  $N_0$  из внешней среды происходит множеством входных вершин  $V_0^*$ , то направление дуг - источников множества  $E_0^*$  являются постоянными величинами.

Следовательно, множество  $E_0^*$  целесообразно включить во множество  $E_0^*$ . Поскольку в выходных вершинах  $x \in V_0^*$  МС  $N_0$  происходит передача потока в РС  $N_0$ ,  $i \in I$ , которые не содержат АЭ, то можно считать, что каждый сток МС  $N_0$  из множества  $E_0^*$  является НЭ. Это означает, что при рассмотрении МС  $N_0$  все РС  $N_0$ ,  $i \in I$ , можно заменить стоками  $j \in E_0^*$ , обладающими такими сопротивлениями, что установившееся потокораспределение в МС  $N_0$  остается неизменным. При этом множество  $E_0^*$  включим во множество  $E_0^*$ . Кроме перечисленных, никаких других дуг множества  $E_0^*$  не содержит.

Пример моделирующего графа топологической структуры МС, удовлетворяющего перечисленным выше ограничениям 1 - 5, приведен в [1].

6. При всех возможных установившихся потокораспределениях в МС не существует двух вершин  $x, u \in V_0^*$ , для которых одновременно были бы справедливы следующие соотношения:  $z_x < z_0^*$ ,  $z_u > z_0^{**}$ ; где  $z_0^*$  и  $z_0^{**}$  - соответственно нижняя и верхняя границы области значений напоров в промежуточных вершинах МС  $N_0$ .

Существование и сущность величин  $z_0^*$  и  $z_0^{**}$  определяются в связи с требованиями постановки ЛЦ и ЛЗ для МС  $N_0$ , а также координируемости ЛЗ для отдельных ЛС различного уровня иерархии по отношению к ГЗ для МС  $N$ .

Рассматриваемое ограничение необходимо для создания допустимых режимов функционирования РС, подключенной к данной МС.

Используя перечисленные в данном подразделе ограничения, налагаемые на МС  $N_0$ , формализуем взаимосвязь между напорами  $z_x$  в вершинах  $x \in V_0^* \setminus V_0^*$ , и координатами  $\omega_j$  вектора состояния АЭ  $U_0^a \in \{U_0^a\}$  в рассматриваемой МС  $N_0$ .

Пусть в МС имеет место установившееся потокораспределение. Тогда при фиксированном значении вектора состояния НЭ  $G_0$  напор  $z_x$  в любой

том, что если известна кратчайшая цепь из узла  $S$  в вершину  $j$  и вершина принадлежит этой цепи, то кратчайшая цепь из  $S$  в  $K$  является частью исходной цепи, оканчивающейся в узле  $K$ . Инициализация алгоритма осуществляется при  $j=S$ ; затем величина  $j$  пошагово увеличивается на единицу, и при  $j=t$  алгоритм завершает работу. На основе указания алгоритма реализована программа DIJKA, входящая в ППП сетевой оптимизации [123].

Назначение программы, реализующей алгоритм Дейкстры заключается в нахождении кратчайшей цепи из источника в любой другой узел сети. Программа DIJKA локализована в ППП сетевой оптимизации [123]. Программа обрабатывает сети, содержащие до 50 узлов и 50 дуг. Размеры сети можно увеличить, изменив границы массивов в операторе размерности, записанных в подпрограмме DIJKA и в основной программе. Входные данные имеют следующий вид.

Набор 1. Одна запись с именем алгоритма в формате (A4).

Набор 2. Одна запись с числом узлов и числом дуг сети в формате (2I10).

Набор 3. Общее число записей в данном наборе равно числу дуг сети. Каждая запись содержит следующие величины:

- 1) номер начального узла дуги;
- 2) номер конечного узла дуги;
- 3) длину дуги.

Формат такой записи (4X,I6,I10,F10.2).

Набор 4. Состоит из одной записи, содержащей слово PEND в формате (A4), которая указывает конец задачи.

Набор 5. Состоит из одной записи, содержащей слово EXIT в формате (A4), которая указывает конец входных данных.

Программа состоит из следующих подпрограмм: DIJKA (ввод данных и вычисления), TRACED (печать узлов кратчайшей цепи и ее длины). Используемые переменные:  $I$  - начальный узел дуги,  $J$  - конечный узел дуги, VAL - длина дуги, D - рабочий массив длин дуг, OPTPAT - массив оптимального решения. Вывод оптимального решения в виде распечатки узлов кратчайшей цепи и ее длины осуществляется программой TRACED, входящей в указанный ППП. Реализация задачи оптимизации трассировки МК оперативно управляемой оросительной системы содержится в [80].

## 4.6. Оптимизация топологической структуры оперативно управляемых локальных сетей

В соответствии с [29, 115], оптимизация топологической структуры оперативно управляемых ЛС должна осуществляться с учетом следующих технико-экономических условий.

1. Минимизация общих затрат на сооружение ЛС.
  2. Минимизация общих затрат на эксплуатацию ЛС.
- Минимизация общих затрат на сооружение ЛС может быть осуществлена посредством реализации следующих мероприятий [29, 115].
1. Минимизация объема строительных работ.
  2. Минимизация расхода строительных и конструкционных материалов.
- Минимизация общих затрат на эксплуатацию ЛС может быть достигнута посредством реализации следующих условий [29, 115].

1. Минимизация общего числа элементов (участков) рассматриваемой ЛС.
2. Минимизация общих энергетических потерь при транспортировке ЦП по участкам и его перераспределение в узлах рассматриваемой ЛС.

В данном подразделе рассмотрим возможный подход к оптимизации топологической структуры оперативно управляемых ЛС, учитывающий перечисленные требования. В данном смысле рассматриваемый подход является логическим продолжением и развитием содержащегося в подразделе 3.5 настоящей работы подхода к оптимизации трассировки МК оперативно управляемых оросительных систем.

Анализ существующих и проектируемых ЛС позволяет заключить, что для объектов рассматриваемого класса обычно известным является местонахождение узлов (вершин), в которых соединяются их участки (дуги) [29, 115]. В целях реализации своего функционального назначения и удовлетворения перечисленным требованиям, проектируемая ЛС должна обладать следующими свойствами.

1. Быть связной.
2. Содержать все заданные узлы (вершины).
3. Содержать минимальное число участков (дуг).
4. Минимизировать сумму обобщенных стоимостных оценок (обобщенных длин) этих дуг.

На основании теоретико-графового анализа, проведенного в соответствии с [123], можно заключить, что ЛС, обладающие указанными свойствами, могут быть формализованы как кратчайшие остовные деревья. Поэтому для оптимизации топологической структуры оперативно

управляемых ЛС предлагается использовать известную задачу кратчайшем остовном дереве. Постановка указанной задачи в соответствии с [123] предполагает следующую формализацию. Выделим в определенной ЛС  $M$ , которую формализуем остовным деревом имеющим  $n$  вершин, принадлежащих множеству  $S$ . Вершины остовного дерева  $T$  соответствуют узлам ЛС  $M$ . Остовным деревом  $T$  называется связный граф, состоящий из  $n-1$  дуг и  $n$  вершин. Дуги дерева соответствуют участкам ЛС  $M$ . Из любого собственного подмножества множества  $S$  может быть образовано дерево, которое, однако, может быть остовным деревом исходной ЛС  $M$ . Будем предполагать, что каждой дуге  $(i, j)$ , соединяющей вершины  $i$  и  $j$  ЛС  $M$ , соответствует величина выражающая обобщенную стоимостную оценку (обобщенную для рассматриваемой дуги  $(i, j)$ , порождаемую общими затратами на сооружение и эксплуатацию соответствующего участка ЛС  $M$ , где  $i, j$  - кратчайшим остовным деревом назовем такой остов ЛС  $M$ , который имеет минимальную сумму обобщенных стоимостных оценок  $C_{ij}$  всех его дуг  $(i, j)$ , где  $i, j \in S$ .

Сеть возможных вариантов топологической структуры оросительной системы приведена в [80].

В соответствии с [123], задача о кратчайшем остовном дереве является задачей исследования операций, которая может быть решена с помощью «поглощающего» алгоритма. Этот процесс начинается выбором произвольной вершины ЛС  $M$  и кратчайшей дуги из множества соединяющих выбранную вершину с другими вершинами. После соединения двух вершин выбранной дугой определяется ближайшая вершина к этим двум. Затем эта вершина и соответствующая ей дуга добавляются к искомому остовному дереву. Данный процесс продолжается до тех пор, пока все вершины не будут соединены между собой. Алгоритм основанный на «поглощении» кратчайших дуг, в соответствии с [123] может быть формализован следующим образом.

1. Используя вершины дерева  $T$ , определяются следующие множества:  $S$  - множество соединенных вершин,  $\bar{S}$  - множество несоединенных вершин. Вначале все вершины будут принадлежать множеству  $\bar{S}$ .

2. Выбирается произвольная вершина из  $\bar{S}$  и соединяется с ближайшей соседней вершиной. После выполнения данного шага множество  $S$  будет содержать две вершины.

3. Среди всех дуг, соединяющих вершины множества  $S$  с вершинами множества  $\bar{S}$ , выбирается кратчайшая дуга. Концевая вершина этой дуги

принадлежащая множеству  $\bar{S}$ , обозначается  $\delta$ . Вершина  $\delta$  удаляется из множества  $\bar{S}$  и помещается во множество  $S$ .

4. Шаг 3 выполняется до тех пор, пока все вершины не будут принадлежать множеству  $S$ .

Программа построения кратчайшего остовного дерева для заданной ЛС содержится в [123]. Она локализована в качестве подпрограммы в ППП сетевой оптимизации. В соответствии с налагаемыми ограничениями, данная программа позволяет обрабатывать ЛС, содержащие до 50 узлов и до 100 дуг. В случае необходимости размерность можно увеличить, изменив значения в операторах DIMENSION подпрограммы MINSPA и основной программы.

Подготовка исходной информации для решения рассматриваемой задачи с использованием указанного ППП сетевой оптимизации состоит из следующих шагов.

В набор 1 входит одна запись с именем алгоритма MSTR в формате (A4). Набор 2 представлен одной записью с числом вершин и числом дуг ЛС  $M$  в формате (2I10). В наборе 3 общее число записей равно числу дуг ЛС  $M$ . При этом каждая запись содержит следующие величины: номер начального узла дуги, номер конечного узла дуги, обобщенную стоимостную оценку (обобщенную длину) дуги. Перечисленные данные имеют формат (4X, I6, I10, F10.2). Набор 4 состоит из одной записи, содержащей слово PEND в формате (A4), которая указывает конец задачи. Набор 5 состоит из одной записи, содержащей слово EXIT в формате (A4), которая указывает конец входных данных.

Реализация задачи оптимизации топологической структуры оперативно управляемых ЛС по критерию суммы обобщенных стоимостных оценок их дуг содержится в [80].

### 3.7. Выводы

1. На основании соответствующей концептуализации установлена иерархическая организация реальных ИСС по функциональному принципу. Проанализировано изменение важнейших свойств и особенностей, характерных для отдельных ЛС, в зависимости от их уровня иерархии в ИСС. Определены прикладные аспекты предлагаемого анализа.

2. На основании выделения существенных свойств и характерных особенностей функционирования формализованы отдельные ЛС заданного уровня иерархии, входящие в состав иерархически организованной ИСС. Сформулированы утверждения, устанавливающие взаимосвязь между управляющими параметрами и параметрами установившихся потокораспределений в рассматриваемых ЛС. Полученные

7. На основании известных ограничений (2.25), (2.26), (2.28) и целевой функции (2.29) реализуется процедура нахождения решения соответствующей задачи сепарабельного программирования. В результате для  $\forall j \in J$  определяются оптимальные значения управляющих параметров  $x_{j \min}^k$ .

8. Найденные оптимальные значения управляющих параметров  $x_j^k$  для  $\forall j \in J$  реализуются путем установки соответствующих режимов функционирования АЭ в рассматриваемой ИС.

9. Выполняется передача управления к шагу 1.

Построенный алгоритм, реализующий предлагаемый в данном подразделе статистический подход к управлению ИС, апробирован на объектах управления рассматриваемого класса. В частности, он был использован для реализации процесса оперативного управления системой городского водоснабжения.

## 2.6. Выводы

1. На основании предложенной концептуализации была проведена формализация и определены прикладные аспекты комбинаторно-графового подхода к управлению ИС с неполной информацией об объекте управления и среде их функционирования.

2. Используя комбинаторно-графовый подход к управлению ИС, формализованы задачи, связанные с определением эффективности управляющих воздействий в ИС, а также оценок надежности управляемости ИС. Для их решения использованы такие известные задачи сетевой оптимизации, как задача о многополюсной кратчайшей цепи, а также задача о  $K$  кратчайших путях, реализуемые с помощью ППП сетевой оптимизации.

3. Разработан подход к планированию исходных потокораспределений в реальных ИС, в котором предполагается, что для ИС имеют ограниченные пропускные способности, а для отдельных ПП задана система их приоритетов по отношению к потреблению ЦП. На основании такого подхода построен эффективный алгоритм планирования исходных потокораспределений, используемый для реализации итерационных процессов оперативного управления ИС.

4. Для формализации реальных ИС как объектов управления с учетом специфики их топологической структуры и процессов функционирования использован иерархический кластерный и параболический регрессионный анализ. Такой подход позволяет формализовать задачу управления ИС как задачу сепарабельного программирования, реализуемую методом штрафных

барьеров. На основании указанного подхода построен эффективный управляющий алгоритм для реальных объектов управления рассматриваемого класса.

## Раздел 1 ПРОБЛЕМА ОПЕРАТИВНОГО УПРАВЛЕНИЯ ИНЖЕНЕРНЫМИ СЕТЯМИ

### 1.1. Формализованное описание топологических структур оперативно управляемых инженерных сетей

В соответствии [30 - 33, 106, 123, 126] схема соединений участков ИС  $N$  может быть представлена связным орграфом, который обозначим  $G^*$ . Будем считать, что граф  $G^*$  имеет конечное множество вершин  $V^*$  и конечное множество дуг  $E^*$ . Число вершин и дуг графа  $G^*$  обозначим соответственно  $v^*$  и  $e^*$ . При этом каждой дуге  $j \in E^*$  соответствует участок ИС с выбранным направлением, а каждой вершине  $x \in V^*$  - узел (точка соединения отдельных участков) ИС  $N$ .

Во множестве  $V^*$  выделим множество входных вершин  $V'$  и множество выходных вершин  $V''$ ; при этом имеют место следующие соотношения:  $V' \subset V^*$ ,  $V'' \subset V^*$ . Будем полагать, что  $V' \cap V'' = \emptyset$  то есть никакая входная вершина не является выходной, и наоборот. Множество  $V'''$  введем следующим соотношением:  $V''' = V^* \setminus (V' \cup V'')$ . Очевидно, что множество  $V'''$  является множеством вершин графа  $G^*$ , каждая из которых не является ни входной, ни выходной. В связи с этим  $V'''$  назовем множеством промежуточных вершин графа  $G^*$ .

Введенная таким образом система множеств  $\{V', V'', V'''\}$  образует разбиение на множестве  $V^*$  [125, 135].

Выполним следующие преобразования орграфа  $G^*$ , дополняющие его до графа, который обозначим  $G$ .

Во множестве  $V^*$  введем фиктивную вершину  $w$ . Дополним множество дуг  $E^*$  графа  $G^*$  до соответствующего множества дуг  $E$  графа  $G$  следующим образом: из вершины  $w$  проведем в каждую вершину  $x \in V'$  дугу  $wx$ ; из каждой вершины  $x \in V''$  проведем в вершину  $w$  дугу  $xw$ .

Каждую дугу  $wx$  будем называть источником, а множество дуг  $E' = \{wx, x \in V'\}$  - множеством источников ИС  $N$ . Каждую дугу  $xw$  будем называть стоком, а множество дуг  $E'' = \{xw, x \in V''\}$  - множеством стоков ИС  $N$ .

В соответствии с процедурой построения графа  $G$  он однозначно определяется графом  $G^*$ , при этом множество его вершин суть множество

$V = \{w\} \cup V^*$ , а множество дуг - множество  $E = E^* \cup E' \cup E''$ . Число вершин графа  $G$  обозначим  $v$ , число дуг  $e$ .

Моделирующие графы  $G$  и  $G^*$  топологической структуры ИС  $N$  приведены в [80].

Будем предполагать, что орграф  $G$  является сильно связным. Цикломатическое число, определяющее количество фундаментальных циклов графа  $G$ , обозначим  $\mu$ . Для связного графа  $G$  имеет место следующее соотношение [106]:  $\mu = e - v + 1$ .

Следуя [30 - 33, 106, 123, 126], информацию о графе  $G$  относительно выделенного дерева можно записать в виде матрицы инцидентий  $A_\omega$ , матрицы главных сечений  $Q_\omega$ , матрицы фундаментальных циклов  $B_\alpha$ .

На практике большинство ИС имеет малое количество взаимосвязанных элементов графа  $G$  относительно общего их числа:  $v \ll e$ , что приводит к содержанию большого количества нулевых элементов в перечисленных матрицах, которое возрастает с ростом числа элементов множества  $E$  [30 - 33, 89]. В результате этого необходима дополнительная ОП управляющей ЭВМ для хранения фактически излишней информации, и дополнительное процессорное время для выполнения операций над нулевыми элементами.

В работах [30 - 33] вводится теоретико-множественное (списочное) представление информации о графе  $G$ , позволяющее избежать необходимости хранения информации о несвязной части графа и, как следствие, приводящее к резкому сокращению количества данных, требуемого для ввода в ОП управляющей ЭВМ и используемого в процессе вычислений. При этом матрицам  $A_\omega$ ,  $Q_\omega$  и  $B_\alpha$  соответствуют следующие теоретико-множественные конструкции: множество узловых подмножеств  $A$ , множество главных сечений  $Q$  и множество фундаментальных циклов  $B$ .

Множество узловых подмножеств  $A$  для орграфа  $G$  состоит из  $v$  узловых подмножеств  $A_x$ , элементами которых являются номера дуг графа  $G$ , инцидентных вершине  $x \in V$ , взятые со знаком плюс, если дуга заходит в вершину  $x$ , и со знаком минус, если дуга исходит из этой вершины.

Множество главных сечений  $Q$  состоит из  $v - 1$  подмножеств  $Q_j$ ; элементами подмножества  $Q_j$  являются номера дуг графа  $G$ , принадлежащих  $j$ -му главному сечению, со знаком плюс, если направление дуги в сечении совпадает с направлением  $j$ -ой ветви дерева, и со знаком минус в противном случае. Элемент  $j$  является ведущим элементом подмножества  $Q_j$ , принадлежит только этому подмножеству и однозначно его определяет.

Множество фундаментальных циклов  $B$  состоит из  $\mu$  подмножеств  $B_k$ , элементами которых являются номера дуг графа  $G$ , принадлежащих  $k$ -му фундаментальному циклу, со знаком плюс, если направление дуги в

вершине  $x \in V_0^* \setminus V_0'$  является функцией координат  $\omega_j$ ,  $j \in E_0^a$ , векторное состояние АЭ  $U_0^a$  МС  $N_0$ :  $z_x = z_x(U_0^a) = z_x(\omega_j, j \in E_0^a)$ .

Областью определения каждой такой функции  $z_x$ ,  $x \in V_0^* \setminus V_0'$ , является область возможных значений вектора  $U_0^a$  - конечное множество  $\{U_0^a\}$ . В этом имеет место следующее утверждение.

Утверждение 2. При фиксированном значении вектора  $\Gamma_0$  все  $z_x$ ,  $x \in V_0^* \setminus V_0'$ , являются ограниченными и возрастающими функциями по любому параметру  $\omega_j$ , принимающему значения на вполне упорядоченном конечном множестве  $\Omega_j$  при условии, что все остальные параметры закреплены. Доказательство справедливости утверждения 1 содержится в [80].

Для реализации процесса оперативного управления МС  $N_0$  определена степень влияния всех АЭ рассматриваемой сети на напоры  $z_x$  для  $\forall x \in V_0^*$ .

С этой целью для  $\forall x \in V_0^*$  упорядочим множество  $E_0^a$  следующим образом.

1. Обозначим кратчайший путь из вершины  $u \in V_0'$  в вершину  $x \in V_0^*$   $P(u, x)$ . Тогда для вершины  $x \in V_0^*$  полагаем  $j < k$ , если  $P(u^{(1)}, x) < P(u^{(2)}, x)$ , где  $j, k \in E_0^a$ ;  $u^{(1)}, u^{(2)} \in V_0'$ ;  $j \in P(u^{(1)}, x)$ ;  $k \in P(u^{(2)}, x)$ .

2. Если для различных  $j, k \in E_0^a$ , входящих в состав кратчайших путей соответственно  $P(u^{(1)}, x)$  и  $P(u^{(2)}, x)$ , выполняется равенство  $P(u^{(1)}, x) = P(u^{(2)}, x)$ , то полагаем  $j < k$ , когда  $|\Omega_j| < |\Omega_k|$ .

3. В случае равенства  $P(u^{(1)}, x) = P(u^{(2)}, x)$  и  $|\Omega_j| = |\Omega_k|$  для  $j, k \in E_0^a$  упорядочение  $j < k$  производится по конструктивным параметрам  $\omega_j$  находящихся в дугах  $j$  и  $k$ .

Предположим, что все АЭ МС  $N_0$  занумерованы последовательными натуральными числами. В таком случае каждой промежуточной вершине  $x \in V_0^*$  графа  $G_0$  МС  $N_0$  соответствует вектор, обозначаемый компонентами которого являются номера АЭ, расположенные в порядке соответствующем рассматриваемой промежуточной вершине  $x \in V_0^*$  МС  $N_0$ .

Построенная в настоящем подразделе модель оперативно управляемой МС использована в данной работе при синтезе ГСУ ИСС.

### 3.5. Оптимизация трассировки магистральных каналов оперативно управляемых оросительных систем

Оросительные системы как подкласс ИСС имеют иерархическую организацию. Их вертикальная декомпозиция обусловлена многоуровневой структурой [62, 136]. На высшем уровне иерархии находится головной водозабор с магистральным каналом (МК) оросительной системы, ниже которого уровни представлены соединенными между собой РС различного назначения.

В настоящем подразделе рассмотрим постановку и реализацию на МК задачи оптимизации трассировки МК оперативно управляемых оросительных систем.

Пусть необходимо от заданного пункта потребления ЦП (воды) из внешней среды построить МК оросительной системы в одну из нескольких возможных вершин РС, находящейся на следующем, более низком уровне иерархии. Для обеспечения подачи ЦП потребуется определенное количество насосных станций, которые являются АЭ оперативно управляемой оросительной системы. Каждый АЭ может находиться на любом из доступных для сооружения участков местности. Ограничения в данном случае могут быть обусловлены сложными физико-географическими условиями местности, наличием других сооружений, а также соображениями, связанными с охраной окружающей среды.

Предполагается, что для любой пары смежных АЭ известны затраты на сооружение инцидентной им части возможного варианта МК оросительной системы.

Задача оптимизации трассировки МК оперативно управляемой оросительной системы, рассматриваемая в настоящем подразделе, заключается в следующем. Необходимо при заданных положениях пунктов потребления из внешней среды определить такое допустимое расположение АЭ, которое минимизирует общие затраты на сооружение МК оросительной системы.

В целях формализации поставленной на содержательном уровне задачи введем следующие обозначения.

Сеть возможных вариантов МК представим моделирующим графом  $G$ , имеющим множество вершин  $V$  и дуг  $E$ , на котором каждая дуга  $e \in E$  соответствует упорядоченной паре вершин  $(i, j)$ , где  $i, j \in V$ . Вершину, соответствующую пункту потребления ЦП из внешней среды МК оросительной системы, обозначим  $S$  и назовем ее главным источником. Вершину распределительной сети из множества возможных вершин, к которой предполагается подключение МК, обозначим  $t$  и назовем ее главным стоком. Каждой дуге  $e$  поставим в соответствие величину  $C_{ij}$ , выражающую стоимость сооружения части МК, соединяющего соответствующие узлы сети возможных вариантов. В данной формализации задача оптимизации трассировки МК оперативно управляемой оросительной системы сводится к задаче нахождения кратчайшей цепи из вершины  $S$  в вершину  $t$  на моделирующем графе  $G$  [123].

Сеть возможных вариантов трассировки МК оросительной системы приведена в [80].

Машинные программы, численно реализующие данную задачу, разработаны на известном алгоритме Дейкстры, учитывающем специфику рассматриваемой модели [123]. Основу алгоритма составляет положение о

зависимости использованы для алгоритмизации локальных процессов оперативного управления отдельными ЛС различного уровня иерархии.

3. Для оптимизации трассировки МК оперативно управляемых оросительных систем использована задача нахождения кратчайшей цепи моделирующем графе возможных вариантов трассировки МК. Математические программы, входящие в ППП сетевой оптимизации, который используется для численной реализации поставленной задачи, основаны на известном алгоритме Дейкстры, учитывающем специфику данной задачи.

4. Для оптимизации топологической структуры оперативно управляемых ЛС, входящих в состав иерархически организованных ИСС, с учетом реализации предъявляемых к ним конструктивных и эксплуатационных требований, использована известная задача нахождения кратчайшего остовного дерева. Поэтому для оптимизации топологической структуры оперативно управляемых ЛС использован ППП сетевой оптимизации, эффективно реализующий указанную задачу на ЭВМ с помощью «поглощающего» алгоритма.

## Раздел 4 ПРОБЛЕМА КООРДИНИРУЕМОСТИ В ИЕРАРХИЧЕСКИ ОРГАНИЗОВАННЫХ ОПЕРАТИВНО УПРАВЛЯЕМЫХ ИНЖЕНЕРНЫХ СЕТЕВЫХ СИСТЕМАХ

### 4.1. Иерархическая декомпозиция топологической структуры инженерных сетевых систем

Для формализации иерархической декомпозиции топологической структуры ИСС введем необходимые обозначения и понятия. При этом будем использовать теоретико-графовую терминологию в соответствии с [1, 94, 129].

Будем считать, что ИСС  $N$  декомпозирована по функциональному назначению на отдельные ЛС различного уровня иерархии, и при этом все ЛС определенного уровня иерархии являются занумерованными.

Тогда  $j$ -ю ЛС  $i$ -го уровня иерархии, являющуюся непосредственно вышестоящей для  $k$ -й ЛС  $(i+1)$ -го уровня иерархии, обозначим  $N_{jk}^i$ . Будем предполагать, что непосредственно вышестоящей для рассматриваемой ЛС  $N_{jk}^i$  является ЛС  $N_{kl}^{i+1}$ , а одной из непосредственно нижестоящих - ЛС  $N_{lm}^{i-1}$ .

Топологическую структуру ИСС  $N$  формализуем моделирующим графом  $G$ , множество вершин которого  $V$  соответствует множеству узлов ИСС  $N$ , а множество дуг  $E$  - множеству участков ИСС  $N$ . Аналогично, топологическую структуру ЛС  $N_{jk}^i$  формализуем соответствующим моделирующим графом  $G_{jk}^i$ , являющимся подграфом моделирующего графа  $G$  ИСС  $N$ . При этом предполагается, что множество вершин  $V_{jk}^i$

моделирующего графа  $G_{jk}^i$  соответствует множеству узлов ЛС  $N_{jk}^i$ , множество его дуг  $E_{jk}^i$  - множеству участков рассматриваемой ЛС.

Множеству узлов ЛС  $N_{jk}^i$ , в которых осуществляется потребление из внешней среды или непосредственно из вышестоящей ЛС, поставив в соответствие множество источников (входных вершин) моделирующего графа  $G_{jk}^i$  рассматриваемой ЛС.

Множеству узлов ЛС  $N_{jk}^i$ , в которых осуществляется потребление непосредственно нижестоящими ЛС или ПЦП, подключенными к рассматриваемой ЛС, поставим в соответствие множество стоков (выходных вершин)  $T_{jk}^i$  моделирующего графа  $G_{jk}^i$  рассматриваемой ЛС.

Множеству узлов ЛС  $N_{jk}^i$ , в которых осуществляется перераспределение ЦП между участками рассматриваемой ЛС или ПЦП, поставим в соответствие множество промежуточных (внутренних) вершин  $M_{jk}^i$  моделирующего графа  $G_{jk}^i$  рассматриваемой ЛС.

На основании анализа топологической структуры реальных ИСС, содержащегося в [62, 74, 136], сформулируем постулаты, определяющие топологическую структуру отдельных ЛС различного уровня иерархии входящих в состав ИСС. При этом для определенности будем рассматривать ЛС  $N_{jk}^i$ .

1. Множества источников  $S_{jk}^i$ , стоков  $T_{jk}^i$ , а также промежуточных вершин  $M_{jk}^i$  моделирующего графа  $G_{jk}^i$  ЛС  $N_{jk}^i$  не являются пустыми. Указанный постулат может быть формализован следующим соотношением:

$$T_{jk}^i \neq \emptyset; S_{jk}^i \neq \emptyset; M_{jk}^i \neq \emptyset. \quad (4.1)$$

2. Множества источников  $S_{jk}^i$ , стоков  $T_{jk}^i$ , а также промежуточных вершин  $M_{jk}^i$  моделирующего графа  $G_{jk}^i$  ЛС  $N_{jk}^i$  не содержат общих вершин и поэтому эти множества являются попарно непересекающимися. Данный постулат может быть формализован следующим соотношением:

$$\begin{aligned} S_{jk}^i \cap T_{jk}^i &= \emptyset; S_{jk}^i \cap M_{jk}^i = \emptyset; \\ T_{jk}^i \cap M_{jk}^i &= \emptyset. \end{aligned} \quad (4.2)$$

3. Множество вершин  $V_{jk}^i$  моделирующего графа  $G_{jk}^i$  ЛС  $N_{jk}^i$  не содержит вершин, принадлежащих множествам источников  $S_{jk}^i$ , стоков  $T_{jk}^i$ , а также промежуточных вершин  $M_{jk}^i$  рассматриваемого моделирующего графа  $G_{jk}^i$ . Указанный постулат может быть формализован следующим соотношением:

$$S_{jk}^i \cup M_{jk}^i \cup T_{jk}^i = V_{jk}^i. \quad (4.3)$$

Некая из соотношений (4.1) - (4.3), можно заключить, что система множеств  $\{S_{jk}^i; M_{jk}^i; T_{jk}^i\}$  образует разбиение на множестве вершин  $V_{jk}^i$  моделирующего графа  $G_{jk}^i$  ЛС  $N_{jk}^i$ .

Учитывая специфику топологической структуры реальных ИСС [62, 74, 136], сформулируем постулаты, определяющие взаимосвязи топологических структур отдельных ЛС различного уровня иерархии, входящих в состав ИСС.

