ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«КУЗБАССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ
имени Т.Ф. ГОРБАЧЕВА»

На правах рукописи

Варнавский Кирилл Александрович

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ СИСТЕМ ВНЕШНЕГО И ВНУТРЕННЕГО ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ПРЕДПРИЯТИЙ НА ОСНОВЕ УВЕЛИЧЕНИЯ ИХ ИНФОРМАЦИОННОГО РЕСУРСА

Специальность: 05.09.03 – «Электротехнические комплексы и системы»

ДИССЕРТАЦИЯ
на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель –
доктор технических наук,
профессор Матвеев В.Н.

Кемерово – 2017

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ 4

1. СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ИССЛЕДУЕМОГО ВОПРОСА 10

1.1. Актуальные аспекты проблемы эффективности функционирования систем электроснабжения горных и промышленных предприятий 10

1.2. Современное состояние распределительных и питающих систем электроснабжения..... 22

1.3. Анализ методов оценки эффективности функционирования систем электроснабжения 26

1.4. Учет человеческого фактора в системах электроснабжения горных и промышленных предприятий 29

1.5. Выводы по главе..... 32

2. ИНФОРМАЦИОННАЯ МОДЕЛЬ СЛОЖНОЙ СИСТЕМЫ 34

2.1. Информация в сложной системе и ее влияние на эффективность функционирования..... 34

2.2. Структурное описание системы 39

2.3. Насыщенность системы оперативной информацией 48

2.4. Информационный ресурс сложной системы..... 52

2.5. Синтез систем электроснабжения 57

2.6. Выводы по главе..... 58

3. ПОВЫШЕНИЕ ИНФОРМАЦИОННОГО РЕСУРСА СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ КЕМЕРОВСКОГО АО «АЗОТ»..... 61

3.1. Анализ системы электроснабжения КАО «АЗОТ» 61

3.2. Оценка способов повышения информационного ресурса системы электроснабжения КАО «АЗОТ»..... 72

3.3. Совершенствование системы электроснабжения КАО «АЗОТ» 75

3.4. Выводы по главе..... 82

4. ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУР СИСТЕМ ВНЕШНЕГО ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ГОРНЫХ И ПРОМЫШЛЕННЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ СИБИРСКОГО РЕГИОНА 84

4.1. Структурный анализ систем внешнего электроснабжения горных и промышленных предприятий Кемеровской области 85

4.2. Совершенствование структуры системы внешнего электроснабжения потребителей Кемеровского района 93

4.3. Структурный анализ региональных систем электроснабжения Сибирского федерального округа 95

4.4. Выводы по главе 104

ЗАКЛЮЧЕНИЕ 106

ЛИТЕРАТУРА 108

ПРИЛОЖЕНИЕ А 119

ПРИЛОЖЕНИЕ Б 138

ПРИЛОЖЕНИЕ В 144

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы исследования. Наметившаяся в последние годы тенденция роста числа остановок производственного оборудования горных и промышленных предприятий из-за внезапных прекращений подачи электроэнергии свидетельствует о снижении эффективности функционирования систем электроснабжения (СЭС) предприятий, как внешних, так и внутренних. Под эффективностью функционирования СЭС понимается ее свойство сохранять работоспособность и гарантированно обеспечивать электроснабжение потребителей при возникающих и изменяющихся случайным образом событиях как внутри, так и вне СЭС.

Незапланированные простои промышленного оборудования из-за случайных перерывов электропитания, зачастую длительные, приводят к нарушениям сложных технологических процессов, увеличивая производственные издержки, что, в конечном счете, отрицательно сказывается на конкурентоспособности продукции предприятия. Для отдельных производств случайные перерывы электроснабжения, помимо остановки технологического процесса, могут значительно снизить производственную безопасность.

Для СЭС, как объекта со сложной структурой, высокая эффективность функционирования во многом обеспечивается использованием определенных принципов при ее создании и дальнейшем развитии. Однако на практике в большинстве случаев развитие СЭС происходит при отсутствии должного обоснования изменений структуры системы. Поэтому многие существующие СЭС имеют разнообразные структурные недостатки, обусловленные их «историческим» развитием, которые приводят к неожиданно тяжелым последствиям для конечных потребителей при возникновении аварийных ситуаций на отдельных объектах СЭС. Подтверждением этому служат участившиеся в последние годы случаи длительных прекращений подачи электроэнергии горным предприятиям Кузбасса из-за аварий в системах внешнего электроснабжения.

Помимо свойств структуры, значительное влияние на СЭС оказывает

человек-оператор, выполняющий ключевую роль в процессе управления и обслуживания СЭС, поэтому учет данного факта обязателен при проведении исследования эффективности функционирования.

Отсутствие официальных методик проведения подобной многофакторной оценки эффективности функционирования СЭС определяет актуальность задачи по поиску и разработке новых способов повышения эффективности функционирования СЭС как с научной точки зрения, так и с целью практического применения. Для решения данной задачи необходимо использовать комплексный подход, позволяющий учесть различные факторы, которые влияют на эффективность функционирования СЭС.

Степень разработанности темы исследования. Значительный вклад в исследование эффективности функционирования СЭС внесли такие ученые, как Гамм А.З., Абраменкова Н.А., Воропай Н.И., Ефимов Д.Н., Васин В.П., Войтов О.Н., Голуб И.И., Фокин Ю.А, Туфанов В.А., Кудрин Б.И., Разгильдеев Г.И., Абрамович Б.Н., Лоскутов А.Б., P. Hines, S. Blumsack и др. Полученные результаты в работах этих авторов позволили сделать вывод о том, что эффективность функционирования СЭС в значительной степени зависит от ее структурных и информационных качеств, характеристики которых до сих пор остаются предметом дискуссий.

Цель работы – разработать научно-обоснованные рекомендации, обеспечивающие повышение эффективности функционирования систем внешнего и внутреннего электроснабжения предприятий.

Идея работы – повышение эффективности функционирования СЭС достигается с помощью увеличения информационного ресурса СЭС посредством совершенствования формирующих его информационных составляющих – структурной и оперативной.

Основные задачи исследования:

1. Провести анализ влияния структурной и оперативной составляющих информационного ресурса СЭС на бесперебойность подачи электроэнергии потребителям.

2. Разработать программу проведения поэтапной комплексной оценки эффективности функционирования СЭС на основе анализа заложенной в ней структурной и оперативной информации.

3. Создать информационно-энергетическую модель (ИЭМ) СЭС промышленного предприятия, позволяющую учесть топологические и эксплуатационные характеристики ее функционирования.

4. Провести анализ качества структур систем внешнего электроснабжения горных и промышленных предприятий.

5. Провести оценку разработанных вариантов повышения эффективности функционирования систем внешнего и внутреннего электроснабжения предприятий при помощи предложенного подхода к исследованию эффективности функционирования СЭС.

Научная новизна работы:

- в качестве критериев, оценивающих свойства топологии СЭС, впервые применены предложенные в работе структурные показатели;

- предложен способ проведения информационного анализа СЭС, отличающийся поэтапным исследованием структурной и оперативной составляющих, при помощи которых формируется итоговый комплексный показатель эффективности функционирования – информационный ресурс СЭС;

- предложен способ выявления «ключевых точек» СЭС, отличающийся использованием степени участия элемента в формировании структуры СЭС, определяемой при помощи его ранга;

- предложен способ структурной классификации СЭС, отличающийся использованием в качестве основного классификатора характеристики, определяющей совершенство топологии СЭС – упорядоченности структуры.

Теоретическая и практическая значимость. Предложенный подход к исследованию СЭС может быть использован для решения широкого спектра технико-эксплуатационных задач, таких как:

- комплексная оценка эффективности функционирования существующих СЭС различных уровней;

- анализ и определение наиболее рационального варианта реконструкции систем внешнего и внутреннего электроснабжения горных и промышленных предприятий;

- выявление «ключевых точек» СЭС и выработка мероприятий по снижению их значимости;

- разработка штатных расписаний структурных подразделений предприятия, должностных инструкций для электротехнического персонала, схем обслуживания и ремонта производственных электроустановок.

Полученные научные результаты могут быть использованы в исследованиях, направленных на повышение эффективности функционирования крупных электроэнергетических объединений, а также в проектах по созданию электрических сетей нового поколения Smart Grid.

Методология и методы исследования. Проведенные исследования основывались на элементах системного анализа, общих положениях теорий графов и информации, методах матричного анализа и математической статистики, имитационном моделировании.

Научные положения, выносимые на защиту:

1. Использованный в качестве комплексного показателя информационный ресурс СЭС, учитывающий как топологические свойства СЭС, характеризуемые структурными показателями, так и особенности управляющих воздействий на элементы СЭС, обусловленные перемещением потоков оперативной информации, определяет эффективность функционирования СЭС.

2. Комплексный подход, включающий исследование топологии СЭС с позиции оптимальности по критерию упорядоченности и оценку информационной насыщенности СЭС, позволяет выявить наиболее рациональные варианты ее модернизации и реконструкции.

3. Ранжирование элементов СЭС с позиции их структурной значимости позволяет выявить подстанции (либо отдельные секции шин мощных подстанций) – «ключевые точки», от функционирования которых зависит бесперебойное электроснабжение большого числа потребителей.

Достоверность научных положений и выводов, сформулированных в диссертационной работе, обеспечивается корректностью принятых допущений при постановке задач, использованием апробированных методов структурного анализа и оценки информационной насыщенности сложных технических систем, а также подтверждается результатами вычислительных экспериментов, полученных в процессе исследований, согласующимися со статистическими данными.

Личный вклад автора заключается в выполнении основного объема исследований, изложенных в работе, в обработке, анализе, обобщении полученных результатов и формулировке выводов, а также в личном участии в апробации результатов исследования и подготовке основных публикаций по выполненной работе.

Реализация выводов и рекомендаций работы. Полученные в диссертационной работе выводы нашли применение в системе внутреннего электроснабжения КАО «АЗОТ» (г. Кемерово).

Структурный анализ систем внешнего электроснабжения угледобывающих предприятий Кузбасса был проведен при финансовой поддержке АО ХК «СДС-Уголь» в рамках гранта на проведение исследований в области энергоэффективности и энергосбережения.

Апробация работы. Основные положения диссертационной работы докладывались на IX и XV Международных научно-практических конференциях «Природные и интеллектуальные ресурсы Сибири. Сибресурс» (г. Кемерово, 2012 и 2014 гг.), VII Международной научно-практической конференции «Инновации в технологиях и образовании» (г. Белово, 2014 г.), III Международной научно-практической конференции «Современные тенденции и инновации в науке и производстве» (г. Междуреченск, 2014 г.), а также на ежегодных Всероссийских научно-практических конференциях молодых ученых «Россия молодая», проводимых в Кузбасском государственного техническом университете имени Т.Ф. Горбачева (г. Кемерово, 2012-2014 гг.), научно-технических семинарах на кафедре механики и электроники Шаньдунского научно-технологического университета (г. Циндао, КНР, 2016 г.).

Публикации. По результатам выполненных исследований опубликовано 10

печатных работ, 3 из которых – в изданиях, рекомендованных ВАК РФ.

Структура и объем диссертации. Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы, включающего 104 наименования. Работа изложена на 149 страницах машинописного текста, содержит 55 рисунков, 20 таблиц и 3 приложения.

ГЛАВА 1. СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ИССЛЕДУЕМОГО ВОПРОСА

1.1. Актуальные аспекты проблемы эффективности функционирования систем электроснабжения горных и промышленных предприятий

Обеспечение бесперебойного электроснабжения технологического оборудования предприятий является важнейшим условием для нормальной работы современных промышленных производств. Так, перерыв подачи электроэнергии в несколько секунд (а иногда даже в доли секунды) на металлургических производствах, нефтедобывающих и нефтеперерабатывающих предприятиях, целлюлозно-бумажных комбинатах, предприятиях горной промышленности, химических заводах и многих других может привести к нарушению непрерывного технологического процесса и остановке производства, что, как минимум, чревато ощутимым экономическим ущербом для предприятия. В отдельных случаях, например, для предприятий химической и горной промышленности, случайный перерыв электроснабжения может создать условия для возникновения аварийных ситуаций, угрожающих жизни и здоровью работников предприятия, а также нарушению экологической безопасности производства.

В то же время полностью исключить возможность появления аварий в СЭС, потенциально способных вызвать перебои электроснабжения промышленных электроприемников, объективно практически невозможно (здесь и далее СЭС, определена как система, объединяющая в себе все электроустановки, предназначенные для обеспечения потребителей электроэнергией, при этом понятие СЭС можно использовать как эквивалент понятия электроэнергетической системы [26]).

В таких условиях для СЭС очень важна высокая эффективность функционирования, для достижения которой СЭС должна обладать топологией высокого качества (необходимым количеством резервных перемычек, альтернативных источников электроснабжения и т.п.), что обеспечит наличие нескольких резервных схем питания для каждого потребителя, а соответственно позволит выбирать различные

варианты доставки к нему электроэнергии нужного качества при возникновении аварийных ситуаций. В свою очередь, присутствующая в каждой СЭС составляющая (как правило, эргатическая), которая обеспечивает оперативное управление системой, должна своевременно осуществлять управляющие воздействия по недопущению перерывов электроснабжения и организовывать скорейшее проведение ремонтных работ по восстановлению нормальных схем питания при оптимальной численности электротехнического персонала.

Степень негативного влияния перерыва электроснабжения на деятельность предприятия (величина возможного экономического ущерба, изменение состояния производственной и экологической безопасности и др.) определяется категорией надежности электроприемников согласно Правилам устройства электроустановок (ПУЭ) [5]. В промышленности Кемеровской области присутствует значительное число опасных производств, относящихся к потребителям I и II категории надежности электроснабжения.

Одним из таких потребителей является химический комплекс Кузбасса, который ранее производил около 50% союзного выпуска фенолформальдегидных пресспорошков, почти 30% ионообменных смол, более 23% фенолформальдегидных смол, 17,7% капролактама, более 14% аминопластов. В структуре товарной продукции химической промышленности Кемеровской области большое значение имели производство химических волокон и нитей (12,9%), синтетических смол и пластмасс (11,9%) [79]. Химический комплекс Кузбасса составляли такие крупные предприятия как: КАО «АЗОТ», ООО ПО «Химпром», ООО ПО «ТОКЕМ», ООО «Химволокно Амтел – Кузбасс», ОАО «Анилокрасочный завод», ОАО «Спектр» и др. К настоящему времени, количество химических предприятий Кемеровской области существенно сократилось, тем не менее, химическая промышленность занимает высокий удельный вес в отраслевой структуре Кузбасса, а ее вклад в валовый региональный продукт (ВРП) составляет порядка 6% [100].

Большинство электроприемников химических предприятий из-за специфики технологии и непрерывности производственного процесса относят к I и II категориям надежности (таблица 1.1 [32, 85]).

Таблица 1.1

Классификация некоторых электроприемников химических предприятий по категориям надежности

Наименование производств	Категория надежности
Производство азотной промышленности и продуктов органического синтеза	
а) Производство аммиака:	
- Конверсия метана и окиси углерода, очистка от углекислоты (наружная установка, насосные станции противопожарного водопровода, электроприводы запорной арматуры)	I
- Электроосветительные установки (аварийные)	$0^{*}(I)^{**}$
- Очистка от углекислоты (помещения насосных установок с вынесенной технологической аппаратурой), очистка от окиси углерода, предкатализ и отделение синтеза, насосные станции производственного водопровода, сантехнические вентиляторы, освещение (рабочее)	I
б) Производство ацетилена термокислотным пиролизом метана:	
- Отделение пиролиза	0(I)
- Помещение насосной растворителя, отделение компрессии газов пиролиза, отделения концентрирования, сантехнические вентиляторы	II
в) Производство капролактама гидрированием бензола:	
- Бензотаялка	II
- Насосная станция базисного склада, цех лактама, промежуточный склад	I
г) Отделение гидрирования бензола и получения циклогексана, отделение окисления циклогексана воздухом, отделение ректификации продуктов окисления циклогексана, отделение дегидрирования	0(I)

Продолжение таблицы 1.1

д) Производство разбавленной азотной кислоты *е) Производство аммиачной селитры (нитрат аммония)*	II II
Коксохимические заводы	
Коксовый блок, основные химические цеха Углеподготовка и углеобогатительные фабрики	I II

* – особая группа

** – в скобках указана допускаемая категория

Повышенные требования к надежности электроснабжения потребителей химических предприятий во многом диктуются соображениями безопасности, так как развитие многих аварий, в том числе приводящих к взрывам и пожарам, начинается именно с внезапного прекращения электроснабжения отдельных технологических процессов и производств, а также всего предприятия [13].

На рисунке 1.1 представлены данные о количестве аварийных нарушений электроснабжения цеховых потребителей крупнейшего химического предприятия Кемеровской области – Кемеровского акционерного общества «АЗОТ» (КАО «АЗОТ») за 2005-2015 гг., составленная по данным журнала учета аварий цеха электроснабжения (ЦЭС).

Время перерыва электроснабжения цеховых потребителей варьируется от одного часа до нескольких суток. При этом согласно [85] для КАО «АЗОТ» как азотнотукового предприятия, производящего аммиачную селитру, карбамид, аммиак, капролактам, сульфат аммония, серную и азотную кислоты, перерыв питания электроприемников приводит к быстрому расстройству технологического процесса, а время его восстановления пропорционально длительности перерыва питания и может исчисляться днями или даже неделями. Для производства капролактама перерыв электроснабжения, помимо расстройства технологического процесса, может привести к нарушению условий безопасности труда и экологической безопасности.

Таким образом, представленная статистика и данные о времени перерывов питания цеховых электроприемников позволяют констатировать недостаточно высокую эффективность функционирования СЭС КАО «АЗОТ».

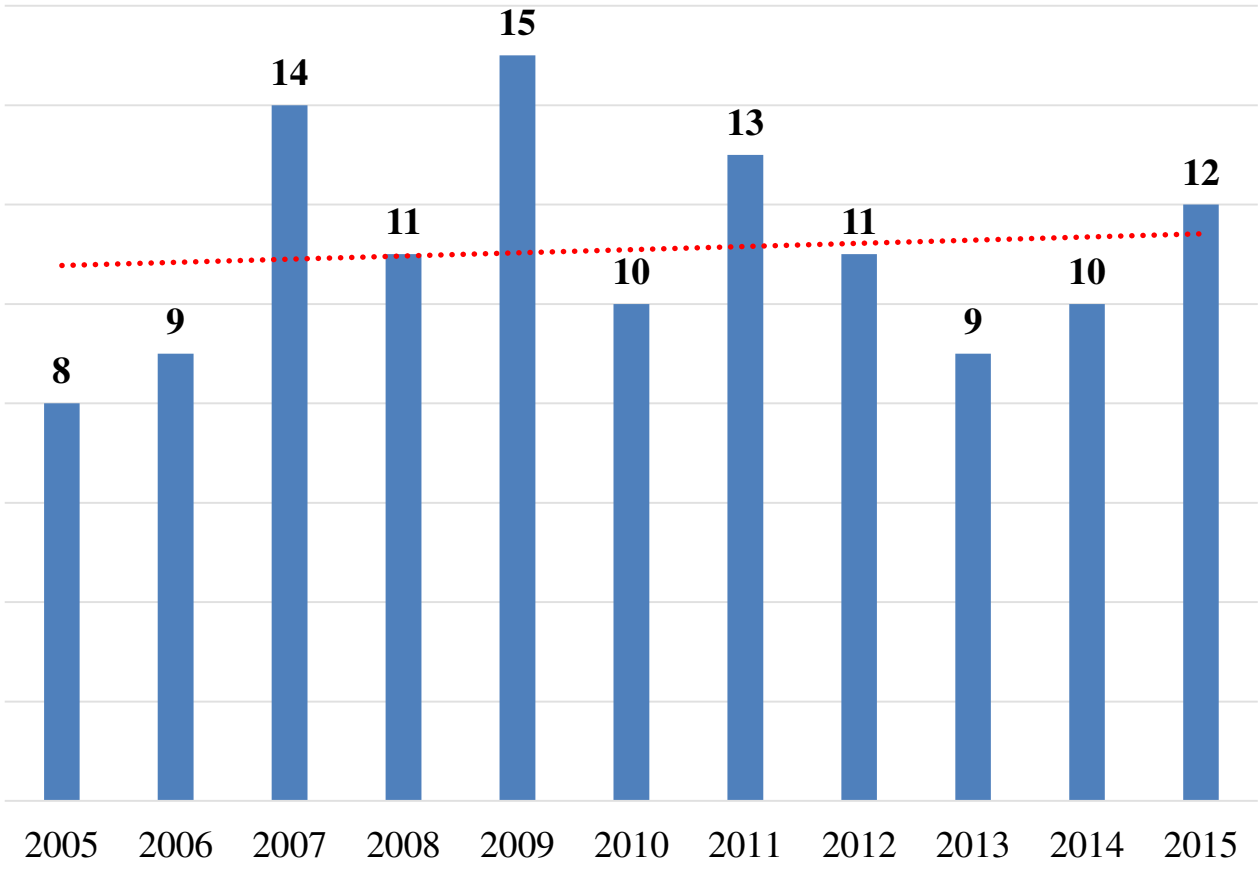


Рисунок 1.1 – Количество случаев нарушений электроснабжения цеховых потребителей КАО «АЗОТ» за 2005-2015 гг.

Основными причинами нарушений нормального электроснабжения потребителей КАО «АЗОТ» согласно диаграммам, представленным на рисунках 1.2 и 1.3, являются аварии во внутризаводской СЭС, а именно повреждения в кабельной сети 6 кВ, которые в большинстве случаев вызваны внезапным пробоем изоляции кабельных линий электропередачи (КЛ).

Для предупреждения случайных пробоев изоляции электрооборудования Правилами [6] (далее – ПТЭЭП) предусмотрены периодические профилактические испытания изоляции повышенным напряжением и замеры ее сопротивления специальным оборудованием.

Непосредственно на КАО «АЗОТ» ремонтный персонал, на который возложена обязанность проведения профилактических испытаний электрооборудования, как правило, склонен выполнять их в «щадящем» режиме, не доводя величину испытательного напряжения до заданного в ПТЭЭП, что является нарушением.

Рисунок 1.2 – Распределение случаев нарушения электроснабжения потребителей КАО «АЗОТ» по причинам возникновения

Рисунок 1.3 – Распределение случаев нарушения электроснабжения из-за аварий внутреннего характера по видам повреждаемого оборудования

Во многом это связано со значительным возрастом испытуемого оборудования (таблица 1.2), иногда превышающим 1,5-2 срока нормативной эксплуатации, а соответственно с повышенной вероятностью пробоя изоляции электрооборудования при испытании. Чаще всего такое отношение персонала проявляется именно при испытаниях кабельных линий 6 кВ, так как в случае обнаружения какой-либо проблемы предстоит длительная и трудоемкая процедура поиска повреждения и его устранения, а, следовательно, дефекты изоляции не всегда выявляются на начальном этапе их развития.