1. Моделирующие графы всех ЛС, входящих в состав ИСС, разделены между собой ребрами [129]. Для различных ЛС  $N_{jk}^i$  и  $N_{qr}^p$ , входящих в состав ИСС  $N$ , указанный постулат может быть формализован следующим соотношением:

$$(i \neq p) \vee (j \neq q) \vee (k \neq r) = 1 \Rightarrow E_{jk}^i \cap E_{qr}^p = \emptyset \quad (4.4)$$

2. Моделирующие графы ЛС одного уровня иерархии разделены между собой вершинами [129]. Для ЛС  $N_{jk}^i$  и  $N_{qr}^i$ , находящиеся на  $i$ -м уровне иерархии в ИСС  $N$ , указанный постулат может быть формализован следующим соотношением:

$$(j \neq q) \vee (k \neq r) = 1 \Rightarrow V_{jk}^i \cap V_{qr}^i = \emptyset. \quad (4.5)$$

3. Множество источников  $S_{jk}^i$  моделирующего графа  $G_{jk}^i$  ЛС  $N_{jk}^i$  является как подмножество во множестве стоков  $T_{kl}^{i+1}$  моделирующего

графа  $G_{kl}^{i+1}$  ЛС  $N_{kl}^{i+1}$ , являющейся непосредственно вышестоящей по отношению к рассматриваемой ЛС  $N_{jk}^i$  в ИСС  $N$ . Данный постулат может быть формализован следующим соотношением:

$$S_{jk}^i \subset T_{kl}^{i+1} \quad (4.6)$$

4. Множество стоков  $T_{jk}^i$  моделирующего графа  $G_{jk}^i$  ЛС  $N_{jk}^i$  включает в качестве подмножеств множества источников  $S_{mj}^{i-1}$  моделирующих графов  $G_{mj}^{i-1}$  ЛС  $N_{mj}^{i-1}$ , являющихся непосредственно нижестоящими для рассматриваемой ЛС  $N_{jk}^i$  в ИСС  $N$ .

Указанный постулат может быть формализован следующим соотношением:

$$T_{jk}^i \subset S_{mj}^{i-1} \quad (4.7)$$

Соотношения (4.1) - (4.7) формализуют иерархическую декомпозицию топологической структуры реальных ИСС.

Апробация предлагаемого в данном подразделе подхода показала эффективность его использования для организации процессов управления РС системы городского водоснабжения.

#### 4.2. Координируемость локальных целей функционирования и локальных задач оперативного управления в многоуровневых инженерных сетевых системах

Для реализации процессов управления иерархически организованными ИСС необходимо прежде всего сформулировать и формализовать условия функционирования и порождаемые ими задачи управления для отдельных ЛС различного уровня иерархии, которые назовем соответственно локальными целями функционирования (ЛЦ) и локальными задачами управления (ЛЗ). Затем на основании полученных результатов необходимо формализовать условие, выражающее принцип координируемости ЛЦ порождаемых ими ЛЗ для нижестоящих ЛС по отношению к соответствующим ЛЦ и ЛЗ для непосредственно вышестоящих ЛС. В соответствии с [88] выполнение указанного принципа является

необходимым условием функционирования иерархически организованных систем. Перечисленные вопросы являются предметом исследования в данном подразделе.

Будем предполагать, что все ЛС определенного уровня иерархии являются занумерованными. Тогда  $j$ -ю ЛС  $i$ -го уровня иерархии, являющуюся непосредственно нижестоящей для  $k$ -й ЛС  $(i+1)$ -го уровня иерархии, обозначим  $N_{jk}^i$ .

Следуя [58, 60], будем предполагать, что управляющие воздействия в рассматриваемой ЛС осуществляются путем изменения состояний ее АЭ и ПЭ. Исходя из этого, рассматриваемой ЛС поставим в соответствие пары параметров АЭ и ПЭ, которые обозначим соответственно  $U_{jk}^i$  и  $R_{jk}^i$ .

Координатами вектора  $U_{jk}^i$ , в частности, могут быть угловые скорости, а также потребляемые ими мощности, напряжения, токи. Координатами вектора  $R_{jk}^i$ , в частности, могут быть величины линейных и угловых перемещений соответствующих ПЭ.

Также рассматриваемой ЛС  $N_{jk}^i$  поставим в соответствие векторы ее управляемых и возмущающих переменных, которые обозначим соответственно  $Z_{jk}^i$  и  $Q_{jk}^i$ . Координатами вектора  $Z_{jk}^i$ , в частности, могут быть величины управляемых напоров, давлений, депрессий, уровней и т.д. в определенных вершинах моделирующего графа рассматриваемой ЛС. Координатами вектора  $Q_{jk}^i$  являются переменные, характеризующие возмущающие воздействия на управляемые переменные рассматриваемой ЛС, оказываемые непосредственно вышестоящей и нижестоящими ЛС. Координатами переменными, в частности, могут быть потоки или расходы ЦП в определенных дугах моделирующего графа рассматриваемой ЛС.

Следуя [58, 60], будем предполагать, что в рассматриваемой ЛС  $N_{jk}^i$  векторы  $U_{jk}^i$ ,  $R_{jk}^i$ ,  $Z_{jk}^i$  и  $Q_{jk}^i$  принадлежат областям их допустимых значений, которые обозначим соответственно  $\Omega(U_{jk}^i)$ ,  $\Omega(R_{jk}^i)$ ,  $\Omega(Z_{jk}^i)$  и  $\Omega(Q_{jk}^i)$ . Формально такое условие имеет следующий вид:

$$U_{jk}^i \in \Omega(U_{jk}^i); R_{jk}^i \in \Omega(R_{jk}^i);$$

$$Z_{jk}^i \in \Omega(Z_{jk}^i); Q_{jk}^i \in \Omega(Q_{jk}^i). \quad (4.8)$$

В соответствии с [58, 60] будем считать, что соотношение формализует состояние технической исправности рассматриваемой отсутствие в ней аварийных ситуаций.

Следуя [58, 60], будем предполагать, что ЛЦ определенной заключается в создании требуемых условий функционирования для непосредственно нижестоящих ЛС или всех ПЦП, подключенных к рассматриваемой ЛС. Такая ЛЦ может быть выражена принадлежностью вектора управляемых переменных рассматриваемой ЛС области требуемых значений, являющейся подобластью допустимых значений этого вектора. При этом предполагается, что все остальные векторы, соответствующие рассматриваемой ЛС, находятся в областях их допустимых значений. Область требуемых значений вектора  $Z_{jk}^i$  рассматриваемой ЛС обозначим  $\Omega^r(Z_{jk}^i)$ ; при этом  $\Omega^r(Z_{jk}^i) \subset \Omega(Z_{jk}^i)$ .

С учетом введенных обозначений и понятий критерий управления рассматриваемой ЛС  $N_{jk}^i$ , формализующий соответствующую ЛЦ, имеет следующий вид:

$$\begin{aligned} N_{jk}^i : Z_{jk}^i \in \Omega^r(Z_{jk}^i), U_{jk}^i \in \Omega(U_{jk}^i), \\ R_{jk}^i \in \Omega(R_{jk}^i), Q_{jk}^i \in \Omega(Q_{jk}^i). \end{aligned} \quad (4.9)$$

Формализованная соотношением (4.9) ЛЦ порождает следующую задачу. Необходимо в рассматриваемой ЛС реализовать такие значения векторов параметров АЭ и ПЭ, находящиеся в соответствующих областях допустимых значений, которые при определенном требуемом значении вектора управляемых переменных непосредственно вышестоящей ЛС обеспечат некоторое требуемое значение вектора управляемых переменных рассматриваемой ЛС. При этом предполагается, что значения векторов возмущающих переменных рассматриваемой ЛС находятся в области допустимых значений.

С учетом выражения (4.9), формализующего соответствующий критерий управления, ЛЦ рассматриваемой ЛС  $N_{jk}^i$  может быть выражено следующим соотношением:

$$\begin{aligned} N_{kl}^{i+1}, N_{jk}^i : Z_{kl}^{i+1} \in \Omega^r(Z_{kl}^{i+1}) \Rightarrow \\ \Rightarrow \exists U_{jk}^i \in \Omega(U_{jk}^i), \exists R_{jk}^i \in \Omega(R_{jk}^i) \Rightarrow \\ \Rightarrow Z_{jk}^i \in \Omega^r(Z_{jk}^i), Q_{jk}^i \in \Omega(Q_{jk}^i). \end{aligned} \quad (4.10)$$

Необходимым условием функционирования иерархически организованных систем является выполнение принципа координируемости функционирования и порождаемых ими задач управления для взаимодействующих подсистем по отношению к соответствующим целям функционирования и задачам управления для непосредственно взаимодействующих подсистем [88]. Указанный принцип сформулируем в виде необходимого условия, которое может быть реализовано в объектах управления рассматриваемого класса в силу специфики и взаимосвязи математических моделей потокораспределений в отдельных ЛС различного уровня иерархии [58, 60]. С этой целью рассмотрим такую ЛС, которая является непосредственно вышестоящей для определенных ЛС, в свою очередь являющихся непосредственно нижестоящими для рассматриваемой ЛС. Суть формулируемого условия заключается в том, что существует область требуемых значений вектора управляемых переменных рассматриваемой ЛС, из которой каждое значение указанного вектора позволяет обеспечить требуемые значения векторов управляемых переменных во всех непосредственно нижестоящих ЛС путем реализации в них некоторых соответствующих значений векторов параметров АЭ и ПЭ. При этом предполагается, что векторы параметров АЭ и ПЭ, а также векторы возмущающих переменных, соответствующие всем этим ЛС, не выходят из областей их допустимых значений. Справедливость данного утверждения обусловлена утверждением 3, устанавливающим взаимосвязи между переменными (параметрами) установившихся потокораспределений определенной вышестоящей ЛС и непосредственно нижестоящих ЛС, которое сформулировано и доказано в подразделе 4.5 данной работы.

В предположении, что рассматриваемой является ЛС  $N_{kl}^{i+1}$ , а непосредственно нижестоящими - ЛС  $N_{jk}^i$ , с учетом соотношений (4.8) - (4.10), формализующих техническую исправность, а также соответствующие ЛЦ и ЛЗ указанных ЛС, такое условие допускает следующую формализацию:

$$\begin{aligned}
& N_{kl}^{i+1}, \forall N_{jk}^i : \exists \Omega^r(Z_{kl}^{i+1}), \forall Z_{kl}^{i+1} \in \Omega^r(Z_{kl}^{i+1}) \Rightarrow \\
& \Rightarrow \exists U_{jk}^i \in \Omega(U_{jk}^i), \exists R_{jk}^i \in \Omega(R_{jk}^i) \Rightarrow \\
& \Rightarrow \exists Z_{jk}^i \in \Omega^r(Z_{jk}^i), Q_{jk}^i \in \Omega(Q_{jk}^i).
\end{aligned}
\tag{4.11}$$

Таким образом, в данном подразделе соотношениями (4.8) - (4.11) формализованы состояние технической исправности, а также ЛЦ порождаемые ими ЛЗ отдельных ЛС различного уровня иерархии. С учетом результатов соотношением (4.11) формализовано условие, выражающее принцип координируемости ЛЦ и порождаемых ими ЛЗ нижестоящих ЛС по отношению к соответствующим ЛЦ и ЛЗ непосредственно вышестоящих ЛС в иерархически организованных ИСС. Указанные модели были использованы для организации процесса управления реальными ИСС. В частности, такие модели использованы для реализации процесса управления системой городского водоснабжения.

### 4.3. Анализ координируемости локальных целей функционирования и локальных задач оперативного управления по отношению к глобальной цели и глобальной задаче в многоуровневых инженерных сетевых системах

В соответствии с [88] для реальных иерархически организованных сложных технических систем является справедливым утверждение о том, что достижение глобальной цели их функционирования посредством реализации соответствующей задачи управления такими объектами зависит от достижения подсистемами низшего уровня иерархии локальных целей функционирования посредством реализации соответствующих локальных задач управления этими подсистемами. При этом для реализации процесса управления иерархически организованными системами является необходимым выполнение принципа координируемости локальных целей функционирования и порождаемых ими локальных задач управления подсистем низшего уровня иерархии по отношению к глобальной цели функционирования и порождаемой ею глобальной задаче управления иерархически организованной системы [88].

В иерархически организованной сложной технической системе с учетом указанного принципа выполняется в том случае, если реализация локальных задач управления подсистемами низшего уровня иерархии, порождаемых соответствующими локальными целями их функционирования, приводит

к реализации глобальной задачи управления иерархически организованной системой, порождаемой соответствующей глобальной целью ее функционирования [88].

Рассмотрим возможный подход к формализации условий, обеспечивающих указанный принцип в иерархически организованных ИСС. Возможность такого подхода обусловлена утверждением 4, являющимся условием реализации рассматриваемого принципа в иерархически организованных ИСС, которое сформулировано и доказано в подразделе 4.5 данной работы. Понятия ЛЦ и ЛЗ для отдельных ЛС различного уровня иерархии рассмотрены в подразделе 4.2 настоящей работы. Цель функционирования ИСС и порождаемую ею задачу назначения ИСС назовем соответственно глобальной целью функционирования (ГЦ) и глобальной задачей управления (ГЗ) для рассматриваемой ИСС.

Исходя из анализа функционального назначения реальных ИСС [60, 136], можно заключить, что ЛЦ для ЛС низшего уровня иерархии состоит в создании требуемых условий функционирования для всех тех ЛЦ, которые подключены к рассматриваемой ЛС. Такая ЛЦ может быть выражена принадлежностью вектора управляемых переменных рассматриваемой ЛС соответствующей области требуемых значений, являющейся подобластью допустимых значений этого вектора.

Для определенности будем предполагать, что в рассматриваемой ИСС низшего уровня является ЛС первого уровня иерархии. Тогда непосредственно вышестоящими для них являются ЛС второго уровня иерархии.

С учетом введенных обозначений и понятий ЛЦ для ЛС первого уровня иерархии  $N_{jk}^1$  может быть формализована следующим соотношением:

$$\begin{aligned}
& N_{jk}^1 : Z_{jk}^1 \in \Omega^r(Z_{jk}^1), U_{jk}^1 \in \Omega(U_{jk}^1), \\
& R_{jk}^1 \in \Omega(R_{jk}^1), Q_{jk}^1 \in \Omega(Q_{jk}^1).
\end{aligned}
\tag{4.12}$$

Исходя из анализа функционального назначения реальных ИСС [60, 136], можно заключить, что ГЦ для иерархически организованных систем управления рассматриваемого класса состоит в создании требуемых условий функционирования для всех ПЦП, подключенных к рассматриваемой ИСС. В соответствии с [60, 62, 136], ПЦП в реальных ИСС подключены к ЛС низшего уровня иерархии. Поэтому на основании введенных обозначений и понятий, с учетом соотношения (4.12), ГЦ для рассматриваемой ИСС может быть формализована следующим соотношением:

$$\forall N_{jk}^1 : Z_{jk}^1 \in \Omega^r(Z_{jk}^1), U_{jk}^1 \in \Omega(U_{jk}^1), \\ R_{jk}^1 \in \Omega(R_{jk}^1), Q_{jk}^1 \in \Omega(Q_{jk}^1). \quad (4.1)$$

Из анализа соотношений (4.12) и (4.13) можно заключить, что реальное достижение всеми ЛС низшего уровня иерархии соответствующих ЛЦ приводит к достижению ГЦ для ИСС. Следовательно, предлагаемый подход к формализации ЛЦ для ЛС низшего уровня иерархии и ГЦ для ИСС позволяет формализовать условие, реализующее принцип координируемости ЛЦ для ЛС низшего уровня иерархии по отношению к ГЦ для ИСС в иерархически организованных объектах управления рассматриваемого класса.

Формализованная соотношением (4.12) ЛЦ порождает следующую ГЦ для ЛС низшего уровня иерархии. Необходимо в рассматриваемой реализации реализовать такие значения векторов состояния АЭ и ПЭ, находящихся в соответствующих областях их допустимых значений, которые в определенном требуемом значении вектора управляемых переменных непосредственно вышестоящей ЛС обеспечат некоторое требуемое значение вектора управляемых переменных рассматриваемой ЛС. Предполагается, что значения вектора возмущающих переменных рассматриваемой ЛС находятся в области их допустимых значений.

На основании введенных обозначений и понятий, с учетом соотношения (4.12), ЛЗ для рассматриваемой ЛС первого уровня иерархии  $N_{jk}^1$ , может быть формализована следующим соотношением:

$$N_{kl}^2, N_{jk}^1 : Z_{kl}^2 \in \Omega^r(Z_{kl}^2) \Rightarrow \exists U_{jk}^1 \in \Omega(U_{jk}^1), \\ \exists R_{jk}^1 \in \Omega(R_{jk}^1) \Rightarrow \exists Z_{jk}^1 \in \Omega^r(Z_{jk}^1), Q_{jk}^1 \in \Omega(Q_{jk}^1). \quad (4.14)$$

Формализованная соотношением (4.13) ГЦ для ИСС порождает следующую ГЗ для иерархически организованного объекта управления рассматриваемого класса. Необходимо во всех ЛС низшего уровня иерархии выбрать такие значения векторов параметров АЭ и ПЭ, принадлежащие областям их допустимых значений, которые обеспечивают некоторые значения векторов управляемых переменных в рассматриваемой ЛС, принадлежащие областям их требуемых значений. Предполагается, что векторы управляемых переменных, соответствующие всем непосредственно вышестоящим ЛС, принадлежат областям требуемых значений, а все остальные векторы, соответствующие указанным ЛС, - областям их допустимых значений.

На основании введенных обозначений и понятий, с учетом соотношения (4.14), ГЗ для реальной ИСС может быть формализована следующим соотношением:

$$\forall N_{kl}^2, \forall N_{jk}^1 : Z_{kl}^2 \in \Omega^r(Z_{kl}^2) \Rightarrow \\ \Rightarrow \exists U_{jk}^1 \in \Omega(U_{jk}^1), \exists R_{jk}^1 \in \Omega(R_{jk}^1) \Rightarrow \\ \Rightarrow \exists Z_{jk}^1 \in \Omega^r(Z_{jk}^1), Q_{jk}^1 \in \Omega(Q_{jk}^1). \quad (4.15)$$

На основании анализа соотношений (4.14) и (4.15) можно заключить, что реализация ЛЗ для всех ЛС низшего уровня иерархии приводит к реализации ГЗ для ИСС. Следовательно, предлагаемый подход к формализации ЛЗ для ЛС низшего уровня иерархии и ГЗ для ИСС позволяет формализовать условие, реализующее принцип координируемости ЛЗ для ЛС низшего уровня иерархии по отношению к ГЗ для ИСС в иерархически организованных объектах управления рассматриваемого класса.

Таким образом, рассмотренный в данном подразделе подход к формализации ЛЦ и ЛЗ для ЛС низшего уровня иерархии, а также ГЦ и ГЗ для ИСС позволяет формализовать соотношениями (4.12) - (4.15) условия, реализующие принцип координируемости ЛЦ и ЛЗ для ЛС низшего уровня иерархии по отношению к соответствующим ГЦ и ГЗ для ИСС.

Полученные результаты использованы для реализации процессов управления иерархически организованными сетевыми системами водоснабжения.

#### 4.4. Моделирование локальных и глобальных целей функционирования и задач оперативного управления в реальных двухуровневых инженерных сетевых системах

Как следует из свойства 9 РС  $N_i, i \in I$ , сформулированных в подразделе настоящей работы, для всех ПЦП, подключенных к рассматриваемой системе, будут реализованы допустимые условия функционирования, если будет выполнено следующее условие:  $\forall x \in V_i^m, z_x \in [z_i^*, z_i^{**}]$ ; где  $z_i^*$  и  $z_i^{**}$  - соответственно нижняя и верхняя границы напора  $z_x$  в промежуточной системе  $x \in V_i^m$  РС  $N_i$ .

Такое условие в указанном подразделе было определено как цель функционирования РС  $N_i, i \in I$ . В связи с этим целевую функцию задачи

оперативного управления РС  $N_i$ ,  $i \in I$ , определим следующим соотношением:

$$F_i = \begin{cases} 0, & \forall x \in V_i''', z_x \in [z_i^*, z_i^{**}]; \\ \max (z_i^* - z_x), & \exists x \in V_i''', z_x < z_i^*; \\ \max (z_x - z_i^{**}), & \exists x \in V_i''', z_x > z_i^{**}. \end{cases} \quad (4.16)$$

Из соотношения (4.16) и свойства 10 РС  $N_i$ , сформулированное в подразделе 3.3 настоящей работы следует, что для  $\forall i \in I, \forall z_x \in R$ , функция  $F_i \geq 0$ , где  $R$  - область действительных чисел.

Кроме этого, минимальное значение рассматриваемой функции, которое обозначим  $F_{i \min}$ , удовлетворяет условию  $F_{i \min} = 0$  и соответствует достижению цели функционирования РС  $N_i$ ,  $i \in I: \forall x \in V_i''', z_x \in [z_i^*, z_i^{**}]$ .

Поскольку целью функционирования РС  $N_i$  является обеспечение допустимых условий функционирования ПЦП, подключенных к рассматриваемой РС, соответствующая задача оперативного управления может быть поставлена следующим образом.

Необходимо выбрать такое значение вектора состояния ПЭ  $U_i^p \in \{U_i^p\}$  РС  $N_i$ , чтобы целевая функция  $F_i$ , определенная соотношением (4.16) стремилась к минимуму:  $F_i \rightarrow \min$ .

Целью функционирования ИСС  $N$  в целом является в конечном счете создание допустимых условий функционирования ПЦП, подключенных к рассматриваемой ИСС. В связи с такой установкой, учитывая взаимосвязь между отдельными ЛС в иерархически организованном объекте оперативного управления, целевую функцию задачи оперативного управления ИСС  $N$ , которую будем обозначать  $F$ , можно определить следующим соотношением:

$$F = \sum_{i \in I} F_i; \quad (4.17)$$

где  $F_i$  - целевая функция задачи оперативного управления РС  $N_i$ , определенная соотношением (4.16).

Исходя из соотношений (4.16) и (4.17), а также из свойства 10 РС  $N_i$ ,  $i \in I$ , сформулированного в подразделе 3.3 настоящей работы, можно заключить, что функция  $F$  неотрицательна:  $F \geq 0$  для  $\forall i \in I, \forall x \in V_i'''$ .

При этом минимальное значение рассматриваемой функции, которое обозначим  $F_{\min}$ , удовлетворяет условию  $F_{\min} = 0$  и соответствует достижению допустимым режимам функционирования одновременно для всех РС  $N_i$ ,  $\forall i \in I, \forall x \in V_i'''$ .

Исходя из цели функционирования ИСС  $N$ , формализуем задачу оперативного управления объектом рассматриваемого класса.

Необходимо в МС  $N_0$  найти такое значение вектора состояния АЭ  $z_0$  (4.17), а в РС  $N_i$  такие значения векторов состояния ПЭ  $U_i^p \in \{U_i^p\}$ , где  $i \in I$ , чтобы целевая функция  $F$ , определенная соотношением (4.17), стремилась к минимуму:  $F \rightarrow \min$ .

Как было показано в подразделе 3.1 настоящей работы, ИСС  $N$  является иерархически организованным объектом, поэтому имеет место определенная взаимосвязь между целью функционирования ИСС  $N$  и целью функционирования отдельных ЛС  $N_i$  различного уровня иерархии,  $i \in I$ . Также имеет место аналогичная взаимосвязь между порождаемыми рассматриваемыми целями соответствующими задачами оперативного управления [74, 75, 88]. При этом цель функционирования сложной системы  $N$  является глобальной целью функционирования (ГЦ), а задача оперативного управления - глобальной задачей управления (ГЗ) рассматриваемым иерархическим объектом.

Цель функционирования РС  $N_i$  и порождаемая ею задача оперативного управления РС  $N_i$ , где  $i \in I$ , является соответственно локальной целью функционирования (ЛЦ) и локальной задачей оперативного управления (ЛЗ) рассматриваемой РС.

Характерной особенностью иерархических систем является наличие различных целей функционирования для подсистем всех уровней иерархии, существующих только этим подсистемам, и не совпадающих ни с локальными целями подсистем другого уровня иерархии, ни с глобальной целью функционирования иерархической системы в целом [75, 88].

Применительно к рассматриваемому объекту оперативного управления, должна быть сформулирована ЛЦ и поставлена соответствующая ей ЛЗ для МС  $N_0$ . К решению данного вопроса подойдем следующим образом. Вначале сформулируем ЛЦ и поставим соответствующую ей ЛЗ для МС  $N_0$ , а затем в следующем подразделе при анализе координируемости подсистем в иерархическом объекте рассматриваемого класса покажем целесообразность таких постановок.

Будем считать, что ЛЦ для МС  $N_0$  является обеспечение достижения цели для всех подключенных к ней РС  $N_i$ ,  $i \in I$ .

Такая постановка ЛЦ МС вытекает из анализа функционирования МС [4, 21, 75].

Исходя из взаимосвязи установившихся потокораспределений в МС  $N_0$  РС  $N_i$ ,  $i \in I$ , анализ которой дан в [30 - 33, 58, 60, 75], ЛЦ для МС  $N_0$  достигается, если имеет место следующее соотношение:  $\forall x \in V_0'''$ ,  $[z_0^*, z_0^{**}]$ ; где  $z_0^*$  и  $z_0^{**}$  - соответственно нижняя и верхняя границы вектора  $z$ , в промежуточной вершине  $x \in V_0'''$  МС  $N_0$ .

Исходя из этого, можно определить целевую функцию оперативного управления МС следующим соотношением:

$$F_0 = \begin{cases} 0, & \forall x \in V_0''', z_x \in [z_0^*, z_0^{**}]; \\ \max (z_0^* - z_x), & \exists x \in V_0''', z_x < z_0^*; \\ \max (z_x - z_0^{**}), & \exists x \in V_0''', z_x > z_0^{**}. \end{cases} \quad (4.1)$$

Исходя из соотношения (4.18) и свойства 6 МС  $N_0$ , которое сформулировано в подразделе 3.4, можно заключить что функция неотрицательна,  $F_0 \geq 0$ , для  $\forall z_x \in R$ , где  $R$  - область вещественных чисел.

Кроме того, минимальное значение рассматриваемой функции, которое обозначим  $F_{0 \min}$ , удовлетворяет условию  $F_{0 \min} = 0$  и соответствует достижению локальной цели функционирования МС  $N_0$ .

Исходя из поставленной цели, соответствующая ЛЗ для МС может быть формализована следующим образом.

Необходимо выбрать в МС  $N_0$  такое значение вектора состояния, чтобы целевая функция  $F_0$ , определенная соотношением (4.18), стремилась к минимуму:  $F_0 \rightarrow \min$ .

Для успешного функционирования ИСС как иерархически организованного объекта оперативного управления необходимо, чтобы она имела место координируемость по отношению к ГЗ [60, 74, 75, 88].

Данное условие означает, что достижение ЛЦ для отдельных ЛС различного уровня иерархии, заключающееся в решении ЛЗ соответствующих ЛС  $N_i$ , где  $i \in I$ , соответствует достижению глобальной цели функционирования для ИСС  $N$ , которая реализуется соответствующим ГЗ. Данный вопрос является предметом анализа следующего подраздела настоящей работы.

#### 4.5. Координируемость локальных задач оперативного управления по отношению к глобальной задаче в реальных двухуровневых инженерных сетевых системах.

При анализе вопроса координируемости ЛЗ по отношению к ГЗ в иерархически организованном объекте оперативного управления рассматриваемого класса целесообразно использовать взаимосвязь между параметрами установившихся потокораспределений в ЛС различного уровня иерархии, которая устанавливается следующим утверждением.

**Утверждение 3.** Пусть дана ИСС  $N$ , которая состоит из РС  $N_i$ ,  $i \in I$ , и МС  $N_0$ . Предполагается, что ЛС  $N_i$  различного уровня иерархии, где  $i \in I$ , удовлетворяют соответствующим ограничениям, сформулированным в подразделах 3.3 и 3.4 настоящей работы.

Пусть имеет место следующее условие:  $\forall i \in I, \forall u \in V_i''', z_u \in [z_i^*, z_i^{**}]$ . Тогда справедливо такое соотношение:  $\exists z_0^*, \exists z_0^{**}, \forall x \in V_0'''$ ,  $z_x \in [z_0^*, z_0^{**}]$ , и при этом  $\forall i \in I, \exists U_i^p \in \{U_i^p\}$ .

Для доказательства утверждения будем считать, что векторы  $Z^{(1)}$  и  $Z^{(2)}$  удовлетворяют условию  $Z^{(1)} < Z^{(2)}$ , если для всех их соответствующих координат  $z_\lambda^{(1)}$  и  $z_\lambda^{(2)}$  выполняется следующее условие:  $\forall \lambda \in \Lambda, z_\lambda^{(1)} < z_\lambda^{(2)}$ , где  $\Lambda$  - множество индексов координат рассматриваемых векторов.

Пусть имеет место следующее условие:  $\forall i \in I, \forall u \in V_i''', z_u \in [z_i^*, z_i^{**}]$ .

Наименьшее значение вектора  $Z_0''$ , обеспечивающее заданное условие для РС, где  $z_i^{**}$  принимает наибольшее значение, обозначим  $Z_0'' \min$ .

Наименьший напор  $z_x$ ,  $x \in V_0'''$ , соответствующий значению вектора  $Z_0'' \min$ , может являться нижней границей  $z_0^*$ . Для тех сетей  $k \in I$ , в которых  $z_k^{**} < z_0^*$ , можно подобрать координаты  $r_j$  вектора состояния ПЭ  $U_k^p$  таким образом, чтобы выполнялось условие:  $z_x \in [z_k^* \dots z_k^{**}]$ , где  $j \in E_k^p$ ,  $x \in V_k'''$ .

Такое заключение непосредственно следует из свойства 6 РС, сформулированного в подразделе 3.3 настоящей работы, а также из соотношения (1.6), учитывая, что для ПЭ интервал  $[r_j^*, r_j^{**}]$  можно оставить как  $[r_j^*, \infty]$  включая предельный случай, когда рассматриваемая дуга  $j$  перекрыта [5, 36].

В качестве верхней границы  $z_0^{**}$  можно взять любое число, большее, чем  $z_0^*$ . При этом в силу тех же взаимосвязей для  $\forall i \in I$  имеет место условие:  $z_i \in [z_i^*, z_i^{**}]$ , что и доказывает утверждение.

Координируемость ЛЗ для ЛС различного уровня иерархии  $N_i$ ,  $i \in I$ , по отношению к ГЗ для ИСС  $N$  устанавливается следующим утверждением.

**Утверждение 4.** Пусть дана ИСС  $N$ , для которой ГЦ и ГЗ определены в подразделе 4.4 настоящей работы.

При этих условиях ЛЗ для ЛС различного уровня иерархии  $N_i$ , где  $i \in I$ , ограничены по отношению к ГЗ для ИСС  $N$ , что выражается следующим соотношением:  $\forall i \in I, F_i = F_{i \min}, F = F_{\min}$ .

Для доказательства утверждения достаточно предположить, что для РС  $N_i$ ,  $i \in I$ , имеет место следующее условие:  $\forall i \in I, \forall u \in V_i''', z_u \in [z_i^*, z_i^{**}]$ .

Тогда в соответствии с утверждением 3 это условие может быть обеспечено выполнением в МС  $N_0$  соотношения  $\forall x \in V_0'''$ ,  $z_x \in [z_0^*, z_0^{**}]$  путем выбора в РС  $N_i$  соответствующих значений векторов состояния ПЭ  $U_i^p \in \{U_i^p\}$ , где  $i \in I$ . В этом случае, исходя из соотношений (4.16), (4.18) и

(4.17), определяющих соответственно  $F_i$ , где  $i \in I$ ,  $F_0$  и  $F$ , имеют следующие равенства:  $\forall i \in I, F_i = F_{i \min} = 0; F_0 = F_{0 \min} = 0; F = F_{\min} = 0$ .