Таблица 1.2

Средний срок эксплуатации электрооборудования КАО «Азот»

Тип электрооборудования	Средний срок эксплуатации, лет
Высоковольтные электродвигатели	39,7
Кабельные линии электропередачи (6 кВ)	43,4
Силовые трансформаторы 110/6 кВ	44
Трансформаторные подстанции (6/0,4 кВ)	41,8

Чрезвычайно опасно несвоевременное обнаруженное дефекта изоляции на вводных питающих КЛ подстанций (ПС) потребителей I и II категории надежности, особенно в ситуации, когда резервный питающий кабель отключен из-за аварии или ремонта. В таком случае значительно повышается вероятность полного «погашения» ПС потребителей цехов и производств с всеми вытекающими негативными последствиями.

Следует отметить, что в журнале учета аварий ЦЭС КАО «АЗОТ» встречаются записи случаев питания ПС потребителей цехов и производств I и II категории надежности в течение длительного времени от одной вводной КЛ, в отдельных случаях до нескольких месяцев. Данный факт, во-первых, является нарушением требований ПУЭ в отношении количества резервных источников питания потребителей I и II категории надежности, а во-вторых, потенциально создает условия для возникновения серьезных аварий. Исходя из этих негативных фактов, можно выделить две основные проблемы: недостатки в эксплуатационном процессе и

несовершенство топологии СЭС КАО «АЗОТ».

Для устранения недостатков эксплуатации необходим, во-первых, более пристальный контроль со стороны административно-технического персонала за эксплуатационным процессом, а во-вторых, анализ времени, затрачиваемого электротехническим персоналом на аварийно-восстановительные работы (при условии выполнения организационных и технических мероприятий, определенных в Правилах [7] (далее – ПОТЭЭ)), который позволит выявить возможные резервы для сокращения их длительности.

Тем не менее, полностью исключить вероятность возникновения аварий невозможно. В случае повреждения вводной КЛ, процедура поиска места неисправности и ее устранения занимает длительное время, особенно в зимний период. При этом на время проведения ремонта ПС питается по одной КЛ, а в случае ее отключения может полностью «обесточиться».

СЭС КАО «АЗОТ», как и СЭС многих других подобных предприятий, строилась по принципам, которые были заложены в середине прошлого века и отвечали требованиям того времени. Современная ситуации изменилась: в первую очередь, возросли требования к надежности и бесперебойности обеспечения электроэнергией, предъявляемые к СЭС современными технологическими установками, которые весьма чувствительны даже к кратковременным перерывам электроснабжения [27].

В большинстве случаев, в полном соответствии с ПУЭ и Нормами [8], электроснабжение производственных электроприемников I и II категории надежности осуществляется от резервируемой секции шин (СШ) распределительной ПС, которая запитывается, как правило, по двум линиям электропередачи (ЛЭП), идущим от основного источника электроэнергии (для промышленного предприятия одна или несколько главных понижающих ПС (ГПП)). Однако, как показывает практика, в случае расположения питающих ЛЭП в непосредственной близости друг от друга (например, на двухцепной опоре воздушной ЛЭП (ВЛ), при совместной подземной прокладке КЛ в траншее и т.п.), даже наличие двух независимых взаимно резервируемых источников для электроприемников не дает гарантии, что время

вынужденного перерыва питания не выйдет за допустимые пределы [62, 89]. Показательна в данном случае авария, произошедшая 26.01.2014 в системе внешнего электроснабжения угольных шахт Ленинск-Кузнецкого района: вследствие обрыва грозотроса ВЛ 220 кВ «Беловская ГРЭС – Восточная-1,2» и его падения на фазные провода ВЛ 110 кВ «Беловская – Новоленинская-1,2» в месте их пересечения произошло короткое замыкание с аварийным отключением всех потребителей, подключенных к двум цепям данной ЛЭП.

Для СЭС КАО «АЗОТ» отмеченная проблема также актуальна, так как зачастую питающие КЛ расположены близко друг к другу (на одной кабельной эстакаде, в одной траншее и т.п.) и какое-либо внешнее механическое повреждение может привести к полному обесточиванию питаемых ПС. При этом согласно данным журнала учета аварий ЦЭС подобные случаи на КАО «АЗОТ» уже имели место.

В таких условиях необходимость совершенствования существующих схем электропитания становится все более очевидна. В [40, 42] описывается новый принцип построения современных СЭС посредством применения трехлучевого питания распределительных ПС и формирования «сотовой» сети. Имеются примеры практического создания подобных сетей для электроснабжения потребителей жилищных комплексов [41].

Использование отмеченного принципа при совершенствовании топологии СЭС КАО «АЗОТ» можно считать достаточно перспективным, особенно учитывая благоприятные начальные условия, а именно: наличие нескольких мощных источников электроэнергии, относительно компактное расположения предприятия и уже существующая достаточно разветвленная кабельная сеть.

Еще одной частой причиной нарушения электроснабжения цеховых электроприемников КАО «АЗОТ» являются аварии в системах внешнего электроснабжения, удельный вес которых составляет порядка 30% от общего числа аварий (см. рисунок 1.2.).

В результате аварийных отключений во внешних питающих сетях, во внутризаводской СЭС происходят значительные «посадки напряжения», которые могут приводить к отпаданию сердечников магнитных пускателей и остановке

электродвигателей на стороне 0,4 кВ, снижению вращающего момента высоковольтных электродвигателей ниже определенного значения, при котором преодоление момента сопротивления становится невозможным даже при восстановлении питания устройствами релейной защиты и автоматики и т.п. [13, 27].

На рисунке 1.4 представлены данные об удельном весе аварийных отключений по причинам внешнего характера за 2005-2015 гг., из которых прослеживается тенденция их роста, а в отдельные годы доля таких отключений составила более половины из общего числа нарушений электроснабжения цеховых потребителей.

Рисунок 1.4 – Удельный вес аварийных отключений по причинам внешнего характера в СЭС КАО «АЗОТ» за 2005-2015 гг.

Проблемы с внешним электроснабжением в настоящее время испытывает еще одна важная отрасль с опасными производствами, по праву считающаяся базовой для экономики Кемеровской области – угольная промышленность.

Несмотря на значительное количество электроприемников I и II категории (в том числе из особой группы) на предприятиях горной промышленности (таблица

1.3) [9, 83, 104], а соответственно повышенные требования к надежности их электроснабжения, в последние годы в Кузбассе прослеживается тенденция к росту приостановок деятельности угледобывающих предприятий, происходящих из-за аварийных отключений электроэнергии (в 2009 г. – 5 отключений, в 2013 г. – 17, в 2014 г. – 21, в 2015 г. – 29) [74].

Таблица 1.3

Классификация некоторых электроприемников горных предприятий по категориям надежности

Наименование электроприемников	Категория надежности
Клетьевой, грузо-людской и людской подъемы Вентиляторы главного проветривания Водоотливные установки шахт и разрезов Центральные подземные подстанции Противопожарные насосные установки Установки дегазации угольных пластов Калориферные установки для районов с тяжелыми климатическими условиями и др.	I
Скиповой и конвейерный угольные подъемы Вспомогательный клетьевой подъем в вентиляционном стволе Экскаваторы, конвейерный и электровозный транспорт, компрессоры угольных разрезов и др.	II
Двигатели систем маслосмазки турбокомпрессорных станций и холодильных машин угольных шахт и т.п. [23]	0

Наиболее серьезными случаями остановки угольных предприятий в Кемеровской области явились следующие аварии [62]:

1. 19.10. 2012 г. короткое замыкание на ПС «ЗСМК» привело к остановке работ на шести шахтах: были обесточены главные вентиляторы шахт «Полосухинская», «Юбилейная», «Большевик», «Есаульская», «Кушеяковская» и «Антоновская». На поверхность были выведены 294 человека; через 2,5 часа электроснабжение было восстановлено лишь на трех шахтах, остальные продолжали простаивать.

2. 25.10.2012 г. прекратилась подача электроэнергии в шахту «Абашевская. 118 горняков были выведены на поверхность. Отключение электричества произошло из-за погашения СШ I и II ПС «Абашевская».

3. 16.07.2013 г. главные вентиляторы на угледобывающих шахтах «Октябрьская» и «Полысаевская» остановились из-за отключения одного из трансформаторов на ПС «Полысаевская-3»: для восстановления энергоснабжения понадобилось около 45 минут.

4. 15.09.2013 г. на шахте «Осинниковская» из-за отключения электроэнергии был остановлен главный вентилятор: из шахты были эвакуированы 278 человек, шахта возобновила добычу угля лишь на следующий день.

5. 26.01.2014 г. из-за повреждения на ВЛ 110 кВ «Белово – Ново-Ленинская-1,2» прекратилось электроснабжение и остановились главные вентиляторы семи угольных шахт Ленинск-Кузнецкого района («Шахта 7 Ноября», шахта «Костромская», шахта «Алексеевская», шахта «Заречная», шахта «Комсомолец», шахта «Кирова» и шахта «Байкаимская»), из-под земли были эвакуированы 1115 горняков.

6. 24.08.2014 г. из-за короткого замыкания на ВЛ «ЗСМК – Карлык» нарушилось электроснабжение угольных шахт «Есаульская» и «Кушеяковская». Для устранения повреждения и восстановления нормального питания предприятий потребовалось порядка 4-х часов.

Согласно постановлению Правительства РФ от 4 мая 2012 г. № 442 для I и II категорий надежности допустимое число часов отключения в год и сроки восстановления электроснабжения определяются сторонами в договоре в зависимости от параметров схемы электроснабжения, наличия резервных источников питания и особенностей технологического процесса осуществляемой потребителем деятельности, но не могут быть более величин, предусмотренных для III категории надежности – 72 часа в год и не более 24 часов подряд, включая срок восстановления электроснабжения [1]. Очевидно, что при существующих схемах внешнего электроснабжения кузбасских предприятий с опасными производствами данное требование не выполняется.

Таким образом, можно выделить некоторые характерные аспекты, которые

оказывают негативное влияние на эффективность функционирования СЭС промышленных предприятий:

- эксплуатационные недостатки, проявляющиеся при проведении аварийно-восстановительных и ремонтных работ, а также профилактических испытаний, которые заключаются в нарушении требований нормативно-технической документации (НТД) и в ненадлежащем контроле за производственным процессом со стороны административно-технического персонала;
- несовершенство топологии СЭС, определяющее ограниченные технические возможности для обеспечения бесперебойного электроснабжения потребителей в различных аварийных ситуациях;
- участившиеся случаи внезапных прекращений питания промышленных потребителей из-за аварийных отключений в системах внешнего электроснабжения.

1.2. Современное состояние распределительных и питающих систем электроснабжения

Возросшее в последнее время число аварий в сетях внешнего электроснабжения, к которым относятся распределительные и частично питающие СЭС [26, 29], связано с общим снижением эффективности функционирования электроэнергетической отрасли после начала процесса ее реформирования.

На рисунке 1.3 представлены данные о количестве аварий в региональных СЭС Сибирского федерального округа (СФО), сопровождавшихся нарушением электроснабжения потребителей от 10 МВт и более за 2009 – 2015 гг. (из сведений годовых отчетов службы технического контроля (СТК) филиала ОАО «СО ЕЭС» – ОДУ Сибири), из которых следует развивающаяся тенденция роста количества таких отключений.

Согласно отчетам СТК ОДУ Сибири из-за аварий в распределительных сетях филиалов ПАО «МРСК Сибири» происходит 30-40% всех случаев прекращения

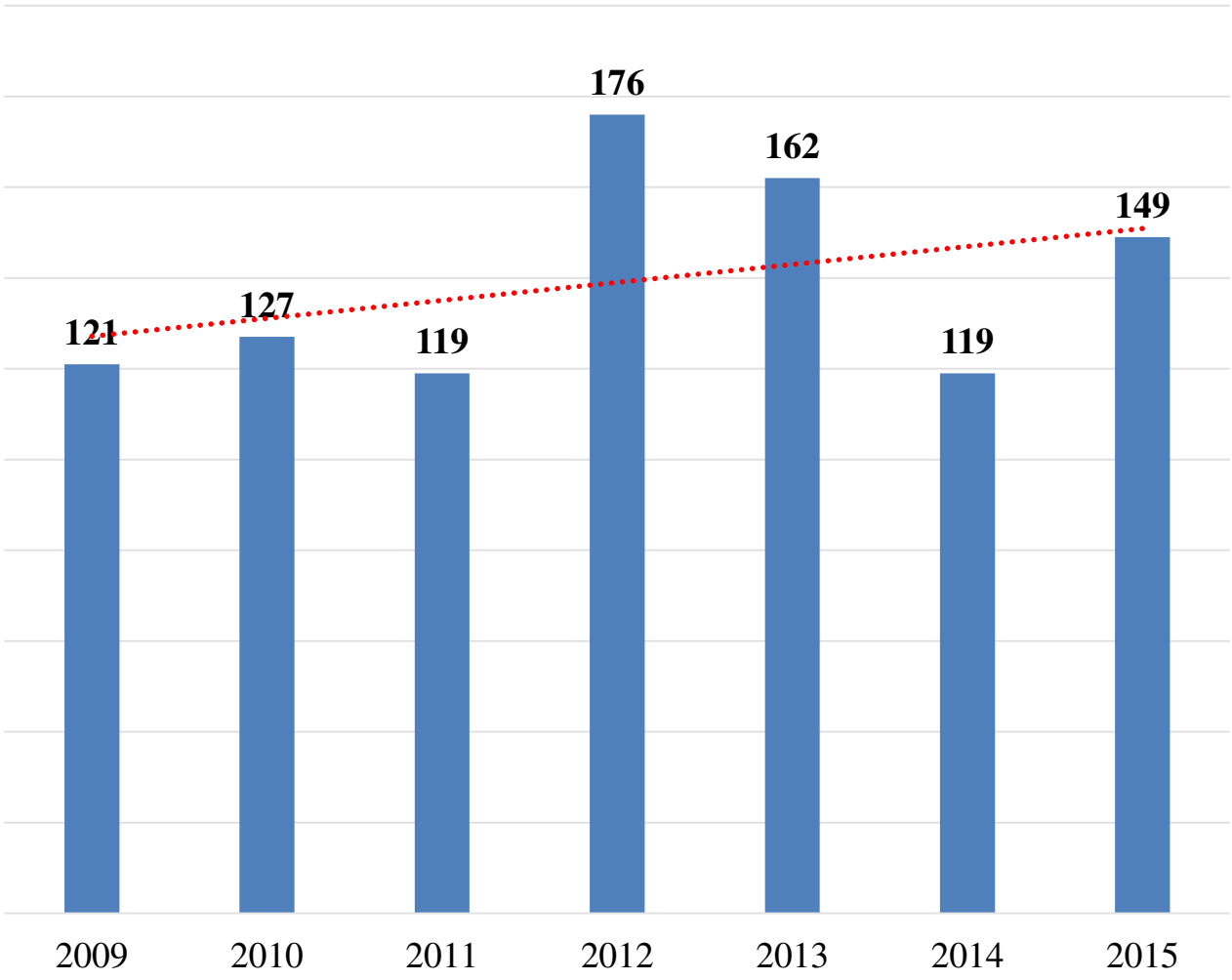


Рисунок 1.3 – Количество случаев нарушений электроснабжения потребителей СФО за 2009-2015 гг.

электроснабжения потребителей, 20-30% приходится на аварии энергообъектов прочих субъектов электроэнергетики, в том числе на распределительные сети частных территориальных сетевых организаций (ТСО).

В качестве основных причин снизившейся надежности распределительных СЭС можно выделить следующие обстоятельства.

1. Износ энергооборудования распределительного комплекса значителен, его техническое состояние часто неудовлетворительное, более того вследствие превышения нормативных сроков эксплуатации большая часть оборудования устарела морально (рисунок 1.4 [2, 94]).

2. В результате реформы электроэнергетики образовалась множество независимых хозяйствующих субъектов с децентрализованной технической и

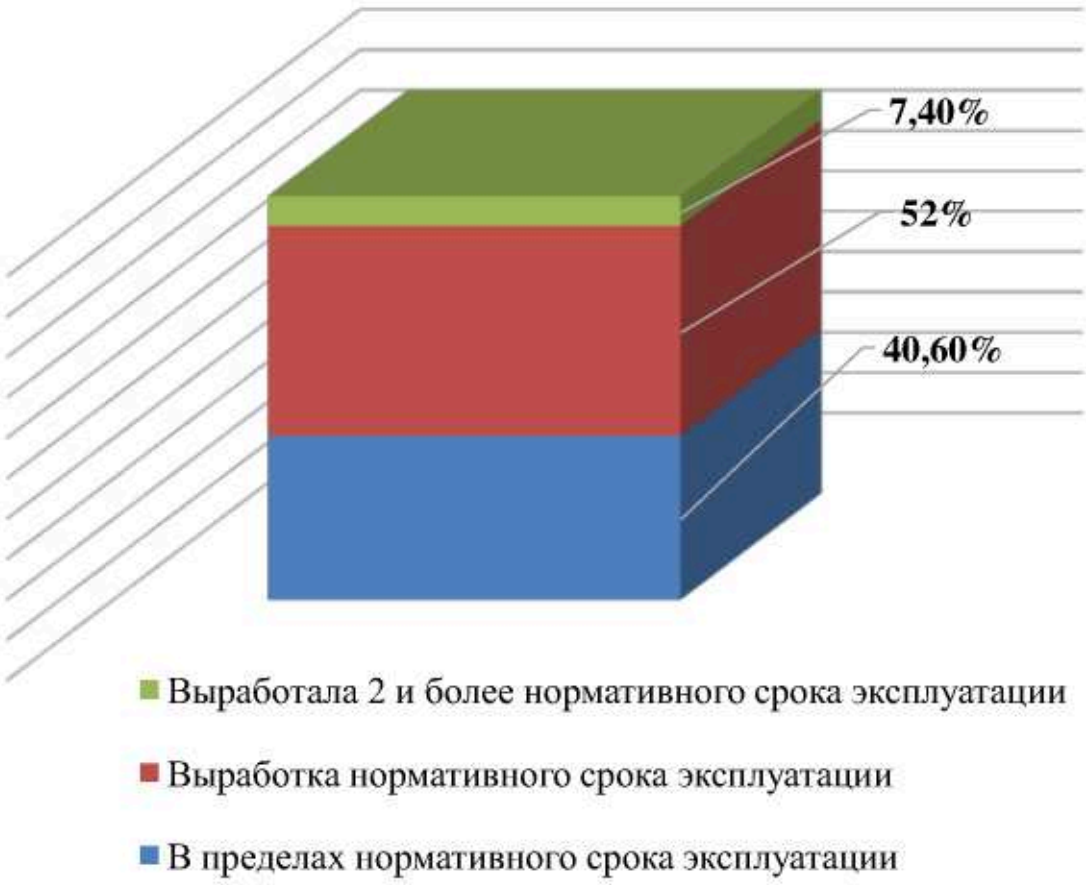


Рисунок 1.4 – Характеристика оборудования распределительных и питающих СЭС по срокам эксплуатации

экономической политикой при неустановленной ответственности за надежность электроснабжения потребителей [28]. Отсутствие центрального органа, наделенного необходимыми полномочиями и способного принимать стратегические решения для развития отрасли, лоббирование корпоративных интересов энергокомпаний, зачастую идущими вразрез с общими интересами отрасли, вносит свой вклад в общую дезорганизацию электроэнергетики.

3. Недостаточное развитие электросетевого комплекса распределительных СЭС. В Стратегии [2] отмечено: «В большинстве территориальных сетевых организаций 90% потребителей не имеют альтернативной линии среднего напряжения, причем существуют радиальные участки сетей высокого и среднего напряжения, повреждения на которых приводят к массовым отключениям потребителей. Характерной особенностью электрических сетей является большее, чем в зарубежных странах, число линий, отходящих с одной секции шин».

В работе [35] сложившаяся проблема с топологией сетей внешнего питания Кузбасских угольных предприятий объясняется отсутствием специального центра, который бы занимался вопросами перспективного развития СЭС питающих горные предприятия. При этом, согласно Стратегии [2] проблема несовершенства топологии распределительных СЭС является общероссийской, а соответственно создание единого отраслевого центра компетенции, который бы обладал реальными механизмами воздействия на все субъекты электроэнергетики, а также участвовал в создании и экспертизе проектов развития электросетевого комплекса, является очень важной задачей для электроэнергетической отрасли России в целом [28, 68].

Таким образом, в настоящее время в большинстве случаев развитие сетей внешнего питания происходит «хаотически» – при возникновении потребности в электроснабжении нового объекта, либо изменении мощностных показателей нагрузки. Традиционно в этих случаях может меняться мощность ПС, строятся ЛЭП без увязки с соседними линиями, то есть при отсутствии должного технического обоснования изменений самой системы как самостоятельного объекта. В то же время объективно существуют общие принципы создания и развития сложных систем, к которым относятся и СЭС [53].

Такой принцип формирования сетей порождает самые разнообразные структуры СЭС, обусловленные их «историческим» развитием. При этом все сложнее использовать принятую в настоящее время классификацию структур СЭС: радиальная, магистральная, кольцевая, петлевая [59]. Так, практически в каждой сложной структуре СЭС присутствуют кольцевые и петлевые фрагменты. Кроме того, применяемое подразделение структур СЭС на разомкнутые и замкнутые, является упрощенной, не выделяющей все многообразие структур, так как даже «замкнутость» в системах в большинстве случаев – множественная, определяемая количеством контуров в структуре системы, обеспечивающих резерв в электроснабжении потребителей.

Также необходимо отметить, что в настоящее время отсутствуют показатели и критерии технической оценки эффективности функционирования СЭС (в том числе структурной оценки) – существует лишь ряд экономико-эксплуатационных

показателей, не позволяющих дать комплексную оценку топологии СЭС совместно с неотъемлемой частью СЭС, обеспечивающей управление системой.

Существующие идеи построения сетей будущего – Smart Grid [2], где СЭС воспринимается как высокоорганизованный целостный технический объект, способный быстро реагировать на любые внешние и внутренние возмущения, определяют важность и актуальность создания подобных оценочных критериев и показателей, а также уточнения принятой классификации СЭС по комплексу признаков. Особенно учитывая факт, что Smart Grid будут создаваться на основе уже существующих СЭС, то есть в нынешнюю топологию и управляющую составляющую будут вноситься изменения, способные значительно повлиять на СЭС в целом, а соответственно отразиться на эффективности ее функционирования (причем далеко не обязательно этот эффект будет положительным).

При этом использование подобных оценочных критериев также возможно при анализе эффективности СЭС горных и промышленных предприятий, исходя из общности принципов функционирования и управления СЭС всех видов.

1.3. Анализ методов оценки эффективности функционирования систем электроснабжения

Сложность комплексной оценки эффективности функционирования СЭС в значительной степени связана с трудностью построения модели сложноорганизованных СЭС, особенно эргатических. Такая модель должна учитывать все составляющие СЭС, которые обеспечивают ее функционирование: топологическую часть СЭС, образованную силовым электрооборудованием и ЛЭП, а также управляющую составляющую, в состав которой входят большое число связей и элементов, в том числе человек-оператор. Отсутствие официальных методик построения подобных моделей порождает проблему при определении комплексного оценочного критерия эффективности функционирования СЭС.

В настоящее время основным подходом к эффективности функционирования является вероятностно-статистический. Трудность использования этого подхода заключается в необходимости получения достоверной статистической информации об эксплуатации оборудования сложной системы, которая нужна для определения законов распределения случайных величин.

Недостатком вероятностно-статистических критериев является невозможность их использования для вновь проектируемых систем и оборудования. Традиционный прием для определения вероятностно-статистического критериев, заключающийся в использовании известных в общем виде характеристик типовых элементов и блоков, которые составляют такую систему или оборудование, дает существенную погрешность для качественно новых разработок.

Все больший интерес представляют методы оценки эффективности сложных систем, в основе которых лежат их структурные исследования. При структурном исследовании система понимается как самостоятельный целостный объект, для которого строится модель, отражающая в наиболее общем виде структуру расположения элементов и взаимосвязей между ними. При этом из оценки качества структуры системы можно сделать вывод об эффективности ее функционирования, используя минимум исходных данных [66].

В работе [65] были изложены основные подходы к проведению структурных исследований сложных систем, базирующихся на теории графов и теории отношений, описан процесс построения моделей этих систем, предложены показатели оценки качества структуры (связанность графа, ранг элемента, множество сочленения) и процедуры их расчета, а также способ учета различных характеристик связей при помощи коэффициентов влияния. Однако единого критерия оценки эффективности функционирования сложных систем не предложено.

В работе [82] методы структурного исследования использованы при оценке надежности СЭС, главным образом, для выявления количества возможных путей передачи электроэнергии от одного элемента системы к другому: чем больше количество подобных путей, тем меньше вероятность обесточивания конкретных элементов системы.

Анализ структур в работе [11] определен как важнейший этап при оценке устойчивости и выбора наиболее эффективного режима работы крупных энергообъединений. Большое значение уделяется структурному исследованию возможностей СЭС обеспечивать бесперебойное электроснабжение потребителей в различных режимах работы (нормальном, ремонтном, послеаварийном). Основным критерием эффективности функционирования выступает коэффициент структурного запаса, который определяется соотношением структурных и режимных величин.

В работе [25] для оценки эффективности управления СЭС вводится понятие наблюдаемости. Определение наблюдаемости СЭС основывается на вычислении ранга структуры управляющей системы. Чем выше ранг, тем выше наблюдаемость и эффективность управленческих воздействий на системы, вследствие чего оперативно устанавливается наиболее эффективный режим работы СЭС.

Комплексный подход для оценки эффективности СЭС и ее компонентов предложен в работе [53], где предлагается создание информационной модели СЭС, включающей в себя особенности структуры системы, а также учитывающей ее внутреннее наполнение различными физическими взаимодействиями между элементами, которые в соответствии с определением Н. Винера понимаются как передача информации и определяются общим понятием «оперативная информация» [20]. При этом использование этой модели возможно, как для технической, так и для эргатической системы.

Высокая эффективность согласно [53] присуща системам, обладающим совершенной структурной организацией при ее максимальном наполнении оперативной информацией, а в качестве эталонных систем автор считает природные микро- и макросистемы.

Схожего мнения относительно необходимости создания технических систем, используя природные принципы, в своих работах придерживается Б. И. Кудрин [33, 34, 35], а также представители созданной им научной школы [77]. При этом, по его мнению, вероятностно-статистические критерии принципиально устарели и необходим переход на ценологические.

Одно из последних исследований по данной тематике проведено в рабо-

те [73], в основу которой легли положения, приведенные в [53]. В качестве объекта исследования была принята эргатическая система управления электроснабжением крупного горного предприятия, в которой были выявлены препятствия и «узкие места» в путях движения оперативной информации, а также выработаны рекомендации по совершенствованию системы управления, способствующие устранению выявленных недостатков. При этом отличительной особенностью данной работы является градация оперативной информации согласно ее иерархической ценности в структуре эргатической системы управления электроснабжением предприятия.

Несмотря на уже достигнутые результаты в исследованиях методов и подходов к оценке эффективности функционирования сложных СЭС, окончательно оформленной единой оценочной методики не представлено.

1.4. Учет человеческого фактора в системах электроснабжения горных и промышленных предприятий

Влияние человеческого фактора на эффективность функционирования существующих СЭС значительно. За человеком-оператором закреплены обязанности проведения основных эксплуатационных операций над электрооборудованием СЭС и в целом оперативное управление режимом работы СЭС.

Однако для автоматизированных СЭС (Smart Grid) участие человека в процессе управления существенно снизится и, по сути, будет заключаться только в наблюдательной функции [102].

В настоящее время профессионализм электротехнического персонала СЭС любого уровня определяет частоту возникновения аварий, несчастных случаев и инцидентов на производстве, а также тяжесть их последствий [75]. На рисунке 1.5 представлена диаграмма количества аварий в объединенной энергосистеме (ОЭС) Сибири, которые были вызваны ошибочными действиями электротехнического персонала предприятий электроэнергетики за 2009-2014 гг. (по данным отчетов

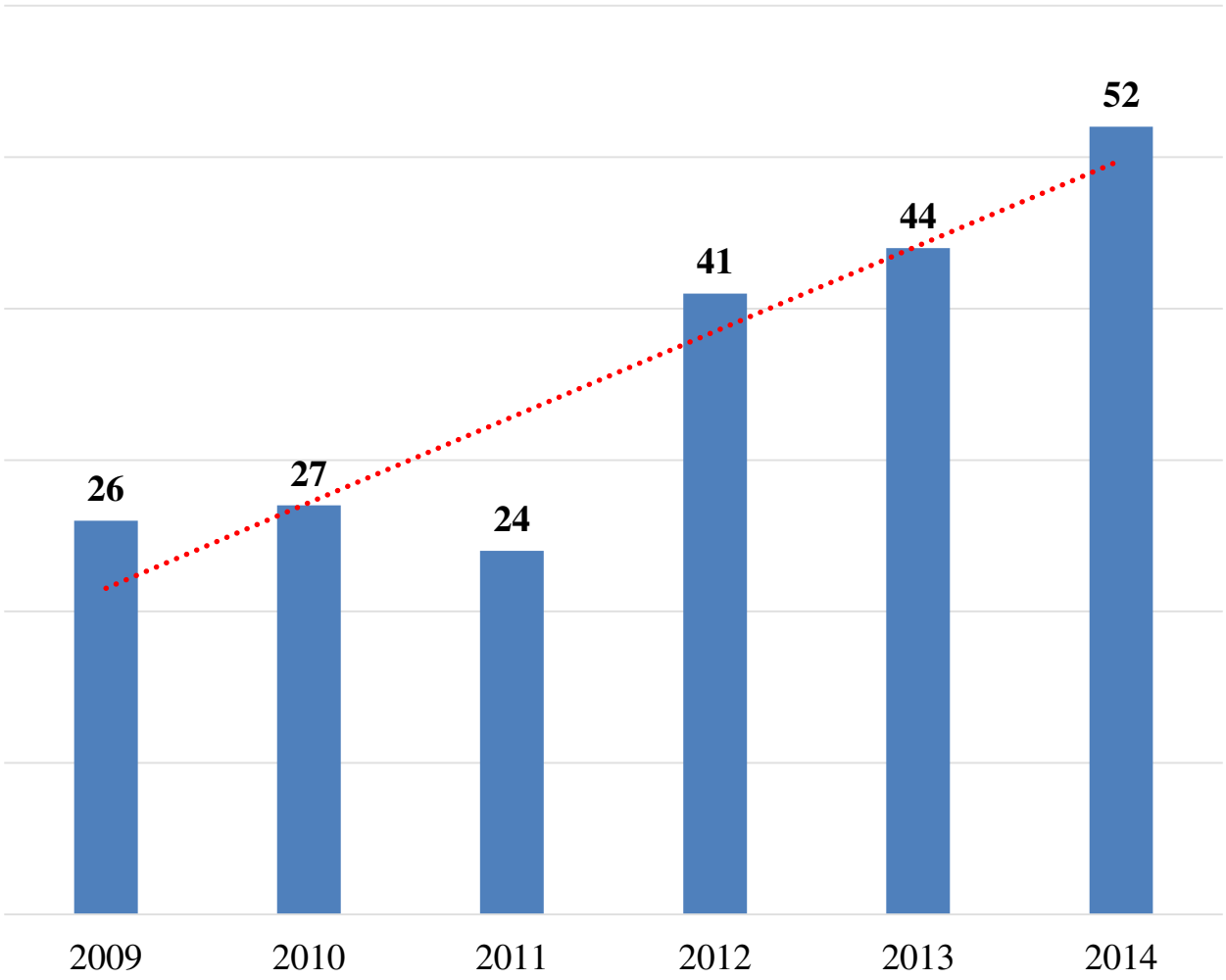


Рисунок 1.5 – Динамика количества аварий в ОЭС Сибири из-за ошибочных действий электротехнического персонала за 2009-2014 гг.

СТК ОДУ Сибири). Возрастающая тенденция аварий связанна с ошибочными действиями персонала, особенно в последние годы.

Помимо серьезных последствий для функционирования СЭС, ошибки электротехнического персонала, в первую очередь, опасны для их жизни и здоровья возможными электротравмами.

Анализ несчастных случаев, происшедших с электротехническим персоналом предприятий за последние несколько лет, приведенный в [73], позволяет выделить следующие характерные причины, которые приводят к электротравмам:

- невыполнение или выполнение не в полном объеме организационных и технических мероприятий, определяющих безопасность работ;
- самовольное расширение рабочего места, определенного в наряде-допуске;

• низкая производственная дисциплина;

• недостаточная квалификация членов бригады для выполнения полученных заданий;

• недостаточный контроль со стороны руководящего персонала за организацией безопасного обслуживания электроустановок.

Основной из отмеченных причин следует считать последнюю, так как именно руководство формирует отношение рабочего коллектива ко всем аспектам производственного процесса. В компетенции руководителей – создание комфортных условия для обеспечения эффективного и безопасного производственного процесса, мотивация подчиненного персонала, в первую очередь, личным примером. Однако, в силу ряда недостатков в управленческом процессе, эффективность и безопасность трудового процесса на отечественных предприятий снижена из-за ряда причин [73].

• Недостатки в организации производственного процесса некоторыми руководителями и неслаженное взаимодействие структурных подразделений предприятия, что в последствии приводит к простоям рабочего персонала и необходимости выполнять поставленные задачи за более короткое время. В таких случаях появляется спешка, ошибочные действия и нарушения правил безопасности.

• Характерная для многих предприятий частая сменяемость руководителей всех уровней с вытекающими частыми изменениями производственной «политики» и отсутствие системности в работе.

• Незнание принципов инженерной психологии, приемов работы с рабочим персоналом. Подмена творческой организационной работы формальными мероприятиями.

• Недостаточный опыт некоторых руководителей, невысокая квалификация.

• Зачастую руководители при обнаружении грубейших нарушений на рабочих местах не делают замечаний работникам-нарушителям.

• Часто формальный и упрощенный подход руководителей к организационно-техническим программам по снижению аварийности и травматизма.

Таким образом, при создании моделей для оценки эффективности функционирования эргатической СЭС учесть человеческий фактор необходимо, так как это позволит выявить недостатки в деятельности электротехнического персонала, определить факторы, которые негативно сказываются на безопасности трудового процесса, оценить правильность выполнения эксплуатационных операций, выработать мероприятия по рационализации производственного процесса и повышения эффективности функционирования СЭС.

1.5. Выводы по главе

Возрастающие требования к надежности и бесперебойности питания современных технологических установок, определяют необходимость развития и усложнения СЭС, при этом важно, чтобы такие изменения оказывали только положительное влияние на эффективность функционирования СЭС.

Существующие системы внешнего и внутреннего электроснабжения промышленных предприятий обладают рядом недостатков, которые негативно сказываются на эффективности их функционирования. Проведенный анализ позволил выделить следующие недостатки.

1. Несовершенство топологии СЭС, заключающееся в недостаточном количестве резервных источников и схем питания, являются основной причиной внезапных прекращения электроснабжения потребителей. Так, исходя из представленной аварийной статистики видно, что для отдельных предприятий до 75% всех случаев нарушений подачи электроэнергии потребителям происходит именно из-за недостатков топологии систем внешнего и внутреннего электроснабжения;

2. Отсутствуют официальные методики и критерии комплексной оценки эффективности функционирования СЭС, позволяющие учесть топологические и эксплуатационные характеристики ее функционирования, в том числе присутствие человека-оператора, осуществляющего управляющие воздействия на элементы СЭС;

3. Характерное для СЭС не всегда продуманное развитие проявляется в виде недостатков топологии (структуре) СЭС, а также в виде различных проблем, возникающих в процессе оперативного управления и организации ремонтных работ, вследствие чего нештатные и аварийные ситуации могут приводить к неожиданно тяжелым последствиям для конечных потребителей.

ГЛАВА 2. ИНФОРМАЦИОННАЯ МОДЕЛЬ СЛОЖНОЙ СИСТЕМЫ

Адекватность оценки эффективности функционирования сложных систем во многом зависит от принятой в исследовании математической модели системы и методов ее построения. Модель должна отражать существующее количество связей между элементами системы, а также характер их взаимодействия, учитывать различные факторы, влияющие на функционирование системы и каналы ее взаимодействия с внешней средой.

Одним из перспективных методов оценки эффективности сложных систем, является метод предложенный в [44]. Метод предполагает использование информационной модели сложной системы, при помощи которой возможно дать комплексную оценку заложенной в системе внутренней информации, определяющей ее устойчивость и живучесть, а, следовательно, эффективность функционирования.

2.1. Информация в сложной системе и ее влияние на эффективность функционирования

Согласно [10] любая сложная система обладает определенным количеством внутренней информации, характеризуемой двумя составляющими: структурной (осевшей) и оперативной (подвижной).

Структурная информация характеризует количество и качество связей между элементами системы [43], а оперативная отражает ее наполненность различными физическими взаимодействиями, перемещающимися в системе в виде потоков вещества, энергии и информации с различными скоростями [47].

Оба отмеченных вида информации формируют информационный ресурс системы, определяющий ее эффективность: чем больше информационный ресурс, тем выше эффективность функционирования системы [50].

Во многом устойчивость сложной системы определяется совершенством ее структуры, которая, в свою очередь, обуславливается наличием в ней достаточного количества закольцованных фрагментов – контуров, или согласно [87] неких универсальных ячеек – «гиперциклов», комбинации которых позволяют строить сколь угодно сложные эффективные системы.

На рисунке 2.1 представлено несколько примеров структур систем в двух вариантах: исходном (структуры систем максимально просты, представлены только однонаправленными связями) и насыщенном (структуры систем дополнены оптимальным количеством контуров посредством введения новых прямых и обратных связей), для которых в работе [58] была проведена оценка их структуры.

Структуры этих систем постепенно насыщались введением прямых и обратных связей. При этом происходило усложнение структуры систем, росло число контуров, повышалось количество структурной информации, а, следовательно, внутренней информации системы. В самых насыщенных контурами структурах – «сотовой» и «колесо» образованы одинаковые закольцованные фрагменты, способные дублировать друг друга, тем самым повышая устойчивость и выживаемость системы.

Однако наполнение системы новыми связями имеет некий предел, после которого дальнейшее увеличение количества структурной информации снижает упорядоченность системы, излишне усложняя ее: возникают избыточные прямые связи, дублирующие связи, усиливается взаимовлияние связей, система теряет устойчивость, становится громоздкой, плохо управляемой и ненадежной.

Внутренняя информация системы, помимо структурной, включает в себя также оперативную информацию. Главное отличие оперативной информации от структурной заключается в ее значительно большей подвижности.

Оперативная информация сложной системы представлена в виде взаимодействий различного характера (вещественного, электромагнитного и др.), циркулирующих по контурам, образованным элементами системы.

Потоки оперативной информации отражают постоянно изменяющиеся состояния элементов системы в каждый момент времени. В то же время эти потоки

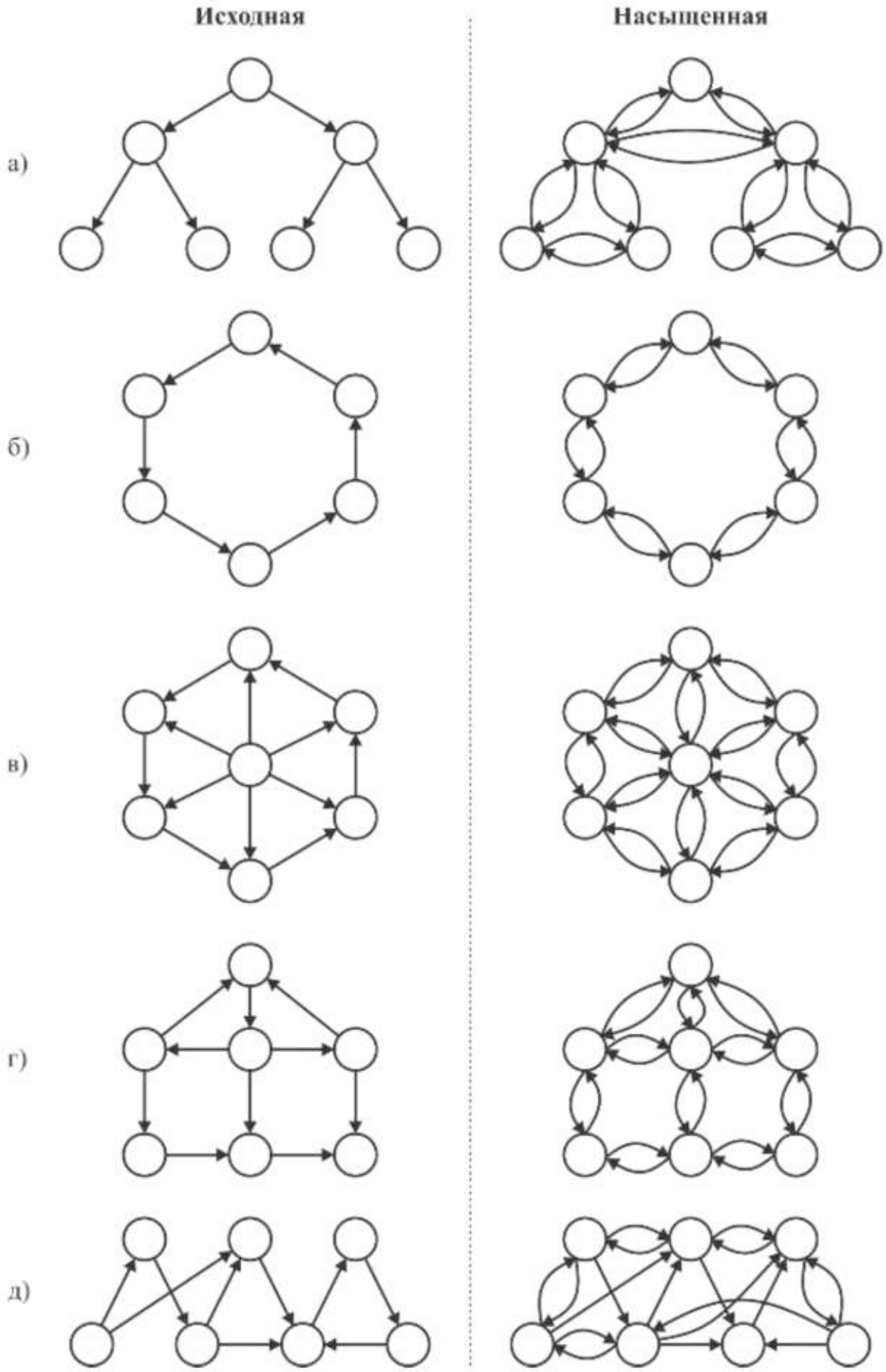


Рисунок 2.1 – Примеры структур систем:

а) – иерархическая; б) – кольцевая; в) – «колесо»; г) – сотовая; д) – многосвязная

перемещаются по контурам с конечной скоростью, поэтому следует говорить о насыщенности системы оперативной информацией – количестве информации, циркулирующей между элементами в единицу времени.

За количество оперативной информации, передаваемой элементом системы, принимается: количество различных состояний данного элемента, состояний его выходов, количество отдаваемых распоряжений (для эргатической системы) и др. При этом даже отсутствие сигнала в течение некоторого времени в статичном положении системы, например, при редком срабатывании элемента – блока защиты, также будет определяться как движение оперативной информации [50].

Для однозначного определения оперативной информации системы необходимо учитывать лишь информацию, которую элементы системы способны распознать без учета момента приема и ее повтора (иначе оценка этой величины невозможна в силу ее постоянного возрастания). В таком случае количество оперативной информации для каждого пути постоянно и представляет собой общее число возможных технических состояний элементов (связей) системы [48].

Источником или приемником оперативной информации может быть любой элемент пути. При этом отдельный контур может включать элементы, находящиеся на разных иерархических уровнях сложной системы и обладающих различным объемом информации.

Вне технической системы, например, в эргатической надсистеме, включающей данную техническую систему (такая структура характерна для большинства современных СЭС), движение оперативной информации также происходит по различным контурам. Если анализировать количество оперативной информации только в технической системе, то в таком случае внешние для нее контуры оказываются разорванными, а внутри этой системы появляются незамкнутые прямые сквозные пути. В дальнейшем все пути движения оперативной информации в системе как контур, так и сквозной путь, будем называть просто путями [51].

Одни и те же элементы системы одновременно могут участвовать в нескольких путях передачи оперативной информации. Таким образом, связи системы могут быть насыщены разным количеством оперативной информации в результате

наложения отдельных путей друг на друга.

В предлагаемой модели СЭС структурную информацию определяет ее топология, формируемая силовым стационарным электрооборудованием, кабельными и воздушными ЛЭП, а оперативная информация характеризует изменение состояний элементов СЭС, в результате их взаимодействий, а также вызванных действиями обслуживающего персонала и других управляющих элементов СЭС. На рисунке 2.2 представлена обобщенная схема взаимодействия между элементами СЭС и их возможные состояния.

Рисунок 2.2 – Схема взаимодействия между элементами СЭС и их состояния

Представление эргатических СЭС, используя предлагаемую модель, позволяет провести комплексный анализ эффективности ее функционирования,

учитывая особенности эксплуатации СЭС, как с технической точки зрения, так и с позиции управления системой.