Полученные равенства показывают, что достижение ЛЦ соответствующих им локальных оптимумов целевых функций ЛЗ отдельных ЛС  $N_i$  различного уровня иерархии, где  $i \in I$ , порождает достижение ГЦ и соответствующего ей глобального оптимума целевой функции ГЗ для ИСС  $N$ . Полученное заключение и доказано утверждение.

Установленная в настоящем подразделе координируемость в отношении к ГЗ использована для синтеза ГСУ, при помощи которого для ИСС  $N$  достигается путем реализации управляющими подсистемами локальных алгоритмов оперативного управления (ЛА) отдельными ЛС различного уровня иерархии  $N_i, i \in I$ .

#### 4.6. Выводы

1. Формализована иерархическая декомпозиция топологической структуры ИСС, порождаемая иерархической декомпозицией ИСС на отдельные ЛС по функциональному принципу.

2. Разработан подход к формализации состояния технической исправности, а также ЛЦ и порождаемых ими ЛЗ для отдельных ЛС различного уровня иерархии. На основании такого подхода формализованы условия, реализующие принцип координируемости ЛЦ и порождаемых ими ЛЗ для нижестоящих ЛС по отношению к соответствующим ЛЦ и ЛЗ непосредственно вышестоящих ЛС в иерархически организованных ИСС.

3. Разработан подход к формализации ЛЦ и ЛЗ для ЛС низшего уровня иерархии, а также ГЦ и ГЗ для иерархически организованных ИСС. На основании такого подхода формализованы условия, реализующие принцип координируемости ЛЦ и ЛЗ для ЛС низшего уровня иерархии по отношению к соответствующим ГЦ и ГЗ для иерархически организованных ИСС.

4. В аспекте конкретизации многоуровневого подхода формализованы условия, реализующие принцип координируемости ЛЦ и ЛЗ для ИСС по отношению к соответствующим ЛЦ и ЛЗ для ИСС в реальном времени двухуровневых ИСС.

5. Формализованы условия координируемости ЛЦ и ЛЗ для ИСС по отношению к ГЦ и ГЗ для реальных двухуровневых ИСС.

## Раздел 5 ОСНОВАННИЕ КОНЦЕПТУАЛЬНЫХ ОСНОВ ИЕРАРХИЧЕСКОЙ ОРГАНИЗАЦИИ СИСТЕМ ОПЕРАТИВНОГО УПРАВЛЕНИЯ ИНЖЕНЕРНЫМИ СЕТЕВЫМИ СИСТЕМАМИ

### 1. Декомпозиция управляющих систем с изменяющейся иерархической структурой

Классическим подходом к иерархической декомпозиции управляющих систем является представление последних в виде совокупности независимых и взаимодействующих между собой по иерархическому принципу отдельных подсистем [88].

В данном подразделе предлагается концептуально иной подход к декомпозиции иерархических структур управляющих систем. Рассмотрим возможность предлагаемого подхода. В соответствии с [54] глобальная задача формирования сложного решения может быть декомпозирована на ряд локальных локальных задач (ЛЗ), решаемых в определенном порядке. При этом решение каждой ЛЗ определяется ее приоритетом, степенью важности, а следовательно, и уровнем иерархии в системе. При этом решения предыдущих ЛЗ конкретизируют последующие ЛЗ, доставляя дополнительную информацию для их решения.

В соответствии с [54] существует класс иерархических структур, в котором при определенных изменениях исходной внешней информации, необходимой для решения ГЗ, происходит изменение степени значимости, приоритетов отдельных ЛЗ при формировании решения ГЗ. Следовательно, важности от изменения внешних исходных данных для формирования решения ГЗ происходит изменение уровня иерархии отдельных ЛЗ. Поэтому ЛЗ, входящие в состав изменяющихся иерархических структур, должны предполагать возможность их решения в различном порядке, что дает возможность изменения иерархической структуры ГЗ. ЛЗ, обладающие тем свойством, что могут быть решены в любой последовательности при формировании решения ГЗ в зависимости от конкретных внешних условий, назовем универсальными локальными задачами (УЛЗ). Один класс УЛЗ рассмотрен в [54].

Алгоритм формирования решения ГЗ назовем глобальным алгоритмом (ГА). Алгоритм формирования решения каждой ЛЗ на соответствующем локальном алгоритмом (ЛА). В силу иерархической декомпозиции ГЗ на определенную последовательность ЛЗ имеет соответствующая иерархическая декомпозиция ГА на определенную последовательность ЛА. Такая декомпозиция определяет очередность последовательности реализации ЛА в процессе реализации ГА. При входная (результатирующая) информация предыдущего ЛА является исходной для последующего.

Исходя из соотношения определений ГЗ и ЛЗ, а также ГА и ЛА, можно заключить, что изменяющаяся иерархическая структура ЛЗ при решении порождает соответственно изменяющуюся иерархическую структуру в процессе реализации ГА. При этом ЛА должны предполагать возможные их реализации в различном порядке, соответствующем последовательности решения ЛЗ в изменяющихся условиях. ЛА, обладающие тем свойством, что могут быть реализованы в любой последовательности в процессе реализации ГА, назовем универсальными локальными алгоритмами (УЛА).

Будем считать, что существует такая система, функциональным назначением которой является решение ГЗ путем реализации соответствующего ГА. Такую систему назовем глобальной системой управления (ГСУ). Аналогично предположим существование таких систем функциональным назначением каждой из которых является решение определенной ЛЗ путем реализации соответствующего ЛА. Каждую такую систему будем называть определенной локальной системой управления (ЛСУ).

Исходя из соотношения определений ГЗ и ЛЗ, а также ГА и ЛА, можно заключить, что ГЗ и ГА представляют последовательно порождающие друг друга иерархические структуры соответственно ЛЗ и ЛА. По определению каждой ЛСУ соответствуют ЛЗ и реализующий ее ЛА. Поэтому можно заключить, что имеет место иерархическая декомпозиция ГСУ на определенным образом взаимосвязанные и взаимодействующие между собой ЛСУ. Такая декомпозиция порождена декомпозицией ГЗ на соответствующей ей декомпозицией ГА на ЛА.

Исходя из соотношения определений ГЗ и ЛЗ, ГА и ЛА, а также ГСУ, можно заключить, что изменения иерархических структур ГЗ порождают изменение иерархической структуры ГСУ. Изменение иерархической структуры ГСУ обусловлено тем, что при существовании изменяющейся внешней информации для реализации функционального назначения ГСУ необходимо изменение последовательности (очередности порядка) взаимодействия между собой отдельных ЛСУ. ЛСУ, обладающие тем свойством, что в процессе функционирования ГСУ могут быть взаимосвязанными и взаимодействовать между собой в любом порядке

назовем универсальными локальными системами управления (УЛСУ). При этом каждая УЛСУ в соответствии со своим функциональным назначением решает определенную УЛЗ путем реализации соответствующего УЛА.

На основании рассмотрения концептуальных аспектов декомпозиции изменяющихся иерархических структур можно заключить следующее. Функционально такая декомпозиция может быть представлена как система из последовательно порождающих друг друга изменяющихся иерархических структур: иерархии УЛЗ при решении ГЗ, иерархии УЛА при реализации ГА, иерархии УЛСУ в процессе функционирования ГСУ. Предлагаемый в данном подразделе подход к декомпозиции изменяющихся иерархических структур допускает следующую формализацию.

Пусть  $P$  - определенная ЛЗ;  $p \in P$ , где  $P$  - конечное множество таких ЛЗ, последовательное решение которых в определенном порядке приводит к решению ГЗ. Пусть далее  $a_p$  - определенный ЛА, реализующий процесс решения ЛЗ  $p$ ,  $a_p \in A$ , где  $A$  - конечное множество таких ЛА, последовательная реализация которых в определенном порядке суть реализация ГА. Пусть также  $S_p$  - определенная ЛСУ, функциональным назначением которой является решение ЛЗ  $p$  путем реализации соответствующего ЛА  $a_p$ . В этом случае ЛСУ  $S_p$  представляется возможным формализовать упорядоченной парой  $S_p = \{p, a_p\}$ . Будем предполагать, что  $S_p \in S$ , где  $S$  - конечное множество ЛСУ, взаимосвязь которых и взаимодействие между которыми в определенной последовательности реализуют функциональное назначение ГСУ.

На основании предположения о последовательном порождении иерархических структур ЛЗ, ЛА и ЛСУ имеет место биективное отображение множества  $P$  на  $A$ , устанавливаемое соотношением:  $p \leftrightarrow a_p$ , а также множества  $A$  на  $S$ , устанавливаемое соотношением:  $a_p \leftrightarrow S_p$ . Используя транзитивность биекции [46], можно заключить, что имеет место биективное отображение множества  $P$  на  $S$ , устанавливаемое соотношением:  $p \leftrightarrow S_p$ .

Приоритеты отдельных ЛЗ, последовательность их решения в процессе реализации ГЗ, естественно в общем случае задать отношением частичной упорядоченности  $\varphi$  на множестве  $P$  [46]. Отношение частичной упорядоченности на множестве  $P$  означает, что если  $p \varphi q$ , то вначале решается ЛЗ  $p$ , имеющая более высокий приоритет, а затем ЛЗ  $q$ , приоритет которой более низкий; где  $p, q \in P$ . При этом решение предыдущей ЛЗ  $p$  конкретизирует некоторые переменные и параметры ЛЗ  $q$ , доставляя необходимую информацию для формирования соответствующего решения.

В соответствии с предлагаемой в данном подразделе функционализацией иерархической декомпозиции решение каждой ЛЗ

может быть получено путем реализации соответствующего ЛА. По-  
естественно предположить существование отношения изоморфизма  
множествами  $P$  и  $A$ . Из этого предположения следует, что множество  
же, как и множество  $P$ , упорядочено отношением частичной строгости  
упорядоченности  $\varphi$ . При этом  $a_p \varphi a_q$  тогда и только тогда, когда  $p \varphi q$ ,  
 $q \in P$ ;  $a_p, a_q \in A$ .

Отношение частичной строгой упорядоченности  $\varphi$  на множестве  
устанавливаемое отношением изоморфизма с множеством  $P$ , означает,  
если  $a_p \varphi a_q$ , то вначале реализуется  $a_p$ , а затем  $a_q$ . При этом выходная  
информация, полученная в результате реализации ЛА  $a_p$ , является исходной  
для ЛА  $a_q$ .

В соответствии с предлагаемой в данном подразделе  
концептуализацией иерархической декомпозиции, решение определенных  
ЛЗ может быть получено путем реализации соответствующего ЛА в  
процессе функционирования определенной ЛСУ. Поэтому естественно  
предположить существование отношения изоморфизма между  
множествами  $A$  и  $S$ . Из этого предположения следует, что множество  
же, как и множество  $A$ , упорядочено отношением строгой частичной  
упорядоченности  $\varphi$ . При этом  $S_p \varphi S_q$  тогда и только тогда, когда  $a_p \varphi a_q$ ,  
 $a_p, a_q \in A$ ;  $S_p, S_q \in S$ . Отношение строгой частичной упорядоченности  
множестве  $S$ , устанавливаемое отношением изоморфизма с множеством  
означает, что если  $S_p \varphi S_q$ , то вначале происходит процесс  
функционирования ЛСУ  $S_p$  по реализации ЛА  $a_p$ , а затем ЛСУ  $S_q$  по  
реализации ЛА  $a_q$ . При этом выходная информация, полученная в  
результате функционирования ЛСУ  $S_p$ , является исходной для  
функционирования ЛСУ  $S_q$ . Таким образом, в процессе реализации  
предлагаемого в настоящей работе подхода к декомпозиции иерархических  
структур установлены отношения изоморфизма между множествами  $P$  и  $S$ ,  
а также между множествами  $A$  и  $S$ . Поскольку отношение изоморфизма  
представляет отношение эквивалентности [46], в силу транзитивности  
последнего имеет место отношение изоморфизма между упорядоченными  
множествами  $P$  и  $S$ . Такое отношение означает, что  $S_p \varphi S_q$  тогда и только  
тогда, когда  $p \varphi q$ , где  $p, q \in P$ ;  $S_p, S_q \in S$ .

В соответствии с рассматриваемой в данном подразделе  
концептуализацией изменяющиеся иерархические структуры предполагают  
различные последовательности (порядки) формирования решения  
отдельных ЛЗ в процессе решения ГЗ. Это соответствует различным  
отношениям упорядоченности  $\varphi$  на множестве  $P$ . Элементы  
формализующие различные возможные упорядоченности, образуют  
множество возможных упорядоченностей  $\Phi$  на множестве  $P$ , где  $\varphi \in \Phi$ .  
Следовательно, УЛЗ являются такие ЛЗ, которые допускают решения

При каждом фиксированном отношении упорядоченности  $\varphi$  имеет  
определенная иерархическая структура на множестве  $P$ , а  
соответственно, в силу изоморфизма упорядоченных этим отношением  $\varphi$   
множества  $P$ ,  $A$  и  $S$  - на изоморфных множествах  $A$  и  $S$ , где  $\varphi \in \Phi$ .  
Следовательно, множество  $\Phi$  порождает семейство отношений  
изоморфизма между упорядоченными множествами  $P$ ,  $A$  и  $S$  для  $\forall \varphi \in \Phi$ .  
При этом УЛЗ являются такие ЛА, которые допускают реализацию  
соответствующих ЛЗ при  $\forall \varphi \in \Phi$ . Аналогично, УЛСУ являются такие ЛСУ,  
которые способны решать определенные ЛЗ путем реализации  
соответствующих ЛА при  $\forall \varphi \in \Phi$ .

Таким образом, предлагаемый подход к декомпозиции изменяющихся  
иерархических структур может быть формализован семейством отношений  
изоморфизма между множествами УЛЗ  $P$ , УЛА  $A$  и УЛСУ  $S$  при различных  
отношениях упорядоченности  $\varphi$  на изоморфных множествах из множества  
возможных упорядоченностей  $\Phi$ . Графическая интерпретация  
предлагаемого подхода к декомпозиции изменяющихся иерархических  
структур представлена в [80].

Настоящий подход к декомпозиции изменяющихся иерархических  
структур представляется полезным в том аспекте, что рассматриваемые  
иерархические структуры УЛЗ, УЛА и УЛСУ, последовательно  
взаимосвязанные друг друга, имеют относительную самостоятельность. Это  
означает в случае необходимости рассматривать иерархические структуры  
либо на каком-нибудь одном определенном уровне - УЛЗ, УЛА или УЛСУ,  
либо на некоторых взаимосвязанных между собой уровнях - УЛЗ и УЛА,  
УЛА и УЛСУ, УЛЗ и УЛСУ. Такая возможность позволяет в некоторых  
случаях ограничить объем, а следовательно и упростить решение  
различных прикладных задач анализа и синтеза изменяющихся  
иерархических структур управляющих систем. В частности, предлагаемый  
подход использован при разработке процесса управления оросительной  
системой в условиях дефицита ЦП, а также в аварийных ситуациях.

## 5.2. Формализованное описание координирующих связей в иерархически организованных управляющих системах

Одним из основных принципов иерархической организации системы  
является приоритет действий или право вмешательства подсистем верхнего  
уровня иерархии по отношению к подсистемам нижнего уровня [88, 90].  
Этот принцип предполагает, что в ГСУ некоторые ЛСУ, называемые  
координирующими, находятся под влиянием или управляются другими ЛСУ,

называемыми вышестоящими. В соответствии с указанным принципом в процессе функционирования иерархически организованной системы происходит передача командных сигналов от вышестоящих ЛСУ нижестоящим (подчиненным) ЛСУ. Исходя из [88, 90], указанным вертикальным воздействиям назовем координирующими.

Естественно предположить, что для реализации указанных воздействий в ГСУ отдельные ЛСУ должны быть определенным образом связаны между собой. Такие вертикальные связи ЛСУ, позволяющие реализовать координирующие воздействия, назовем координирующими связями.

В соответствии с [72] рассмотрим подходы к формализации координирующих связей в иерархически организованных системах. Для достижения этой цели определим, каким образом должны быть связаны ЛСУ в иерархически организованной ГСУ, чтобы вышестоящие (координирующие) ЛСУ были в состоянии оказывать координирующие воздействия на соответствующие подчиненные им (координируемые) ЛСУ. Будем считать, что такая возможность имеет место, если выполнены следующие

**Постулат 1.** Каждая ЛСУ может оказывать координирующие воздействия только на координируемые (нижестоящие, подчиненные) по отношению к рассматриваемой ЛСУ.

Сформулированный постулат порождает два следствия.

**Следствие 1.** Никакая ЛСУ не может оказывать координирующие воздействия на себя самое.

**Следствие 2.** Никакая ЛСУ не может оказывать координирующие воздействия на координирующие (вышестоящие, командные) ЛСУ по отношению к рассматриваемой ЛСУ.

С целью реализации возможных подходов к формализации координирующих связей в иерархически организованной ГСУ введем следующие обозначения и понятия. При этом будем использовать терминологию, принятую в [13, 72, 94].

Множество ЛСУ, входящих в иерархическую ГСУ, обозначим  $X$ . На множестве  $X$  координирующие связи отдельных ЛСУ  $x \in X$  формализуем отображением  $\Gamma$  следующим образом. Для ЛСУ  $x$  отображение  $\Gamma$  определяет подмножество  $\Gamma(x)$  ЛСУ, являющихся непосредственно координируемыми относительно рассматриваемой ЛСУ  $x$ . Естественно предположить, что транзитивное замыкание отображения  $\Gamma$  определяет подмножество  $\bar{\Gamma}(x)$  всех ЛСУ, координируемых относительно ЛСУ  $x$  непосредственно, так и через посредство других ЛСУ. Из смысла придаваемого отображению  $\Gamma$ , следует, что для ЛСУ  $x$  прообраз  $\Gamma^{-1}(x)$  определяет подмножество  $\Gamma^{-1}(x)$  ЛСУ, оказывающих координирующие

воздействия непосредственно на рассматриваемую ЛСУ  $x$ . Транзитивное же замыкание прообраза  $\Gamma^{-1}$  определяет подмножество  $\bar{\Gamma}^{-1}(x)$  всех ЛСУ, оказывающих координирующие воздействия на рассматриваемую ЛСУ  $x$  (как непосредственно, так и через посредство других ЛСУ).

Указанные обозначения и понятия, формализующие координирующие связи ЛСУ в иерархически организованной ГСУ, позволяют выразить постулат в следующем виде:

$$\left( (x) \cup \bar{\Gamma}^{-1}(x) \right) \cap \bar{\Gamma}(x) = \emptyset. \quad (5.1)$$

Из соотношения (5.1) можно формально получить следствия 1 и 2 в виде соотношений (5.2) и (5.3):

$$(x) \cap \bar{\Gamma}(x) = \emptyset; \quad (5.2)$$

$$\bar{\Gamma}^{-1}(x) \cap \bar{\Gamma}(x) = \emptyset. \quad (5.3)$$

Координирующие связи между ЛСУ в иерархической ГСУ допускают формализацию в виде строгого частного упорядочения на множестве  $X$ . Назовем, что отображение  $\Gamma$ , формализующее координирующие связи ЛСУ в иерархической ГСУ, которое удовлетворяет условию (5.1), порождает отношение строгого частного упорядочения на множестве  $X$ .

Для этого достаточно предположить, что для  $a, b \in X$  имеет место соотношение  $a \geq b$ , если  $b \in \bar{\Gamma}(a)$ . При этом из условия (5.2) следует, что  $\forall a, b \in X$  имеет место соотношение  $a \neq b$ . Поэтому в данном случае имеет место соотношение  $a > b$  и, следовательно, отображение  $\Gamma$  на  $X$  порождает отношение строгого частного упорядочения между элементами множества  $X$ . Если  $a > b$  и нет такого другого элемента  $c$  во множестве  $X$ , что  $a > c > b$ , то ЛСУ  $b$  является непосредственно координируемой относительно ЛСУ  $a$ , а ЛСУ  $a$  - непосредственно координирующей для ЛСУ  $b$ . Это соответствует условию  $b \in \Gamma(a)$ . Если же  $\exists c \in X$ , для которого имеет место соотношение  $a > c > b$ , то ЛСУ  $b$  является координируемой относительно ЛСУ  $a$  через посредство других ЛСУ (в частности, ЛСУ  $c$ ), а ЛСУ  $a$  - координирующей для ЛСУ  $b$  через посредство других ЛСУ (в частности, ЛСУ  $c$ ).

Одним из возможных является теоретико-графовый подход к формализации координирующих связей ЛСУ в иерархической ГСУ. Для реализации указанного подхода предположим, что отображение  $\Gamma$  на множестве  $X$  порождает связный моделирующий орграф  $G$ , множеством

вершин которого является  $X$ , а множество дуг  $E$  определено следующим образом. Пара вершин  $(a, b)$  связана дугой  $e \in E$ , если  $b \in \Gamma(a)$ , где  $\Gamma(a)$  — множество вершин, непосредственно координируемых относительно ЛСУ  $a$ . Следовательно, дуга  $e = (a, b)$  означает, что ЛСУ  $b$  является непосредственно координируемой относительно ЛСУ  $a$ , а ЛСУ  $a$  — непосредственно координирующей для ЛСУ  $b$ . Направленный путь  $P_{ab}$  из вершины  $a$  в вершину  $b$  означает, что ЛСУ  $b$  является координируемой по отношению к ЛСУ  $a$  через посредство других соответствующих промежуточных вершин цепи  $P_{ab}$ . Такой вершиной может быть ЛСУ  $c$ , если  $c \in P_{ab}$ . В этом случае ЛСУ  $a$  является координирующей для ЛСУ  $b$  через посредство других ЛСУ (в частности ЛСУ  $c$ ). В силу соотношений (5.2) и (5.3) моделирующий орграф содержит петель и ориентированных циклов (контуров). Следовательно, координирующие связи ЛСУ в иерархической ГСУ допускают формализацию в виде связанного бесконтурного моделирующего орграфа, называемого в соответствии с [94] графом строгого частного упорядочения. Графическая интерпретация координирующих связей в иерархически организованных ГСУ приведена в [80].

Различные подходы к формализации координирующих связей в иерархических системах позволяют выбрать наиболее адекватный при решении конкретных задач исследования и синтеза иерархически организованных управляющих систем. В частности, теоретическая и множественная формализация координирующих связей удобна для аналитических исследований таких систем [72, 88, 90]. Формализация координирующих связей в виде строгого частичного упорядочения является большей степени пригодна для алгоритмизации и программной реализации процессов функционирования систем рассматриваемого класса. В соответствии с [72, 90], моделирующий графом координирующие связи удобно представить в иерархически организованных человеко-машинных управляющих системах.

### 5.3. Формализация обратных связей

Другим основополагающим принципом иерархической организации управляющих систем является зависимость действий подсистем верхнего уровня иерархии от фактического исполнения подсистемами нижнего уровня своих функций [88]. Этот принцип предполагает, что некоторые ЛСУ, называемые вышестоящими (координирующими, командными), получают ответную информацию в виде ответных сигналов о характере и степени успешности реализации координирующих воздействий от нижестоящих (координируемых, подчиненных) ЛСУ. В соответствии с рассматриваемым принципом, в процессе функционирования иерархи-

зированной ГСУ происходит передача ответной информации в виде ответных сигналов от нижестоящих ЛСУ к вышестоящим ЛСУ. В соответствии с [74, 88], указанные вертикальные воздействия будем называть ответными воздействиями (ответной информацией) или обратными связями.

Предположим, что для реализации указанных воздействий вышестоящие ЛСУ, входящие в состав иерархически организованных ГСУ, должны быть определенным образом связаны между собой. Следуя [88], обратные связи между ЛСУ, позволяющие передать ответные сигналы вышестоящим (координирующим) ЛСУ от координируемых ими нижестоящих ЛСУ об исполнении последними своих функций, будем называть обратными связями. В соответствии с [88], качество функционирования иерархически организованных ГСУ обеспечивается обратными связями отдельных ЛСУ.

В соответствии с [73] рассмотрим возможные модели, формализующие обратные связи ЛСУ, входящих в состав иерархически организованных

Для реализации указанной цели рассмотрим, каким образом должны быть связаны ЛСУ в иерархически организованной ГСУ, чтобы вышестоящие (подчиненные, координируемые) ЛСУ были в состоянии оказывать ответные воздействия (передавать ответную информацию) на координирующие вышестоящие (координирующие, командные) ЛСУ. Будем считать, что такая возможность имеет место, если выполняется следующий постулат.

**Постулат 2.** Каждая ЛСУ может оказывать ответные воздействия по каналам обратных связей только на вышестоящие (координирующие, командные) ЛСУ по отношению к рассматриваемой ЛСУ.

Сформулированный постулат порождает три следствия.

**Следствие 1.** Никакая ЛСУ не может оказывать ответные воздействия по каналам обратных связей на себя самое.

**Следствие 2.** Никакая ЛСУ не может оказывать ответные воздействия по каналам обратных связей на нижестоящие (подчиненные, координируемые) ЛСУ по отношению к рассматриваемой ЛСУ.

**Следствие 3.** Каждая ЛСУ может получать ответные воздействия по каналам обратных связей только от координируемых (подчиненных, координируемых) ЛСУ по отношению к рассматриваемой ЛСУ.

Несмотря на [88], в иерархически организованных системах первичными являются координирующие связи, которые имеют определяющее значение по отношению к обратным связям. Поэтому для формализации последних будем использовать модели координирующих связей, содержащиеся в параграфе 3.2 настоящей работы.

С целью реализации возможных подходов к моделированию обратных связей в иерархически организованной ГСУ введем следующие обозначения и понятия.

Пусть  $X$  - множество ЛСУ, входящих в состав иерархически организованной ГСУ. Будем предполагать, что координирующие и обратные связи отдельных ЛСУ  $x \in X$  формализованы отображением  $\Gamma$  на  $X$  в соответствии с моделью, содержащейся в подразделе 5.2 настоящей работы. Обозначим обратные связи отдельных ЛСУ  $x \in X$  формализуем отображением  $\Delta$  на  $X$  следующим образом. Для отдельной ЛСУ  $x$  отображение  $\Delta$  определяет подмножество  $\Delta(x)$  ЛСУ, получающих ответные воздействия по каналам обратных связей непосредственно от рассматриваемой ЛСУ  $x$ .

Естественно предположить, что транзитивное замыкание отображения  $\Delta$  определяет подмножество  $\bar{\Delta}(x)$  всех ЛСУ, получающих ответные воздействия по каналам обратных связей от рассматриваемой ЛСУ  $x$  непосредственно, так и через посредство других ЛСУ). Из свойства транзитивности придаваемого отображению  $\Delta$ , следует, что для ЛСУ  $x$  прообраз  $\Delta^{-1}(x)$  определяет подмножество ЛСУ, оказывающих ответные воздействия по каналам обратных связей непосредственно на рассматриваемую ЛСУ  $x$ . Транзитивное же замыкание прообраза  $\Delta^{-1}(x)$  определяет подмножество  $\bar{\Delta}^{-1}(x)$  всех ЛСУ, оказывающих ответные воздействия по каналам обратных связей на рассматриваемую ЛСУ  $x$  непосредственно, так и через посредство других ЛСУ).

Введенные в данном подразделе обозначения и понятия формализующие координирующие и обратные связи ЛСУ в иерархически организованной ГСУ, позволяют выразить сформулированный постулат 2 следующим образом:

$$\{x\} \cup \bar{\Gamma}(x) \cap \bar{\Delta}(x) = \emptyset; \quad (5.4)$$

$$\bar{\Delta}(x) \subset \bar{\Gamma}^{-1}(x). \quad (5.5)$$

Исходя из соотношений (5.4) и (5.5), формализующих указанный постулат, можно получить выражения (5.6) - (5.8), соответствующие формализующие следствия 1 - 3, порождаемые постулатом 2:

$$\{x\} \cap \bar{\Delta}(x) = \emptyset; \quad (5.6)$$

$$\bar{\Gamma}(x) \cap \bar{\Delta}(x) = \emptyset; \quad (5.7)$$

$$\bar{\Delta}^{-1}(x) \subset \bar{\Gamma}(x). \quad (5.8)$$

В частности, из соотношения (5.6) следует, что ЛСУ  $x$  не может оказывать ответные воздействия по каналам обратных связей на себя самое. Соотношением (5.7) такие воздействия запрещается оказывать со стороны ЛСУ  $x$  на все нижестоящие (подчиненные) ЛСУ по отношению к рассматриваемой ЛСУ  $x$ . Смысл соотношения (5.8) состоит в том, что ответные воздействия по каналам обратных связей со стороны ЛСУ  $x$  могут оказываться лишь на те ЛСУ, которые являются координирующими по отношению к рассматриваемой ЛСУ  $x$ .

Соотношения (5.4) - (5.8) реализуют теоретико-множественный подход к формализации обратных связей в иерархически организованных управляющих системах. Из этих соотношений следует, что отображение  $\Gamma$  порождает отношение строгого частичного упорядочения на множестве  $X$ , реализующее координирующие связи ЛСУ в иерархически организованной ГСУ. Аналогично можно показать, что отображение  $\Delta$  порождает отношение строгого частичного упорядочения на множестве  $X$ . Следовательно, также возможным является подход к формализации обратных связей в иерархически организованных управляющих системах в виде строгого частичного упорядочения. Исходя из этого, можно заключить, что отображение  $\Gamma$  на множестве  $X$  порождает некоторый бесконтурный моделирующий орграф  $G$ , называемый в соответствии с [94] графом строгого частичного упорядочения, который реализует координирующие связи в иерархически организованной ГСУ. Аналогично можно показать, что отображение  $\Delta$  на множестве  $X$  порождает обязательно связный бесконтурный моделирующий орграф  $H$ , являющийся графом строгого частичного упорядочения, который реализует обратные связи в иерархически организованной ГСУ. Такой подход имеет место также и теоретико-графовый подход к формализации обратных связей в иерархически организованных управляющих системах. Такая интерпретация обратных связей в иерархически организованных ГСУ приведена в [80].

Различным конкретным задачам исследования и синтеза иерархически организованных систем адекватны соответствующие возможные подходы к формализации обратных связей в таких системах. В частности, для рассмотрения концептуальных вопросов и проведения аналитических исследований иерархически организованных управляющих систем более эффективным является теоретико-множественный подход. В целях же

алгоритмической и программной реализации процессов функционирования иерархически организованных управляющих систем адекватной в той мере является формализация обратных связей в виде отношений структурного частичного упорядочения. С учетом специфики иерархически организованных человеко-машинных управляющих систем, обратные связи в таких системах более удобно представить в виде моделирующих [45, 73, 85, 88].

#### 5.4. Формирование координирующих воздействий в иерархически организованных управляющих системах

В работе по иерархическим системам [88], ставшей классической, а также в других работах [90, 133] предполагается, что координирующие воздействия вышестоящих (координирующих) подсистем на нижестоящие (координируемые) подсистемы осуществляются заданием соответствующих векторов параметров. Однако такой подход к моделированию координирующих воздействий справедлив лишь для определенного типа иерархически организованных управляющих систем. Существуют иерархические системы, в которых координирующие воздействия имеют более сложную структуру. В этом случае для формализации координирующих воздействий необходимо разработать модели, адекватные соответствующей более сложной их структуре.

В соответствии с [55] рассмотрим концептуализацию координирующих воздействий в иерархически организованных управляющих системах, позволяющую реализовать более общий, чем [90], подход к их моделированию. Координирующие воздействия определяют как информацию, полученную в результате формирования локального решения вышестоящей (координирующей) подсистемой, которая передается рассматриваемой нижестоящей (координируемой) подсистеме с целью использования этой информации для формирования соответствующего локального решения координируемой подсистемой.