Структурная информация, заложенная в технической части СЭС дает возможность оценить существующие схемные решения для обеспечения надежного бесперебойного электроснабжения потребителей, оценить целесообразность и влияние вариантов реконструкции на структуру СЭС, выявить «ключевые» элементы системы, от функционирования которых зависит работа всей СЭС (или большей ее части).

Оперативная информация, циркулирующая в СЭС, позволяет проанализировать способность системы своевременно и адекватно приспосабливаться к изменяющимся условиям, как внутри, так вне системы. При этом учитываются скорость и качество оперативных действий электротехнического персонала и управляющих устройств по изменению состояния СЭС, потенциальные возможности оборудования по изменению режимов его работы, необходимых для обеспечения потребителей электроэнергией заданного качества (например, устройств регулирования напряжения трансформаторов, компенсирующих устройств и др.).

Придание связям информационной модели определенных «стоимостей», отражающих различные условия работы оборудования систем, его обслуживания и др., которые в совокупности с использованием структурных и оперативных характеристик значительно расширяют возможности модели, позволяя также давать оценку технико-экономической эффективности эксплуатации СЭС, выявлять наиболее выгодные пути передачи электроэнергии, разрабатывать наиболее эффективные схемы эксплуатации и обслуживания оборудования и т.д.

2.2. Структурное описание системы

При оценке структуры сложной системы свойства элементов системы несущественны. Важным является совокупность и вид ориентированных связей между

ее элементами – прямых и обратных. Также элементы системы могут обладать связью самоконтроля – обратной связью вокруг одного элемента, позволяющей реализовать функцию самодиагностики данного элемента. В дальнейшем обратные связи и связи самоконтроля объединены общим понятием контурных связей [52].

При анализе структуры системы принято допущение: наличие связи между двумя элементами свидетельствует о потенциальной возможности наполнения ее информацией, энергией и веществом.

Для оценки структурных свойств, которые в той или иной мере определяют структурную информацию сложной системы в [44] предложены следующие показатели:

- коэффициент структуры, учитывающий разветвленность связей

$$k_{ст} = \frac{p_м}{s_м}, \tag{2.1}$$

где $s_м$ – общее число элементов системы; $p_м$ – общее количество связей (энергетического, вещественного или информационного характера) между элементами системы, прямых и обратных;

$$p_м = p_{ос} + p_{ск} + p_п, \tag{2.2}$$

где $p_{ос}$ – количество обратных связей, $p_{ск}$ – количество связей самоконтроля, $p_п$ – количество прямых связей между элементами системы;

- коэффициент связи, характеризующий цикличность связей системы:

$$k_{св} = \frac{p_{ос} + p_{ск}}{s_м}. \tag{2.3}$$

Причем

$$k_{ст} = k_{св} + \frac{p_п}{s_м}. \tag{2.4}$$

Однако, приведенные коэффициенты отражают только внешние признаки структуры системы, в частности, не показывая различий между обратными связями и связями самоконтроля, местоположение обратной связи в системе, не определяют избыточности количества структурной информации, поэтому в дальнейшем в работе не используются и приведены только в ознакомительных целях.

Важным показателем при оценке структурных свойств сложной системы является наблюдаемость структуры системы – показатель характеризующий:

- способность центрального элемента системы контролировать состояние периферийных элементов при помощи обратных связей;
- способность самодиагностики периферийных элементов системы, при помощи связей самоконтроля.

Применительно к СЭС наблюдаемость структуры системы можно трактовать как возможность получения питания каждым приемником от любого источника по максимально возможному количеству путей [64].

Оценка наблюдаемости структуры системы может быть произведена с помощью показателей, определяемых теорией графов [76].

Ориентированный граф $G(S, P)$, где $S = \{s_1, s_2,\ldots, s_м\}$ – множество вершин графа, $P = \{p_1, p_2,\ldots, p_м\}$ – множество ребер графа, строится на основе функциональной схемы системы, вершины графа соответствуют элементам (блокам) системы, а ориентированные ребра графа – связям между элементами (блоками). Количество вершин графа – элементов сложной системы определяется степенью детализации функциональной схемы, которая может быть осуществлена до уровня подсистемы, блока, отдельного элемента или его части.

В теории графов используются следующие понятия.

Путь – это конечная чередующаяся последовательность вершин и ребер вдоль их направлений. Путь является цепью, если все его ребра различны.

Циклом называется замкнутая цепь, все вершины которой, за исключением концевых, различны.

При наличии самоконтролируемого элемента граф системы имеет ребро, которое начинается и заканчивается на одной и той же вершине, которая соответствует данному элементу.

Структурная организация графов более полно может быть описана матрицей смежности вершин. Строки и столбцы матрицы смежности вершин $M_G = [m_{ij}]$ соответствуют вершинам графа. Элементы матрицы m_{ij} могут принимать значения «0» или «1»: если между вершинами есть связь, то на пересечении соответствующих

строки и столбца ставится «1» (в строке, соответствующей номеру вершины, от которой направлено ребро, и в столбце, соответствующем номеру вершины, к которой направлено ребро), если связи нет, – «0».

Матрица смежности вершин симметрична значениями «1» относительно главной диагонали при наличии прямой и обратной связи между двумя элементами – $m_{ij} = m_{ji} = 1$, при этом в графе образуется цикл. Главная диагональ матрицы смежности вершин заполняется значениями $m_{ii} = 1$ при наличии у элементов связей самоконтроля, которые также являются циклами.

Ранг матрицы смежности можно использовать в качестве характеристики наблюдаемости структуры [30]. Ранг определяется, главным образом, заполненностью «1» главной диагонали, а также распределенностью «1» среди элементов матрицы.

Для полностью наблюдаемой структуры системы ранг матрицы смежности вершин равен количеству элементов графа системы:

$$rank(M_G) = s_м. \tag{2.5}$$

Для не полностью наблюдаемой структуры системы ранг ее матрицы смежности вершин меньше количества элементов графа системы:

$$rank(M_G) < s_м. \tag{2.6}$$

Недостатком матрицы смежности вершин является то, что в ней не учитываются параллельные ребра – дублирующие связи. Использование коэффициентов $k_{ст}$ и $k_{св}$ дополнительно к рангу матрицы смежности вершин позволяет устранить этот недостаток.

Так как максимальный ранг квадратной матрицы смежности вершин равен числу строк (количеству элементов), оценку наблюдаемости системы удобно производить с помощью относительного показателя – показателя смежности:

$$A = \frac{rank(M_G)}{s_м}, \tag{2.7}$$

где $rank(M_G)$ – ранг матрицы смежности; $s_м$ – общее число элементов системы.

При оценке структурных характеристик сложной системы важное значение имеет снижение перегрузки отдельных элементов. В связи с этим в качестве

характеристики равномерности использования связей системы введен показатель – энтропия структуры системы $H(p)$, увеличивающаяся при равномерном распределении ветвей между элементами системы.

Энтропия структуры системы $H(p)$

$$H(p) = -\sum_{i=1}^{s_M} \lambda_i \log_2 \lambda_i, \tag{2.8}$$

где λ_i – частота использования связей i-го элемента, причем $\sum_{i=1}^{s_м} \lambda_i = 1$.

$$\lambda_i = \frac{p_i}{p_\Sigma}, \tag{2.9}$$

где p_i – число связей i-го элемента, p_Σ – сумма числа связей элементов структуры.

При идеальном распределении связей между элементами все частоты использования одинаковы, при этом

$$H(p) = \log_2 s_м \tag{2.10}$$

имеет максимальное значение.

В данном случае большая энтропия играет положительную роль, так как определяет равномерную распределенность связей между элементами. При малой энтропии связи сконцентрированы вокруг одного элемента, при неисправности которого система надолго может выйти из строя. В худшем случае все выходы подключены к одному элементу, при этом энтропия равна нулю.

Надо отметить, что при сравнении структурных характеристик нескольких систем значение энтропии структуры, полученное по формуле (2.8), приемлемо использовать при одинаковом числе элементов в этих системах. Это ограничение обусловлено возрастанием значения энтропии при увеличении числа элементов системы, вследствие чего можно сделать ложный вывод об отсутствии перегрузки элементов в системах, обладающих наибольшим количеством элементов из рассматриваемых.

Для устранения данного недостатка формула (2.8) была адаптирована для возможности проведения сравнительного анализа систем с большой разницей в количестве элементов:

$$H(p) = \frac{-\sum_{i=1}^{s_M} \lambda_i \log_2 \lambda_i}{\log_2 s_M}. \qquad (2.11)$$

При использовании формулы (2.11) максимальное значение энтропии структуры системы будет равно единице, то есть при идеальном распределении связей между элементами системы.

Оптимальная структура системы реализуется при максимальных значениях показателя смежности и энтропии структуры, в связи с чем введена интегральная характеристика упорядоченности – комплексный структурный показатель:

$$G = A \cdot H(p). \qquad (2.12)$$

Зависимости комплексного структурного показателя от количества структурной информации, приведены на рисунке 2.3 (при условии использования формулы (2.8) для определения энтропии структуры системы) [51].

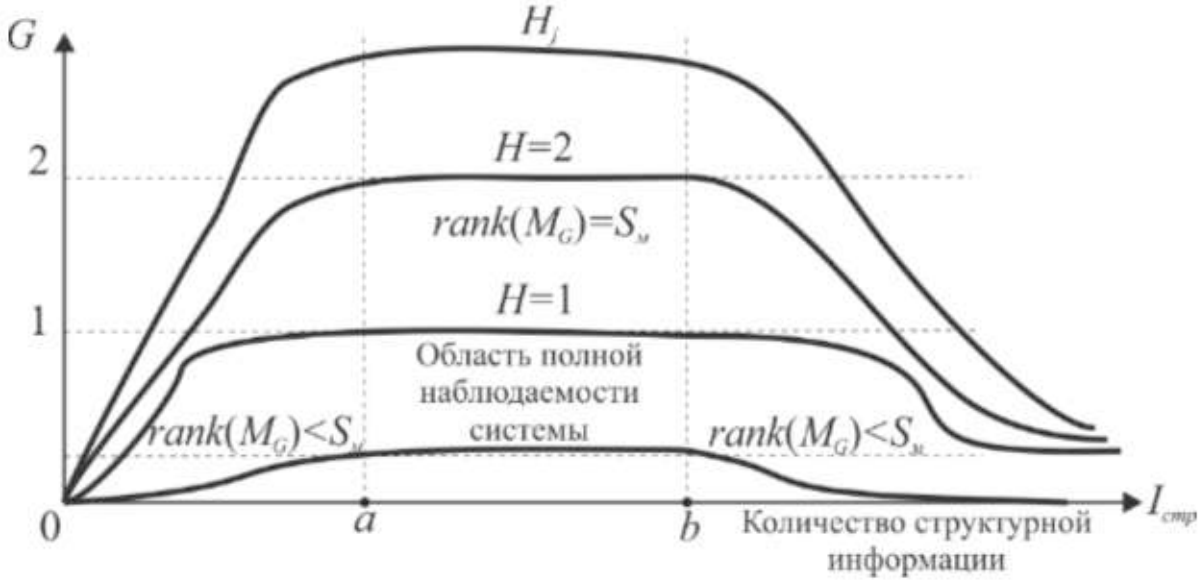


Рисунок 2.3 – Зависимости изменения упорядоченности структуры от количества структурной информации

Достаточно обширная область полной наблюдаемости системы расположена между начальной точкой полного наблюдения *a* и конечной точкой полного наблюдения *b*. Энтропия структуры также зависит от уровня наблюдаемости системы: в точке *b* данный показатель может быть ниже из-за неравномерного распределения связей, чем в непосредственной близости от данной точки [51].

На рисунке 2.4 приведены примеры различных структур, состоящих из трех элементов, матрицы смежности и их структурные показатели.

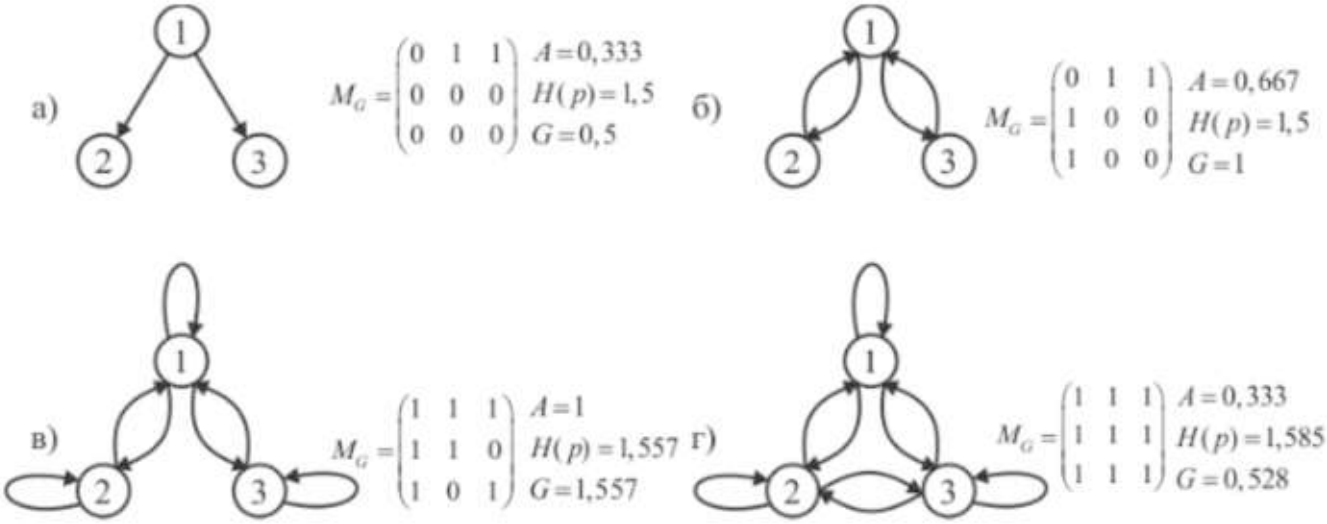
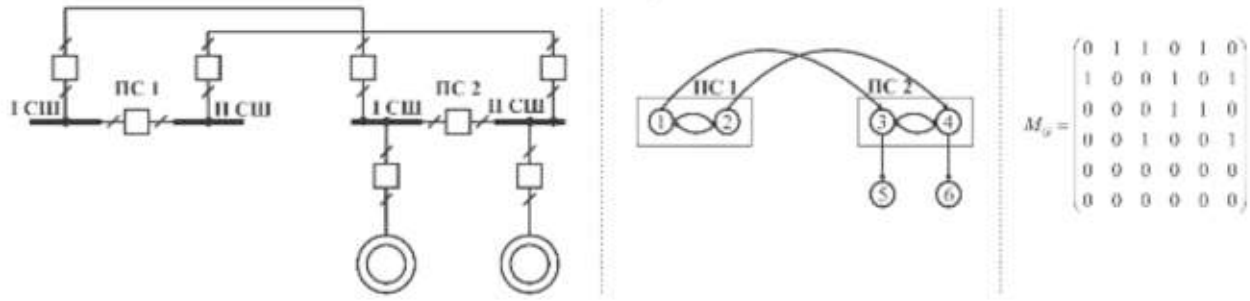


Рисунок 2.4 – Примеры усложняющихся структур

Из данных, представленных на рисунке 2.4, следует, что с усложнением структуры (увеличивается количество структурной информации), также повышаются значения структурных показателей. В то же время при избытке структурной информации (например, связь между элементами 2 и 3 на рисунке 2.4, г), ранг матрицы смежности резко снижается, существенно уменьшая значение упорядоченности структуры, несмотря на рост остальных показателей. Таким образом, показатель смежности можно считать характеристикой, определяющей оптимальное количество структурной информации в системе.

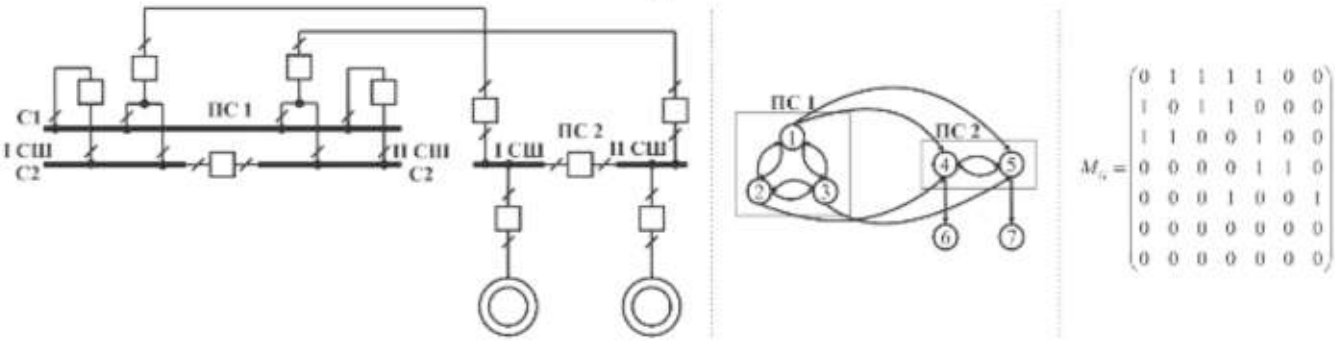
На рисунке 2.5 представлены три небольших фрагмента СЭС, состоящих из нескольких ПС и конечных потребителей в виде электродвигателей. Для каждого из фрагментов построены ориентированные графы, матрицы смежности и определены структурные показатели. Из приведенных данных видно, что при применении более надежных схем распределительного устройства (РУ) питающей ПС (ПС 2 на рисунке 2.5, б), либо при добавлении нового источника электроэнергии (ПС 3 на рисунке 2.5, в), значения структурных показателей возрастают. Увеличение значений показателей объясняется появлением в структурах СЭС новых потенциальных путей для передачи электроэнергии конечным потребителям, благодаря чему повышается надежность электроснабжения.

а)



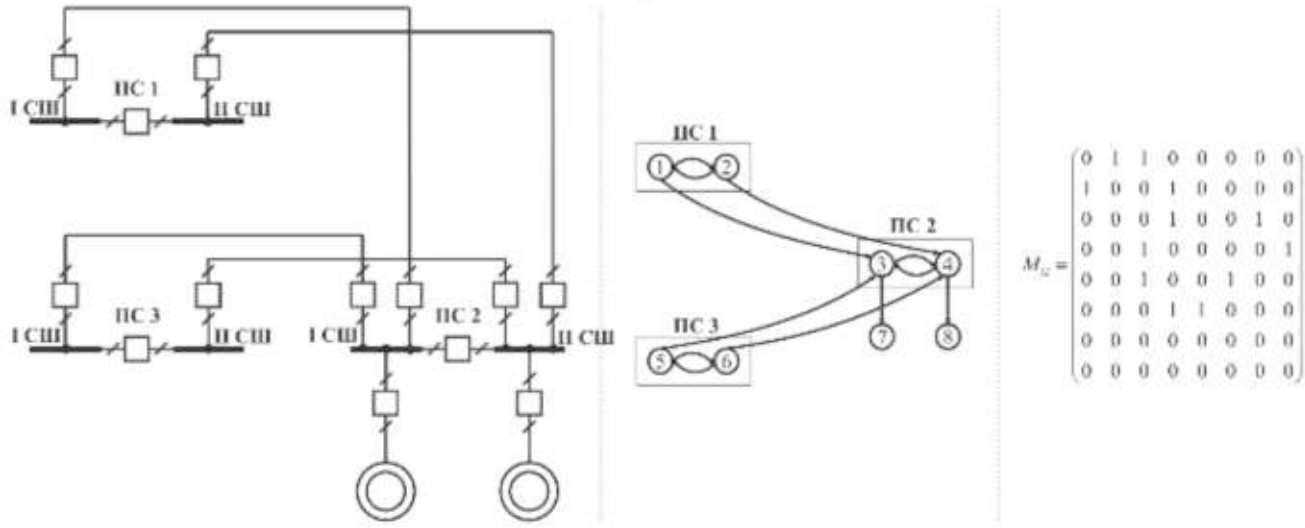
Структурные показатели $A = 0{,}667$; $H(p) = 0{,}976$; $G = 0{,}651$

б)



Структурные показатели – $A = 0{,}714$; $H(p) = 0{,}924$; $G = 0{,}661$

в)



Структурные показатели – $A = 0{,}75$; $H(p) = 0{,}942$; $G = 0{,}706$

Рисунок 2.5 – Примеры усложняющихся структур СЭС

Зачастую помимо качественной оценки структуры системы важно выявить наиболее загруженные связями элементы – «ключевые точки», так как от их надежной работы во многом зависит функционирование всей системы.

Выявить такой элемент возможно при помощи его ранга R_i, который

оценивает значимость i-го элемента системы и степень его участия в формировании структуры системы [65, 66].

$$R_i = \frac{\sum_{i=1}^{n} b_{ij}}{\sum_{\substack{i=1 \\ j=1}}^{n} b_{ij}}, \tag{2.13}$$

где b_{ij} – элементы матрицы $\boldsymbol{B} = \boldsymbol{M}_{\boldsymbol{G}}^{\boldsymbol{k}}$, $k = 4$, причем $\sum_{i=1}^{s_M} R_i = 1$.

Чем больше ранг элемента, тем больше связей отходит непосредственно от этого элемента, а также больше количество путей передачи информации, энергии или вещества проходит через данный элемент [66].

Таким образом, определяющими условиями в создании и развитии оптимальной структуры сложной системы считаются: максимально возможное равномерное распределение участия элементов в формировании структуры на всех уровнях иерархии, наличие способности к самодиагностике и саморегуляции отдельных частей (элементов) и системы в целом, присутствие достаточного количества обратных связей между элементами системы, возможность управляющего элемента контролировать и максимально быстро изменять состояния остальных элементов системы, следовательно, комплексный структурный показатель может быть использован для оценки упорядоченности структуры систем.

Также из анализа графов различных структур можно сделать следующие выводы:

- с ростом упорядоченности системы (количества структурной информации) ранг матрицы смежности вершин возрастает;
- ранг матрицы смежности вершин снижается при перенасыщении системы связями и циклами, которые можно назвать избыточными.
- наибольшее влияние на ранг матрицы оказывает наличие связей самоконтроля и обратных связей в периферийных элементах, которые позволяют реализовать способность к самодиагностике и саморегуляции отдельных частей (элементов) и системы в целом;

• идеальной может считаться система, имеющая во всех элементах самоконтроль без избыточных связей: в этом случае ранг матрицы смежности вершин будет наибольшим и равным количеству элементов системы (при полной упорядоченности A = 1): каждый элемент системы обладает свойством самодиагностики [45, 70].

Структурный анализ графов систем большой размерности сопряжен со значительными трудностями при определении структурных показателей из-за большого числа связей между элементами. Для упрощения процедуры расчета в среде *VBA* (*Visual Basic for Application*) был написан макрос для табличного процессора *Microsoft Excel*, позволивший определять ранги матриц большой размерности и вычислять ранги элементов системы.

Ниже приведены блок-схемы расчетных процедур основных структурных характеристик: показателя смежности A (рисунок 2.6) и энтропии структуры системы $H(p)$ (рисунок 2.7). Весь процесс структурного анализа графа сложной системы с помощью разработанного макроса представлен на рисунке 2.8.

2.3. Насыщенность системы оперативной информацией

Оценку насыщенности сложной системы оперативной информацией возможно осуществить при помощи оперативного показателя, учитывающего такие важные качества информации как: достоверность, объем и скорость ее перемещения [40]:

$$D = \sum_{l=1}^{l_м} p_l f_l I_l, \text{ бит/с}, \tag{2.14}$$

где I_l – количество оперативной информации в l-ом пути, определяющее число распознаваемых технических состояний в данном пути; f_l – скорость перемещения оперативной информации в l-ом пути; p_l – вероятность получения достоверной оперативной информации в l-ом пути; $l_м$ – количество путей в системе.

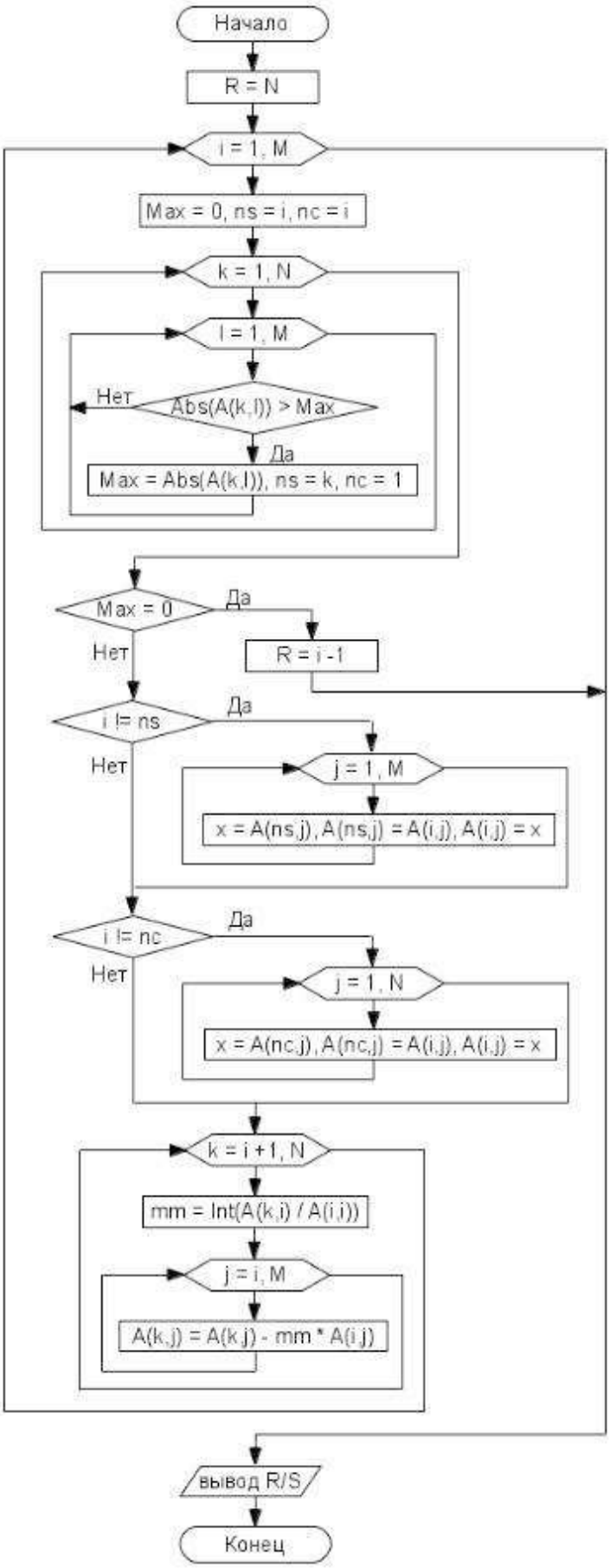


Рисунок 2.6 – Блок-схема расчета показателя смежности *A*

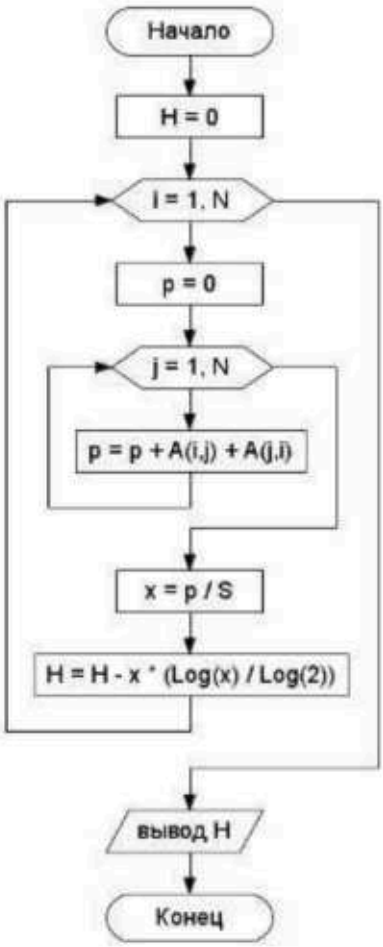


Рисунок 2.7 – Блок-схема расчета энтропии структуры $H(p)$

Рисунок 2.8 – Этапы структурного анализа сложной системы

Для определения количества оперативной информации во всех путях графа может быть использована формула К. Шеннона [84]:

$$I_l = -\sum_{k=1}^{Q_{lм}} p_{lk} \log_2 p_{lk}, \text{ бит}, \tag{2.15}$$

где p_{lk} – вероятность появления k-го состояния в l-ом пути; $Q_{lм}$ – количество возможных состояний в l-ом пути.

При отсутствии достоверных вероятностей состояний в путях можно принять, что данные равновероятны. В таком случае количество оперативной информации l-го пути будет максимально и может определяться по формуле [40]

$$I_l = \log_2(Q_{lм}), \text{ бит}, \tag{2.16}$$

$$Q_{lм} = \frac{\sum_{l=1}^{M_l} Q_{li}^{в}}{M_l}, \tag{2.17}$$

где $Q_{li}^{в}$ – число возможных состояний i-х ребер (число технических состояний i-х элементов), входящих в l-й путь; M_l – количество ребер в l-й пути.

Все состояния параллельных ребер графа могут быть учтены суммарным числом данных состояний одного ребра, таким образом, снимается недостаток матрицы вершин, не учитывающий дублирующие связи [44].

Скорость перемещения оперативной информации в пути определяется как

$$f_l = \frac{1}{\sum_{i=1}^{m} T_{li}}, \text{ 1/с}, \tag{2.18}$$

где T_{li} – время определения состояния в i-м ребре l-го пути, с; m – количество ребер в пути.

Следует различать скорости перемещения оперативной информации в технических и эргатических системах. Это связано с присутствием в эргатических системах человека-оператора, скорость действий и передвижений которого значительно ниже скорости срабатывания технических устройств. Данное обстоятельство накладывает ограничение на сравнение разнородных по составу сложных систем вследствие возможной погрешности при определении оперативного показателя из-за большой разницы во времени определений состояний в путях.

Определение насыщенности связей системы может проводиться и для отдельных частей технической системы (например, для эргатической надсистемы, включающей данную техническую систему), при этом их оперативный показатель может существенно различаться в зависимости от быстродействия управляющих элементов этих частей технической системы. В целом, чем выше скорость перемещения потоков оперативной информации, тем выше насыщенность, а соответственно устойчивость системы. В качестве примера можно привести устойчивость (эффективность) природных микро- и макросистем за счет их упорядоченной структуры и высокой скорости циркуляции оперативной информации [43,100].

Согласно [51] значение оперативного показателя теоретически не ограничено, но практически его пределом является выражение

$$D \to \frac{\log_2 Q_\Sigma}{T}, \tag{2.19}$$

где Q_Σ – количество распознаваемых системой состояний, равное сумме состояний всех элементов системы; T – время распознавания технического состояния системы.

На рисунке 2.9 показаны графики изменения показателя D от оперативной информации $I_{оп}$. Как видно из рисунка 2.9 большая насыщенность систем оперативной информацией обеспечивается вариантами систем, которые имеют графики, проведенные под большими углами к оси абсцисс.

Таким образом, как в технических, так и эргатических системах заложены высокие потенциальные возможности для достижения максимально эффективного функционирования этих систем.

2.4. Информационный ресурс сложной системы

Основным критерием эффективности сложной системы согласно предлагаемому методу является информационный ресурс системы R, значение которого

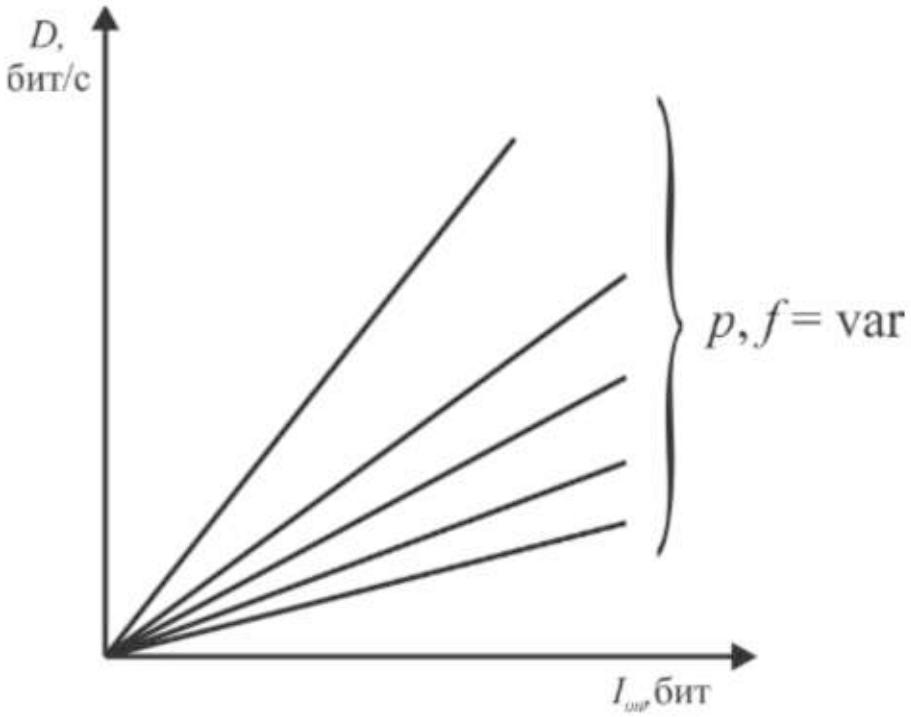


Рисунок 2.9 – Зависимости комплексного оперативного показателя от количества оперативной информации

формируется структурной G и оперативной составляющими D:

$$R = f(G, D) \to \max \tag{2.20}$$

За информационный ресурс системы принимается показатель:

$$R = G \cdot D, \text{ бит/с.} \tag{2.21}$$

Максимум информационного ресурса соответствует системе с оптимальным количеством структурной информации (упорядоченной структурой) и максимально возможной (ограниченной экономическими факторами) насыщенности связей системы оперативной информацией.

Сопоставление графиков комплексного структурного показателя G (рисунок 2.3) и оперативного показателя D (рисунок 2.9) друг с другом при некоторой обобщенной информации по оси абсцисс позволяет получить кривые информационного ресурса R (рисунок 2.10). Эти кривые построены при условии, что матрицы смежности вершин равномерно заполнены «1». Графики информационного ресурса, показанные на рисунке 2.10, построены для двух условных систем, обладающих различными структурными и оперативными показателями. При этом очевидно, что эффективность второй системы выше [51].

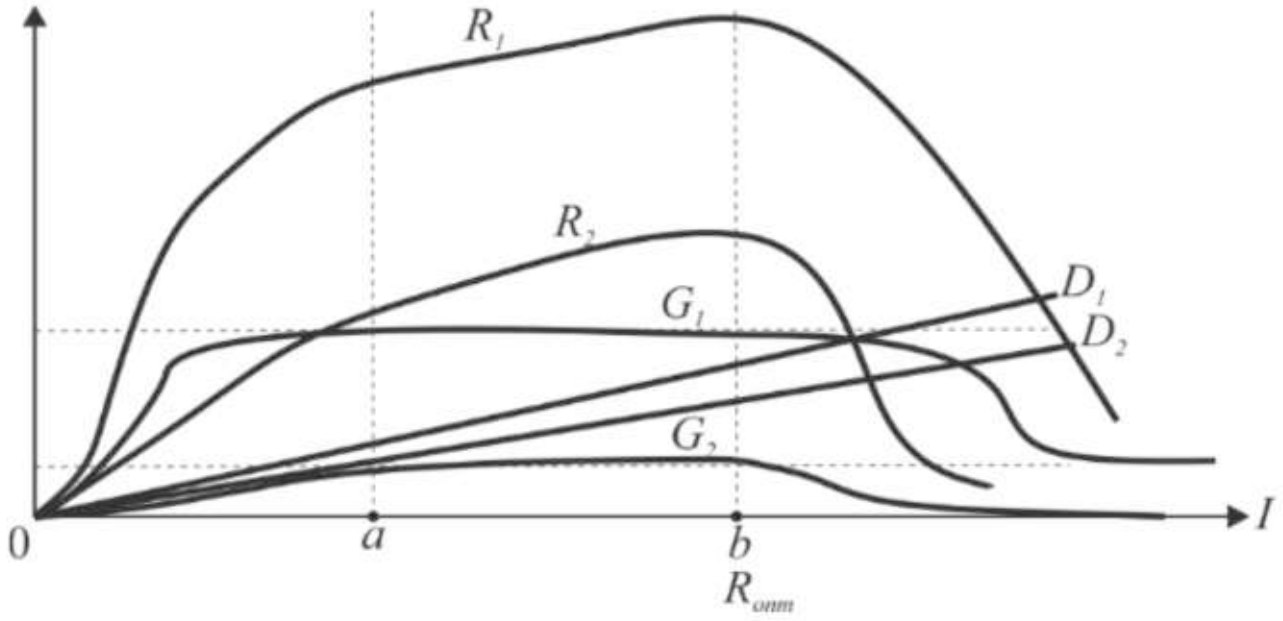


Рисунок 2.10 – Кривые информационного ресурса

Из рисунка 2.10 следует, что максимум информационного ресурса наблюдается в точке *b* при оптимальном количестве структурной информации. Таким образом, целесообразно насыщать систему структурной информацией до момента снижения показателя смежности, находясь при этом в области полной наблюдаемости.

Оптимальное количество структурной информации определяется показателем смежности и энтропией структуры системы, а насыщенность системы оперативной информацией – ее количеством, скоростью перемещения и достоверностью. При безразмерном количестве структурной информации информационный ресурс имеет размерность бит/с.

Согласно [53] в упорядоченных технических системах информационный ресурс может принимать достаточно большие значения, в то время как для систем с несовершенной структурой ($G < 1$) для повышения эффективности эксплуатации необходимо увеличивать оперативный показатель *D*. Учитывая формулу (2.19) пределом информационного ресурса будет выражение

$$R \to H(p)\frac{\log_2 Q_\Sigma}{T} \tag{2.22}$$

Обобщенная структура информационной модели сложной системы представлена на рисунке 2.11, а ее характеристики на рисунке 2.12 [57].

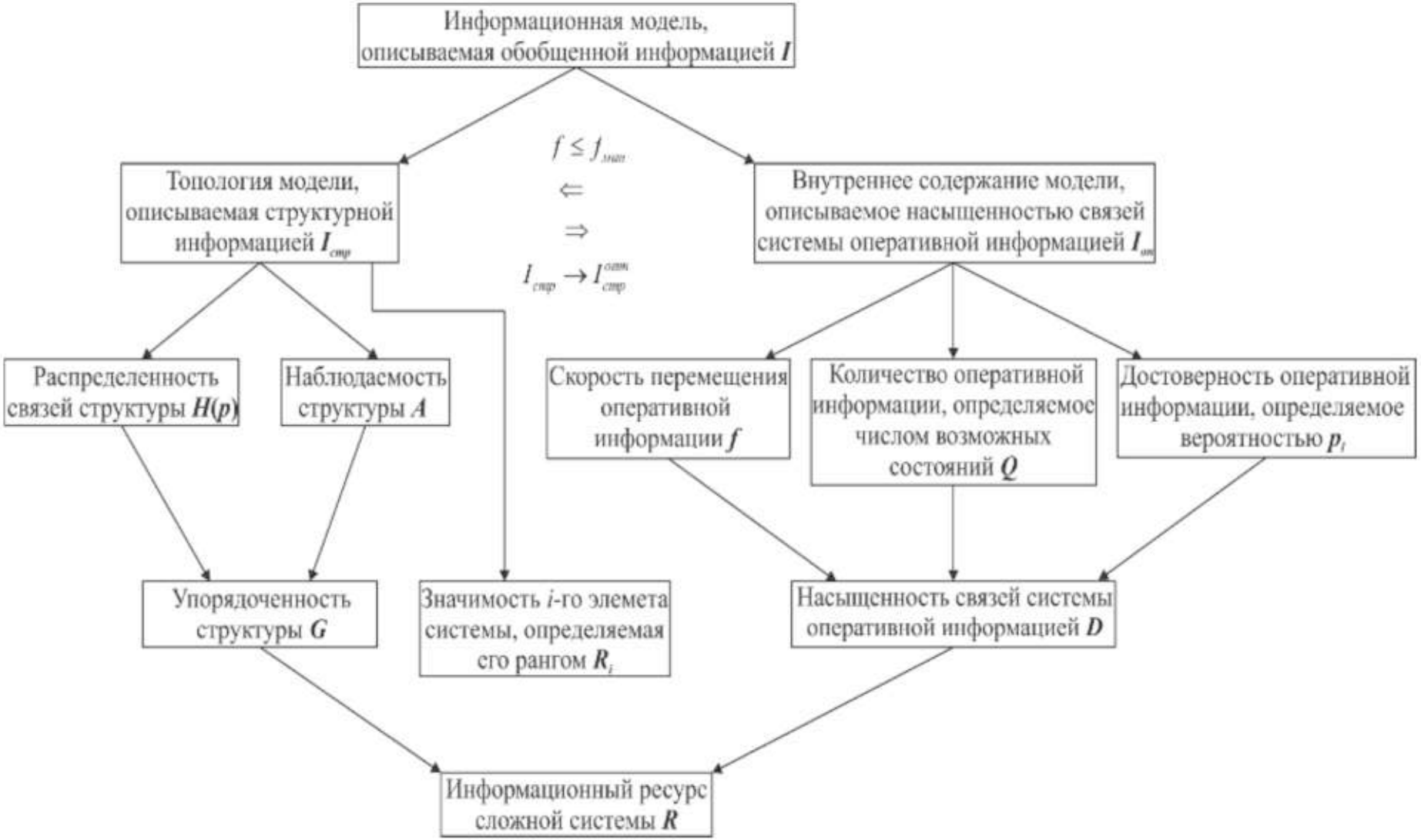


Рисунок 2.11 – Структура информационной модели сложной системы

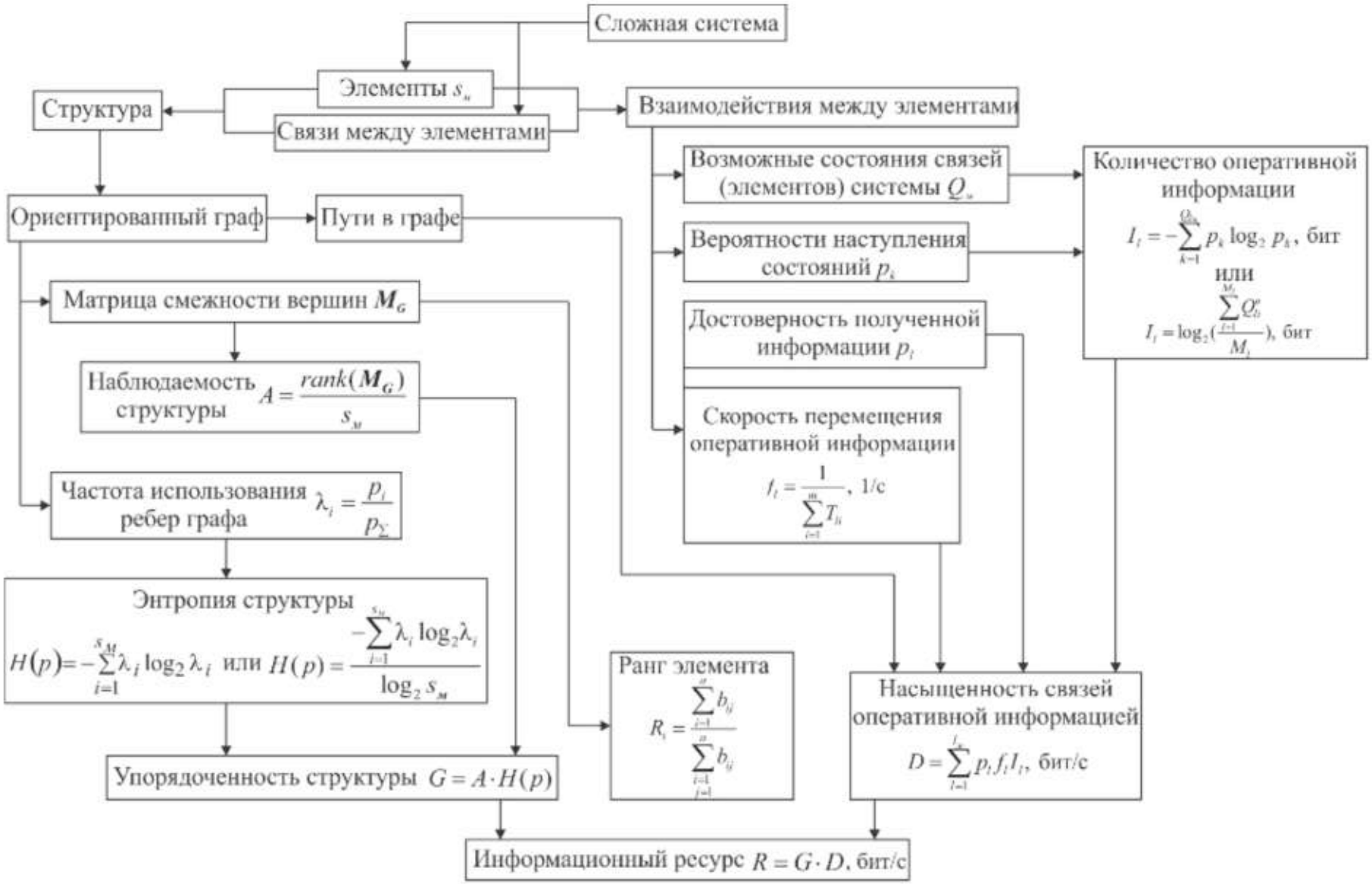


Рисунок 2.12 – Характеристики информационной модели сложной системы

2.5. Синтез систем электроснабжения

Синтез СЭС (как и любой другой сложной системы), основанный на ее информационной модели, проводится в несколько этапов. При этом основной целью синтеза является достижение высокий эффективности функционирования СЭС при максимизации ее информационного ресурса.