Одним из возможных путей использования такой информации координируемой подсистемой для формирования соответствующего локального решения является конкретизация каким-либо способом переменных (параметров) рассматриваемой подсистемы.

Возможные способы конкретизации переменных (параметров) подсистемы координирующими воздействиями постулируем следующим образом.

1. Задание определенных значений некоторых переменных (параметров).

1. Задание ограничений, определяющих области возможных значений некоторых переменных (параметров).

2. Задание взаимосвязей (взаимозависимостей) между некоторыми переменными (параметрами).

В целях реализации предлагаемого в данном подразделе подхода к моделированию координирующих воздействий в иерархически организованных управляющих системах предположим, что переменные (параметры)  $x$  рассматриваемой координируемой подсистемы являются элементами множества  $X$ ;  $x \in X$ . В соответствии с предлагаемой концептуализацией координирующих воздействий, последние различным образом конкретизируют элементы  $x \in X$ . На основании перечисленных способов, определяющих возможные способы конкретизации элементов множества  $X$  выделим следующие подмножества.

1. Множество  $X^C \subset X$ , элементы которого координирующим воздействием определяются численно:

$$X^C \mid \forall x \in X^C, x^C = const. \quad (5.9)$$

2. Множество  $X^V \subset X$ , на элементы которого координирующим воздействием налагаются ограничения, определяющие области возможных значений:

$$X^V \mid \forall x \in X^V, x \in [x^*, x^{**}], x^* \neq x^{**}; \quad (5.10)$$

где  $x^*$  и  $x^{**}$  - соответственно нижняя и верхняя границы области возможных изменений элемента  $x$ .

3. Множество  $X^R \subset X$ , на элементы которого координирующим воздействием налагается множество взаимосвязей  $R$ . При этом отдельные взаимосвязи  $r \in R$  определяются соотношениями, которым должны удовлетворять элементы  $x \in X^R$ :

$$X^R \mid \forall r \in R, \exists X_r^R \subset X^R; \quad (5.11)$$

где  $X_r^R$  - подмножество элементов из множества  $X^R$ , связанных соотношением  $r \in R$ .

Исходя из соотношений (5.9) - (5.11), установим взаимосвязи между множествами  $X^C$ ,  $X^V$  и  $X^R$ .

Если некоторый элемент  $x \in X^C$ , то на основании соотношения (5.9) координирующим воздействием для него задается определенное значение  $x$

$= X^C$ . Этим исключается задание для рассматриваемого элемента множества возможных изменений  $[X^*, X^{**}]$ , что имеет место на основании соотношения (5.10) в случае  $x \in X^V$ . И наоборот, если некоторый элемент  $x \in X^V$ , то на основании соотношения (5.10) координирующим воздействием для него определяется область возможных изменений  $[X^*, X^{**}]$ . Этим исключается задание для рассматриваемого элемента определенного значения  $x = X^C$ , что имеет место на основании соотношения (5.9) в случае  $x \in X^C$ .

Следовательно, множества  $X^C$  и  $X^V$  не могут иметь общих элементов, поэтому справедливо соотношение:

$$X^C \cap X^V = \emptyset. \quad (5.11)$$

Определение элементов  $x \in X^C$  численно соотношениями (5.9) задание областей возможных изменений для элементов  $x \in X^C$  соотношениями (5.10) не исключает возможности наложения координирующим воздействием взаимосвязей (взаимозависимостей) между такими элементами. Поэтому на основании соотношения (5.10) указанные элементы могут входить в подмножества  $X_r^R \subset X^R$ , где  $r \in \{1, 2, \dots, n\}$ . Следовательно, в общем случае могут иметь место соотношения:

$$X^C \cap X^R \neq \emptyset; \quad (5.12)$$

$$X^V \cap X^R \neq \emptyset. \quad (5.13)$$

Соотношения (5.12) - (5.14) формализуют взаимосвязи между множествами  $X^C, X^V$  и  $X^R$ .

Множество  $X^D \subset X$ , элементы которого конкретизированы каким-либо способом координирующим воздействием, определяется следующим соотношением:

$$X^D = X^C \cup X^V \cup X^R. \quad (5.14)$$

Множества  $X^C, X^V$  и  $X^R$ , входящие в соотношение (5.15), естественно определены соотношениями (5.9) - (5.11).

Соотношения (5.9) - (5.15) реализуют предлагаемый подход к формализации координирующих воздействий в иерархически организованных управляющих системах. Графическая интерпретация предлагаемого подхода к формализации координирующих воздействий в иерархически организованных управляющих системах представлена в [80].

Предлагаемый в данном подразделе подход использован для формализации координирующих воздействий в системах, управляющих иерархически организованными ИСС. Объекты такого класса, представляющие иерархически взаимосвязанные и взаимодействующие между собой в процессе функционирования ЛС, рассмотрены в разделе 3 настоящей работы. Выделим в иерархически организованной ИСС вышестоящую (координирующую) ЛС, к которой непосредственно относятся несколько нижестоящих (координируемых) ЛС. Используя предложенную подсистему, рассмотрим координирующие воздействия, осуществляемые вышестоящей ЛС, на одну из подключенных к ней нижестоящих ЛС. В этой связи элементами множества  $X^C$  естественно считать напоры во входных вершинах рассматриваемой нижестоящей ЛС, численно определяются координирующим воздействием со стороны вышестоящей ЛС. Например,

$$X^C = \{x_1 = 22,8; x_2 = 22,6; x_3 = 22,4; x_4 = 22,2; x_5 = 22,0; x_6 = 21,8; x_7 = 21,6; x_8 = 21,5; x_9 = 21,7; x_{10} = 21,9; x_{11} = 22,1; x_{12} = 22,3; x_{13} = 22,5; x_{14} = 22,7\}.$$

С целью обеспечения вышестоящей ЛС допустимых условий функционирования одновременно для нескольких подключенных к ней нижестоящих ЛС существенно, чтобы напоры в определенных промежуточных вершинах подключенных сетей находились в заданных областях их возможных значений [136]. В этой связи элементами множества  $X^V$  естественно считать такие напоры в промежуточных вершинах рассматриваемой нижестоящей ЛС, которые координирующим воздействием со стороны вышестоящей ЛС предполагается поддерживать в заданных областях их возможных значений. Например,

$$X^V = \{x_{15} \in [21,5; 22,5]; x_{16} \in [21,3; 22,3]\}.$$

Для обеспечения ЦП со стороны вышестоящей ЛС всех подключенных к ней нижестоящих ЛС необходимо наложить ограничения на суммарные

расходы ЦП в выходных вершинах каждой из подключенных ЛС. В связи элементами множества  $X^R$  естественно считать величины расходов ЦП в выходных вершинах рассматриваемой нижестоящей ЛС, на значениях которых координирующим воздействием со стороны вышестоящей ЛС налагается определенное ограничение. Например,

$$X^R = \{x_i; i = 17, \dots, 62 : \sum_{i=17}^{62} x_i \leq 11345\}.$$

Элементами множества  $X^D$  естественно считать параметры (параметры) рассматриваемой нижестоящей ЛС, которые каким-либо образом конкретизированы координирующим воздействием со стороны вышестоящей ЛС.

Поэтому множество  $X^D$  включает элементы множеств  $X^C, X^R$ :  $X^D = \{x_i; i = 1, \dots, 62\}$ .

Рассмотренный пример реализует один из возможных прикладных аспектов предлагаемого в данном подразделе подхода к моделированию координирующих воздействий в системах, управляющих иерархически организованными ИСС. Такой подход использован при разработке процессов управления РС системы городского водоснабжения.

### 5.5. Формализация и решение универсальных локальных задач в управляющих системах с изменяющейся иерархической структурой

Системы принятия сложных решений, к которым, в частности относятся ГСУ иерархически организованными ИСС, в соответствии с целесообразно организовать по иерархическому принципу. Концептуально такие системы могут быть представлены как многослойные иерархические структуры, каждая из которых представляет определенную последовательность ЛЗ, реализующих ГЗ системы. Предполагается, что в этом определены очередность, порядок решения ЛЗ в процессе формирования решения ГЗ многослойной системы. Порядок решения каждой ЛЗ определяется ее приоритетом, степенью значимости, следовательно и уровнем иерархии в системе. При этом решение предыдущей ЛЗ конкретизирует рассматриваемую ЛЗ, доставляя исходную информацию для ее решения. Концептуализация многослойных систем иерархической структуры которых неизменна, рассмотрена в [54]. Примером может служить ГСУ иерархически организованной ИСС

где известными являются энергетические ресурсы и запасы ЦП и функционирующая система приоритетов отдельных ЛС в иерархически организованной ИСС. В этом случае ГЗ расчета потокораспределения в ИСС можно реализовать как определенную многослойную последовательность реализации ЛЗ расчета ЛР для ЛС различного уровня иерархии. При этом очередность решения отдельных ЛЗ определяется заданной системой приоритетов. В процессе ЛЗ расчета ЛР для определенной ЛС формируется с учетом очередности в начале этого этапа решения ЛЗ для вышестоящих ЛС. Поскольку это условие означает, что ЛР для определенной ЛС формируется, исходя из ресурсов, оставшихся от реализации ЛР для вышестоящих ЛС в заданной системе [37, 45, 88].

Существует класс иерархически организованных систем, в которых при определенном изменении условий их функционирования происходит изменение степени значимости, приоритетов отдельных ЛЗ при формировании решения ГЗ. Изменение степени значимости, приоритетов отдельных ЛЗ порождает изменение очередности, порядка их решения в процессе формирования решения ГЗ системы. Следовательно, в зависимости от определенных условий функционирования изменяется иерархия ЛЗ в многослойной системе принятия решения. Такие системы, или класс которых рассмотрен в [54], назовем изменяющимися иерархическими структурами. Примером может служить ГСУ иерархически организованной ИСС в условиях возможных изменений приоритетов отдельных ЛС. В реальных системах это имеет место при существенных изменениях режимов потребления ЦП отдельными ЛС в условиях дефицита ЦП, а также в аварийных ситуациях. В этом случае необходимо соответствующее изменение последовательности реализации ЛЗ расчета ЛР отдельных ЛС при формировании решения ГЗ ИСС. Поскольку иерархическая структура ГСУ иерархически организованной ИСС в рассматриваемом примере определяется очередностью реализации ЛЗ в процессе формирования ГЗ, изменение такой последовательности является изменением иерархической структуры системы.

ЛЗ, входящие в состав указанных систем, должны предполагать возможность их решения в различном порядке, создавая возможность изменения иерархической структуры таких систем. ЛЗ, обладающие тем свойством, что могут быть решены в любой последовательности при формировании решения ГЗ в зависимости от условий, стоящих перед системой, назовем универсальными локальными задачами (УЛЗ). УЛЗ являются предметом исследования в данном подразделе.

Следуя [54], в качестве модели УЛЗ рассмотрим функционал, зависящий относительно любого подмножества своих аргументов. Это определение допускает следующую формализацию. Пусть  $X$  - множество параметров (параметров) УЛЗ. Будем предполагать, что модель УЛЗ

удовлетворяет следующему условию. Для каждого подмножества  $\Lambda$  существует такая функция  $f_\Lambda$ , которая отображает подмножество  $\Lambda$  в дополнение  $X_\Lambda = X \setminus \Lambda$  во множестве  $X$ . Сделанное предположение означает, что каждое подмножество  $\Lambda$  отображается функцией  $f_\Lambda$  в подмножество всех оставшихся элементов  $X_\Lambda$  из множества  $X$  относительно выбранного подмножества  $\Lambda$ . Формально указанное условие имеет вид:

$$(\forall \Lambda \subset X)(\exists) f_\Lambda: \Lambda \rightarrow X_\Lambda. \quad (5.16)$$

При таком подходе семейство всех подмножеств множества  $X$   $\{\Lambda: \forall \Lambda \subset X\}$ , биективно соответствует семейству отображающих функций  $\{f_\Lambda\}: \Lambda \leftrightarrow X_\Lambda$ . Для  $\forall \Lambda \subset X$  соответствующую функцию  $f_\Lambda$  в условии (5.16) будем считать заданной аналитически или в виде вычислительного алгоритма с определенным набором исходных данных. Графическая интерпретация предлагаемого подхода к формализации УЛЗ в управляющих системах с изменяющейся иерархической структурой представлена в [80].

Универсальность рассматриваемой ЛЗ можно показать следующим образом. Для этого достаточно предположить, что элементы какого-либо подмножества  $\Lambda \subset X$  являются известными величинами, конкретизированы решениями предыдущих ЛЗ. Тогда на основании условия (5.16) можно вычислить значения элементов соответствующего дополнения  $X_\Lambda$ . Поскольку в соответствии с (5.16) указана возможность имеет место для  $\forall \Lambda \subset X$ , то можно утверждать универсальности ЛЗ.

Таким образом, процесс формирования решения УЛЗ состоит из нескольких этапов.

1. Конкретизация УЛЗ решениями других ЛЗ, находящихся на более высоких уровнях иерархии по отношению к рассматриваемой УЛЗ. Этот этап состоит в определении значений элементов некоторого подмножества  $\Lambda \subset X$ , что является исходной информацией для определения значений элементов подмножества  $X_\Lambda = X \setminus \Lambda$ .

2. Формирование решения конкретизированной УЛЗ. Этот этап заключается в нахождении значений элементов подмножества  $X_\Lambda$  на основании известных величин, составляющих подмножество  $\Lambda$ , с помощью функции  $f_\Lambda$ , отображающей подмножество  $\Lambda$  на  $X_\Lambda$ .

В результате выполнения рассмотренных этапов будут определены все значения множества  $X$  рассматриваемой УЛЗ. В качестве примера УЛЗ рассмотрим задачу математического программирования, алгоритм решения которой реализован процедурой ее конкретизации решениями ЛЗ более низкого уровня иерархии в процессе формирования решения ГЗ. Модель в данном примере имеет вид:

$$F(X) \rightarrow \max; \quad Q_i(X) \geq 0, \quad i = 1, \dots, m; \quad (5.17)$$

где  $F(X)$  - целевая функция;  $Q_i(X)$  - функции ограничения, налагаемые на переменные, являющиеся элементами множества  $X$ ;  $m$  - число ограничений;  $F$  - целевая функция рассматриваемой УЛЗ.

На уменьшая общности удобно предположить множество  $X$  заданным в виде  $n$ -мерного вектора  $X = (X_1, \dots, X_n)$ , где  $n$  - число элементов множества  $X$ .

Пусть решениями предыдущих ЛЗ конкретизированы значения элементов некоторого подмножества  $\Lambda \subset X$ . Это подмножество так же, как и множество  $X$ , удобно предположить упорядоченным в виде  $k$ -мерного вектора  $\Lambda = (\lambda_1, \dots, \lambda_k)$ , где  $k$  - число элементов множества  $\Lambda$ . Из условия (5.16) следует, что  $k < n$ .

На уменьшая общности удобно также предположить, что вектор  $\Lambda$  задает значения первых  $k$  элементов вектора  $X$ :  $x_j = \lambda_j$ , где  $j = 1, \dots, k$ . В противном случае это можно сделать всегда путем соответствующей перестановки элементов вектора  $X$ .

Конкретизированная УЛЗ в рассматриваемом примере примет следующий вид:

$$F(\lambda_1, \dots, \lambda_k, x_{k+1}, \dots, x_n) \rightarrow \max; \quad Q_i(\lambda_1, \dots, \lambda_k, x_{k+1}, \dots, x_n) \geq 0; \quad i = 1, \dots, m; \quad (5.18)$$

$$F(\lambda_1, \dots, \lambda_k, x_{k+1}, \dots, x_n) \rightarrow \max.$$

Решением конкретизированной УЛЗ определяются значения элементов подмножества  $X_\Lambda = (x_{k+1}, \dots, x_n)$ . Это соответствует отображению подмножества  $\Lambda$  на дополнение  $X_\Lambda$  во множестве  $X$ .

В зависимости от специфики видов ограничений  $Q_i$  и целевой функции  $F$  в соотношениях (5.17) различают определенные классы задач

математического программирования [17]. В связи с этим отображаемая функция  $f_{\Lambda}$  в условии (5.16) реализуется методом, и как следствие алгоритмом решения конкретизированной задачи математического программирования определенного класса, заданной соотношениями. В частности, в задачах нелинейного программирования без ограничений отображения  $f_{\Lambda}$  реализуются с помощью методов прямого поиска, методов Ньютона, квазиньютоновских методов, а также методов сопряженных направлений, порождающих соответствующие вычислительные алгоритмы [17]. Для задач нелинейного программирования с ограничениями отображающие функции  $f_{\Lambda}$  могут быть реализованы на базе алгоритмов, использующих методы возможных направлений, методы штрафов и барьеров, а также методы симплексных плоскостей [17].

Рассмотренные методы решения УЛЗ имеют достаточно общий характер и определяют возможные приложения в реальных системах управления с изменяющейся иерархической структурой. В частности, они использованы для разработки ГСУ иерархически организованной системы городского водоснабжения при существенных изменениях режима потребления ЦП отдельными ПЦП в условиях его дефицита, а также в аварийных ситуациях.

## 5.6. Выводы

1. Предложен один из возможных подходов к декомпозиции иерархически организованных управляющих систем. Концептуально декомпозиция представлена как система трех последовательно порождающих друг друга изменяющихся иерархических структур: УЛЗ, ГЗ, УЛА при реализации ГА, УЛСУ в процессе функционирования ГСУ. Предлагаемый подход формализован семейством отношений изоморфизма между множествами УЛЗ, УЛА и УЛСУ в различных отношениях упорядочения на изоморфных множествах множества возможных упорядоченностей. С учетом специфики иерархически организованных управляющих систем определены прикладные аспекты предлагаемого подхода.

2. Исходя из соответствующей концептуализации, постулированы условия, необходимые для реализации координирующих и обратных связей между подсистемами в иерархически организованных управляющих системах. На основании этого сделаны возможные подходы к формализации координирующих и обратных связей: теоретический, в виде строгого частного упорядочения, а также графовый. Определены прикладные аспекты предлагаемых подходов с учетом специфики реальных управляющих систем соответствующего класса.

Предложенный подход к концептуализации и формализации координирующих и обратных связей в иерархически организованных управляющих системах, а также различные возможные способы конкретизации переменных координируемых подсистем. Предлагаемый подход к формализации при разработке ГСУ иерархически организованными ИСС. Предложен концептуальный подход к моделированию УЛЗ, основанный на многослойных иерархически организованных управляющих системах с изменяющейся структурой. Рассмотрены различные методы решения УЛЗ, определяющие возможные прикладные аспекты предлагаемого подхода.

## Раздел 6 ГЛОБАЛЬНАЯ СИСТЕМА ОПЕРАТИВНОГО УПРАВЛЕНИЯ РЕАЛЬНЫМИ ДВУХУРОВНЕВЫМИ ИНЖЕНЕРНЫМИ СЕТЕВЫМИ СИСТЕМАМИ: МОДЕЛИРОВАНИЕ И ИССЛЕДОВАНИЕ

### 6.1. Принципы организации глобальной системы оперативного управления

В соответствии с необходимостью реализации процессов оперативного управления отдельными ЛС  $N_i$  различного уровня иерархии, входящими в состав ИСС  $N$ , порождаемых соответствующими формализованными в подразделе 4.4 настоящей работы, ГСУ, обозначенным  $C$ , имеет следующую структурную организацию. Она состоит из  $|I|$  ЛСУ, каждая, из которых реализует процесс оперативного управления соответствующей ЛС  $N_i$  в соответствии с ЛЗ, формализованным в подразделе 4.4, где  $i \in I$ .

Для этой цели необходимо, чтобы каждая ЛСУ  $C_i$  составляла замкнутый контур оперативного управления с соответствующей ЛС  $N_i$ , где  $i \in I$ .

В соответствии с моделями ЛС различного уровня иерархии  $N_i$ , где  $i \in I$ , как объектов оперативного управления, построенными в подразделах 3.3 и 3.4 настоящей работы, и исходя из формализации соответствующих ЛЦ, имеют место следующие заключения. Информацией, получаемой каждой ЛСУ  $C_i$  от управляемой ею ЛС  $N_i$ , является вектор напряжений на промежуточных вершинах рассматриваемой ЛС  $Z_i''$ , где  $i \in I$ .

Управляющими воздействиями ЛСУ  $C_0$  на МС  $N_0$  являются указания по изменению режимов функционирования АЭ в соответствии с моделью соответствующей МС, построенной в подразделе 3.4 и критерием оперативного управления, формализованным в подразделе 4.4.

Управляющими воздействиями ЛСУ  $C_i$  на соответствующие РС  $N_i$ , где  $i \in I$ , являются величины изменений параметров (координат) ЛС, в соответствии с моделью таких ЛС, которая построена в подразделе 3.3. Критерием оперативного управления, который формализован в подразделе 4.4,

и выражение 4.5 настоящей работы на основании утверждений 3 и 4 является координируемость ЛЗ для отдельных ЛС  $N_i$  различного уровня иерархии, где  $i \in I$ , по отношению к ГЗ для ИСС  $N$ , поставленной в подразделе 4.4.

Исходя из этого можно заключить, что информационные взаимосвязи между отдельными ЛСУ  $C_i$ , реализующими локальные процессы оперативного управления соответствующими ЛС  $N_i$ , где  $i \in I$ , а также каналы соответствующих информационных воздействий, являются необходимыми.

Особенными особенностями структуры ГСУ  $C$  является наличие замкнутых контуров управления, образуемых каждой ЛСУ  $C_i$  с соответствующей ЛС  $N_i$ , а также отсутствие непосредственных взаимосвязей между отдельными ЛСУ  $C_i$ , где  $i \in I$ .

В этой связи для алгоритмизации процесса оперативного управления ЛС  $N_i$ , необходимо выяснить, означает ли последнее обстоятельство, что ЛСУ  $C_i$  в действительности нет функциональной взаимосвязи или хотя бы все же существует некоторая взаимосвязь, проявляющаяся в процессе оперативного управления объектом рассматриваемого класса.

Для ответа на данный вопрос обратимся к математической модели рассматриваемого потокораспределения в ИСС  $N$ , рассматриваемой в подразделе 1.3 и также к моделям отдельных ЛС различного уровня иерархии, формализованным в подразделах 3.3 и 3.4 настоящей работы. Из этого анализа можно заключить, что между ЛСУ  $C_i$ , входящими в состав ГСУ  $C$  и непосредственно между собой не взаимодействующими, взаимосвязи тем не менее существуют и определяются взаимосвязями установившихся потокораспределений в управляемых ими ЛС  $N_i$ , где  $i \in I$ , входящими в состав ИСС  $N$ .

Несомненным характер таких косвенных взаимосвязей между отдельными ЛСУ  $C_i$ , входящими в состав ГСУ  $C$ , исходя из установленной в подразделе 3.3 взаимосвязи между отдельными ЛС  $N_i$ , входящими в состав ИСС  $N$ , организованный ИСС  $N$ .

Как было показано в подразделе 3.2, настоящей работы объект оперативного управления рассматриваемого класса имеет иерархическую структуру. При этом в соответствии с математической моделью установившегося потокораспределения в ИС, рассмотренной в подразделе 1.3 и также математическими моделями установившихся потокораспределений в отдельных ЛС различного уровня иерархии, построенных в подразделах 3.3 и 3.4 настоящей работы, установившееся потокораспределение в МС  $N_0$  в общем определяет установившиеся потокораспределения в РС  $N_i$  для  $\forall i \in I$ .

непосредственно вышестоящей ЛС, принадлежащего заданной области требуемых его значений, выбрать такие значения векторов состояний (параметров) АЭ и ПЭ для всех непосредственно нижестоящих ЛС, которые принадлежат соответствующим областям их допустимых значений и обеспечивают нахождение векторов управляемых переменных этих ЛС в соответствующих заданных областях их требуемых значений. При этом предполагается, что значения всех других векторов, соответствующих ЛС, входящих в рассматриваемую подсистему, находятся в соответствующих областях их допустимых значений. С учетом соотношений (7.2) и (7.3) задача регулирования ЛР в рассматриваемой подсистеме, включающей непосредственно вышестоящую ЛС  $N_{kl}^{i+1}$  со всеми непосредственно нижестоящими ЛС  $N_{jk}^i$ , может быть формализована следующими соотношениями:

$$\begin{aligned} N_{kl}^{i+1}, \forall N_{jk}^i : \forall Z_{kl}^{i+1} \in \Omega^r(Z_{kl}^{i+1}) &\Rightarrow \\ \Rightarrow \exists U_{jk}^i \in \Omega(U_{jk}^i), \exists R_{jk}^i \in \Omega(R_{jk}^i) &\Rightarrow \\ \Rightarrow \exists Z_{jk}^i \in \Omega^r(Z_{jk}^i), Q_{jk}^i \in \Omega(Q_{jk}^i) & \end{aligned} \quad (7.4)$$

Возможность существования решения поставленной задачи регулирования ЛР в рассматриваемой подсистеме, которая формализована соотношениями (7.3) и (7.4), определяется существованием условия, выражающего принцип координируемости ЛЦ и порождаемых ими ЛЗ для непосредственно нижестоящих ЛС по отношению к соответствующим ЛЦ и ЛЗ для непосредственно вышестоящей ЛС в рассматриваемой подсистеме, имеющей иерархическую организацию [58, 60].

Будем считать, что задача регулирования ЛР в ИСС заключается в регулировании ЛР для всех ЛС, входящих в рассматриваемую иерархически организованную ИСС. Поэтому такая задача может быть поставлена путем распространения задачи регулирования ЛР в рассмотренной подсистеме ЛС на все такие подсистемы, входящие в состав ИСС. В рассматриваемой задаче будем предполагать, что для всех ЛС, входящих в состав ИСС, соответствующие области требуемых значений векторов управляемых переменных являются известными и фиксированными. С учетом иерархической организации ИСС данное предположение может быть формализовано следующими соотношениями:

$$\begin{aligned} \forall N_{kl}^{i+1}, \forall N_{jk}^i : \forall \Omega^r(Z_{kl}^{i+1}) &\rightarrow const, \\ \forall \Omega^r(Z_{jk}^i) &\rightarrow const. \end{aligned} \quad (7.5)$$

Задача регулирования ЛР в ИСС с учетом сделанных предположений может быть сформулирована следующим образом. Необходимо для определенного значения вектора управляемых переменных каждой из непосредственно вышестоящих ЛС, принадлежащего заданной области требуемых его значений, выбрать такие значения векторов параметров АЭ и ПЭ для всех непосредственно нижестоящих ЛС, которые принадлежат соответствующим областям их допустимых значений и обеспечивают нахождение векторов управляемых переменных этих ЛС в соответствующих заданных областях их требуемых значений. При этом предполагается, что значения всех других векторов, соответствующих ЛС, входящим в состав рассматриваемой ИСС, находятся в соответствующих областях их допустимых значений. С учетом соотношений (7.4) и (7.5) задача регулирования ЛР в рассматриваемой ИСС может быть формализована следующими соотношениями:

$$\begin{aligned} \forall N_{kl}^{i+1}, \forall N_{jk}^i : \forall Z_{kl}^{i+1} \in \Omega^r(Z_{kl}^{i+1}) &\Rightarrow \\ \Rightarrow \exists U_{jk}^i \in \Omega(U_{jk}^i), \exists R_{jk}^i \in \Omega(R_{jk}^i) &\Rightarrow \\ \Rightarrow \exists Z_{jk}^i \in \Omega^r(Z_{jk}^i), Q_{jk}^i \in \Omega(Q_{jk}^i) & \end{aligned} \quad (7.6)$$

Возможность существования решения поставленной задачи регулирования ЛР в ИСС, которая формализована соотношениями (7.5) и (7.6), определяется существованием условий, выражающих принцип координируемости ЛЦ и порождаемых ими ЛЗ для непосредственно нижестоящих ЛС по отношению к соответствующим ЛЦ и ЛЗ для непосредственно вышестоящей ЛС в каждой подсистеме иерархически организованной ИСС.

Отметим, что нарушение выполнения соотношений (7.5) по любой из причин или отсутствие решения (несовместность) системы, определенной соотношениями (7.5) и (7.6), приводит к принципиально иной задаче управления ИСС. Следуя [33], такую задачу назовем задачей планирования ЛР в ИСС.

Предлагаемый подход к регулированию ЛР в ИСС использован при разработке процессов управления РС оросительной системы.

## Раздел 7

### ОПЫТ РЕАЛИЗАЦИИ ЛОКАЛЬНЫХ ПРОЦЕССОВ ОПЕРАТИВНОГО УПРАВЛЕНИЯ В ИЕРАРХИЧЕСКИ ОРГАНИЗОВАННЫХ ИНЖЕНЕРНЫХ СЕТЕВЫХ СИСТЕМАХ

#### 7.1. Моделирование и реализация процессов регулирования локальных режимов функционирования

Выделим в иерархически взаимосвязанной и взаимодействующей между собой системе ЛС, каковой является ИСС, такую подсистему, которая имеет следующую структуру. Выделяемая подсистема содержит одну определенную ЛС, являющуюся вышестоящей в рассматриваемой подсистеме, со всеми непосредственно подключенными к ней ЛС, которые являются нижестоящими в рассматриваемой подсистеме. Все эти нижестоящие ЛС назовем непосредственно нижестоящими по отношению к вышестоящей ЛС, входящей в рассматриваемую подсистему. Тогда вышестоящая ЛС, входящая в рассматриваемую подсистему, является непосредственно вышестоящей для всех этих непосредственно нижестоящих ЛС.

Исходя из функционального назначения отдельных ЛС различного уровня иерархии, входящих в состав ИСС [30 - 33, 62, 136], будем предполагать, что достижение ЛЦ для определенной ЛС может быть выражено принадлежностью вектора управляемых переменных рассматриваемой ЛС некоторой определенной области требуемых его значений при условии, что все остальные векторы, соответствующие рассматриваемой ЛС, находятся в областях их допустимых значений. Область требуемых значений вектора  $Z_{jk}^i$  для ЛС  $N_{jk}^i$  обозначим  $\Omega^r(Z_{jk}^i)$ , при этом будем предполагать, что имеет место следующее соотношение:  $\Omega^r(Z_{jk}^i) \subset \Omega(Z_{jk}^i)$ .