На первом этапе синтеза на основе принципиальной схемы СЭС строится ориентированный граф. Элементами графа в зависимости от степени детализации исследования могут быть: ПС, либо отдельные СШ мощных ПС и электростанций, генераторы, компенсирующие устройства, различные электроприемники потребителей (трансформаторные подстанции (ТП), электродвигатели, электротехнологические установки и др.). Ветви графа представляют собой кабельные и воздушные ЛЭП. Ориентация ветвей графа соответствует потенциально возможным направления движения потоков электроэнергии по ЛЭП в СЭС. Таким образом, построенный ориентированный граф отражает и потоки электроэнергии в исследуемой СЭС.

На основе полученного графа составляется матрица смежности вершин $\boldsymbol{M_G}$, при помощи которой определяются структурные показатели и ранги элементов системы.

Анализ структурных показателей позволяет:

- классифицировать СЭС по характерным свойствам структуры [64];
- выработать рекомендации по совершенствованию структуры СЭС;
- выявить «ключевые точки» – ПС (или отдельные СШ) на обеспечении надежности работы которых, необходимо обратить особое внимание.

На следующем этапе исследуются потоки оперативной информации в СЭС. Большинство современных СЭС являются эргатическими, что определяет человека-оператора основным элементом, влияющим на потоки оперативной информации. Ориентированный граф СЭС дополняется элементами и связями, которые отражают присутствие оперативного персонала и движение потоков оперативной информации при проведении эксплуатационных операций над оборудованием СЭС.

При этом можно говорить о расширении ориентированного граф до ИЭМ [18].

Для каждой конкретной эксплуатационной операции (оперативные переключения, осмотры оборудования, подготовку рабочих мест и допуск ремонтных бригад и др.) выявляется путь движения оперативной информации, отражающий последовательность действий от момента получения распоряжения на выполнение какой-либо операции до ее непосредственного исполнения.

Анализ выявленных путей позволяет:

- вычислить насыщенность исследуемой СЭС оперативной информацией;
- определить места, где потоки оперативной информации искажаются или неоправданно долго задерживаются;
- выработать рекомендации по целесообразному увеличению насыщенности системы оперативной информацией.

На третьем этапе, используя полученные характеристики структурной и оперативной информации, рассчитывается информационный ресурс СЭС, который позволяет дать оценку эффективности функционирования исследуемой СЭС и определить необходимость и возможность ее совершенствования.

Еще одним этапом синтеза СЭС, может быть определение и анализ различных стоимостных характеристик, отражающих технико-экономические показатели работы СЭС. Учет стоимостных показателей возможен при помощи матриц оценочных показателей размерности [$s_м$, $s_м$], элементы которых являются стоимостями связей i-го элемента с остальными элементами системы. ИЭМ СЭС с возможными стоимостными характеристиками показана на рисунке 2.12 [60].

2.6. Выводы по главе

1. Упорядоченность структуры позволяет оценить качество структурной информации, заложенной в сложной системе.

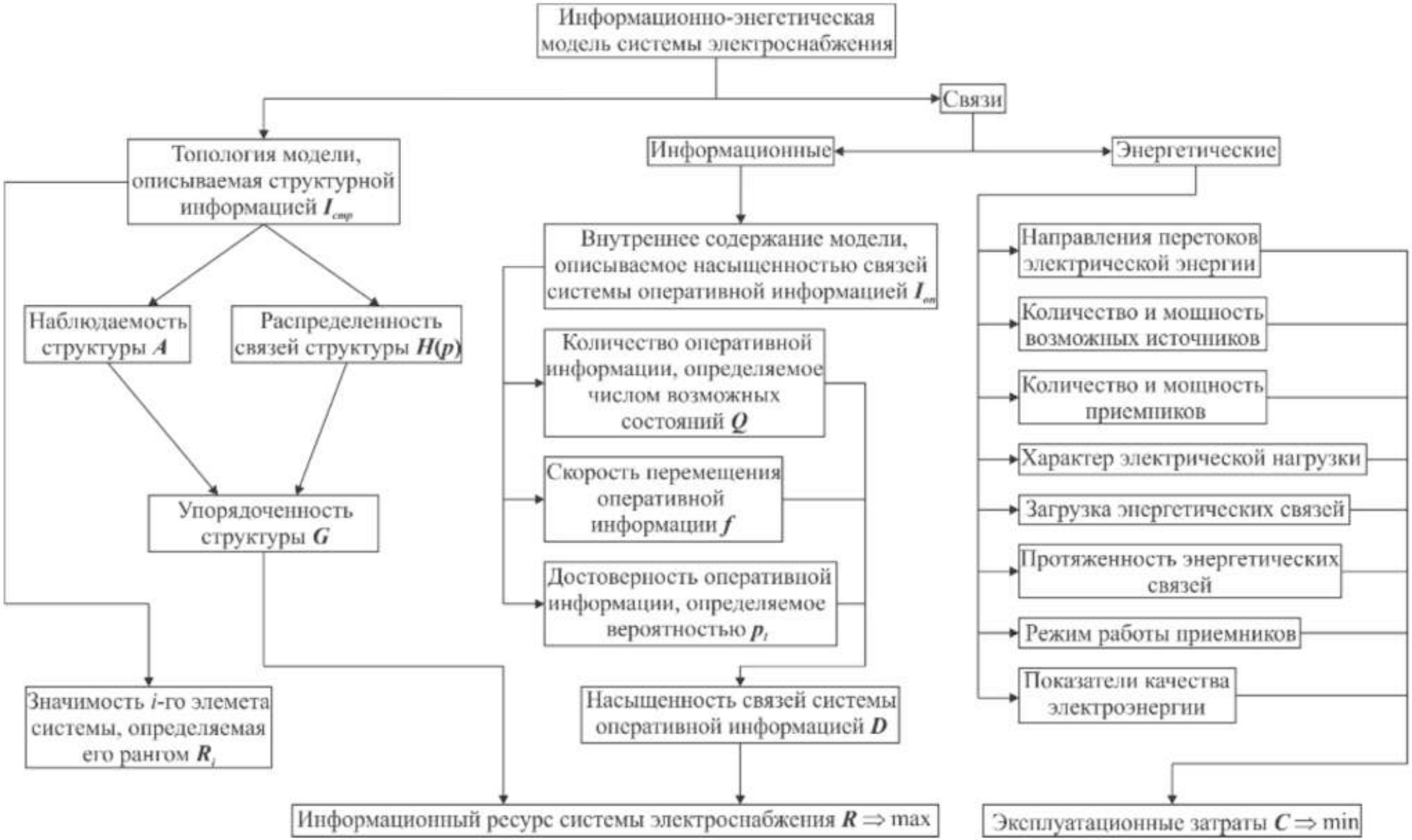


Рисунок 2.12 – Информационно-энергетическая модель системы электроснабжения

2. Наиболее значимые и загруженные связями элементы системы – «ключевые точки», обладающие значительной степенью участия в формировании структуры системы можно определить при помощи ранга элемента.

3. Насыщенность сложной системы оперативной информацией может быть определена оперативным показателем, учитывающим основные характеристики оперативной информации (достоверность, объем и скорость ее перемещения).

4. Эффективность эксплуатации сложной системы (в частности СЭС) зависит от ее информационного ресурса, формируемого двумя составляющими внутренней информации системы – структурной и оперативной.

5. Поэтапно расписана процедура синтеза СЭС, основной целью которого является достижение высокий эффективности эксплуатации СЭС при максимизации ее информационного ресурса.

Анализ информационной модели (ИЭМ для СЭС) показал, что с ее помощью можно:

- оценить эффективность эксплуатации эргатической СЭС как с технической точки зрения, так и с позиции управления системой;
- выявить и устранить недостатки в структуре (топологии) СЭС, тем самым повысив надежность электроснабжения потребителей;
- определить наиболее значимые и загруженные связями элементы системы – «ключевые точки», на надежность работы которых необходимо обратить особое внимание;
- рационализировать работу системы управления СЭС, при помощи анализа потоков оперативной информации;
- определить места СЭС, в которых происходит задержка оперативной информации;
- ускорить обмен оперативной информацией между технической частью СЭС и человеком-оператором; снизить вероятность нарушения человеком-оператором правил эксплуатации, регламентируемых ПОТЭЭ, посредством рационализации скорости перемещения потоков оперативной информации.

ГЛАВА 3. ПОВЫШЕНИЕ ИНФОРМАЦИОННОГО РЕСУРСА СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ КЕМЕРОВСКОГО АО «АЗОТ»

КАО «АЗОТ» – одно из ведущих предприятий химической отрасли России. Производственный комплекс завода состоит из 50 основных и вспомогательных цехов, являясь одним из крупнейших за Уралом. КАО «АЗОТ» производит широкий спектр химической продукции: минеральные удобрения для аграрного комплекса (карбамид, сульфат аммония, аммиачная селитра), взрывчатку для угледобывающих предприятий, капролактам для производства химических волокон и нитей, продукты органического синтеза для производителей пластмасс и красителей (диметилформамид технический, кислота серная техническая и др.) и многие другие химические вещества для различных отраслей народного хозяйства (аммиак, кислота азотная, соли углеаммонийные, карбонат аммония и др.) [92, 96].

Производство качественной продукции при должном уровне безопасности технологического процесса требует от эргатической СЭС КАО «АЗОТ» высокой эффективности функционирования для обеспечения бесперебойного электроснабжения цеховых потребителей, большая часть из которых относится к потребителям I и II категории надежности.

3.1. Анализ системы электроснабжения КАО «АЗОТ»

Электроснабжение высоковольтных цеховых электроприемников КАО «АЗОТ» осуществляется по КЛ 6 кВ через распределительные ПС, которые запитаны от трех ГПП 110/6 кВ («Азот-1,2», «Азот-3», «Азот-4»), а также от генераторного распределительного устройства (ГРУ) 6 кВ Ново-Кемеровской ТЭЦ. Питание ГПП происходит по ВЛ 110 кВ от ПС «Азот-220» и от Ново-Кемеровской ТЭЦ.

Обеспечением бесперебойного электроснабжения занимаются службы управления главного энергетика (УГЭ) – цех электроснабжения (ЦЭС), цех

сервисного облуживания электрооборудования (ЦСОЭ), электроремонтный цех (ЭРЦ), участок по наладке электрооборудования (НУ УГЭ). Круглосуточное оперативное управление СЭС КАО «АЗОТ» осуществляется дежурными электромонтерами 9-ти районов обслуживания под общим руководством начальника смены.

Определение информационного ресурса СЭС КАО «АЗОТ» было проведено поэтапно, согласно п. 2.5. На основе принципиальной схемы СЭС (рисунок А.1 в приложении А) был построен ориентированный граф (рисунок А.2 в приложении А), отражающий структуру электроснабжения потребителей КАО «АЗОТ», степень детализации графа – до отдельных СШ ПС.

На основе графа была построена матрица смежности вершин и определены структурные показатели: показатель смежности A = 0,871; энтропия структуры $H(p)$ = 7,019 (0,955)*; упорядоченность структуры G = 6,115 (0,832).

Для анализа информационных потоков и определения оперативного показателя эргатической СЭС КАО «АЗОТ», используя ориентированный граф, были построены ИЭМ для каждого из 9-ти районов обслуживания (наименования районов определяются номером ПС, где находится место базирования дежурного персонала), представленные на рисунках 3.1 – 3.9, где 1-166 – СШ ПС СЭС КАО «АЗОТ», 167 – диспетчерский щит, 168 – начальник смены, 169-177 – дежурные электромонтеры районов (в некоторых ИЭМ присутствуют СШ непосредственно в данный район не входящие, но формирующие схему его электроснабжения).

Построенные модели отражают пути движения оперативной информации при выполнении персоналом различных эксплуатационных операций:

- переключение коммутационных аппаратов, отходящих от ПС фидерных линий, питающих конечных потребителей;
- переключение вводных коммутационных аппаратов, а также аппаратов, обеспечивающих резервное питание СШ;
- выполнение послеаварийных осмотров;
- подготовка рабочего места и допуск ремонтной бригады.

---

* в скобках указано значение показателя при использовании формулы (2.8) для расчета энтропии структуры