Будем считать, что совокупность определенных значений векторов  $U_{jk}^i$ ,  $R_{jk}^i$ ,  $Z_{jk}^i$  и  $Q_{jk}^i$ , соответствующих ЛС  $N_{jk}^i$ , характеризует

определенный локальный режим (ЛР) ее функционирования. Будем считать, что определенная ЛС функционирует в требуемом ЛР, если в процессе ее функционирования соответствующий ей вектор управляемых переменных находится в области требуемых его значений, а все остальные векторы рассматриваемой ЛС в соответствующих областях их допустимых значений. При этом будем предполагать, что область требуемых значений вектора управляемых переменных ЛС  $N_{jk}^i$  является известной и фиксированной. Данное предположение может быть формализовано следующим соотношением:

$$N_{jk}^i : \Omega^r(Z_{jk}^i) \rightarrow const. \quad (7.1)$$

Понятие требуемого ЛР для определенной ЛС обусловлено необходимостью достижения ЛЦ путем решения соответствующей ЛЗ [58, 60]. С учетом соотношения (7.1) условие функционирования ЛС  $N_{jk}^i$  в требуемом ЛР может быть формализовано следующими соотношениями:

$$\begin{aligned} N_{jk}^i : Z_{jk}^i \in \Omega^r(Z_{jk}^i), U_{jk}^i \in \Omega(U_{jk}^i), \\ R_{jk}^i \in \Omega(R_{jk}^i), Q_{jk}^i \in \Omega(Q_{jk}^i) \end{aligned} \quad (7.2)$$

Для постановки задачи регулирования ЛР в иерархически организованной ИСС выделим в ней такую подсистему ЛС, которая состоит из непосредственно вышестоящей в данной подсистеме ЛС  $N_{kl}^{i+1}$  со всеми непосредственно нижестоящими ЛС  $N_{jk}^i$ . Будем предполагать, что области требуемых значений векторов управляемых переменных для всех ЛС, входящих в рассматриваемую подсистему, являются известными и фиксированными. С учетом иерархической организации рассматриваемой подсистемы данное предположение может быть формализовано следующими соотношениями:

$$\begin{aligned} N_{kl}^{i+1}, \forall N_{jk}^i : \Omega^r(Z_{kl}^{i+1}) \rightarrow const, \\ \forall \Omega^r(Z_{jk}^i) \rightarrow const. \end{aligned} \quad (7.3)$$

Будем считать, что задача регулирования ЛР в рассматриваемой подсистеме заключается в регулировании ЛР для всех ЛС, входящих в рассматриваемую подсистему. Тогда рассматриваемая задача состоит в том, чтобы для определенного значения вектора управляемых переменных

б) Процедура является последней, и полученные элементы также удовлетворяют условию допустимости. В этом случае получаем решение поставленной задачи.

в) Полученные в результате выполнения очередной процедуры элементы не удовлетворяют условию допустимости ширины соответствующей области. Тогда, появляется необходимость корректировки исходных данных, без которой найти решение поставленной задачи невозможно.

В процессе решения задачи априорная информация задается следующим образом. Каждой вершине, которая является конечной для какой-либо дуги графа  $G^*$  РС  $N$ , соответствует отдельная строка. В этой строке содержится следующая информация: номер начальной вершины, которая соединена дугой с рассматриваемой вершиной, а также численные значения параметров дуги (граница области возможных значений коэффициента гидравлического сопротивления, величина потока). Кроме этого, каждая строка, соответствующая выходной вершине рассматриваемого графа  $G^*$  РС  $N$ , содержит априорно заданные границы области требуемых значений напора в соответствующей вершине. Результат решения задачи выдается следующим образом. Каждой выходной вершине графа  $G^*$  РС  $N$  соответствует строка, в которой содержатся полученные величины границ требуемых значений напора в этой вершине. Пример реализации поставленной задачи содержится в [80].

## 6.5. Выводы

1. На основании обобщенного концептуального подхода к формализации иерархически организованных ГСУ для многоуровневых ИСС конкретизированы структурные и функциональные особенности ГСУ для реальных двухуровневых ИСС.

2. В аспекте разработки отдельных ЛА, реализуемых определенными ЛСУ в соответствующих РС, проведена алгоритмизация процессов оперативного управления РС, входящими в состав реальных двухуровневых ИСС.

3. Проведена постановка и разработан метод реализации задачи идентификации состояния входных вершин РС. Предлагаемый подход эффективен для построения определенных ЛА, реализуемых отдельными ЛСУ в соответствующих РС, входящих в состав реальных двухуровневых ИСС.

4. Разработан метод формирования кластера состояния входных вершин РС. Такой метод может быть использован для разработки определенных ЛА, используемых отдельными ЛСУ для реализации процессов оперативного управления в соответствующих РС, входящих в состав реальных двухуровневых ИСС.

В соотношениях (6.8) и (6.9) величины  $z_{xu}^{min}$  и  $z_{xu}^{max}$  определены соотношениями (6.6) и (6.7) для всех  $u \in V_x$ .

Для эффективной реализации процесса оперативного управления РС необходимо обеспечить определенную устойчивость требуемого установившегося потокораспределения в такой ЛС, учитывая возможные небольшие изменения режимов потребления, а также установившегося потокораспределения в ЛС высшего уровня иерархии.

Будем считать, что для обеспечения устойчивости требуемого установившегося потокораспределения в РС  $N$  необходима, чтобы ширина области  $[z_x^{min}, z_x^{max}]$  была не меньше определенной величины, зависящей, например, от нижней границы  $z_x^{min}$ . Такое условие может быть выражено следующим соотношением:

$$z_x^{max} - z_x^{min} \geq \lambda_x z_x^{min}; \quad (6.10)$$

где  $x \in V^* \setminus V'$ .

В соотношении (6.10) для всех вершин  $x \in V^* \setminus V'$  графа  $G^*$  РС коэффициенты ширины области напора  $\lambda_x$  будем считать известными числами. В случае невыполнения соотношения (6.10) по крайней мере для одной из указанных вершин необходимо ввести соответствующие коррективы в исходные данные поставленной задачи.

Будем предполагать, что процедуры, каждая из которых определена соотношениями (6.6) - (6.10), выполняются для вершин всех уровней графа  $G^*$  РС  $N$ , начиная со второго уровня, в следующем порядке.

1. Для вершин отдельных уровней, начиная со второго, процедуры выполняются в порядке возрастания номеров уровней.
2. Для вершин одного уровня порядок выполнения процедур произвольный.

Покажем, что выполнение рассмотренных процедур в таком порядке приводит к нахождению областей  $[z_x^{min}, z_x^{max}]$  для вершин  $x \in V^* \setminus V'$ , эквивалентно нахождению решения поставленной задачи.

Исходя из соотношений (6.6)-(6.9), для определения области значений напора  $[z_x^{min}, z_x^{max}]$  в вершине  $x$ , находящейся на уровне  $\xi$ , где  $1 < \xi \leq v$ , необходимо и достаточно, чтобы были известны области  $[z_u^{min}, z_u^{max}]$  во всех вершинах  $u \in V_x$ , с которыми рассматриваемая вершина  $x$  соединена исходящими из нее дугами  $j \in E_x$ .

В соответствии со свойствами (1)-(5) графа  $G^*$  РС  $N$ , перечисленные в данном подразделе, вершины  $u \in V_x$  принадлежат только предыдущим уровням  $\varphi$ , где  $1 \leq \varphi < \xi$ . Следовательно, для того, чтобы было возможно нахождение областей значений напора  $[z_x^{min}, z_x^{max}]$  в вершинах  $x$ , принадлежащих уровню  $\xi$ , где  $1 < \xi \leq v$ , необходимо соблюдать первый пункт порядка выполнения процедур.

Для каждой вершины  $x$  уровня  $\xi$ , где  $1 < \xi \leq v$ , нахождение области  $[z_x^{min}, z_x^{max}]$  может осуществляться независимо от нахождения соответствующих областей для других вершин этого уровня. Это следует из свойств (1)-(5) графа  $G^*$  РС  $N$  и соотношений (6.6)-(6.9). Такая возможность выполнения процедур для вершин одного уровня в произвольном порядке отмечена во втором пункте.

Для формирования решения поставленной задачи необходимо, чтобы порядок выполнения процедур на графе  $G^*$  РС  $N$  был полностью определен. Следовательно, исходя из второго пункта, необходимо определенным образом задать такой порядок для вершин одного уровня. В связи с этим будем предполагать следующее.

Пусть выполнение процедур для вершин каждого уровня  $\xi$  где  $1 < \xi \leq v$ , осуществляется в порядке номеров таких вершин. Тогда на основании принятой нумерации вершин графа  $G^*$  РС  $N$ , первого пункта порядка выполнения процедур и сделанного предположения о порядке выполнения процедур для вершин каждого уровня можно заключить следующее.

Порядок выполнения процедур для вершин  $x \in V^* \setminus V'$  графа  $G^*$  РС  $N$  (для всех вершин, начиная со второго уровня) соответствует порядку номеров этих вершин.

В результате построения метода решения поставленной задачи можно сделать следующие выводы о структуре соответствующего алгоритма.

1. Нахождение решения поставленной задачи, или заключение об отсутствии решения при определенных значениях исходных данных осуществляется на основании выполнения конечного числа однотипных процедур в определенном порядке.
2. Каждая процедура представляет собой совокупность следующих процессов, выполняемых в порядке их перечисления.
  - а) Процесс формирования двух искомого массивов на основании заданного массива по определенным соотношениям.
  - б) Процесс выбора наибольшего элемента, в одном из полученных массивов и наименьшего элемента в другом.
  - в) Процесс оценки допустимости ширины области, определяемой значениями таких элементов, заключающийся в проверке выполнения заданного неравенства.
3. В результате выполнения очередной процедуры возможны следующие альтернативы.
  - а) Процедура не является последней, и полученные элементы удовлетворяют условию допустимости ширины соответствующей области. В этом осуществляется переход к следующей процедуре.

номера вершин одного уровня, а также при переходе к следующему уровню последовательно возрастали.

2. Вершины первого уровня являются выходными; они образуют множество  $V'$ . Каждая вершина первого уровня может быть соединена только с вершинами уровней  $j$  заходящими в нее дугами, где  $1 < j < v$ . Граф  $G^*$  содержит  $v'$  выходных вершин.

3. Каждая вершина уровня  $\xi$ , где  $1 < \xi < v$ , может быть соединена только заходящими в нее дугами с вершинами уровней  $\phi$  исходящими из нее дугами с вершинами уровней  $\phi$ , где  $\xi < j \leq v$  и  $1 \leq \phi < \xi$ .

4. Вершина уровня  $v$  является входными; они образуют множество  $V''$ . Каждая вершина уровня  $v$  может быть соединена только с вершинами уровней  $\phi$  исходящими из нее дугами, где  $1 \leq \phi < v$ . Граф  $G^*$  содержит  $v''$  входных вершин.

5. Граф  $G^*$  PC  $N$  не содержит дуг, инцидентных вершинам одного и того же уровня. Очевидно, что свойство 5 является следствием свойств 4 графа  $G^*$  PC  $N$ .

6. Граф  $G^*$  PC  $N$  может содержать ПЭ в любой дуге  $j$ . Моделирующий граф топологической структуры PC к задаче формирования кластера состояния входных вершин PC, обладающий перечисленными выше свойствами, приведен в [80].

Пусть дуга  $j$  исходит из вершины  $x$  в вершину  $u$ . Тогда взаимосвязь между напорами  $z_x$  и  $z_u$  и потоком  $x_j$  при фиксированном значении коэффициента гидравлического сопротивления  $r_j$  и установившемся потокораспределении в PC  $N$  определяется следующим соотношением:

$$z_x = z_u + r_j q_j^2. \quad (6.5)$$

Соотношение (6.5) соответствует установившемуся потокораспределению в PC при турбулентном режиме движения потока [5, 16, 36, 51, 99].

Перечислив свойства, которым должна удовлетворять PC  $N$ , перейдем непосредственно к постановке задачи.

Пусть зафиксировано определенное значение вектора потокораспределения  $q$  и задан некоторый кластер значений вектора напоров в выходных вершинах, который обозначим  $M(Z')$ . Будем считать, что для этого заданы границы значений координат  $z_x$  вектора напоров в выходных вершинах:  $z_x^{\min}$  и  $z_x^{\max}$ , где  $z_x \in [z_x^{\min}, z_x^{\max}]$ ,  $x \in V'$ .

Следовательно, кластер  $M(Z')$  является замкнутым, ограниченным и связным. Необходимо определить при фиксированном значении  $q$  допустимом значении вектора  $U^p \in \{U^p\}$  такой кластер значений вектора напоров во входных вершинах, обозначаемый  $K(Z)$  чтобы каждое значение  $Z \in K(Z)$  обеспечивало любое значение  $Z' \in M(Z')$ .

Очевидно, что искомым кластер  $K(Z)$  является кластером эквивалентности значений  $Z \in K(Z)$  в указанном в приведенной постановке смысле [34, 119, 135, 139].

Будем считать, что определение искомого кластера  $K(Z)$  сводится к нахождению границ значений координат  $z_u$ :  $z_u^{\min}$  и  $z_u^{\max}$ , где  $z_u \in [z_u^{\min}, z_u^{\max}]$ . Полученный таким образом кластер  $K(Z)$  является замкнутым, ограниченным и связным.

На основании соответствующей постановки построим метод формирования кластера состояния входных вершин PC.

Рассмотрим вершину  $x$  графа  $G^*$  PC  $N$ , находящуюся на уровне  $\xi$ , где  $1 < \xi < v$ . Множество дуг, исходящих из вершины  $x$ , будем обозначать  $E_x$ . Множество вершин, которые соединены с рассматриваемой вершиной  $x$  исходящими из нее дугами  $j \in E_x$ , будем обозначать  $V_x$ . Из перечисленных в этом подразделе свойств (1) - (5) графа  $G^*$  PC  $N$  следует, что вершины  $V_x$  могут находиться на различных уровнях  $\phi$ , где  $1 \leq \phi < \xi$ .

Определим границы области значений напора  $z_{xu}$  в вершине  $x$ :  $z_{xu}^{\min}$  и  $z_{xu}^{\max}$ , где каждое значение  $z_{xu} \in [z_{xu}^{\min}, z_{xu}^{\max}]$  обеспечивает любое значение напора  $z_u$  в вершине  $u \in V_x$ . При этом  $z_u \in [z_u^{\min}, z_u^{\max}]$ , и такая область значений напора  $z_u$ , задаваемая границами  $z_u^{\min}$  и  $z_u^{\max}$ , предполагается известной.

Очевидно, что для выполнения этого условия нижняя граница области значений напора  $z_{xu}$  должна обеспечить значение  $z_u^{\max}$ , а верхняя граница  $z_{xu}^{\max}$  - значение  $z_u^{\min}$ , и при этом  $r_j \in [r_j^*, r_j^{**}]$ . Такое утверждение, с учетом фиксированного значения вектора  $q$  и соотношения (6.5), эквивалентно выполнению следующих соотношений:

$$z_{xu}^{\min} = z_u^{\max} + r_j^* q_j^2; \quad (6.6)$$

$$z_{xu}^{\max} = z_u^{\min} + r_j^{**} q_j^2. \quad (6.7)$$

Определим теперь границы такой области  $[z_x^{\min}, z_x^{\max}]$ , где каждое значение напора  $z_x \in [z_x^{\min}, z_x^{\max}]$  обеспечивает любое значение напора  $z_u \in [z_u^{\min}, z_u^{\max}]$  для всех вершин  $u \in V_x$ . При этом  $r_j \in [r_j^*, r_j^{**}]$ ,  $j \in E_x$ .

В условиях данной постановки задачи искомая область  $[z_x^{\min}, z_x^{\max}]$  определяется пересечением областей  $[z_{xu}^{\min}, z_{xu}^{\max}]$  для всех вершин  $u \in V_x$ . Следовательно, границы этой области определяются такими соотношениями:

$$z_x^{\min} = \max_{u \in V_x} z_{xu}^{\min}; \quad (6.8)$$

$$z_x^{\max} = \min_{u \in V_x} z_{xu}^{\max}; \quad (6.9)$$

процессов оперативного управления ЛС различного уровня иерархии [75].

Рассмотрим постановку такой задачи.

Пусть вектор  $z = (a, b_1, \dots, b_i, \dots, b_n)$  принадлежит ограниченной замкнутой области  $Z: z \in Z$ .

Область  $Z$  разбита на подобласти  $Z_j, j = 1, 2, \dots, m$ , удовлетворяющие следующим условиям:

1.  $Z_j \neq \emptyset$ ;
2.  $j_1 \neq j_2 \Rightarrow Z_{j_1} \cap Z_{j_2} = \emptyset$ ;
3.  $\bigcup_{j=1}^m Z_j = Z$ .

Подобласти  $Z_j$  характеризуются следующими свойствами. При переходе от подобласти  $Z_j$  к  $Z_{j+1}$  по крайней мере одна координата вектора например  $a$ , изменяется монотонно и непрерывно. Следовательно, значение верхней границы координаты  $a$  в подобласти  $Z_j$ , обозначаемое одновременно является значением нижней границы в подобласти  $Z_{j+1}$ . Нижней границей координаты  $a$  в подобласти  $Z_1$  является величина  $x_{min}$ . Нижней и верхней границами координаты  $b_i$  в подобласти  $Z_j$  являются соответственно величины  $y_{ij}^{(1)}$  и  $y_{ij}^{(2)}$ .

Вектор  $z \in Z_1$ , если одновременно выполняются следующие соотношения для всех  $i = 1, 2, \dots, n$ :

$$x_{min} \leq a \leq x_1; \quad (6.1)$$

$$y_{ij}^{(1)} \leq b_i \leq y_{ij}^{(2)}. \quad (6.2)$$

Вектор  $z \in Z_j$ , если одновременно для всех  $i = 1, 2, \dots, n$  выполняются следующие соотношения:

$$x_{j-1} < a \leq x_j; \quad (6.3)$$

$$y_{ij}^{(1)} \leq b_i \leq y_{ij}^{(2)}. \quad (6.4)$$

Следовательно, подобласти  $Z_j$  являются  $(n+1)$ -мерными параллелепипедами [46, 125, 135].

Пусть задано определенное значение вектора  $z$ . Необходимо найти следующее.

1. Если выполняются условия (6.1) и (6.2) или (6.3) и (6.4), то соответствует условию  $z \in Z_1$  или  $z \in Z_j$ , где  $j = 1, 2, \dots, m$ , то необходимо определить индекс  $j$  соответствующей подобласти  $Z_j$ .

2. Если  $a < x_{min}$  или  $a > x_m$ , то необходимо сделать соответствующее сообщение.

3. Если выполняется условие (6.1), но не выполняются некоторые из условий (6.2), или выполняется условие (6.3), но не выполняются некоторые из условий (6.4), то необходимо определить следующее:

- а) Индекс  $j$  соответствующей подобласти  $Z_j$ .
- б) Индекс  $i$  первой из координат  $b_i$ , для которой нарушается выполнение соответствующего условия (6.2) или (6.4).
- в) Сообщить характер нарушения выполнения соотношения:  $b_i < y_{ij}^{(1)}$  или  $b_i > y_{ij}^{(2)}$ .

Алгоритм реализации задачи идентификации состояния входных вершин РС приведен в [80].

Информация о границах подобластей к задаче идентификации состояния входных вершин РС, а также результаты реализации различных вариантов задачи идентификации состояния входных вершин РС приведены в [80].

#### 6.4. Реализация метода формирования кластера состояния входных вершин распределительной сети

Одна из возможных схем структурной организации ГСУ  $S$  для иерархически организованной ИСС  $N$  рассмотрена в подразделе 6.1. Схемы функциональных взаимосвязей между ЛСУ  $C_i$  и соответствующими ЛС  $N_j$ , а также ЛСУ  $C_i$  между собой, при такой организации ГСУ  $S$ , где  $i \in I$ , определяются управляющими алгоритмами, которые рассмотрены в подразделе 6.2 настоящей работы.

Другим возможным подходом к организации структуры и функциональных взаимосвязей между отдельными ЛСУ  $C_i$  и ЛС  $N_j$ , а также ЛСУ  $C_i$  между собой в иерархически организованной ГСУ  $S$ , где  $i \in I$ , в процессе оперативного управления ИСС  $N$ , является игровой принцип [74, 75].

В этом случае одной из задач, решаемой отдельными ЛСУ  $C_i$  в процессе оперативного управления соответствующими РС  $N_i$ , является задача формирования кластера состояния входных вершин РС  $N_i$ , где  $i \in I$ .

Формализация указанной задачи и разработка метода формирования кластера состояния входных вершин РС является предметом настоящего подраздела.

Пусть РС  $N$  кроме свойств, перечисленных в подразделе 3.3 настоящей работы, характеризуется следующим.

1. Вершины графа  $G^*$  РС  $N$  расположены по  $v$  уровням и пронумерованы последовательными натуральными числами так, чтобы

соответствующего значения переменной  $IS$  и рассматриваемой подпрограмма переходит в состояние ожидания соответствующего сообщения.

Если по каким-либо причинам вводится значение  $IS = 0$ , то выдается соответствующее сообщение и управление снова передается на значение  $IS$ .

Если  $IS = -1$ , то выдается сообщение о нерабочем состоянии рассматриваемого АЭ. Если при этом  $L < LL$ , то значение индекса увеличивается на единицу и управление вновь передается на элемент массива  $ID$  - следующего номера АЭ, соответствующего номеру  $IX$ . Если  $IS = -1$  и  $L = LL$ , то выдается сообщение о невозможности уменьшения напоров в МС  $N_0$  и происходит выход подпрограммы  $DOWN1$  в головную программу  $MAINPGM$ .

Если  $IS = +1$ , то производится выдача указания уменьшить напор АЭ с номером  $IT$  (перейти к режиму  $\omega' < \omega$ ). После этого рассматриваемая подпрограмма переходит в состояние ожидания ответа от запрашиваемого АЭ.

Если запрашиваемый АЭ не может выполнить указание (уменьшить напор), то вводится значение  $IA = -1$ . При этом если  $L < LL$ , то значение увеличивается на единицу и выполняется аналогичное обращение к следующему номеру АЭ. Если  $L = LL$ , то выдается сообщение о невозможности понижения напоров в вершинах  $V_0^* \setminus V_0'$  МС  $N_0$  (все АЭ работают в режимах создания минимальных напоров) и происходит выход подпрограммы  $DOWN1$  в головную программу  $MAINPGM$ .

Если по каким-либо причинам вводится ответ  $IA = 0$ , то выдается соответствующее сообщение и подпрограмма снова переходит в состояние ожидания ответа от запрашиваемого АЭ.

Если запрашиваемый АЭ выполняет указание (уменьшает напор), вводится значение  $IA = +1$ . В этом случае подпрограмма запрашивает значение  $IZ$ , соответствующее вершине  $IX$ , и переходит в состояние ожидания ответа.

Если ответ - вводимое значение  $IZ = +1$ , что соответствует соотношению  $z_x > z_0^{**}$  в вершине с номером  $IX$ , то управление передается на выдачу указания уменьшить напор АЭ с номером  $IT$ . Если  $IZ = 0$  или  $IZ = -1$ , что соответствует соотношению  $z_x \leq z_0^{**}$ , то выдается сообщение о том, что цель функционирования подпрограммы достигнута и происходит выход из рассматриваемой подпрограммы  $DOWN1$  в головную программу  $MAINPGM$ .

Эффективность рассматриваемой подпрограммы была подтверждена при практическом использовании для реализации процесса понижения напоров в промежуточных вершинах МС.

График процесса понижения напора  $z_x$  в промежуточной вершине МС  $N_0$  приведен в [80].

управления реальными объектами рассматриваемого класса заключается в том, что восстановление условия  $z_x \leq z_0^{**}$  происходит за короткий промежуток времени (порядка нескольких минут), что существенно для таких объектов.

## Реализация задачи идентификации состояния входных вершин распределительной сети

В подразделе 6.2 настоящей работы рассмотрен один из возможных вариантов алгоритмизации процессов оперативного управления ЛС, предполагающий использование дискретного аналога метода спуска, дополненного эвристикой упорядочения АЭ по влиянию на промежуточные вершины по степени влияния на них. В этом случае этим вершинам напоры. Однако этот принцип не является единственным возможным для алгоритмизации задач оперативного управления объектами рассматриваемого класса.

В качестве возможного принципа алгоритмизации рассматриваемых процессов предлагается принцип шаблонных решений [69, 75]. Данный принцип применяется, в частности, для алгоритмизации процессов оперативного управления МС  $N_i$ , где  $i \in I$ .

В данном случае принцип шаблонных решений определяет выбор оптимальных управляющих воздействий - координат вектора состояния ПЭ в зависимости от значений координат вектора напоров во входных вершинах  $Z_i$  МС  $N_i$ , где  $i \in I$ . Одной из главных подзадач, порождаемых этим принципом, является задача идентификации состояния входных вершин. Эта задача сводится к следующему.

Необходимо определить номер (индекс) подобласти по заданному состоянию этой подобласти - действительному значению вектора напоров во входных вершинах  $Z_i$  рассматриваемой РС  $N_i'$ , где  $i \in I$ .

В дальнейшем при решении задачи оперативного управления такой подобластью осуществляется для выбора соответствующего значения вектора  $U_i'$  (его координат) [74, 75]. При этом предполагается, что область возможных значений вектора напоров во входных вершинах заранее разбивается на отдельные подобласти, однозначно определяющие значения вектора  $U_i'$ , обеспечивающие функционирование РС  $N_i'$  в допустимом режиме, описанном в пункте 9 основных условий и ограничений для рассматриваемого объекта, рассматриваемом в подразделе 3.3 настоящей работы.

Кроме этого, задачу идентификации состояния входных вершин РС рассматриваемой системы можно решать с помощью системного подхода к синтезу ГСУ иерархически организованными ИСС, а также игровой подход к алгоритмизации

Если  $IZ > 0$ , то управление передается подпрограмме *DOWN1*, которая в качестве фактического параметра передает номер вершины, в которой имеет место соотношение  $z_x > z_0^{**}$ .

Если  $IZ=0$ , то выдается соответствующее сообщение и управление передается на запрос номера вершины *IX*, в которой нарушено выполнение соотношения  $z_x \in [z_0^*, z_0^{**}]$ .

Если управление передано одной из подпрограмм *UP001* или *DOWN1*, то по окончании выполнения соответствующей подпрограммы и выработки сообщения управление передается на запрос номера вершины *IX*, в которой нарушается выполнение соотношения  $z_x \in [z_0^*, z_0^{**}]$ .

Алгоритм процесса увеличения напоров в вершинах МС приведен в [80].

При передаче управления соответствующей ему подпрограмме из головной программы *MAINPGM* фиктивному параметру подпрограммы *UP001* ставится в соответствие значение действительного параметра *IX* головной программы *MAINPGM*, соответствующего вершине  $x \in V_0^{**}$ , для которой  $z_x < z_0^*$ . Подпрограмма *UP001* использует массив  $D_x$ , находящийся в общей области головной программы *MAINPGM* и подпрограмм *UP001* и *DOWN1*.

Вначале переменной *IR* присваивается значение +1. Затем выбирается элемент массива *ID* (номер АЭ), соответствующий первой компоненте вектора  $D_x$  для вершины с номером *IX*. После этого производится задание состояния АЭ с выбранным номером путем сообщения соответствующего значения переменной *IS* и программа переходит в состояние ожидания соответствующего ответа.

Если введенное значение  $IS = 0$ , то выдается соответствующее сообщение и управление вновь передается на запрос значения *IS*. Если  $IS < 0$ , выдается сообщение о том, что рассматриваемый АЭ не работает. При этом если *L* (индекс номеров АЭ, соответствующих вершинам с номером *IX*) меньше общего числа таких номеров *LL* (количество компонент вектора  $D_x$ ), происходит увеличение индекса *L* на единицу и управление передается на выбор элемента массива *ID*. При этом выбирается следующий номер АЭ, соответствующего вершине с номером *IX*.

Если  $IS < 0$  и  $L = LL$ , то делается сообщение о невозможности увеличения напоров в вершинах  $V_0^* \setminus V_0^{**}$  МС  $N_0$  и происходит выход из подпрограммы *UP001* в головную программу *MAINPGM*.

Если  $IS > 0$ , то производится выдача указания увеличить напор (перейти к режиму  $\omega > \omega$ ) для АЭ с номером *IT*. После этого подпрограмма *UP001* переходит в состояние ожидания ответа от запрашиваемого АЭ. В зависимости от того, выполнил или нет АЭ указание увеличить напор,

выдается соответствующее значение переменной *IA*. Если запрашиваемый АЭ не выполнил указание увеличить напор, то вводится значение  $IA = -1$ . При этом управление передается на блок операторов, анализирующий соотношение  $IA$  и индексы *L* и *LL*. Если  $L < LL$ , то значение *L* увеличивается на единицу и выполняется аналогичное обращение к АЭ, соответствующему индексу *L*. Если  $L < LL$ , то делается сообщение о невозможности увеличения напоров в МС  $N_0$  (все АЭ работают в режимах повышенных напоров) и происходит выход из подпрограммы *UP001* в головную программу *MAINPGM*.

Если по каким-либо причинам вводится ответ  $IA = 0$ , то выдается соответствующее сообщение и программа вновь переходит в состояние ожидания ответа от запрашиваемого АЭ.

Если рассматриваемый АЭ увеличивает напор, то вводится значение  $IA = +1$ . При этом подпрограмма *UP001* запрашивает значение *IZ*, соответствующее вершине *IX* и переходит в состояние ожидания ответа.

Если ответ - вводимое значение  $IZ = -1$ , что соответствует соотношению  $z_x < z_0^*$ , то управление вновь передается на выдачу указания увеличить напор АЭ с номером *IT*.

Если  $IZ = 0$  или  $IZ = +1$ , что соответствует соотношению  $z_x \geq z_0^*$ , то делается сообщение о том, что цель функционирования подпрограммы достигнута, и происходит выход из рассматриваемой подпрограммы.

Практическое использование подпрограммы *UP001* показывает ее эффективность при реализации процесса увеличения напора в конкретной вершине МС. График процесса увеличения напора  $z_x$  в конкретной вершине  $x$  МС  $N_0$ , содержащей 60 вершин, 140 дуг и 10 АЭ, приведен в [80].

Опыт управления реальными МС показывает, что процесс восстановления  $z_x$  за весьма короткий промежуток времени (несколько минут), что является вполне допустимым для объектов рассматриваемого класса.

Алгоритм процесса понижения напоров в вершинах МС приведен в [80]. При передаче управления соответствующей ему подпрограмме *DOWN1* из головной программы *MAINPGM* фиктивному параметру *IX* подпрограммы *DOWN1* ставится в соответствие значение действительного параметра *IX* головной программы *MAINPGM*, соответствующего вершине  $x \in V_0^{**}$ , для которой  $z_x > z_0^{**}$ .

Подпрограмма *DOWN1* так же, как и *UP001*, использует массив  $D_x$ , находящийся в общей области. Переменной *IR* присваивается значение -1. Выбирается номер АЭ (элемент массива *ID*), который соответствует компоненте вектора  $D_x$  для вершины с номером *IX*. После этого задается состояние АЭ с выбранным номером путем сообщения

соответствующего значения переменной *IS* и программа переходит в состояние ожидания соответствующего ответа.

Если введенное значение  $IS = 0$ , то выдается соответствующее сообщение и управление вновь передается на запрос значения *IS*. Если  $IS < 0$ , выдается сообщение о том, что рассматриваемый АЭ не работает. При этом если *L* (индекс номеров АЭ, соответствующих вершинам с номером *IX*) меньше общего числа таких номеров *LL* (количество компонент вектора  $D_x$ ), происходит увеличение индекса *L* на единицу и управление передается на выбор элемента массива *ID*. При этом выбирается следующий номер АЭ, соответствующего вершине с номером *IX*.

Если  $IS < 0$  и  $L = LL$ , то делается сообщение о невозможности понижения напоров в вершинах  $V_0^* \setminus V_0^{**}$  МС  $N_0$  и происходит выход из подпрограммы *DOWN1* в головную программу *MAINPGM*.

Если  $IS > 0$ , то производится выдача указания понизить напор (перейти к режиму  $\omega < \omega$ ) для АЭ с номером *IT*. После этого подпрограмма *DOWN1* переходит в состояние ожидания ответа от запрашиваемого АЭ. В зависимости от того, выполнил или нет АЭ указание понизить напор,

напорами  $z_x$ , где  $x \in V_i^* \setminus V_i'$ , которые устанавливаются утверждением подраздела 3.3 настоящей работы.