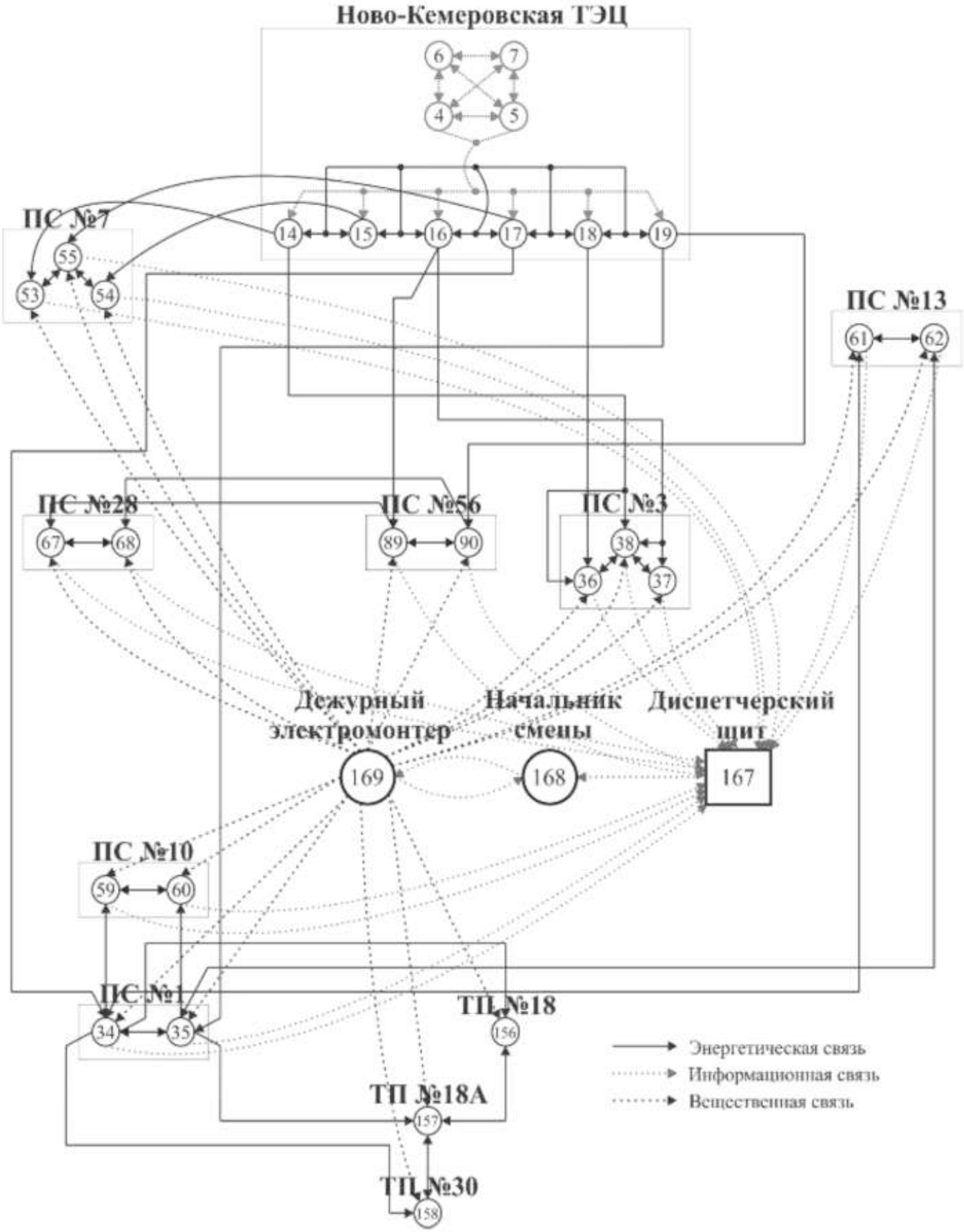


Рисунок 3.1 – ИЭМ района обслуживания ПС №1

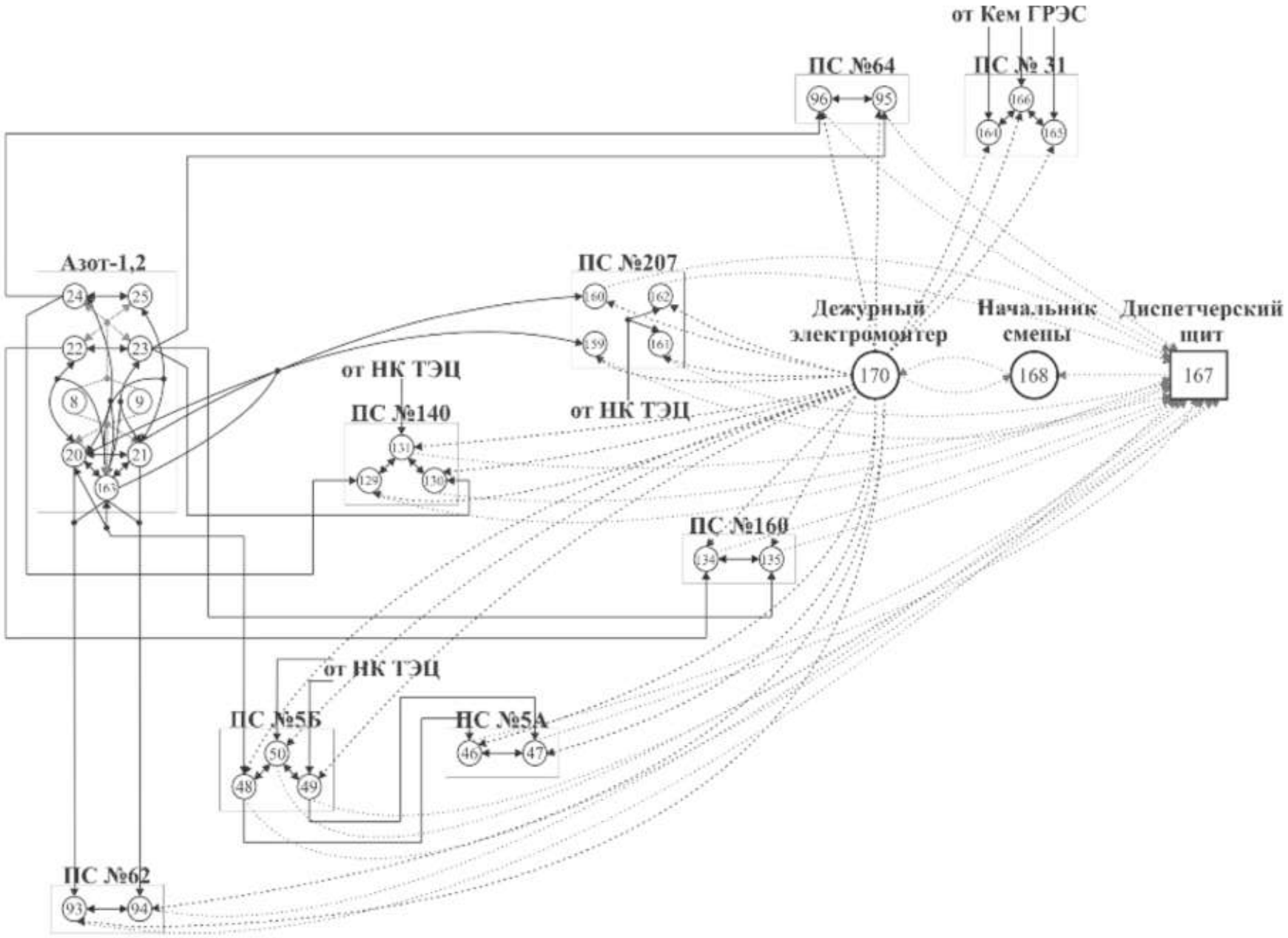


Рисунок 3.2 – ИЭМ района обслуживания ПС №5А

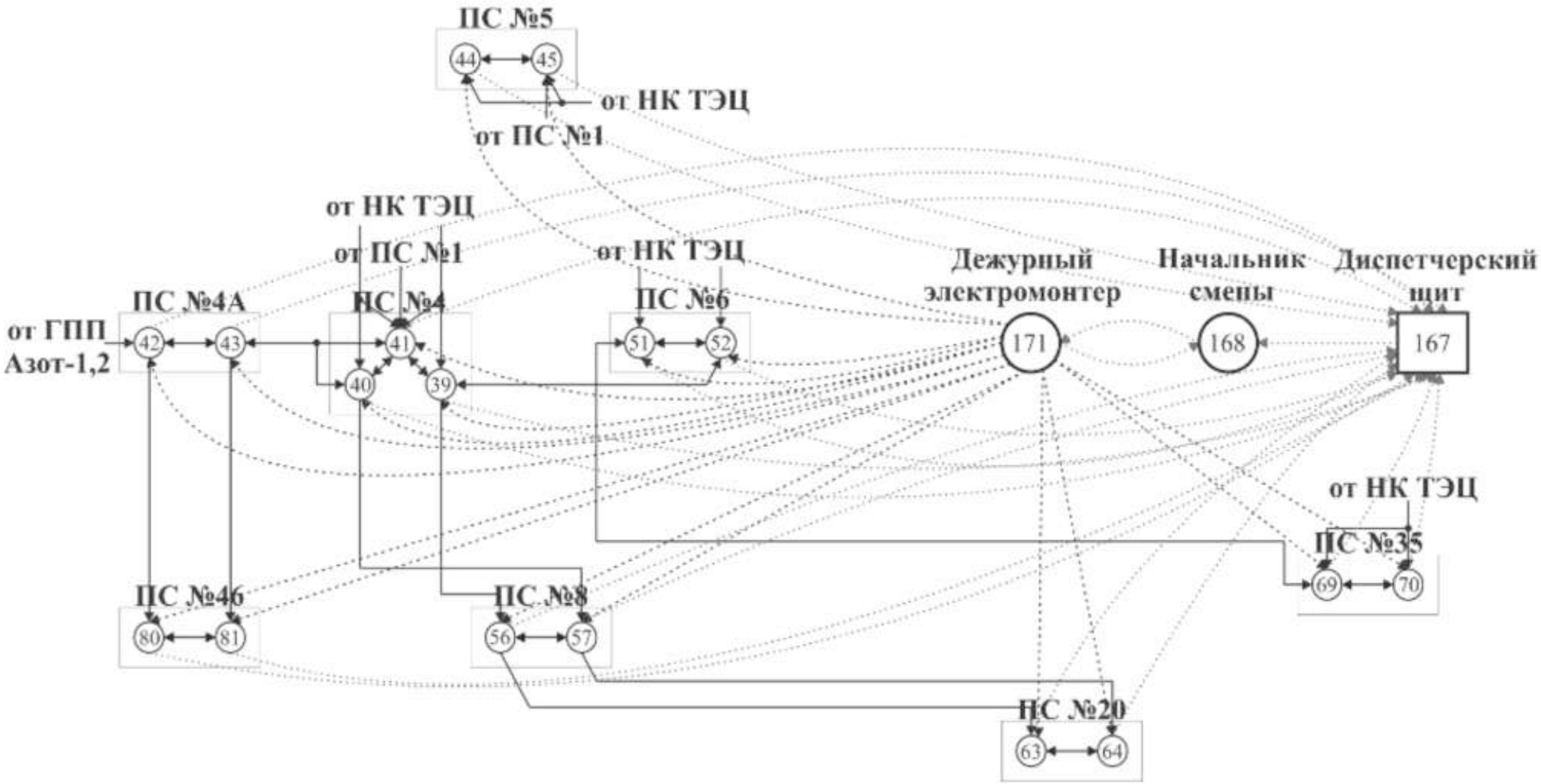


Рисунок 3.3 – ИЭМ района обслуживания ПС №6

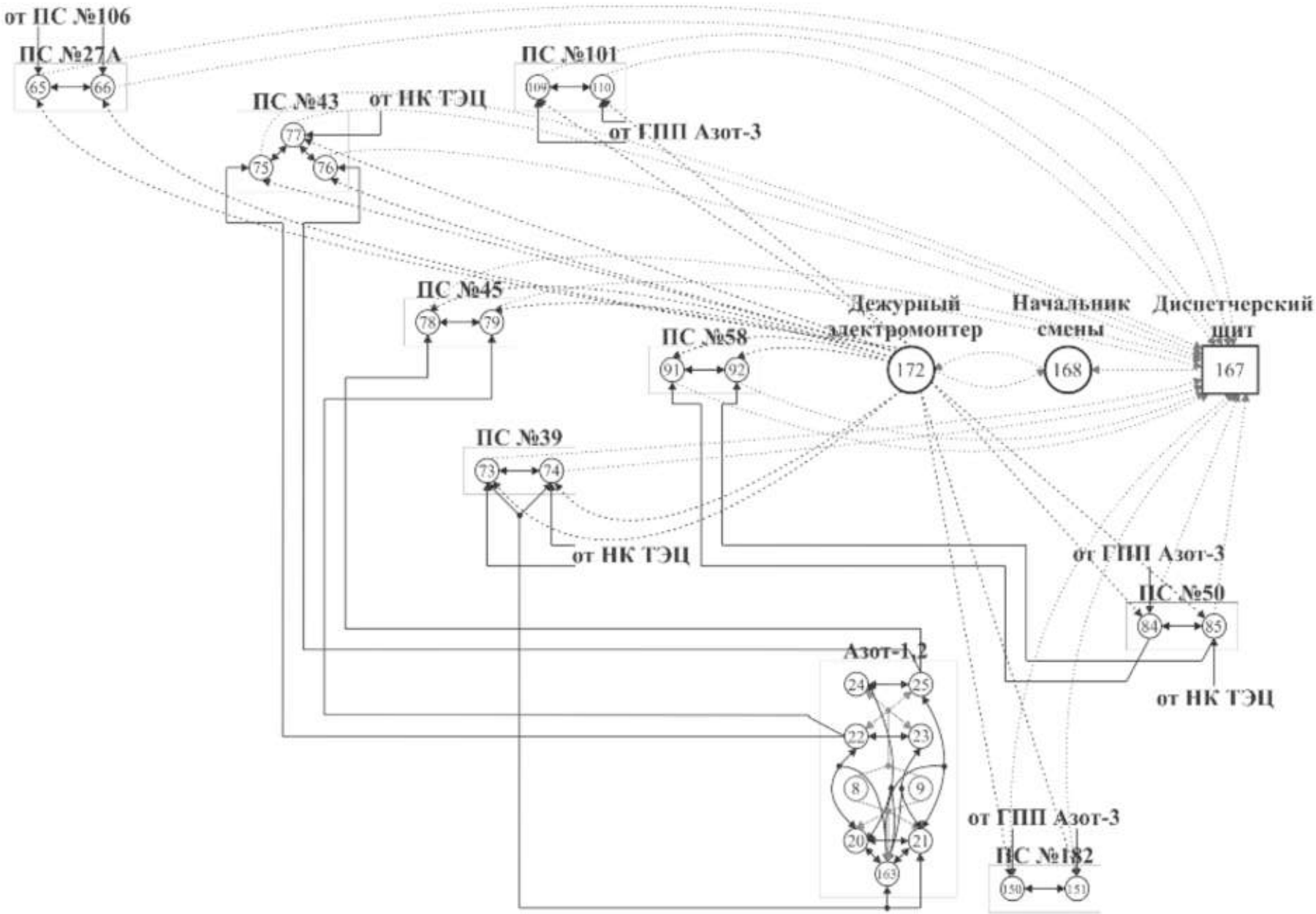


Рисунок 3.4 – ИЭМ района обслуживания ПС №39

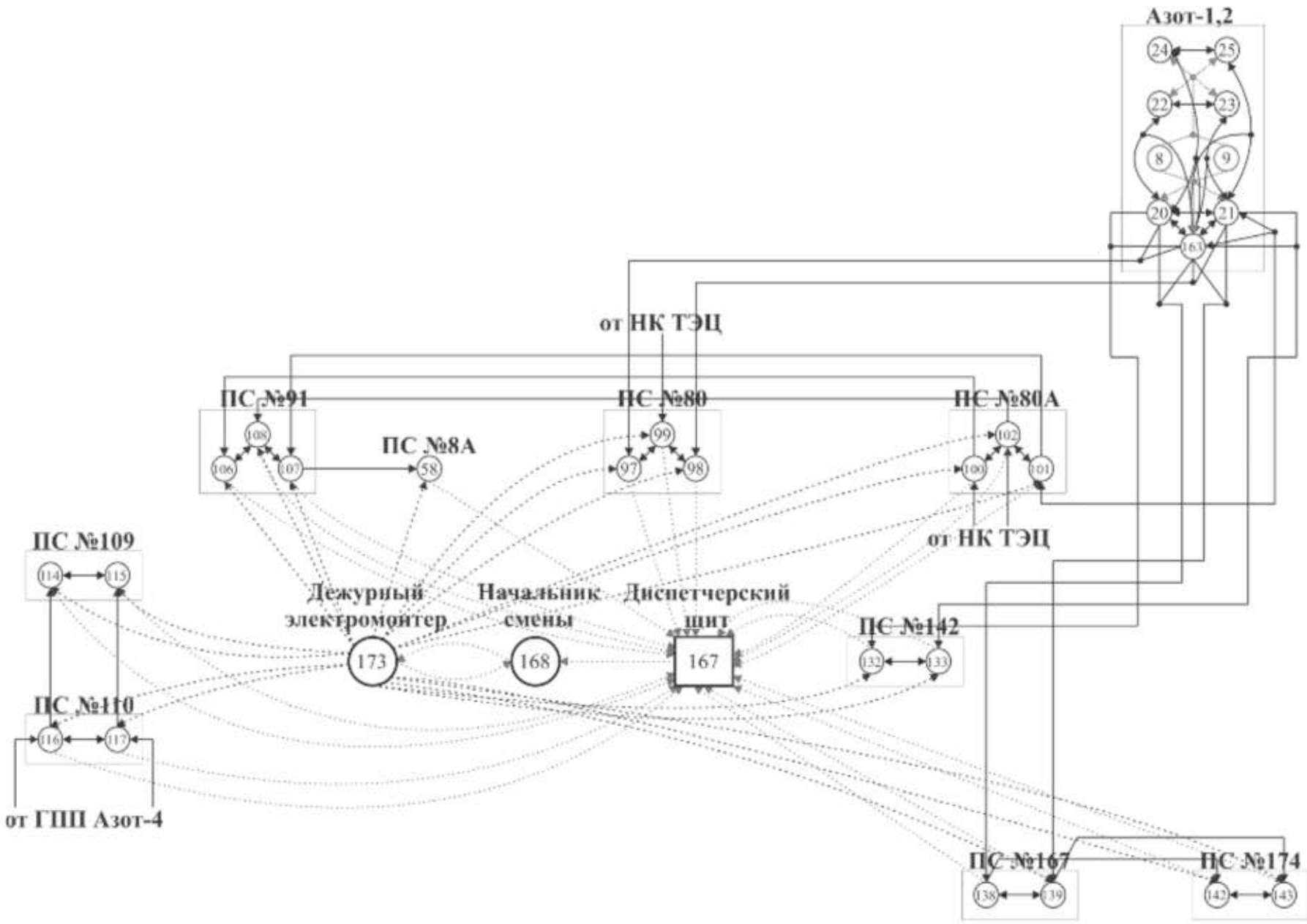


Рисунок 3.5 – ИЭМ района обслуживания ПС №80

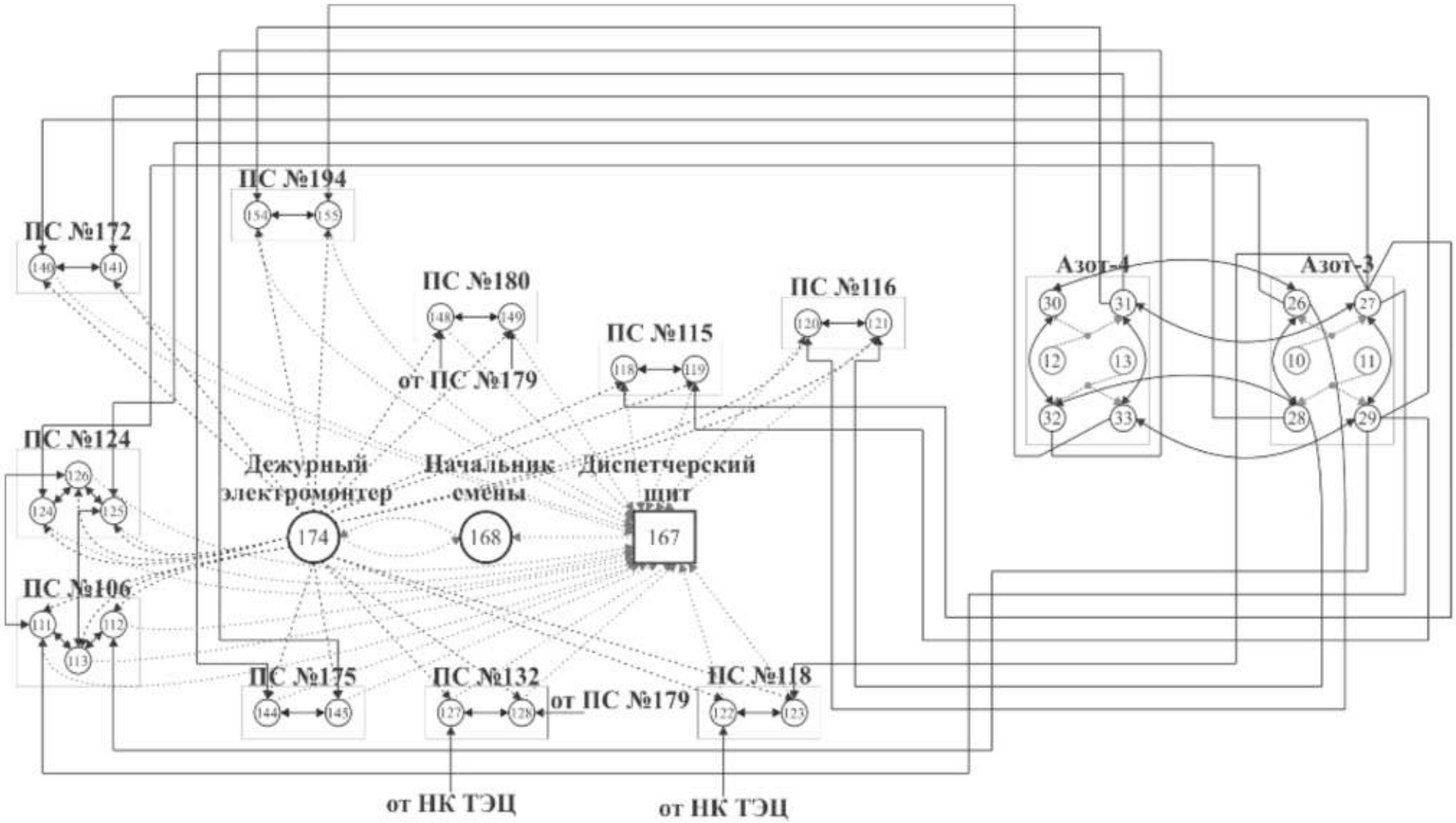


Рисунок 3.6 – ИЭМ района обслуживания ПС №132

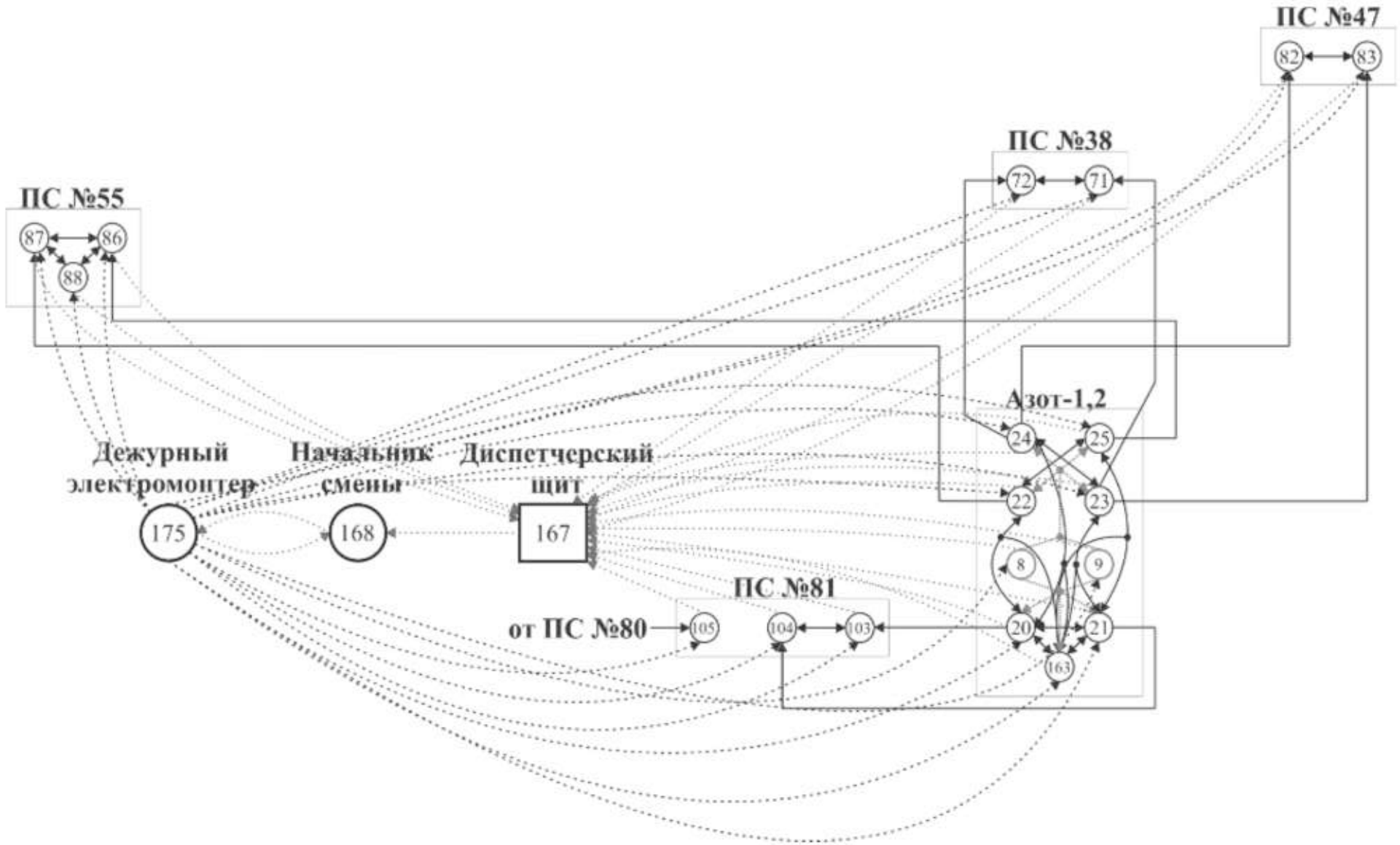


Рисунок 3.7 – ИЭМ района обслуживания ПС «Азот-1,2»

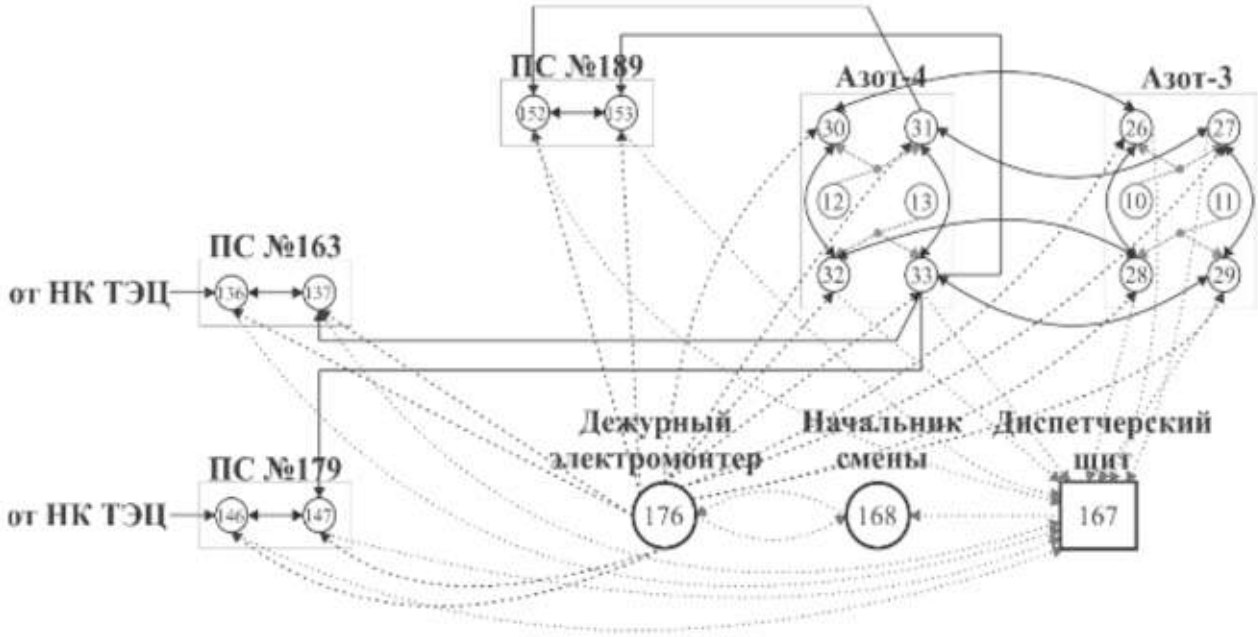


Рисунок 3.8 – ИЭМ района обслуживания ПС «Азот-3,4»

Рисунок 3.9 – ИЭМ района обслуживания ПС «Азот-220»

За возможные состояния элементов в путях были приняты следующие:

• включенные, нормально и аварийно отключенные (под действием различных защит) положения всех коммутационных аппаратов СШ;

• прием сигналов о положении коммутационных аппаратов, а также о возникновении аварийных отключений;

• информационный обмен между дежурным электромонтером и начальником смены;

• исполнение дежурным электромонтером полученных команд.

При определении скорости циркуляции оперативной информации в путях учитывались: время передачи и приема оперативной информации оперативным

персоналом, среднее время перемещения дежурного персонала от мест базирования к объектам района обслуживания (определены при помощи геоинформационной системы «Яндекс.Карты») и среднее время выполнения поставленных задач.

Вероятность правильного определения состояния в l-х путях p_l определялось произведением вероятностей i-х ребер, входящих в l-й путь. Значение i-х вероятностей составом эксплуатационной операции согласно [39, 73].

В качестве примера в приложении Б (таблица Б.1) приведен расчет оперативных показателей для района обслуживания ПС №1, для остальных районов расчеты аналогичны и в работе не приводятся. Итоговые результаты определения информационных параметров существующей эргатической СЭС КАО «АЗОТ» показаны в таблице 3.1.

Таблица 3.1

Информационные параметры СЭС КОАО «Азот»

A	$H(p)$	G	D, бит/с	R, бит/с
0,871	7,019	6,114	1,862	11,389

Проведенный анализ и полученные результаты позволяют сделать следующие выводы о структурной и оперативной составляющих эргатической СЭС КАО «АЗОТ».

1. Исследуемая СЭС обладает относительно высокими значениями структурных показателей, чему способствует, во-первых, наличие нескольких мощных источников питания, позволяющее избежать излишней перегрузки отдельных элементов СЭС, а во-вторых, достаточно разветвленная сеть питающих кабельных ЛЭП, способная обеспечить электроснабжение цеховых ПС по нескольким путям, при этом к некоторым ПС питание подводится по 3-м линиям. Также надо отметить наличие в отдельных частях СЭС закольцованных фрагментов, что также положительно отражается на структурной организации СЭС.

Однако для приближения значений структурных показателей СЭС к показателям идеальной «сотовой» структуры (A = 1; $H(p)$ =0,987; G = 0,987 [58]) необходимо проанализировать возможные варианты дальнейшего развития структуры СЭС КАО «АЗОТ».

2. Основным фактором, определяющим существующее значение оперативного показателя надсистемы управления СЭС КАО «АЗОТ», является скорость перемещения оперативной информации в ней. При этом присутствие электромонтера в исследуемой СЭС, выполняющего эксплуатационные операции в «ручном режиме», изначально ограничивает скорость перемещения оперативной информации, делая ее недостаточно высокой. Наиболее эффективным вариантом повышения скорости циркуляции оперативной информации будет полная автоматизация процессов оперативных переключений и оставление за человеком только наблюдательной функции. Однако на практике для СЭС КАО «АЗОТ» в настоящее время это труднореализуемая задача.