Перечисленные алгоритмы построены на основании дискретного аналога метода координатного спуска [35, 50, 53, 103, 117, 122, 123]. В этом указанный метод дополнен естественной для данной задачи эвристикой упорядочения АЭ по отношению к промежуточным вершинам по степени влияния на соответствующие напоры, рассмотренной в подразделе 3.4 настоящей работы. Использование такой эвристики алгоритмизации процесса оперативного управления ИС повышает эффективность и уменьшает время регулирования объектов рассматриваемого класса.

ЛА, реализуемый ЛСУ  $C_0$  в МС  $N_0$ , записан в виде соответствующей программы, которая состоит из головной программы *MAINPGM* и подпрограмм *UP001* и *DOWN1*.

Пусть по крайней мере в одной из вершин  $x \in V_0'''$  МС  $N_0$  нарушается выполнение соотношения  $z_x \in [z_0^*, z_0^{**}]$ .

Тогда если  $z_x < z_0^*$ , то головная программа передает управление подпрограмме *UP001*; если  $z_x > z_0^{**}$ , то головная программа передает управление подпрограмме *DOWN1*.

Подпрограмма *UP001* реализует управляющие воздействия, направленные на увеличение напоров в вершинах множества  $V_0^* \setminus V_0'$  до соблюдения в рассматриваемой вершине  $x \in V_0'''$  условия  $z_x \in [z_0^*, z_0^{**}]$  в невозможности дальнейшего увеличения напоров в указанных вершинах МС  $N_0$ .

Подпрограмма *DOWN1* реализует управляющие воздействия, направленные на понижение напоров в вершинах множества  $V_0^* \setminus V_0'$  МС  $N_0$  до соблюдения условия  $z_x \in [z_0^*, z_0^{**}]$  в рассматриваемой вершине  $x \in V_0'''$  в невозможности дальнейшего понижения напоров в указанных вершинах МС  $N_0$ . При записи и реализации головной программы *MAINPGM* и подпрограмм *UP001* и *DOWN1* будем считать, что выполняются следующие условия.

Если в вершине  $x \in V_0'''$  МС  $N_0$  нарушается выполнение условия  $z_x \in [z_0^*, z_0^{**}]$ , то происходит сигнализация с передачей номера вершины *IX* и установка значения переменной *IZ* = -1. Если в рассматриваемой вершине нарушается выполнение условия  $z_x \leq z_0^{**}$ , то происходит сигнализация с передачей номера вершины *IX* и установка значения переменной *IZ* = +1. Если в рассматриваемой вершине выполняется условие  $z_x \in [z_0^*, z_0^{**}]$ , то устанавливается значение переменной *IZ* = 0.

В общем случае будем считать, что отдельный АЭ является элементом станции. При этом будем предполагать, что все АЭ занумерованы последовательными натуральными числами.

Указание увеличить напор определенного АЭ осуществляется передачей номера соответствующего АЭ и установкой значения переменной *IR* = +1. Указание уменьшить напор реализуется аналогично, но устанавливается в установке значения переменной *IR* = -1.

Предполагается, что в результате реализации указанного действия над рассматриваемым АЭ устанавливается значение переменной *IA* = +1; при нарушении реализации необходимого действия над рассматриваемым АЭ устанавливается значение *IA* = -1.

В процессе рассматриваемого АЭ будем определять значение переменной *IS*. Если АЭ находится в состоянии нормальной эксплуатации, то *IS* = 0. Если по какой-либо причине (аварийное отключение, ремонт) АЭ должен быть включен, то устанавливается значение *IS* = -1.

Предполагается, что информация о векторах  $D_x$  для  $\forall x \in V_0'''$  хранится в массиве соответствующим массивом *ID*, который записан в виде соответствующего файла на магнитном диске, а массив *ID* упорядочен в соответствии с номерами вершин множества  $V_0'''$ . Предполагается, что элементы множества  $V_0'''$  занумерованы последовательными натуральными числами.

Рассматриваемые в настоящей работе программы (головная программа *MAINPGM* и подпрограммы *UP001* и *DOWN1*) составлены для реальной системы с количеством 500 вершин во множестве  $V_0'''$  и 10 АЭ (элементов множества  $V_0'$ ).

Головной модуль алгоритма процесса оперативного управления МС занесен в [80].

Соответствующая ему программа *MAINPGM* вводит массив *ID*, который предварительно записан на магнитный диск в соответствии с порядком, указанным выше. При этом массив *ID* располагается в общей памяти головной программы *MAINPGM* и подпрограмм *UP001* и *DOWN1*. При вводе массива *ID* головная программа получает информацию о номере той вершины *IX*, в которой напор  $z_x$  выходит из допустимого интервала  $[z_0^*, z_0^{**}]$ .

При сообщении номера *IX* осуществляется его проверка на принадлежность к множеству  $V_0'''$ . Если  $IX \leq 0$  или  $IX > 500$ , то выдается соответствующее сообщение и управление снова передается на запрос номера *IX*. Если имеет место соотношение  $1 \leq IX \leq 500$ , то производится запрос значения переменной *IZ*, определяющей характер выхода напора  $z_x$  из интервала  $[z_0^*, z_0^{**}]$ .

В зависимости от значения переменной *IZ* производится передача управления соответствующим образом.

Если *IZ* = 0, то выполняется подпрограмма *UP001*, которой в качестве управляющего параметра передается номер вершины *IX*, в которой имеет место соотношение  $z_x < z_0^{**}$ .



## 7.2. Оперативное управление иерархически организованными инженерными сетевыми системами с динамическим распределением процессорного времени

В реальных задачах, которые охватывают весьма широкий спектр видов и форм машинных и человеко-машинных управляющих систем, возникает необходимость распределения системных ресурсов между отдельными подпроцессами в условиях определенных ограничений. Такие ограничения налагаются как на виды и объемы ресурсов, так и на конкретные формы их использования. К такому классу относятся задачи управления распределением ресурсов вычислительных систем (процессорного времени, ОП, устройств ввода-вывода) между отдельными программами [82]; задачи управления распределением ЦП (воды, газа, воздушных потоков) в ИСС [30 - 33]; задачи управления распределением технико-экономических ресурсов (машин, трудовых ресурсов, денежных средств) производственных и технологических процессов [28, 54].

В данном подразделе рассмотрен один подкласс таких задач, связанный с проблемой управления ИСС.

Отдельные ЛС различного уровня иерархии, входящие в состав ИСС  $N$ , обозначим  $N_{ij}$ , где  $i$  - номер уровня иерархии,  $j$  - номер ЛС данного уровня. Множество вершин ЛС  $N_{ij}$  обозначим  $V_{ij}$ . Во множестве  $V_{ij}$

выделим подмножество вершин ЛС  $N_{ij}$ , обозначаемое  $V_{ij}^c$ , в каждой из которых происходит контроль (измерение) напора (уровня) ЦП.

Будем считать, что допустимые условия функционирования ЛС  $N_{ij}$  выполняются, если имеет место следующее условие:

$$\forall x \in V_{ij}^c, Z_x \in [Z_{ij}^*, Z_{ij}^{**}] \quad (7.7)$$

где  $Z_{ij}^*$  и  $Z_{ij}^{**}$  - соответственно нижняя и верхняя границы напора

(уровня) ЦП  $Z_x$  в вершине  $x \in V_{ij}^c$ .

Условие (7.7) порождено целями функционирования реальных ЛС, входящих в состав ИСС, состоящими в создании допустимых условий функционирования для всех ЛС низших уровней иерархии, подключенных к рассматриваемой ЛС  $N_{ij}$  [77].

Для формализации факта нарушения выполнения условия (7.7) в ЛС  $N_{ij}$  введем соответствующий предикат  $D_{ij}$ .

Будем считать, что этот предикат является истинным ( $D_{ij} = 1$ ), если имеет место нарушение выполнения условия (7.7) в ЛС  $N_{ij}$ , и ложным ( $D_{ij} = 0$ ) - в противном случае. В соответствии с результатами, приведенными в [77], управляющая система использует совокупность управляющих программ  $P_{ij}$ , каждая из которых реализует процесс управления соответствующей ЛС  $N_{ij}$ , направленный на восстановление условия (7.7) в случае его нарушения возмущающими факторами - стохастически изменяющимися режимами потребления.

Для реализации управляющих программ  $P_{ij}$  предполагается использовать ПК типа IBM PC. Такие ЭВМ используют мультипрограммный режим работы, при котором имеет место конкурентное выполнение программ. Это значит, что при одновременном наличии всех или некоторых из управляющих программ в оперативной памяти ЭВМ, они могут выполняться только последовательно в некотором порядке очередности [77].

Целью данного подраздела и является рассмотрение возможного подхода к распределению одного из важнейших видов системных ресурсов ЭВМ - процессорного времени относительно управляющих программ  $P_{ij}$ . Для этого необходимо разработать систему приоритетов, определяющих очередность реализации управляющих программ  $P_{ij}$  на ЭВМ. Одно из важных решений этой задачи - априорное, заранее определенное распределение приоритетов между управляющими программами  $P_{ij}$ .

Однако такое технически более простое решение не является адекватным процессу управления реальной ИСС, поскольку не учитывает стохастический характер возмущений, обусловленный стохастичностью процесса потребления ЦП.

Адекватным решением данной задачи является разработка динамической системы приоритетов, учитывающих реальное состояние ЛС  $N_{ij}$ . В отличие от априорно заданной, такая система должна

непосредственно определяться в процессе функционирования отдельных ЛС  $N_{ij}$  различного уровня иерархии, входящих в состав ИСС  $N$  [77].

Для решения поставленной задачи представляется целесообразным учитывать как уровень иерархии  $i$  ЛС  $N_{ij}$ , управляемой программой  $P_{ij}$ , для которой имеет место условие  $D_{ij} = 1$ , так и оценку степени нарушения условия (7.7) для такой ЛС. Оценку степени нарушения выполнения условия (7.7) для ЛС  $N_{ij}$  можно произвести, например, путем задания функции как суммы модулей отклонений величин  $Z_x$  от границ интервала  $[Z_{ij}^*, Z_{ij}^{**}]$  для всех вершин  $x$  из множества вершин с контролируемыми напорами  $V_{ij}^c$ :

$$\forall Z_x \in V_{ij}, F_{ij} = \sum_{\forall Z_x < Z_{ij}^*} (Z_{ij}^* - Z_x) + \sum_{\forall Z_x > Z_{ij}^{**}} (Z_x - Z_{ij}^{**}) \quad (7.8)$$

С учетом иерархичности структуры ИСС  $N$ , а также возможности нарушения допустимого условия функционирования (7.7) для отдельных ЛС различного уровня иерархии  $N_{ij}$ , степень которого выражена функцией  $F_{ij}$ , определенной соотношением (7.8), динамическая система приоритетов управляющих программ  $P_{ij}$ , распределяющая процессорное время управляющей ЭВМ, может быть формализована следующим алгоритмом.

1. Из множества всех ЛС  $\{N_{ij}\}$ , входящих в состав ИСС  $N$ , выбираем подмножество ЛС  $\{N_{kl}\}$ , для которых в данный момент нарушено условие (7.7):

$$\{N_{ij}, D_{ij} = 1\} \Rightarrow \{N_{kl}\}$$

2. Из множества ЛС  $\{N_{kl}\}$ , для которых нарушено условие (7.7), выбираем подмножество сетей  $\{N_{mn}\}$  высшего уровня иерархии  $m$ :

$$\{N_{kl}, k \rightarrow \max\} \Rightarrow \{N_{mn}\}$$

3. Из множества ЛС высшего уровня иерархии  $\{N_{mn}\}$ , для которых нарушено выполнение условия (7.7), выбираем такое подмножество сетей  $\{N_{mp}\}$ , для которых условие (7.7) нарушено в большей степени, что характеризуется максимальным значением функции  $F_{mn}$ :

$$\{N_{mn}, F_{mn} \rightarrow \max\} \Rightarrow \{N_{mp}\}$$

4. Во множестве  $\{N_{mp}\}$  ЛС высшего уровня иерархии, для которых в данный момент условие (7.7) нарушено в большей степени, выбираем один определенный элемент - ЛС  $N_{mg}$ . Для определенности предположим, что в этом случае выбирается ЛС с наименьшим во множестве  $\{N_{mp}\}$  номером  $g$ :

$$\{N_{mp}, p \rightarrow \min\} \Rightarrow N_{mg}$$

5. На основании взаимно-однозначного соответствия определенных ЛС различного уровня иерархии  $N_{ij}$  и соответствующих им управляющих программ  $P_{ij}$ , выраженного соотношением,  $N_{ij} \leftrightarrow P_{ij}$ , осуществляется инициализация соответствующей управляющей программы  $P_{mg}$  для выбранной в результате выполнения шагов 1-4 настоящего алгоритма ЛС  $N_{mg}$ .

Шаги 1-5 формализуют алгоритм динамического распределения процессорного времени управляющей ЭВМ с учетом реального состояния отдельных ЛС различного уровня иерархии в иерархически организованной ИСС. Такой алгоритм использован при разработке процессов оперативного управления системой городского водоснабжения.

### 7.3. Минимизация объемов оперативной информации о состояниях объектов орошения

Содержательно оперативная информация о состояниях объектов орошения как ПЦП может быть представлена совокупностью (набором) определенных признаков, полученных путем измерения соответствующих параметров в определенных заданных точках таких объектов [37]. В частности, если объектом орошения является поливное поле, то

оперативная информация о его состоянии представляет совокупность следующих признаков [37].

1. Влажность почвы, %.
2. Скорость испарения, мм/сут.
3. Осадки, мм/сут.
4. Уровень грунтовых вод, м.
5. Минерализация грунтовых вод, г/л.
6. Температура воздуха, °C.
7. Фазы развития растений, шифр.

При этом предполагается, что сбор указанных данных осуществляется путем измерения значений соответствующих параметров в определенных заданных точках рассматриваемого объекта, количество которых для таких объектов составляет 5...7. Поэтому для реальных объектов орошения общее количество данных, определяющее объем оперативной информации об их состояниях, составляет несколько десятков признаков [37].

Следуя [100], оперативная информация о состоянии объекта орошения может быть формализована вектором состояния рассматриваемого объекта  $X = (x_1, \dots, x_p)$ , координатами которого является упорядоченная совокупность значений соответствующих признаков, измеренных в определенных заданных точках этого объекта. В соответствии с введенной формализацией множество возможных значений вектора  $X$  образует  $p$ -мерное признаковое пространство состояний рассматриваемого объекта орошения. Анализ реальных объектов орошения позволяет заключить, что величина размерности признакового пространства  $p$  для них может составлять несколько десятков параметров [37].

В соответствии с [100, 136], в основу реализации локального процесса управления РС оросительных систем может быть положена задача классификации состояний всех тех объектов орошения, которые подключены к рассматриваемой РС. При этом размерность рассматриваемой задачи аддитивно зависит от объемов оперативной информации о состояниях всех этих объектов орошения [37, 100]. Однако возможности практической реализации процессов оперативного управления РС оросительных систем ограничены размерностями соответствующих задач классификации [37, 100]. Поэтому актуальной является проблема минимизации объемов оперативной информации о состояниях объектов орошения.

Указанную минимизацию предполагается реализовать путем снижения размерностей признаковых пространств состояний отдельных объектов орошения.

В соответствии с [100], сущность проблемы снижения размерности анализируемого признакового пространства формально может быть выражена следующим образом. Необходимо каждому заданному вектору

$X = (x_1, \dots, x_p)$  поставить в соответствие некоторый вспомогательный вектор  $Z(X) = (Z_1(X), \dots, Z_q(X))$  с числом компонент (координат)  $q$ , существенно меньшим, чем число  $p$ . При этом переход от заданного вектора  $X$  к вспомогательному вектору  $Z(X)$  должен сопровождаться наименьшими потерями в информативности. В соответствии с [100], такой переход обусловлен следующими предпосылками.

1. Дублирование информации, доставляемой взаимосвязанными признаками.
2. Неинформативность признаков, несущественно изменяющихся в различных заданных точках измерения.
3. Возможность агрегирования (в общем случае взвешенного суммирования) некоторых признаков.

Используя [100], рассмотрим следующие методы снижения размерностей признаковых пространств состояний отдельных объектов орошения.

1. Метод главных компонент.
2. Факторный анализ.

В соответствии с [100], сущность метода главных компонент заключается в следующем. Первой компонентой  $Z_1(X)$  исследуемой системы измеряемых признаков (показателей)  $X = (x_1, \dots, x_p)$  является такая нормированно-центрированная линейная комбинация этих показателей, которая среди всех прочих нормированно-центрированных линейных комбинаций переменных  $x_1, \dots, x_p$  обладает наибольшей дисперсией. Аналогично,  $k$ -й главной компонентой исследуемой системы показателей  $X$ , где  $k = 2, \dots, q$ , является такая нормированно-центрированная линейная комбинация этих показателей, которая не коррелирована с  $k - 1$  предыдущими главными компонентами и среди всех прочих нормированно-центрированных и не коррелированных с предыдущими  $k - 1$  главными компонентами линейных комбинаций переменных  $x_1, \dots, x_p$  обладает наибольшей дисперсией.

Для вычисления  $k$ -й главной компоненты  $z_k(X)$ , где  $k = 1, \dots, q$ , необходимо найти собственный вектор  $l_k = (l_{k1}, \dots, l_{kp})$  ковариационной матрицы  $\Sigma$  исходного набора показателей  $X = (x_1, \dots, x_p)$ . Компоненты  $l_{kj}$ , где  $j = 1, \dots, p$ , собственного вектора  $l_k$  являются весовыми коэффициентами, с помощью которых осуществляется переход от сходных показателей  $x_1, \dots, x_p$  к главной компоненте  $z_k(X)$ . Такой переход определяется соотношением  $z_k(X) = l_k \cdot X$ .

Как показано в [100], основные числовые характеристики вектора главных компонент  $Z = (z_1, \dots, z_q)$  могут быть выражены через основные числовые характеристики исходных показателей и собственные числа их ковариационной матрицы  $\Sigma$ . При этом вектор первых главных компонент  $Z(X) = (Z_1(X), \dots, Z_q(X))$  обладает рядом экстремальных свойств, к которым, в частности, относятся следующие.

1. Свойство наименьшей ошибки автопрогноза или наилучшей самовоспроизводимости. Указанное свойство заключается в том, что с помощью первых  $q$  главных компонент  $z_1, \dots, z_q$  исходных показателей  $x_1, \dots, x_p$  достигается наилучший в определенном смысле прогноз этих показателей среди всех прогнозов, которые можно построить с помощью  $q$  линейных комбинаций набора из произвольных признаков. При этом предполагается, что число главных компонент  $q$  существенно меньше, чем число измеряемых признаков  $p$ .

2. Свойство наименьшего искажения некоторых геометрических характеристик определенной совокупности значений вектора состояний  $X$  при их проецировании в пространство меньшей размерности, натянутое на  $q$  первых главных компонент  $z_1, \dots, z_q$ . Другим методом снижения размерностей признаков пространств состояний объектов орошения, который может быть использован в данной ситуации, является факторный анализ. В соответствии с [100], основная идея различных модификаций рассматриваемого метода заключается в том, что значения всех измеряемых признаков  $x_1, \dots, x_p$  анализируемого вектора состояния объекта орошения  $X$  формируются под воздействием сравнительно небольшого числа одних и тех же (общих) факторов  $f_1, \dots, f_q$ , не поддающихся непосредственному измерению и поэтому называемых латентными (скрытыми). В этом смысле такие общие факторы являются причинами, а измеряемые (анализируемые) признаки - следствиями. При этом предполагается, что число общих факторов  $q$  существенно меньше, чем количество  $p$  измеряемых признаков, отражающих состояние рассматриваемого объекта орошения. Поэтому методы факторного анализа позволяют осуществить снижение размерностей анализируемых признаков пространств.

В соответствии с [100], статистическая реализация какой-либо конкретной модели факторного анализа предусматривает поэтапное выполнение следующих шагов.

1. Решение вопроса о существовании модели.
2. Идентификация модели, заключающаяся в возможности ее однозначного восстановления по исходным статистическим данным.
3. Алгоритмическое определение ее структурных параметров. Этот шаг заключается в реализации формул, связывающих параметры модели с элементами ковариационной матрицы анализируемых признаков.

4. Статистическая оценка параметров искомой модели по имеющимся измерениям значений признаков, соответствующих различным состояниям рассматриваемого объекта орошения.

В соответствии с [100], наиболее распространенной в практике статистических исследований и наиболее разработанной в теоретическом аспекте является каноническая модель факторного анализа, в которой признаки линейно зависят от факторов, факторы взаимно некоррелированы между собой и со случайными остатками модели, а случайные остатки в свою очередь взаимно некоррелированы и нормально распределены.

Между рассматриваемыми методами снижения размерностей признаков пространств, к которым относятся метод главных компонент и линейная модель факторного анализа, имеется идейная общность. Она заключается в том, что каждый из этих методов можно рассматривать как метод аппроксимации набора значений анализируемых признаков с помощью линейных функций от сравнительно небольшого числа некоторых вспомогательных переменных (главных компонент или общих факторов). Некоторое различие рассматриваемых методов обусловлено различными подходами к конкретизации критерия точности аппроксимации [100].

Адекватность аппроксимации с помощью модели факторного анализа связана как с решением задачи оценки числа  $q$  общих факторов модели, так и с содержательной интерпретацией найденных общих факторов. Для реализации последней задачи в [100] предлагается использовать неоднозначность определения общих факторов (с точностью до ортогонального преобразования), которая позволяет осуществлять различные вращения таких факторов в факторном пространстве.

Рассмотренные методы реализованы как в базисной (basis), так и в полной (full) версиях статистического ППП BMDP, ориентированного на ПК IBM PC [100].

Используем предлагаемый подход для минимизации объема оперативной информации о реальном объекте орошения, которым является оливное поле. С этой целью будем предполагать, что на рассматриваемом объекте орошения заданы  $n$  точек, в каждой из которых осуществляется измерение значений (параметров) перечисленных признаков. При этом порядоченную совокупность значений таких признаков в  $i$ -й точке рассматриваемого объекта орошения представим вектором  $X_i$ , где  $i = 1, \dots, n$ .

Оперативную информацию об объекте орошения формализуем соответствующим вектором состояния  $X$ , содержащим в качестве компонент векторы  $X_i$ :  $X = (X_i, i = 1, \dots, n)$ . В данной задаче будем

предполагать, что в семи заданных точках объекта орошения векторы  $X_i$  принимают следующие значения:

$$X_1 = (76; 4,2; 4,0; 1,7; 1,83; 24,7; 3);$$

$$X_2 = (72; 3,8; 3,8; 1,9; 1,83; 24,7; 3);$$

$$X_3 = (78; 4,8; 4,2; 1,6; 1,83; 24,7; 3);$$

$$X_4 = (80; 5,0; 4,4; 1,5; 1,83; 24,7; 3);$$

$$X_5 = (82; 5,4; 4,6; 1,4; 1,83; 24,7; 3);$$

$$X_6 = (74; 4,0; 3,8; 1,5; 1,83; 24,7; 3);$$

$$X_7 = (76; 4,2; 4,0; 1,7; 1,83; 24,7; 3);$$

При этом объем оперативной информации об объекте орошения определяется размерностью вектора  $X$ , который в рассматриваемом примере содержит 49 компонент. Результирующий (вспомогательный) вектор  $Z$ , полученный методом главных компонент, содержит всего 7 координат:

$$Z = (76,86; 4,49; 4,11; 1,61; 1,83; 24,7; 3);$$

В соответствии с используемой процедурой формирования вектора  $Z$ , минимизирующего объем оперативной информации об объекте орошения, его координатами являются средние значения (математические ожидания) соответствующих координат векторов  $X_1, \dots, X_7$ , расположенные в порядке убывания их дисперсий.

Анализ, проведенный в данном подразделе, позволяет сделать следующие выводы. Для создания возможности практической реализации локальных процессов оперативного управления РС оросительных систем является необходимой минимизация объемов оперативной информации о состояниях объектов орошения. Указанная задача может быть решена путем снижения размерностей признаков пространств состояний отдельных объектов орошения, являющихся ПЦП, подключенными к РС оросительных систем. С этой целью могут быть использованы такие методы прикладной статистики, как метод главных компонент и факторный анализ. Указанные методы могут быть реализованы на современных ПК с помощью соответствующего статистического ППП.

Предлагаемый подход нашел применение при разработке процессом оперативного управления МК оросительной системы.

#### 7.4. Реализация процессов сбора данных в системах управления орошением

В настоящее время в связи с необходимостью дальнейшего повышения эффективности сельскохозяйственного производства весьма важной и актуальной является проблема автоматизации процессов управления оросительными системами [7, 29, 44]. Одним из аспектов этой проблемы является автоматизация процессов сбора данных в системах управления такими объектами [70].

Назначением процесса сбора данных в системах управления орошением является формирование текущих значений переменных процесса управления на основании сигналов, получаемых от соответствующих измерительных преобразователей (датчиков).

Для реализации такого назначения предполагается, что управляющая система выполняет следующие функции по сбору данных.

1. Получение сигналов о текущих значениях переменных процесса управления с помощью соответствующих датчиков.

2. Передача указанных сигналов в систему управления с помощью средств телемеханики.

3. Формирование текущих значений переменных процесса управления на основании полученных сигналов с использованием соответствующих алгоритмов, реализующих математико-статистические методы предварительной обработки экспериментальных данных.

В данном подразделе рассмотрим возможный подход к реализации процесса сбора данных в системах управления орошением. При этом к переменным процесса управления орошением будем относить значения уровней воды в определенных узлах (вершинах) оросительной системы, величины расходов (потоков) в определенных ее участках (дугах), а также значения перемещений затворов, определяющих степень их открытия.

Анализ основных типов измерительных преобразователей (датчиков), предназначенных для преобразования физических величин, соответствующих указанным переменным процесса управления в сигналы, имеющие форму, удобную для передачи и дальнейшей обработки, содержится в [7].

Вследствие значительной протяженности реальных объектов управления рассматриваемого класса [29, 44] для передачи сигналов от датчиков в систему управления является необходимым использование средств телемеханики [7]. В частности, для передачи данных в системах управления орошением может быть использован комплекс средств телемеханики КЭТ-51.01, в котором для передачи определенного сигнала

от соответствующего измерительного преобразователя выделяется по одному такту работы такого комплекса.

Специфика оросительных систем как объектов управления [7, 29, 44], а также особенности функционирования измерительных преобразователей (датчиков) и комплексов средств телемеханики [7] обуславливают использование методики сбора и первичной обработки информационных сигналов порциями через определенные интервалы времени, которые назовем периодами сканирования режимов управляемой системы. Указанная методика известна как методика сканирования режимов управляемой системы [97]. На основании анализа процессов функционирования реальных объектов управления рассматриваемого класса можно заключить, что величина периода сканирования режимов управляемой системы может находиться в интервале от нескольких минут до нескольких десятков минут.

Преобразование сигналов, полученных от соответствующих датчиков и переданных в систему управления по каналам телемеханики, в текущие значения соответствующих переменных процесса управления может быть реализовано в соответствии с методиками и алгоритмами предварительной обработки экспериментальных данных, содержащихся в [100, 119]. В этой связи для формирования текущего значения каждой переменной процесса управления предполагается реализация следующих процедур.

1. В окрестностях текущего момента сканирования режимов управляемой системы получение по каналам телемеханики и запоминание в ОП управляющей ЭВМ определенной совокупности значений сигналов измерений, соответствующих каждой переменной процесса управления. Сущность рассматриваемой процедуры заключается в оперативном формировании выборки определенного числа значений для каждой переменной в окрестностях текущего момента сканирования режимов управляемой системы.

2. Определение важнейших математико-статистических характеристик для каждой такой совокупности значений (выборки). К ним, в первую очередь, относится эмпирическое, или выборочное, среднее, которое предполагается отождествить с формируемым текущим значением соответствующей переменной. В рамках указанной процедуры могут быть определены и другие характеристики рассматриваемой выборки, в частности, дисперсия, среднееквадратическое отклонение, а также коэффициент вариации.

Для реализации функций запоминания выборок значений сигналов и последующего формирования текущих значений переменных процесса управления в качестве управляющей ЭВМ предполагается использовать ПК IBM PC.

Анализ свойств реальных объектов управления рассматриваемого класса [29, 44], а также аппаратных и программных средств реализации указанных процедур [7, 29, 44] позволяет заключить, что интервал времени, необходимый для формирования текущих значений переменных, соответствующий моменту сканирования режимов управляемой системы, составляет от нескольких секунд до нескольких десятков секунд. Следовательно, можно заключить, что указанный временной интервал существенно меньше периода сканирования режимов управляемой системы. Такое временное соотношение обуславливает оперативность процессов сбора данных в системах управления орошением, реализованных в соответствии с предлагаемым подходом.

Данный подход использован при разработке процессов управления РС оросительной системы.

### **7.5. Метод кластер-анализа и функциональных соответствий как реализационная основа процессов оперативного управления инженерными сетевыми системами**

Рассмотрим один из возможных подходов к реализации процессов управления ЛС, в основу которого положены модели, методы и процедуры современного кластер-анализа и функциональных соответствий [34, 119]. Адекватность предлагаемого подхода обусловлена спецификой реальных ЛС как объектов управления [62, 136]. Для реализации указанного подхода проведем соответствующую формализацию ЛС как объекта управления.

В соответствии с [62, 136] будем предполагать, что управляющие воздействия в рассматриваемой ЛС осуществляются путем изменения состояний ее АЭ и ПЭ. Исходя из этого, рассматриваемой ЛС поставим в соответствие векторы состояний (параметров) ее АЭ и ПЭ, которые обозначим соответственно  $U$  и  $R$ . Также рассматриваемой ЛС поставим в соответствие вектор ее управляемых переменных (параметров), который обозначим  $Z$ .

На основании анализа реальных ЛС, содержащегося в [62, 136], будем предполагать, что указанные векторы  $Z$ ,  $U$  и  $R$  находятся в определенных заданных областях их допустимых значений, которые обозначим соответственно  $\Omega(Z)$ ,  $\Omega(U)$  и  $\Omega(R)$ . В соответствии с целевой установкой процесса управления рассматриваемой ЛС [62, 136] будем считать известным (заданным) индекс  $i$  кластера  $\Omega_i^r(Z)$  требуемых значений вектора  $Z$ , принадлежащего области его допустимых значений  $\Omega(Z)$ . При

будем предполагать, что  $i \in I$ , где  $I$  - множество индексов кластеров требуемых значений вектора  $Z$ .

Требуемым значением  $Z^i$  вектора  $Z$  будем называть любое значение этого вектора, принадлежащее заданному кластеру  $\Omega_i^r(Z)$  требуемых его значений:

$$Z^i \in \Omega_i^r(Z). \quad (7.9)$$

Будем предполагать, что измеренное текущее значение  $Z^i$  вектора  $Z$ , в общем случае не удовлетворяющее соотношению (7.9), принадлежит определенному кластеру  $\Omega_j^t(Z)$  текущих значений указанного вектора, находящемуся в области допустимых его значений  $\Omega(Z)$ :

$$Z^i \in \Omega_j^t(Z). \quad (7.10)$$

При этом будем считать, что  $j \in J$ , где  $J$  - множество индексов кластеров текущих значений вектора  $Z$ .

Будем предполагать, что измеренное текущее значение  $U^i$  вектора  $U$  принадлежит определенному кластеру  $\Omega_k^t(U)$  текущих значений указанного вектора, находящемуся в области допустимых его значений  $\Omega(U)$ :

$$U^i \in \Omega_k^t(U). \quad (7.11)$$

При этом будем считать, что  $k \in K$ , где  $K$  - множество индексов кластеров текущих значений вектора  $U$ .

Будем предполагать, что измеренное текущее значение  $R^i$  вектора  $R$  принадлежит определенному кластеру  $\Omega_l^t(R)$  текущих значений указанного вектора, находящемуся в области допустимых его значений  $\Omega(R)$ :

$$R^i \in \Omega_l^t(R). \quad (7.12)$$

При этом будем считать, что  $l \in L$ , где  $L$  - множество индексов кластеров текущих значений вектора  $R$ .

Будем предполагать, что искомое требуемое значение  $U^r$  вектора  $U$ , определяемое в ходе реализации процесса управления рассматриваемой ЛС, принадлежит определенному кластеру  $\Omega_m^r(U)$  требуемых значений указанного вектора, находящемуся в области допустимых его значений  $\Omega(U)$ :

$$U^r \in \Omega_m^r(U). \quad (7.13)$$

При этом будем считать, что  $m \in M$ , где  $M$  - множество индексов кластеров текущих значений вектора  $U$ .

Будем предполагать, что искомое требуемое значение  $R^r$  вектора  $R$ , определяемое в ходе реализации процесса управления рассматриваемой ЛС, принадлежит определенному кластеру  $\Omega_n^r(R)$  требуемых значений указанного вектора, находящемуся в области допустимых его значений  $\Omega(R)$ :

$$R^r \in \Omega_n^r(R). \quad (7.14)$$

При этом будем считать, что  $n \in N$ , где  $N$  - множество индексов кластеров текущих значений вектора  $R$ .

Будем предполагать, что на указанных множествах индексов  $I, J, K, L, M$  и  $N$  определены (заданы) следующие функциональные соответствия (отображения):

$$P: I \times J \times K \times L \rightarrow M; \quad (7.15)$$

$$Q: I \times J \times K \times L \rightarrow N. \quad (7.16)$$

В соответствии с указанными отображениями  $P$  и  $Q$ , каждому упорядоченному набору индексов  $(i, j, k, l)$  соответствуют определенные индексы  $m$  и  $n$ :

$$(i, j, k, l) \rightarrow m; \quad (7.17)$$

$$(i, j, k, l) \rightarrow n; \quad (7.18)$$

где  $i \in I, j \in J, k \in K, l \in L, m \in M, n \in N$ .

Соотношения (7.9) - (7.18) формализуют ЛС как объект управления.

На основании данной формализации построим алгоритм, реализующий процесс управления рассматриваемым объектом.

1. В соответствии с целевой установкой процесса управления рассматриваемой ЛС определяется индекс  $i$ , идентифицирующий кластер  $\Omega_i^r(Z)$ , который содержит требуемые значения  $Z^r$  вектора  $Z$ .

2. Для измеренного текущего значения  $Z^t$  вектора  $Z$  реализуется проверка выполнения условия, определенного соотношением (7.9). Если указанное условие выполняется, то осуществляется переход к шагу 1. В противном случае выполняется следующий, 3-й, шаг.

3. Исходя из соотношения (7.10), определяется индекс  $j$  кластера  $\Omega_j^r(Z)$ , содержащего измеренное текущее значение  $Z^t$  вектора  $Z$ .

4. Исходя из соотношения (7.11), определяется индекс  $k$  кластера  $\Omega_k^t(U)$ , содержащего измеренное текущее значение  $U^t$  вектора  $U$ .

5. Исходя из соотношения (7.12), определяется индекс  $l$  кластера  $\Omega_l^t(R)$ , содержащего измеренное текущее значение  $R^t$  вектора  $R$ .

6. Исходя из соотношений (7.15) и (7.17), определяется индекс  $m$  искомого кластера  $\Omega_m^r(U)$  требуемых значений  $U^r$  вектора  $U$ .

7. Исходя из соотношений (7.16) и (7.18), определяется индекс  $n$  искомого кластера  $\Omega_n^r(R)$  требуемых значений  $R^r$  вектора  $R$ .

8. Исходя из соотношения (7.13), определяется требуемое значение  $U^r$  вектора  $U$ .

9. Исходя из соотношения (7.14), определяется требуемое значение  $R^r$  вектора  $R$ .

10. В рассматриваемой ЛС осуществляется реализация требуемых значений  $U^r$  и  $R^r$  векторов  $U$  и  $R$ .

11. Осуществляется переход к шагу 1 данного алгоритма.

Для проверки принадлежности измеренного текущего значения  $Z^t$  вектора  $Z$  определенному кластеру  $\Omega_i^r(Z)$  требуемых его значений на шаге 2 данного алгоритма предполагается использовать алгоритм нахождения индекса подобласти, содержащей заданное значение вектора [34, 119]. Указанный алгоритм предполагается также использовать в качестве стандартной служебной процедуры для нахождения индексов  $j$ ,  $k$  и  $l$  соответствующих кластеров  $\Omega_j^r(Z)$ ,  $\Omega_k^t(U)$  и  $\Omega_l^t(R)$ , содержащих

измеренные текущие значения  $Z^t$ ,  $U^t$  и  $R^t$  векторов  $Z$ ,  $U$  и  $R$  на шагах 3, 4 и 5 данного алгоритма.

Для реализации функциональных соответствий (отображений) на шагах 6 и 7 данного алгоритма предполагается использовать известный метод шаблонных решений, применяемый в экспертных системах принятия решения [90, 91, 102].

Данный алгоритм использован для реализации процессов управления МК оросительной системы, а также РС системы городского водоснабжения.

## 7.6 Методы автоматической классификации при реализации процессов оперативного управления инженерными сетевыми системами

В соответствии с [30 - 33, 62, 136], для реализации процессов управления ЛС необходимо иметь рабочую информацию о текущих значениях векторов состояний (параметров) АЭ и ПЭ, а также векторов управляемых и возмущающих переменных (параметров) рассматриваемой ЛС. В соответствии с [75, 100, 119], одним из возможных подходов к получению указанной информации является использование методов автоматической классификации (АК), основанных на постановке задач выделения в соответствующих многомерных векторных пространствах компактных групп точек (кластеров). Следуя [68, 100, 119], для организации процедуры АК будем использовать эвристический алгоритм  $k$  эталонов, модифицированный с учетом специфики объектов управления рассматриваемого класса в последовательную процедуру. Основная идея такого алгоритма заключается в том, что совокупность значений векторов, находящихся на одинаковом расстоянии от каждого из  $k$  эталонов (ядер), образует компактную группу (облако точек, или кластер). В результате указанной процедуры определенному измеренному текущему значению вектора ставится в соответствие код (индекс) определенного кластера, содержащего значения векторов, в известном смысле близкие к данному текущему значению. Будем считать, что определенный с помощью такого алгоритма код кластера и является той искомой рабочей информацией об измеренном текущем значении рассматриваемого вектора.

Пусть классификации подлежит измеренное текущее значение  $X_i$   $p$ -мерного вектора  $X$ , определенного следующим соотношением:  $X_i = (x_{i1}, \dots, x_{ip})$ .

Содержательно вектором  $X$  может быть любой из указанных векторов, поставленных в соответствие рассматриваемой ЛС.

Следуя [68, 100, 119], будем предполагать, что в  $p$ -мерном векторном пространстве  $X^p$  определена (задана) функция  $d(X_i, X_j)$  расстояния или степени близости значений  $X_i$  и  $X_j$  вектора  $X$ . Будем предполагать, что в качестве функции расстояния (степени близости) между значениями  $X_i$  и  $X_j$  рассматриваемого вектора  $X$  используется взвешенное евклидово расстояние [100]:

$$d(X_i, X_j) = \sqrt{\omega_1(x_{i1} - x_{j1})^2 + \dots + \omega_p(x_{ip} - x_{jp})^2}. \quad (7.19)$$

При этом предполагается, что каждой координате  $x_m$  вектора  $X$  поставлен в соответствие некоторый неотрицательный весовой коэффициент  $\omega_m$ , отражающий степень ее важности при решении вопроса об отнесении измеренного текущего значения вектора к определенному классу.

С учетом введенных обозначений и понятий рассматриваемый алгоритм АК заключается в следующем.

1. Выбираются  $k$  эталонов  $X_1^*, \dots, X_k^*$  и пороговое значение  $d_o$  функции расстояния  $d(X_i, X_j)$ , определенной соотношением (7.19).

2. Измеренному текущему значению  $X_i$  вектора  $X$  ставится в соответствие код  $\varepsilon_i$  из  $k$  двоичных чисел (символов), определенный следующим соотношением:  $\varepsilon_i = (\varepsilon_{i1}, \dots, \varepsilon_{ik})$ . При этом  $\varepsilon_{ij} = 1$ , если  $d(X_i, X_j^*) \leq d_o$ , и  $\varepsilon_{ij} = 0$  в противном случае.

3. Устанавливается принадлежность измеренного текущего значения  $X_i$  рассматриваемого вектора  $X$  определенному кластеру в соответствии с его кодом  $\varepsilon_i$ . В зависимости от величины порогового значения  $d_o$  и измеренных текущих значений  $X_i$  число таких кластеров может быть от 1 до  $2^k$ .

В результате анализа полученной информации о текущих значениях рассматриваемого вектора  $X$  в форме соответствующей классификации является возможным уточнение выбора эталонов и переход к следующей итерации данного алгоритма. Если в качестве эталонов используются

определенные измеренные текущие значения рассматриваемого вектора  $X$ , то в качестве входной информации для данного алгоритма достаточно использовать матрицу взаимных попарных расстояний  $\{\rho_{i,j} = d(X_i, X_j)\}$ .

В соответствии со способом выбора (определения) эталонов возможны следующие модификации данного алгоритма АК [100].

1. В качестве эталонов могут быть использованы  $k$  случайно выбранных точек в  $p$ -мерном векторном пространстве  $X^p$ .

2. Эталоны могут быть определены на основании экспертных оценок или какой-либо другой априорной информации о типичных представителях классов.

3. В качестве эталонов могут быть использованы значения векторов, принадлежащих заведомо разным классам, но не обязательно типичных в своем классе.

Разработанная на основании данного подхода стандартная служебная процедура АК использована для управления МК оросительной системы.

### 7.7. Использование нечеткого подхода для реализации процессов оперативного управления инженерными сетевыми системами

Проведенный анализ характерных свойств и особенностей реальных ЛС как объектов управления, входящих в состав иерархически организованных ИСС, позволяет заключить, что они являются нечеткими объектами управления, функционирующими в нечеткой среде [92, 93]. Поэтому такие способы реализации процессов управления ЛС, которые основаны на известных методах расчета потокораспределений, в большинстве случаев являются малоэффективными [30 - 33, 67].

С учетом специфики реальных ЛС для управления объектами рассматриваемого класса представляется адекватным подход, использующий концептуализацию и математический аппарат нечетких множеств (НМ) [92, 93]. Например, в [63] разработан нечеткий логический регулятор (НЛР) уровня воды в магистральном канале (МК) оросительной системы.

Содержательный аспект управления МК заключается в следующем. Вследствие стохастического характера потребления воды из МК оросительной системы со стороны подключенных к нему РС имеет место тенденция к изменению уровня воды в рассматриваемом МК. Однако для обеспечения допустимых условий функционирования РС, подключенных к рассматриваемому МК, является необходимым поддержание относительного постоянства такого уровня. В этой связи является

необходимой реализации процесса регулирования уровня воды в МК [63]. Следуя [63], целью такого процесса будем считать поддержание определенного заданного значения уровня воды (определенной уставки) в заданном сечении рассматриваемого МК. Анализ реальных МК, содержащихся в [63], позволяет заключить, что они являются нечеткими объектами управления, функционирующими в нечеткой среде.

НЛР, реализующий процесс регулирования уровня воды в МК оросительной системы, использует эвристические правила формирования решений. При этом определение управляющих воздействий в рассматриваемом НЛР включает следующие четыре основных этапа.

1. Получение отклонений физических величин, являющихся текущими значениями входных переменных рассматриваемого НЛР.
2. Преобразование этих значений к нечеткому виду.
3. Определение нечетких значений выходных переменных рассматриваемого НЛР посредством использования композиционных правил вывода.
4. Нахождение детерминированных значений выходных переменных рассматриваемого НЛР, необходимых для реализации управляющих воздействий на объект управления.

Рассмотрим реализацию НЛР уровня воды в МК реальной оросительной системы.

В соответствии с нечетким подходом к управлению ИСС для реализации НЛР будем использовать следующие переменные, формализующие процесс управления МК. В частности, будем считать известной величину отклонения уровня  $P$ , которую определим как разность между текущим значением уровня и выбранным заранее значением уровня, соответствующим норме (уставкой). Также будем считать известной величину изменения отклонения уровня  $S$ , которую определим как разность между текущим отклонением и отклонением, полученным в предыдущем измерении. Величины  $P$  и  $S$  являются входными переменными рассматриваемого НЛР. Искомой будем считать величину относительного перемещения затвора  $H$ , которую определим как разность между текущим и требуемым его положением. Величина  $H$  является выходной переменной рассматриваемого НЛР.

В соответствии со спецификой рассматриваемого процесса управления определим роль каждой из введенных переменных.

Величина отклонения уровня  $P$  является управляемой переменной, поскольку она определяет степень достижения цели управления объектом рассматриваемого класса - МК. Величина изменения отклонения уровня  $S$  является возмущающей переменной, поскольку характеризует внешние по отношению к МК воздействия, нарушающие целевую установку управления этим объектом. В частности, такими воздействиями могут быть изменения

потребления воды РС, подключенными к рассматриваемому МК, изменение режимов функционирования головного водозабора, осуществляющего подачу воды в рассматриваемый МК, изменение метеорологических факторов, а также возникновение аварийных ситуаций. Величина относительного перемещения затвора  $H$  является управляющей величиной, поскольку она определяет воздействия, направленные на достижение цели функционирования объектом управления рассматриваемого класса. Сущность этих воздействий заключается в таком изменении поступления воды из головного заборного узла путем изменения степени открытия затвора, которое направлено на относительное восстановление уровня воды в определенном сечении МК в соответствии с заданной уставкой.

Следуя [63, 67, 92, 93], формализуем значения введенных переменных, характеризующих рассматриваемый процесс управления МК, нечеткими множествами (НМ). Будем считать, что значения рассматриваемых переменных нормированы, и вследствие этого соответствующие НМ определены на универсуме  $[-1, 1]$ . Будем считать, что каждая переменная рассматриваемого процесса управления может принимать следующие лингвистические значения:  $PB$  - большое положительное,  $PM$  - среднее положительное,  $PS$  - малое положительное,  $PO$  - близкое к нулю положительное,  $NO$  - близкое к нулю отрицательное,  $NS$  - малое отрицательное,  $NM$  - среднее отрицательное,  $NB$  - большое отрицательное. На основании анализа реальных МК как объектов управления может быть установлено соответствие между лингвистическими значениями и серединами интервалов изменения переменных процесса управления.

Будем считать, что для положительных лингвистических значений переменных процесса управления такое соответствие задано в [80]. Также будем считать, что отрицательным лингвистическим значениям соответствуют симметричные значения середин интервалов изменения переменных процесса управления.

Следуя [63, 67, 92, 93], будем считать, что функции принадлежности НМ, соответствующих принятым лингвистическим значениям переменных процесса управления, определены в [80]. При этом предполагается, что величины  $x$  в формулах функций принадлежности представляют нормированные текущие значения соответствующих входных переменных и искомое значение выходной переменной рассматриваемого процесса управления.

Используя НМ, порождаемые лингвистическими значениями переменных процесса управления, сформулируем лингвистические правила, реализующие стратегию управления НЛР. В соответствии с [63, 67, 92, 93], значение относительного перемещения затвора  $H$ , которое бы путем изменения подачи воды из головного водозаборного узла в рассматриваемый МК компенсировало как текущее отклонение уровня  $P$  от

последовательной модификацией алгоритма  $k$  эталонов. Апробация такой процедуры показала эффективность ее использования для реализации процессов управления ЛС иерархически организованных ИСС.

7. Показано, что реальные ЛС, входящие в состав иерархически организованных ИСС, к которым, в частности, относятся оросительные системы, а также системы сельскохозяйственного водоснабжения, являются нечеткими объектами управления, функционирующими в нечеткой среде. Поэтому для реализации процессов управления объектами рассматриваемого класса использованы модели и методы теории НМ. Используя указанный подход, разработан НЛР уровня воды в МК реальной оросительной системы.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основании исследований, проведенных в настоящей работе, осуществлено решение научной проблемы автоматизации технологических процессов распределения ЦП путем реализации процессов оперативного управления иерархически организованными ИСС с неполной информацией об объектах управления и среде их функционирования, имеющей важное народнохозяйственное и социальное значение.

Основные результаты, полученные в настоящей работе, заключаются в следующем.

1. На основании анализа состояния проблемы оперативного управления ИС сделан вывод о необходимости новых концептуальных подходов к решению указанной проблемы, учитывающих существенные структурно-топологические, конструктивно-технологические, а также функциональные свойства и особенности объектов управления рассматриваемого класса.

2. Используя специально разработанный комбинаторно-графовый подход к управлению ИС, формализованы задачи, связанные с определением эффективности управляющих воздействий в ИС, а также оценок надежности и управляемости для таких объектов. Для их решения использованы такие известные задачи сетевой оптимизации, как задача о многополюсной кратчайшей цепи, а также задача о  $K$  кратчайших путях, эффективно реализуемые с помощью ППП сетевой оптимизации.

3. Разработан подход к планированию исходных потоко-распределений в реальных ИС, в котором предполагается, что дуги ИС имеют ограниченные пропускные способности, а для отдельных ПЦП задана система их приоритетов по отношению к потреблению ЦП. На основании такого подхода построен эффективный алгоритм планирования исходных потоко-распределений, используемый для реализации итерационных процессов оперативного управления ИС.

4. Для формализации реальных ИС как объектов управления с учетом специфики их топологической структуры и процессов функционирования использован иерархический кластерный и параболический множественный регрессионный анализ. Такой подход позволяет формализовать задачу управления ИС как задачу сепарабельного программирования. На основании указанного подхода построен эффективный управляющий алгоритм для реальных объектов управления рассматриваемого класса.

5. На основании соответствующей концептуализации установлена иерархическая организация реальных ИСС и проанализировано изменение важнейших свойств и особенностей, характерных для отдельных ЛС, в зависимости от их уровня иерархии в ИСС. Формализована иерархическая декомпозиция топологической структуры ИСС, порождаемая иерархической декомпозицией ИСС по функциональному принципу.

6. На основании специально разработанного подхода формализованы условия, реализующие принцип координируемости ЛЦ и порождаемых ими ЛЗ для нижестоящих ЛС по отношению к соответствующим ЛЦ и ЛЗ для непосредственно вышестоящих ЛС в иерархически организованных ИСС. Формализованы также условия, реализующие принцип координируемости ЛЦ и ЛЗ для ЛС низшего уровня иерархии по отношению к соответствующим ГЦ и ГЗ для иерархически организованных ИСС.

7. Для оптимизации топологической структуры оперативно управляемых ЛС различного уровня иерархии, входящих в состав реальных ИСС, использованы такие известные задачи сетевой оптимизации, как задача о нахождении кратчайшей цепи, а также задача о кратчайшем остовном дереве, поставленные на сетях возможных вариантов топологической структуры оперативно управляемых ЛС. Эффективность предлагаемого подхода обусловлена наличием машинных программ, численно реализующих указанные задачи, которые входят в ППП сетевой оптимизации.

8. На основании специально разработанного концептуального подхода декомпозиция иерархически организованных управляющих систем представлена как определенная система трех последовательно порождающих друг друга изменяющихся иерархических структур: УЛЗ при решении ГЗ, УЛА при реализации ГА, УЛСУ в процессе функционирования ГСУ. Предлагаемый подход формализован семейством отношений изоморфизма между определенными множествами при различных отношениях упорядоченности на изоморфных множествах из множества возможных упорядоченностей.

9. Исходя из соответствующей концептуализации, постулированы условия, необходимые для реализации вертикальных взаимосвязей между отдельными подсистемами иерархически организованных управляющих систем. На основании этого сделаны возможные подходы к формализации вертикальных взаимосвязей и определены прикладные аспекты предлагаемых подходов с учетом специфики реальных управляющих систем рассматриваемого класса.

10. На основании соответствующего концептуального подхода формализованы координирующие воздействия в системах, управляющих иерархически организованными ИСС. Предложен концептуальный подход к моделированию и рассмотрены методы и алгоритмы реализации УЛЗ,

порождаемых иерархически организованными управляющими системами с изменяющейся структурой.

11. На основании соответствующей формализации произведена постановка задачи регулирования ЛР, рассмотрены прикладные аспекты реализации процессов их регулирования в иерархически организованных ИСС, а также разработан эффективный алгоритм динамического распределения процессорного времени управляющей ЭВМ.

12. Разработаны модели, методы и алгоритмы, а также определены технические средства сбора данных и минимизации объемов оперативной информации в системах управления ЛС, входящими в состав оросительных систем.

13. Разработаны принципы организации и функционирования ГСУ для реальных двухуровневых ИСС, реализующих процесс оперативного управления рассматриваемыми объектами. Реализованы задача идентификации состояния входных вершин РС, а также метод формирования кластера состояния входных вершин РС.

14. С использованием моделей и методов современного кластер-анализа и функциональных соответствий, а также теории НМ формализованы локальные процессы оперативного управления отдельными ЛС, входящими в состав иерархически организованных ИСС. На основании этого разработаны эффективные в прикладном аспекте управляющие алгоритмы, реализующие такие процессы.

15. Результаты, полученные в настоящей работе, нашли практическое применение при моделировании ГСУ и алгоритмизации процессов оперативного управления оросительными системами, а также системами водоснабжения. В частности, модели, методы и алгоритмы, содержащиеся в настоящей работе, использованы Институтом гидротехники и мелиорации УААН (г. Киев), Луганским областным производственным управлением мелиорации и водного хозяйства (г. Луганск), областным государственным коммунальным предприятием «Луганскводоканал» (г. Луганск) при разработке и реализации управляющих систем и процессов оперативного управления оросительными системами, а также системами городского водоснабжения.

Экономический эффект от внедрения материалов, разработок и результатов настоящей работы был получен за счет сокращения непроизводительных расходов ЦП и электроэнергии, а также повышения надежности и качества функционирования объектов управления рассматриваемого класса.

## ЛИТЕРАТУРА

1. **Абрамов Н.Н.** Водоснабжение. - М.: Стройиздат, 1982. - 276 с.
2. **Абрамов Н.Н.** Надежность систем водоснабжения. - М.: Наука, 1985. - 278 с.
3. **Абрамов Н.Н.** Теория и методика расчета систем подачи и распределения воды. - М.: Стройиздат, 1972. - 297 с.
4. **Александров В.В.** Надежность систем дальнего газоснабжения. - М.: Недра, 1976. - 320 с.
5. **Альтшуль А.Д.** Гидравлические сопротивления. - М.: Недра, 1970. - 216 с.
6. **Багров Н.М., Кружилин И.П.** Оросительные системы и их эксплуатация. - М.: Агропромиздат, 1988. - 255 с.
7. **Баховец Б.А., Ткачук Я.В.** Основы автоматики и автоматизации производственных процессов в гидромелиорации. - Львов: Выща шк., 1989. - 336 с.
8. **Баясанов Д.Б.** Автоматизированные системы управления трубопроводными объектами коммунального хозяйства. - М.: Стройиздат, 1974. - 312 с.
9. **Баясанов Д.Б., Быков З.Я.** Расчет и проектирование городских газовых сетей среднего и высокого давления. - М.: Стройиздат, 1972. - 270 с.
10. **Баясанов Д.Б., Гурвич Г.М.** Автоматическое регулирование и управление в городских газовых сетях. - М.: Стройиздат, 1970. - 192 с.
11. **Баясанов Д.Б., Чонин А.А.** Распределительные системы газоснабжения. - М.: Стройиздат, 1977. - 406 с.
12. **Бендат Д., Пирсол А.** Прикладной анализ случайных данных: Пер. с англ. - М.: Мир, 1989. - 540 с.
13. **Берж К.** Теория графов и её применение: Пер. с фр. - М.: Мир, 1962. - 312 с.
14. **Бобровский С.А.** Трубопроводный транспорт газа. - М.: Недра, 1976. - 495 с.
15. **Бобровский С.А., Яковлев Е.И.** Газовые сети и газохранилища. - М.: Недра, 1980. - 413 с.
16. **Богомолов А.И., Михайлов К.А.** Гидравлика. - М.: Стройиздат, 1972. - 552 с.
17. Введение в нелинейное программирование: Пер. с нем. / К.-Х. Эльстер, Р. Рейнгарт, М. Шойбле, Г. Донат / Под ред. И.И. Ерёмина - М.: Наука, 1985. - 264 с.
18. **Вентцель Е.С.** Исследование операций. - М.: Сов. радио, 1972. - 552 с.
19. **Вильнер Я.М., Ковалев Н.Т., Некрасов Б.Б.** Справочное пособие по гидравлике, гидромашинам и гидроприводам. - Минск: Высшая шк., 1976. - 415 с.
20. **Водяник П.Ф.** Автоматизация управления газоснабжением городов. - Киев: Будивельник, 1979. - 136 с.
21. **Вольский Э.Л., Константинова И.И.** Режим работы магистрального газопровода. - М.: Недра, 1970. - 168 с.
22. Временная методика проектирования оперативного управления водопроводом. - М.: Академия коммунального хозяйства им. К.Д. Памфилова, 1977. - 77 с.
23. **Вучков И., Бояджиева Л., Солаков Е.** Прикладной линейный регрессионный анализ: Пер. с болгарск. - М.: Финансы и статистика, 1987. - 239 с.
24. **Гарляускас А.И.** Математическое моделирование оперативного и перспективного планирования систем транспорта газа. - М.: Недра, 1975. - 205 с.
25. **Гинзбург Я.Н., Лезнов Б.С.** Современные методы регулирования режимов работы систем водоснабжения крупных городов. - М.: Стройиздат, 1972. - 552 с.
26. **Гудман С., Хидентеми С.** Введение в разработку и анализ алгоритмов: Пер. с англ. - М.: Мир, 1981. - 368 с.
27. **Дружинин В.В., Конторов Д.С.** Проблемы системологии (проблемы теории сложных систем). - М.: Сов. радио, 1976. - 296 с.
28. **Дубовицкий Н.М., Леви Л.И.** Поиск и экономическая эффективность рационального распределения ресурсов // Оценка производственного потенциала в хозяйственном механизме АПК: Сб. науч. тр. - Харьков: Изд-во ХСХИ, 1990. - С.80 - 82.
29. **Дупляк В.Д.** Научно-технический прогресс в орошении. - К.: Урожай, 1989. - 248 с.
30. **Евдокимов А.Г.** Минимизация функций и её приложения к задачам автоматизированного управления инженерными сетями. - Харьков: Выща шк. Изд-во при Харьк. ун-те, 1985. - 228 с.
31. **Евдокимов А.Г.** Оптимальные задачи на инженерных сетях. - Харьков: Выща шк. Изд-во при Харьк. ун-те, 1976. - 153 с.
32. **Евдокимов А.Г., Дубровский В.В., Тевяшев А.Д.** Потокораспределение в инженерных сетях. - М.: Стройиздат, 1979. - 199 с.
33. **Евдокимов А.Г., Тевяшев А.Д.** Оперативное управление потокораспределением в инженерных сетях. - Харьков: Выща шк. Изд-во при Харьк. ун-те, 1980. - 142 с.
34. **Жамбю М.** Иерархический кластер-анализ и соответствия: Пер. с фр. - М.: Финансы и статистика, 1988. - 342 с.
35. **Зангвилл У.** Нелинейное программирование. Единый подход: Пер. с англ. - М.: Сов. радио, 1973. - 312 с.
36. **Идельчик И.Е.** Справочник по гидравлическим сопротивлениям. - М.: Машиностроение, 1975. - 559 с.
37. Информационно-советующая система управления орошением / Остапчик В.П., Костромин В.А., Коваль А.М. и др. / Под ред. Остапчика В.П. - К.: Урожай, 1989. - 248 с.
38. **Ионин А.А.** Газоснабжение. - М.: Стройиздат, 1981. - 415 с.
39. **Кавешников Н.Т.** Эксплуатация и ремонт гидротехнических сооружений. - М.: Агропромиздат, 1989. - 272 с.
40. **Караев Р.А., Левин А.А.** Сбор и передача информации в АСУ трубопроводами. - М.: Энергия, 1975. - 104 с.
41. **Карлин С.** Основы теории случайных процессов: Пер. с англ. - М.: Мир, 1971. - 536 с.

заданного значения (уставки), так и тенденцию к его изменению, определяемую текущей величиной изменения отклонения  $C$ .

Такие правила формируются в виде условных предложений, не содержащих количественных значений. Такая стратегия, основанная на композиционных правилах, является эвристической, она формализует опыт операторов по управлению объектами рассматриваемого класса. В общем стратегия управления заключается в том, чтобы выбрать такое искомое значение относительного перемещения затвора  $H$ , которое бы путем изменения подачи воды из головного водозаборного узла и рассматриваемый МК компенсировало как текущее отклонение уровня  $P$  от заданного значения (уставки), так и тенденцию к его изменению, определяемую текущей величиной изменения отклонения  $C$ .

Рассматриваемый управляющий алгоритм, реализуемый НЛР, состоит из совокупности композиционных правил, каждое из которых представляет собой сложное высказывание, формализованное с помощью операций нечеткой логики [63, 67, 92, 93]. При этом каждое такое композиционное правило, записанное как строка рассматриваемого управляющего алгоритма, выражает соответствие между определенными лингвистическими значениями известных входных переменных  $P$  и  $C$  и искомой выходной переменной  $H$ . Такое соответствие осуществляется посредством реализации определенной совокупности операций нечеткой логики (связок) И, ИЛИ, НЕ. Указанные операции интерпретируются как нахождение *min*, *max*, а также вычитание из единицы, выполняемые над функциями принадлежности соответствующих НМ. Также предполагается, что в рассматриваемом алгоритме два или более композиционных правила соединены между собой связкой ИНАЧЕ, которая интерпретируется как операция *max* [63, 67, 92, 93].

С учетом сделанных замечаний управляющий алгоритм, реализуемый рассматриваемым НЛР, имеет следующий вид:

ЕСЛИ  $P = NB$ , ТО (ЕСЛИ  $C = HE$  ( $NB$  ИЛИ  $NM$ ), ТО  $H = PB$ );  
ЕСЛИ  $P = (NB$  ИЛИ  $NM$ ), ТО (ЕСЛИ  $C = PS$ , ТО  $H = PM$ );  
ЕСЛИ  $P = NS$ , ТО (ЕСЛИ  $C = (PS$  ИЛИ  $NO$ ), ТО  $H = PM$ );  
ЕСЛИ  $P = NO$ , ТО (ЕСЛИ  $C = (PB$  ИЛИ  $PM$ ), ТО  $H = PM$ );  
ЕСЛИ  $P = NO$ , ТО (ЕСЛИ  $C = (NB$  ИЛИ  $NM$ ), ТО  $H = NM$ );  
ЕСЛИ  $P = (PO$  ИЛИ  $NO$ ), ТО (ЕСЛИ  $C = NO$ , ТО  $H = NO$ );  
ЕСЛИ  $P = PO$ , ТО (ЕСЛИ  $C = (NB$  ИЛИ  $NM$ ), ТО  $H = PM$ );  
ЕСЛИ  $P = PO$ , ТО (ЕСЛИ  $C = (PB$  ИЛИ  $PM$ ), ТО  $H = NM$ );  
ЕСЛИ  $P = PS$ , ТО (ЕСЛИ  $C = (PS$  ИЛИ  $NO$ ), ТО  $H = NM$ );  
ЕСЛИ  $P = (PB$  ИЛИ  $PM$ ), ТО (ЕСЛИ  $C = NS$ , ТО  $H = NM$ );  
ЕСЛИ  $P = PB$ , ТО (ЕСЛИ  $C = HE$  ( $NB$  ИЛИ  $NM$ ), ТО  $H = NB$ );  
ЕСЛИ  $P = NO$ , ТО (ЕСЛИ  $C = PS$ , ТО  $H = PS$ );

ЕСЛИ  $P = NO$ , ТО (ЕСЛИ  $C = NS$ , ТО  $H = NS$ );  
ЕСЛИ  $P = PO$ , ТО (ЕСЛИ  $C = NS$ , ТО  $H = PS$ );  
ЕСЛИ  $P = PO$ , ТО (ЕСЛИ  $C = PS$ , ТО  $H = NS$ ).

Такой алгоритм, записанный в виде соответствующей программы на алгоритмическом языке APL, использован для реализации процесса регулирования уровня воды в МК оросительной системы.

## 7.8. Выводы

1. На основании соответствующей формализации произведена постановка задачи регулирования ЛР в иерархически организованных ИСС. С учетом указанной постановки рассмотрены прикладные аспекты реализации процессов регулирования ЛР в ИСС.

2. Разработан эффективный алгоритм динамического распределения процессорного времени управляющей ЭВМ, учитывающий реальные состояния отдельных ЛС различного уровня иерархии в ИСС.

3. Показано, что для создания эффективных алгоритмов, реализующих локальные процессы оперативного управления РС, входящими в состав иерархически организованных оросительных систем, необходимо минимизировать объемы оперативной информации о состояниях подключенных к ним объектов орошения, являющихся ПЦП. Такую минимизацию предлагается осуществить путем снижения размерностей признаков пространств состояний отдельных объектов орошения на основании использования метода главных компонент и факторного анализа.

4. Предложен подход к организации процессов сбора данных в системах управления орошением, в основу которого положена методика сканирования режимов управляемой системы, а также математико-статистические методы предварительной обработки экспериментальных данных. В качестве технических средств для реализации данного подхода использованы соответствующие измерительные преобразователи (датчики), комплексы средств телемеханики, а также управляющая ЭВМ. Показано, что такой подход обеспечивает оперативность процессов сбора данных в системах управления орошением.

5. На основании использования моделей и методов современного кластер-анализа и функциональных соответствий произведена формализация ЛС, входящих в состав иерархически организованных ИСС, как объектов оперативного управления. Данный подход послужил основой для алгоритмизации процессов оперативного управления такими объектами.

6. Для получения рабочей информации о состояниях ЛС иерархически организованных ИСС использована процедура АК, являющаяся

42. Кулик Ю.В. Проектирование систем газоснабжения с учетом качества их функционирования // Наука и техника в городском хозяйстве. - 1990. - № 73. - С. 205 - 217.
43. Кулик Ю.В. Оптимизационный подход к проектированию систем газоснабжения // Нефтяная и газовая промышленность. - 1991. - № 1. - С. 46 - 49.
44. Киенчук А.Ф. Водораспределение на оросительных системах. - К.: Урожай, 1989. - 176 с.
45. Клир Д. Системология. Автоматизация решения системных задач: Пер. с англ. - М.: Радио и связь, 1990. - 544 с.
46. Колмогоров А.Н., Фомин С.В. Элементы теории функций и функционального анализа. - М.: Наука, 1981. - 544 с.
47. Краус М., Кучбах Э., Вошни О.Г. Сбор данных в управляющих вычислительных системах: Пер. с нем. - М.: Мир, 1987. - 294 с.
48. Кузьмин И.В., Кедрус В.А. Основы теории информации и кодирования. - К.: Выща шк., 1977. - 279 с.
49. Кулик Ю.В. Автоматизированное проектирование и управление режимами работы развивающихся трубопроводных систем: Дис... д-ра техн. наук: 05.13.07. - К., 1991. - 331 с.
50. Кулик Ю.В., Михайленко В.М. Цели и критерии управления развивающихся трубопроводных систем // Автоматика. - 1990. - № 4. - С. 77 - 80.
51. Кулик Ю.В., Михайленко В.М. К вопросу управления трубопроводными системами в случае стохастической модели потокораспределения // Автоматика. - 1990. - № 5. - С. 81 - 83.
52. Кулик Ю.В., Михайленко В.М. Анализ устойчивости режимов работы активных элементов трубопроводных систем // Автоматика. - 1991. - № 2. - С. 89 - 91.
53. Кулик Ю.В., Михайленко В.М. Гидравлический расчет проектируемых трубопроводных систем в случае вероятностного потокораспределения // Электронное моделирование. - 1991. - № 2. - С. 67 - 71.
54. Леви Л.И. Универсальные локальные задачи в изменяющихся иерархических структурах // АСУ и приборы автоматки. - Харьков: Выща шк., 1988. - Вып.87. - С. 102 - 105.
55. Леви Л.И. Координирующие воздействия в иерархических системах // АСУ и приборы автоматки. - Харьков: Выща шк., 1989. - Вып.91. - С. 73 - 76.
56. Леви Л.И. Эвристический подход к управлению инженерными сетями // АСУ и приборы автоматки. - Харьков: Выща шк., 1989. - Вып. 92. - С. 87 - 90.
57. Леви Л.И. Об одном подходе к оценкам надёжности и управляемости инженерных сетей // АСУ и приборы автоматки. - Харьков: Основа, 1992. - Вып. 97. - С. 44 - 47.
58. Леви Л.И. Координируемость локальных целей функционирования и задач управления в инженерных сетевых системах // АСУ и приборы автоматки. - Харьков: Основа, 1992. - Вып. 98. - С. 36 - 40.
59. Леви Л.И. Об определении эффективности управляющих воздействий в инженерных сетях // АСУ и приборы автоматки. - Харьков: Основа, 1992. - Вып. 98. - С. 56 - 58.
60. Леви Л.И. Координируемость по отношению к глобальной цели функционирования и задаче управления в инженерных сетевых системах // АСУ и приборы автоматки. - Харьков: Основа, 1993. - Вып. 99. - С. 69 - 73.
61. Леви Л.И. Статистические методы в управлении инженерными сетями // Мелиорация и водное хозяйство - К.: Урожай, 1991. - Вып.75. - С. 68 - 72.
62. Леви Л.И. Свойства локальных сетей в инженерных сетевых системах // Мелиорация и водное хозяйство - К.: Урожай, 1992. - Вып. 76. - С. 38 - 41.
63. Леви Л.И. Нечёткий логический регулятор уровня воды в магистральном канале оросительной системы // Мелиорация и водное хозяйство - К.: Урожай, 1992. - Вып. 76. - С. 49 - 52.
64. Леви Л.И. Минимизация объемов оперативной информации о состояниях объектов орошения // Мелиорация и водное хозяйство - К.: Урожай, 1992. - Вып.77. - С. 23 - 27.
65. Леви Л.И. Оптимизация проектируемых локальных сетей инженерных сетевых систем // Мелиорация и водное хозяйство - К.: Урожай, 1993. - Вып. 78. - С. 70 - 72.
66. Леви Л.И. Сбор данных в системах управления орошением // Мелиорация и водное хозяйство - К.: Урожай, 1993. - Вып.79. - С. 24 - 27.
67. Леви Л.И. Нечеткий подход к управлению инженерными сетевыми системами // Мелиорация и водное хозяйство - К.: Урожай, 1993. - Вып.79. - С. 75 - 78.
68. Леви Л.И. Автоматическая классификация в управлении инженерными сетевыми системами // Моделирование и автоматизация технологических процессов сельскохозяйственного производства: Сб. научн. тр. МИИСП. - М.: Изд-во МИИСП, 1991. - С. 39 - 42.
69. Леви Л.И. Реализация локальных процессов управления в инженерных сетевых системах // Автоматика, вычислительная техника и моделирование в сельском хозяйстве: Сб. научн. тр. МГАУ. - М.: Изд-во МГАУ, 1993. - С. 59 - 65.
70. Леви Л.И. Средства и методы реализации процесса сбора данных в системах управления орошением // Автоматика, вычислительная техника и моделирование в сельском хозяйстве: Сб. научн. тр. МГАУ. - М.: Изд-во МГАУ, 1993. - С. 87 - 92.
71. Леви Л.И. Иерархическая декомпозиция и распараллеливание процессов управления инженерными сетевыми системами // Моделирование, автоматика и вычислительная техника в сельском хозяйстве: Сб. научн. тр. МГАУ. - М.: Изд-во МГАУ, 1994. - С. 54 - 57.
72. Леви Л.И. Моделирование координирующих связей в иерархически организованных управляющих системах // Материалы отчётной научно-технической конференции сотрудников ЛСХИ по итогам 1993 года. Часть II. - Луганск: Изд-во ЛСХИ, 1994. - С. 31 - 32.
73. Леви Л.И. Моделирование обратных связей в иерархически организованных управляющих системах // Материалы отчётной научно-технической конференции сотрудников ЛСХИ по итогам 1994 года. - Луганск: Изд-во ЛСХИ, 1995. - С. 33.
74. Леви Л.И. Формализм нечетких множеств в моделировании и алгоритмизации процессов оперативного управления инженерными сетевыми системами // Сб. научн. тр. ЛСХИ. Часть 3. - Луганск: Изд-во ЛСХИ, 1997. - С. 39 - 40.

75. **Леви Л.И., Скрипкина А.С.** Кластер-анализ и функциональные соответствия в управлении ИСС // Збірник наукових праць Луганського державного аграрного університету. - Луганськ: Вид-во ЛДАУ, 1999. - № 4/13. - С. 240 - 243.
76. **Леви Л.И., Скрипкина А.С.** Декомпозиция управляющих систем с изменяющейся иерархической структурой // Збірник наукових праць Луганського державного аграрного університету. - Луганськ: Вид-во ЛДАУ, 2000. - № 6(16). - С. 57 - 60.
77. **Леви Л.И.** Комбинаторно-графовый подход к управлению инженерными сетями // Збірник наукових праць Луганського державного аграрного університету. - Луганськ: Вид-во ЛДАУ, 2000. - № 8. - С. 52 - 54.
78. **Леви Л.И.** Планирование исходных потоков распределений в инженерных сетях // Вісник Східноукр. нац. ун-ту. - 2000. - № 9. - С. 133 - 138.
79. **Леви Л.И.** Декомпозиция в задачах моделирования процессов оперативного управления иерархически организованными инженерными сетевыми системами. - Луганск: Изд-во ВУГУ, 1996. - 122 с.
80. **Леви Л.И.** Иерархическая декомпозиция в задачах оперативного управления инженерными сетевыми системами. Дис... д-ра техн. наук: 05.13.07 - Луганск, 1999. - 342 с.
81. **Макухин А.Г., Малый В.В., Леви Л.И.** О целях функционирования и задачах управления в одном классе иерархически организованных сложных технических систем // Ворошиловградский машиностроительный институт. - Ворошиловград, 1985. - 8 с. - Деп. в УкрНИИТИ 26.04.85, № 836 Ук-85Деп.
82. **Макухин А.Г., Малый В.В., Леви Л.И.** Управление инженерными сетевыми системами с динамическим распределением процессорного времени // Ворошиловградский машиностроительный институт. - Ворошиловград, 1985. - 8 с. - Деп. в УкрНИИТИ 26.04.85, № 840 Ук-85Деп.
83. **Макухин А.Г., Малый В.В., Леви Л.И.** Об одной задаче автоматизированного проектирования структурно-модульных систем // Ворошиловградский машиностроительный институт. - Ворошиловград, 1987. - 8 с. - Деп. в УкрНИИТИ 12.09.87, № 2466 - Ук.87.
84. **Малый В.В., Макухин А.Г., Леви Л.И.** Моделирование структурных элементов технических систем модульного типа с унифицированными каналами сопряжения // Ворошиловградский машиностроительный институт. - Ворошиловград, 1988. - 10 с. - Деп. в УкрНИИТИ 22.08.88, № 2074-Ук.88.
85. **Мангейм М.Л.** Иерархические структуры. Модель процессов проектирования и планирования: Пер. с англ. - М.: Мир, 1970. - 180 с.
86. **Мандель И.Д.** Кластерный анализ. - М.: Финансы и статистика, 1988. - 176 с.
87. **Мейдональд Д.** Вычислительные алгоритмы в прикладной статистике: Пер. с англ. - М.: Финансы и статистика, 1988. - 350 с.
88. **Месарович М., Мако Д., Такахага И.** Теория иерархических многоуровневых систем: Пер. с англ. - М.: Мир, 1973. - 344 с.
89. **Михайленко В.М.** Методы расчета шахтных вентиляционных систем с применением ЭВМ. - К.: Техника, 1974. - 112 с.
90. **Михалевич В.С., Волкович В.Л.** Вычислительные методы исследования и проектирования сложных систем. - М.: Наука, 1982. - 286 с.
91. **Нейман Д., Моргенштерн О.** Теория игр и экономическое поведение: Пер. с англ. - М.: Наука, 1970. - 708 с.
92. **Нечёткие множества в моделях управления и искусственного интеллекта / Аверкин А.Н., Батыршин И.З., Блишун А.Ф. и др.** - М.: Наука, 1986. - 312 с.
93. **Обработка нечёткой информации в системах принятия решений / Борисов А.Н., Алексеев А.В., Меркурьева Г.В. и др.** - М.: Радио и связь, 1989. - 304 с.
94. **Оре О.** Теория графов: Пер. с англ. - М.: Наука, 1980. - 336 с.
95. **Островский А.С.** Комплексная автоматизация и телемеханизация систем водоснабжения промышленных предприятий. - М.-Л.: Госэнергоиздат, 1961. - 168 с.
96. **Палишкин Н.А.** Гидравлика и сельскохозяйственное водоснабжение. - М.: Агропромиздат, 1990. - 351 с.
97. **Панкратов В.С., Дубинский А.В., Сиперштейн Б.И.** Информационно-вычислительные системы в диспетчерском управлении газопроводами. - Л.: Недра, 1988. - 246 с.
98. **Первозванский А.А., Вайцгорн В.Г.** Декомпозиция, агрегирование и приближенная оптимизация. - М.: Наука, 1979. - 342 с.
99. **Повх И.Л.** Техническая гидродинамика. - Л.: Машиностроение, 1976. - 502 с.
100. **Прикладная статистика: Классификация и снижение размерности: Справ. изд. / С.А. Айвазян, В.М. Бухштабер, И.С. Енюков, Л.Д. Мешалкин / Под ред. С.А. Айвазяна** - М.: Финансы и статистика, 1989. - 607 с.
101. **Романенко В.Д.** Синтез многомерных регуляторов состояния с компенсацией медленно изменяющихся возмущений при разнотемповой дискретизации // Вестн. Киев. политехн. ин-та. Техн. кибернетика. -1991. - Вып. 15. - С. 3 - 11.
102. **Романенко В.Д., Игнатенко Б.В.** Адаптивное управление технологическими процессами на базе микроЭВМ. - К.: Выща шк. - 1990. - 334 с.
103. **Сea Ж.** Оптимизация. Теория и алгоритмы: Пер. с фр. - М.: Мир, 1973. - 244 с.
104. **Сегединов А.А.** Инженерное обеспечение города. - М.: Моск. рабочий, 1986. - 312 с.
105. **Сельскохозяйственные гидротехнические мелиорации / Богушевский А.А., Голованов А.И., Кутергин В.А. и др. / Под ред. Маркова Е.С.** - М.: Колос, 1981. - 375 с.
106. **Сешу С., Рид М.Б.** Линейные графы и электрические цепи: Пер. с англ. - М.: Высш. шк., 1971. - 448 с.
107. **Сингх М., Титли А.** Системы: декомпозиция, оптимизация и управление: Пер. с англ. - М.: Машиностроение, 1986. - 496 с.
108. **Сироткин В.П.** Схемы и расчет водоводов и водопроводных сетей. - М.: Высш. шк., 1968. - 271 с.
109. **Системы параллельной обработки: Пер. с англ. / Под ред. Ивенса Д.** - М.: Мир, 1985. - 416 с.
110. **Смирнов В.А., Герчиков С.В.** Применение современной вычислительной техники в городском водоснабжении. - М.: Стройиздат, 1970. - 168 с.
111. **Сумароков С.В.** Математическое моделирование систем водоснабжения. - Новосибирск: Наука. Сиб. отд-ние, 1983. - 167 с.
112. **Сухарев М.Г., Ставровский Е.Р.** Расчёты систем транспорта газа с помощью вычислительных машин. - М.: Недра, 1971. - 206 с.

113. **Тевяшев А.Д.** Оперативное управление потокораспределением в инженерных сетях в условиях неопределенности: Дис. ... д-ра техн. наук: 05.13.01. Харьков, 1984. - 541 с.
114. **Темпель Ф.Г.** Моделирование газоснабжающих систем. - Л.: Недра, 1986. - 184 с.
115. **Торчинский Я.М.** Оптимизация проектируемых и эксплуатируемых газораспределительных систем. - Л.: Недра, 1988. - 239 с.
116. **Турк В.И., Минаев А.В., Карелин В.Я.** Насосы и насосные станции. - М.: Стройиздат, 1977. - 296 с.
117. **Ткаченко С.В., Бирючинская З.Н., Кулик Ю.В.** Оценка целесообразности строительства ведомственных АЗС // Нефтяная и газовая промышленность. - 1990. - № 3. - С. 44 - 45.
118. **Усаковский В.М.** Водоснабжение в сельском хозяйстве. - М.: Агропромиздат, 1989. - 280 с.
119. Факторный, дискриминантный и кластерный анализ: Пер. с англ./ Ким Д.О., Мюллер Ч.У., Клекка У.Р. и др. / Под ред. Енюкова И.С. - М.: Финансы и статистика, 1989. - 215 с.
120. **Феллер В.** Введение в теорию вероятностей и её приложения: В 2 т.: Пер. с англ. - М.: Мир, 1967. - Т. 1. - 498 с.
121. **Фельдбаум А.А., Бутковский А.Г.** Методы теории автоматического управления. - М.: Наука, 1971. - 744 с.
122. **Фиакко А., Мак-Кормик Г.** Нелинейное программирование. Методы последовательной безусловной минимизации: Пер. с англ. - М.: Мир, 1972. - 240 с.
123. **Филлипс Д., Гарсиа-Диас А.** Методы анализа сетей: Пер. с англ. - М.: Мир, 1984. - 496 с.
124. **Фильчаков П.Ф.** Численные и практические методы прикладной математики. - К.: Наук. думка, 1970. - 800 с.
125. **Фихтенгольц Г.М.** Курс дифференциального и интегрального исчисления: В 2 т. - М.: Наука, 1970. - Т. 1. - 800 с.
126. **Форд Л.Р., Фалкерсон Д.** Потоки в сетях: Пер. с англ. - М.: Мир, 1966. - 276 с.
127. **Фритч В.** Применение микропроцессоров в системах управления: Пер. с нем. - М.: Мир, 1984. - 464 с.
128. **Фрэнк Г., Фриш И.** Сети, связь и потоки: Пер. с англ. - М.: Связь, 1978. - 448 с.
129. **Харари Ф.** Теория графов: Пер. с англ. - М.: Мир, 1973. - 300 с.
130. **Цой С.** Автоматическое управление вентиляционными системами шахт. - Алма-Ата: Наука, 1975. - 335 с.
131. **Цой С., Рогов Е.И.** Основы теории вентиляционных систем. - Алма-Ата: Наука, 1976. - 283 с.
132. **Чапковский В.Л.** Автоматика в системах водоснабжения и канализации. - М.: Стройиздат, 1965. - 60 с.
133. **Чернышев М.К., Гаджиев М.Ю.** Математическое моделирование иерархических систем с приложениями к биологии и экономике. - М.: Наука, 1983. - 192 с.
134. **Шарадкин А.М., Молчанов А.А.** Дискретизация информационных сигналов. - К.: Выща шк., 1991. - 186 с.
135. **Шварц Л.** Анализ: В 2 т.: Пер. с фр. - М.: Мир, 1972. - Т. 1. - 824 с.
136. **Шумаков Б.Б., Губанков Л.Н., Леви Л.И.** Об иерархической организации оросительных систем // Доклады ВАСХНИЛ. - 1983. - № 11. - С. 34 - 35.
137. **Шумаков Б.Б., Губанков Л.Н., Леви Л.И.** Оптимальное проектирование магистральных каналов оросительных систем // Доклады ВАСХНИЛ. - 1988. - № 2. - С. 41 - 43.
138. **Шумаков Б.Б., Губанков Л.Н., Леви Л.И.** Система параметров для оценки алгоритмов, управляющих оросительными системами // Вестник сельскохозяйственной науки. - 1985. - № 11. - С. 131 - 132.
139. **Эдвардс Р.** Функциональный анализ. Теория и приложения: Пер. с англ. - М.: Мир, 1969. - 1071 с.
140. **Bennington G.E.** An Efficient Minimal Cost Flow Algorithm // Management Science. - 1973. - Vol. 19. - P. 1042 - 1051.
141. **Bennington G.E.** Applying Network Analysis // Journal of Industrial Engineering. - 1974. - Vol. 6. - P. 17 - 25.
142. **Edmonds J., Karp R.M.** Theoretical Improvements in algorithmic Efficiency for Network Flow Problems // Journal of the Association of Computing Machinery. - 1972. - Vol. 19. - P. 248 - 264.
143. **Haykin S.** Neural Network. A Comprehensive Foundation. - New York: Macmillan College Publishing Company, 1994. - 691 p.
144. **Holland J.H.** Adaptation in natural and artificial systems. An introductory analysis with application to biology, control, and artificial intelligence. - London: Bradford book edition, 1994 - 211 p.
145. **Maurras J.F.** Optimisation of the Flow through Networks with Gains // Mathematical Programming. - 1972. - Vol. 3. - P. 135 - 144.
146. **Narendra K.S., Parthasarathy K.** Identification and control of dynamical system using neural networks // IEEE Trans. on Neur. Net. - 1990. - Vol. 1. N 1. - P. 4 - 27.
147. **Schaffer J.D., Whitley D., Eshelman L.J.** Combinations of Genetic Algorithms and Neural Networks: A Survey of the State of the Art // In: Proc. Of the Int. Workshop on Combinations of Genetic Algorithms and Neural Networks (Eds. L.D. Whitley, J.D. Schaffer). - Baltimore, Maryland, 1992. - P. 1 - 37.
148. **Shier D.A.** Iterative Methods for Determining the K Shortest Paths in a Network // Networks. - 1976. - Vol. 6. - P. 205 - 230.
149. **Park J., Sandberg I.W.** Universal approximation using radial basis function networks // Neural Computation. - 1991. - Vol. 3. - P. 246 - 257.
150. **Truemper K.** An Efficient Scaling Procedure for Gains Networks // Networks. - 1976. - Vol. 6. - P. 151 - 160.
151. **Zadeh N.** A Bad Network Problem for the Simplex Method and Other Minimum Cost Flow Algorithms // Mathematical Programming. - 1973. - Vol. 5. - P. 255 - 266.

## СОДЕРЖАНИЕ

ПЕРЕЧЕНЬ УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ И СОКРАЩЕНИЙ .....	3
ВВЕДЕНИЕ.....	5
Раздел 1	
ПРОБЛЕМА ОПЕРАТИВНОГО УПРАВЛЕНИЯ ИНЖЕНЕРНЫМИ СЕТЯМИ .....	14
1.1. Формализованное описание топологических структур оперативно управляемых инженерных сетей .....	14
1.2. Математические модели функциональных элементов.....	17
1.3. Моделирование потокораспределений в оперативно управляемых инженерных сетях .....	20
1.4. Обобщенная задача оперативного управления.....	24
1.5. Система показателей для оценки алгоритмов оперативного управления .....	26
1.6. Проблема синтеза управляющих алгоритмов, порождаемых обобщенной задачей оперативного управления инженерными сетями.....	29
1.7. Выводы.....	33
Раздел 2	
КОНЦЕПТУАЛЬНЫЕ ПОДХОДЫ К АНАЛИЗУ НАДЕЖНОСТИ И УПРАВЛЯЕМОСТИ ИНЖЕНЕРНЫХ СЕТЕЙ.....	35
2.1. Комбинаторно-графовый подход к управлению инженерными сетями.....	35
2.2. Методика оценки эффективности управляющих воздействий.....	39
2.3. Методика оценки надежности и управляемости инженерных сетей.....	42
2.4. Особенности планирования исходных потокораспределений.....	45
2.5. Разработка и реализация статистических методов для управления инженерными сетями .....	54
2.6. Выводы.....	58

## Раздел 3

ИНЖЕНЕРНЫЕ СЕТЕВЫЕ СИСТЕМЫ КАК ИЕРАРХИЧЕСКИ ОРГАНИЗОВАННЫЕ ОБЪЕКТЫ ОПЕРАТИВНОГО УПРАВЛЕНИЯ: МОДЕЛИРОВАНИЕ И ИССЛЕДОВАНИЕ .....	60
3.1. Концептуальная модель иерархической организации инженерных сетевых систем.....	60
3.2. Принципы иерархической организации реальных двухуровневых инженерных сетевых систем.....	64
3.3. Моделирование распределительных сетей как локальных сетей нижнего уровня иерархии .....	66
3.4. Моделирование магистральной сети как локальной сети верхнего уровня иерархии .....	69
3.2. Оптимизация трассировки магистральных каналов оперативно управляемых оросительных систем.....	72
3.6. Оптимизация топологической структуры оперативно управляемых локальных сетей .....	75
3.7. Выводы .....	77

## Раздел 4

ПРОБЛЕМА КООРДИНИРУЕМОСТИ В ИЕРАРХИЧЕСКИ ОРГАНИЗОВАННЫХ ОПЕРАТИВНО УПРАВЛЯЕМЫХ ИНЖЕНЕРНЫХ СЕТЕВЫХ СИСТЕМАХ.....	79
4.1. Иерархическая декомпозиция топологической структуры инженерных сетевых систем.....	79
4.2. Координируемость локальных целей функционирования и локальных задач оперативного управления в многоуровневых инженерных сетевых системах.....	82
4.3. Анализ координируемости локальных целей функционирования и локальных задач оперативного управления по отношению к глобальной цели и глобальной задаче в многоуровневых инженерных сетевых системах.....	86
4.4. Моделирование локальных и глобальных целей функционирования и задач оперативного управления в реальных двухуровневых инженерных сетевых системах.....	89
4.5. Координируемость локальных задач оперативного управления по отношению к глобальной задаче в реальных двухуровневых инженерных сетевых системах.....	92
4.6. Выводы .....	94

Раздел 5

**ОБОСНОВАНИЕ КОНЦЕПТУАЛЬНЫХ ОСНОВ ИЕРАРХИЧЕСКОЙ  
ОРГАНИЗАЦИИ СИСТЕМ ОПЕРАТИВНОГО УПРАВЛЕНИЯ  
ИНЖЕНЕРНЫМИ СЕТЕВЫМИ СИСТЕМАМИ..... 95**

- 5.1. Декомпозиция управляющих систем с изменяющейся иерархической структурой ..... 95
- 5.2. Формализованное описание координирующих связей в иерархически организованных управляющих системах ..... 99
- 5.3. Формализация обратных связей..... 102
- 5.4. Формирование координирующих воздействий в иерархически организованных управляющих системах ..... 106
- 5.5. Формализация и решение универсальных локальных задач в управляющих системах с изменяющейся иерархической структурой ..... 110
- 5.6. Выводы..... 114

Раздел 6

**ГЛОБАЛЬНАЯ СИСТЕМА ОПЕРАТИВНОГО УПРАВЛЕНИЯ  
РЕАЛЬНЫМИ ДВУХУРОВНЕВЫМИ ИНЖЕНЕРНЫМИ СЕТЕВЫМИ  
СИСТЕМАМИ: МОДЕЛИРОВАНИЕ И ИССЛЕДОВАНИЕ..... 116**

- 6.1. Принципы организации глобальной системы оперативного управления ..... 116
- 6.2. Реализация процесса оперативного управления реальными двухуровневыми инженерными сетевыми системами ..... 119
- 6.3. Реализация задачи идентификации состояния входных вершин распределительной сети ..... 125
- 6.4. Реализация метода формирования кластера состояния входных вершин распределительной сети ..... 127
- 6.5. Выводы..... 132

Раздел 7

**ОПЫТ РЕАЛИЗАЦИИ ЛОКАЛЬНЫХ ПРОЦЕССОВ ОПЕРАТИВНОГО  
УПРАВЛЕНИЯ В ИЕРАРХИЧЕСКИ ОРГАНИЗОВАННЫХ  
ИНЖЕНЕРНЫХ СЕТЕВЫХ СИСТЕМАХ..... 134**

- 7.1. Моделирование и реализация процессов регулирования локальных режимов функционирования ..... 134
- 7.2. Оперативное управление иерархически организованными инженерными сетевыми системами с динамическим распределением процессорного времени..... 138

- 7.3. Минимизация объемов оперативной информации о состояниях объектов орошения..... 141

- 7.4. Реализация процессов сбора данных в системах управления орошением..... 147

- 7.5. Метод кластер-анализа и функциональных соответствий как реализационная основа процессов оперативного управления инженерными сетевыми системами ..... 149

- 7.6. Методы автоматической классификации при реализации процессов оперативного управления инженерными сетевыми системами..... 153

- 7.7. Использование нечеткого подхода для реализации процессов оперативного управления инженерными сетевыми системами..... 155

- 7.8. Выводы ..... 159

**ЗАКЛЮЧЕНИЕ..... 161**

**ЛИТЕРАТУРА ..... 164**

Наукове видання

**ЛЄВІ Леонід Ісаакович**

**ОПЕРАТИВНЕ УПРАВЛІННЯ  
ІНЖЕНЕРНИМИ МЕРЕЖНИМИ СИСТЕМАМИ**

Редактор *З.І. Андропова*  
Техн. редактор *Т.М. Дрогвоз*  
Оригінал-макет *Т.В. Погорелова*

Підписано до друку 14.03.2001.

Формат 60×84<sup>1</sup>/<sub>16</sub>. Папір типогр. Гарнітура Times.

Друк офсетний. Умов. друк. арк. 10,2. Обл. вид. арк. 12,7.

Тираж 1000 екз. Вид. № 499. Замов. № . Ціна договірна.

Видавництво

Східноукраїнського національного університету  
91034, м. Луганськ, кв. Молодіжний, 20а

Адреса редакції: 91034, м. Луганськ, кв. Молодіжний, 20а

Телефон: 8 (0642) 46-13-04. Факс: 8 (0642) 46-13-64.

E-mail: uni@vugu.lugansk.ua <http://vugu.lugansk.ua>