Таким образом, исходя из существующего эксплуатационного процесса, скорость циркуляции оперативной информации можно увеличить, в первую очередь, повышением мобильности оперативного персонала, что снизит время перемещения электромонтера до объектов обслуживания.

3.2. Оценка способов повышения информационного ресурса системы электроснабжения КАО «АЗОТ»

В таблице 3.2 представлены предлагаемые мероприятия, направленные на повышение информационного ресурса СЭС КАО «АЗОТ», посредством рационализации состояний структурной и оперативной информации СЭС.

Места установки 10-ти предлагаемых резервных перемычек между цеховыми ПС СЭС КАО «АЗОТ» при реализации мероприятия 1 показаны на рисунке А.3 в приложении А пунктирными линиями. Надо отметить, что установка резервных перемычек помимо повышения структурной организации окажет положительное влияние на оперативный показатель, так как появятся новые пути для питания электроприемников, а это, в свою очередь, приведет к увеличению количества возможных состояний СЭС и соответственно увеличит оперативный показатель.

Таблица 3.2

Мероприятия, повышающие информационный ресурс СЭС

Мероприятие	Содержание	Результат
1	Установка резервных перемычек между распределительными ПС, которые запитаны от независимых источников	Повышение структурной организации СЭС
2	Использование транспортных средств (ТС) повышающих мобильности оперативного персонала	Увеличение скорости перемещения оперативной информации

В качестве ТС при реализации мероприятия 2 предполагается использовать автомобили марки *Daewoo Matiz*, так как это один из самых дешевых автомобилей на российском авторынке (314 000 руб. на февраль 2016 г. [97]), с низкой стоимостью владения (8 руб. 38 коп. на 1 км [99]) и достаточной надежностью при эксплуатации. Автомобили данной марки были выбраны как наиболее очевидный и простой вариант, в целом же в качестве ТС могут использоваться и более современные варианты, например, микролитражные автомобили, электромобили, пневмомобили, автомобили использующие в качестве топлива газовые смеси (в данном случае имеет смысл рассмотреть вариант использования в ТС побочных горючих газов, возникающих в основном производственном процессе КАО «АЗОТ») и т.п.

Следует отметить, что мероприятие 2 косвенно будет способствовать повышению безопасности эксплуатации электрооборудования СЭС КАО «АЗОТ», увеличивая вероятность в l-х путях p_l, так как, во-первых, использование ТС исключает необходимость пешего преодоления оперативным персоналом значительных расстояний между обслуживаемыми объектами, снижая физическую и моральную усталость персонала и, как следствие, вероятность неправильных действий [18]; во-вторых, позволит рациональнее использовать рабочее время, в частности, в полном объеме проводить целевой инструктаж в качестве допускающего на рабочем месте для ремонтных бригад.

Целевой инструктаж на рабочем месте допускающим является важнейшим организационным мероприятием, определяющим безопасность проведения работ.

Однако, в силу некоторых причин (нехватка времени, халатное отношение персонала к данной процедуре) дежурными электромонтерами ЦЭС КАО «АЗОТ» целевой инструктаж на рабочем месте для ремонтных бригад проводится не более чем в половине случаев, а это является грубым нарушением ПОТЭЭ.

Решением проблемы нехватки времени может стать использование ТС, а гарантию проведения целевых инструктажей дежурными электромонтерами может обеспечить требование обязательной записи инструктажей на мобильные видеорегистраторы с последующей проверкой этих видеозаписей административно-техническим персоналом УГЭ КАО «АЗОТ». Данная мера позволит повысить производственную дисциплину персонала и самоконтроль при выполнении работ, а проверка видеозаписей даст возможность анализировать допущенные ошибки, совершенствовать профессиональные навыки, исключить нарушения правил безопасности в дальнейшей трудовой деятельности, а также выработать «привычку» выполнять работу безопасно, что в итоге окажет значительное влияние на предупреждение электротравматизма, так как причиной 90% несчастных случаев являются опасные действия самих пострадавших [78]. Кроме того, применение видеорегистраторов упростит работу комиссий, проводящих детальный разбор несчастных случаев и ошибочных действий персонала, позволив им более оперативно и качественно проводить расследования.

Значения информационных параметров СЭС КАО «АЗОТ» при реализации предлагаемых мероприятий, а также степень их влияния на информационный ресурс в сравнении с существующим значением представлены в таблице 3.3.

Таблица 3.3

Информационные параметры для предложенных мероприятий

Мероприятие	Показатели					Изменение значения R, %
	A	$H(p)$	G	D, бит/с	R, бит/с	
1	0,877	7,056	6,188	1,932	11,962	5,04
2	0,871	7,019	6,114	2,196 (2,321)*	13,427 (14,194)	17,90 (24,63)

* – в скобках указаны значения параметров при условии применения оперативным персоналом видеорегистраторов

Из полученных данных видно, что при реализации мероприятия 2 (особенно в сочетании с применением видеорегистраторов) значение информационного ресурса изменяется в большей степени, нежели в случае реализации мероприятия 1. Соответственно, для повышения эффективности эксплуатации СЭС КАО «АЗОТ» вариант совершенствования оперативной составляющей предпочтительнее.

Однако предложенный вариант рационализации оперативной составляющей исследуемой СЭС имеет следующие недостатки:

- с экономической точки зрения приобретение ТС для каждого из районов обслуживания (за исключением района ПС «Азот-220») не является целесообразным, так как оно потребует значительных материальных затрат, которые вряд ли окупятся в разумные сроки;
- совершенствование только оперативной составляющей исключает дальнейшее насыщение структуры СЭС закольцованными фрагментами, которые способны устранить имеющие место случаи полного «погашения» цеховых ПС при повреждении всех питающих линий, а также оставления электроприемников I и II категории надежности без резервных источников питания.

Таким образом, необходимо разработать комбинированный вариант для повышения информационного ресурса СЭС КАО «АЗОТ», подходящий как с экономической точки зрения, так и с позиции улучшения структурной организации СЭС.

3.3. Совершенствование системы электроснабжения КАО «АЗОТ»

Комбинированный подход к повышению информационного ресурса СЭС КАО «АЗОТ» позволил выработать вариант, сочетающий в себе преимущества предлагаемых способов рационализации структурной и оперативной составляющих исследуемой СЭС.

Для улучшения структурной организации оставим 3 резервные перемычки между цеховыми ПС из 10-и предложенных:

1. между ПС №160 и ПС №7;

2. между ПС №132 и ПС №175;

3. между ПС №175 и ПС №172.

Установка перемычек между отмеченными ПС, во-первых, оказывает большее влияние на упорядоченность структуры из предложенных, а во-вторых, увеличивает оперативный показатель, так как от СШ этих ПС запитывается большое количество электроприемников цехов и производств СЭС КАО «АЗОТ».

Для рационализации системы управления и увеличения оперативного показателя исследуемой СЭС уменьшим количество районов обслуживания СЭС до 6 штук, путем объединения следующих районов:

1. ПС №1 и ПС №6 (место базирования дежурного персонала ПС №1);

2. ПС №5 и ПС №80, а также 2-х ПС (№47 и №55) района ГПП «Азот-1,2» (место базирования дежурного персонала ПС №5);

3. ПС №39 и ПС №132, а также 2-х ПС (№163 и №179) района ГПП «Азот-3,4» (место базирования дежурного персонала ПС №132).

Предполагается, что для 3-х укрупненных районов будут приобретены ТС, которые, несмотря на увеличившиеся расстояния между обслуживаемыми объектами, существенно повысят скорость перемещения дежурного персонала и соответственно циркуляции оперативной информации. При этом для оставшихся районов ГПП «Азот-1,2», ГПП «Азот-3,4» и ГПП «Азот-220» приобретение ТС не требуется, так как основные обслуживаемые объекты этих районов обслуживания расположены в непосредственной близости от мест базирования дежурного персонала.

Также для повышения производственной дисциплины и безопасности труда предполагается обязательное применение дежурными электромонтерами мобильных видеорегистраторов.

ИЭМ полученных районов обслуживания показаны на рисунках 3.10-3.14 (для района ГПП «Азот-220» ИЭМ, показанная на рисунке 3.9, осталась без изменения), а информационные параметры для разработанного варианта повышения эффективности эксплуатации СЭС КАО «АЗОТ» приведены в таблице 3.4.

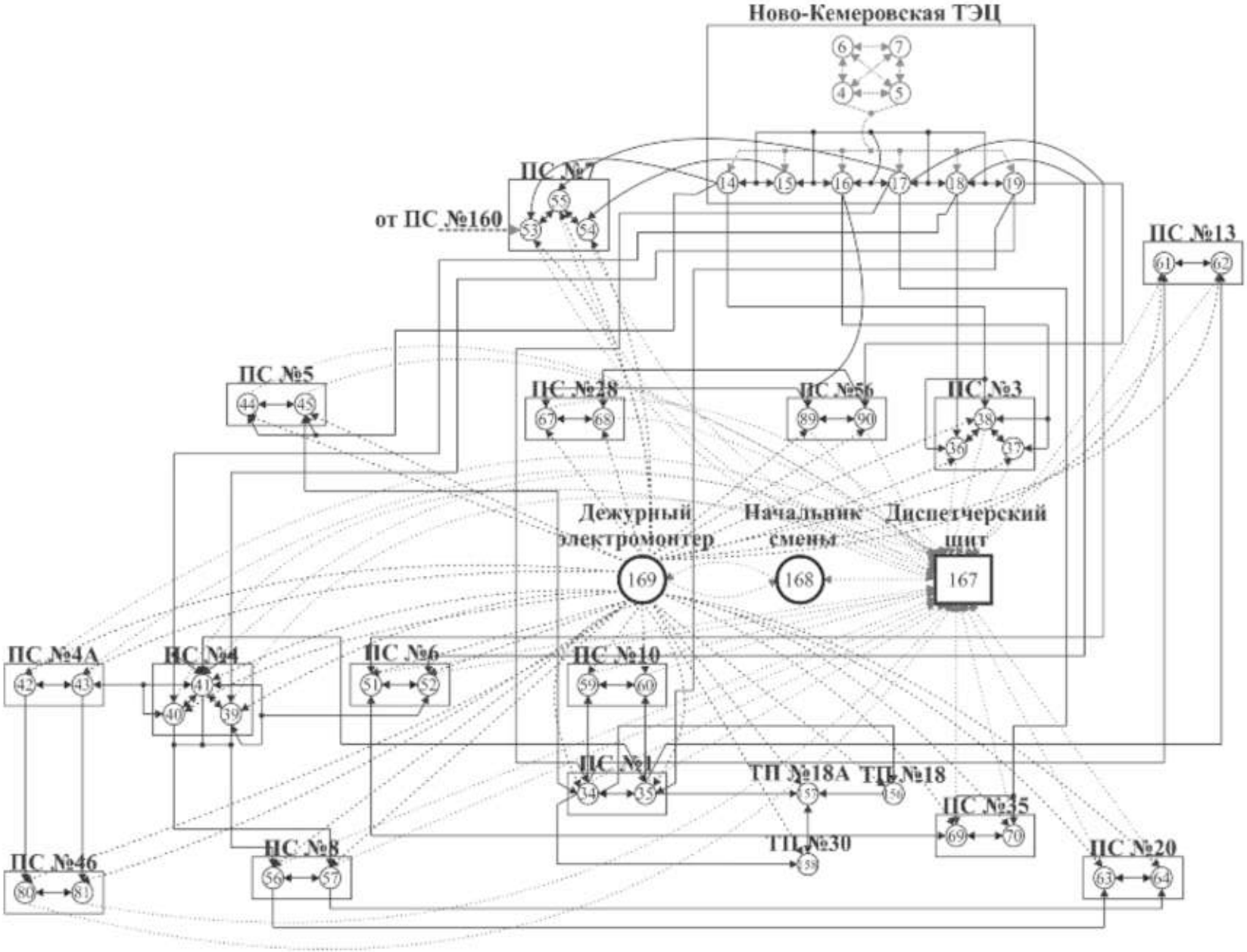


Рисунок 3.10 – ИЭМ района обслуживания ПС №1'

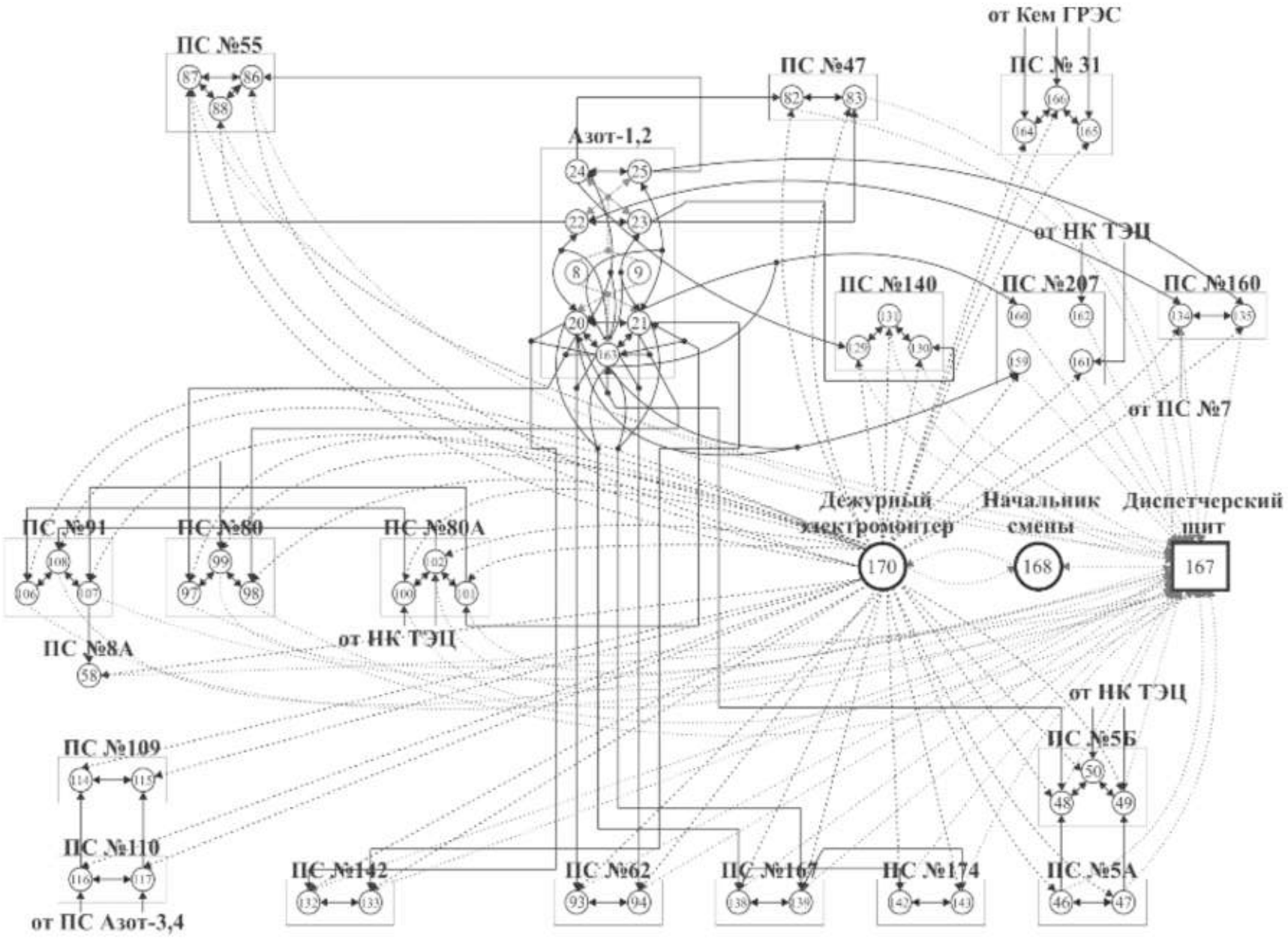


Рисунок 3.11 – ИЭМ района обслуживания ПС №5А'

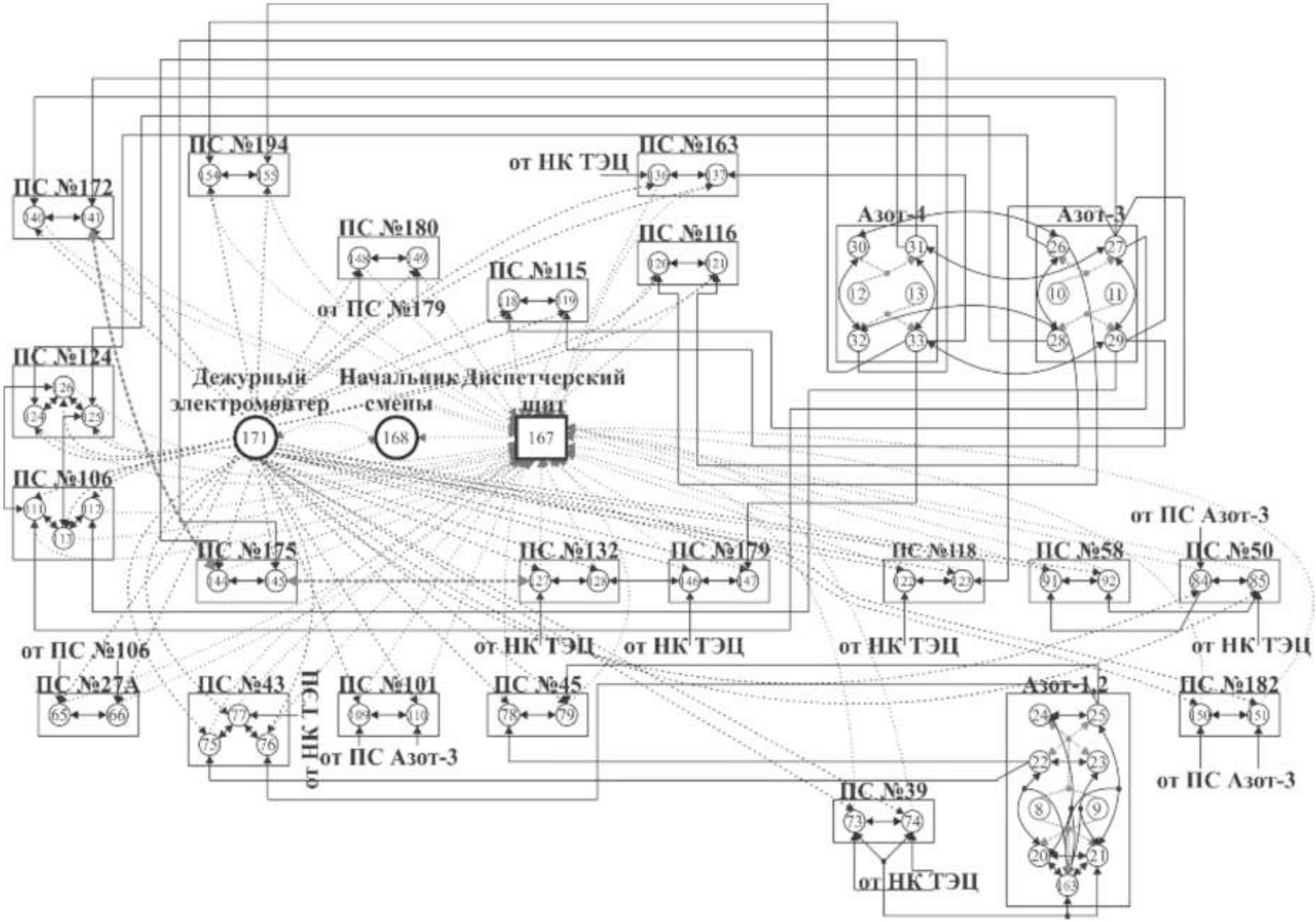


Рисунок 3.12 – ИЭМ района обслуживания ПС №132'

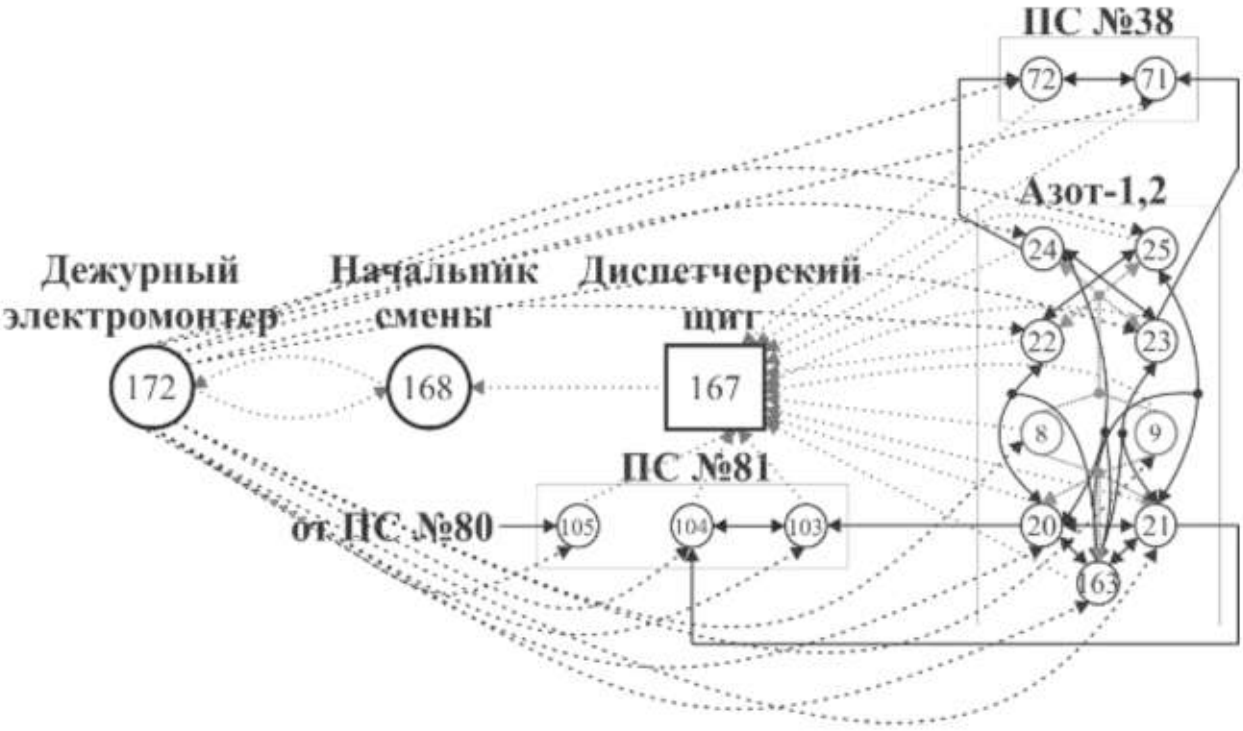


Рисунок 3.13 – ИЭМ района обслуживания ГПП «Азот-1,2'»

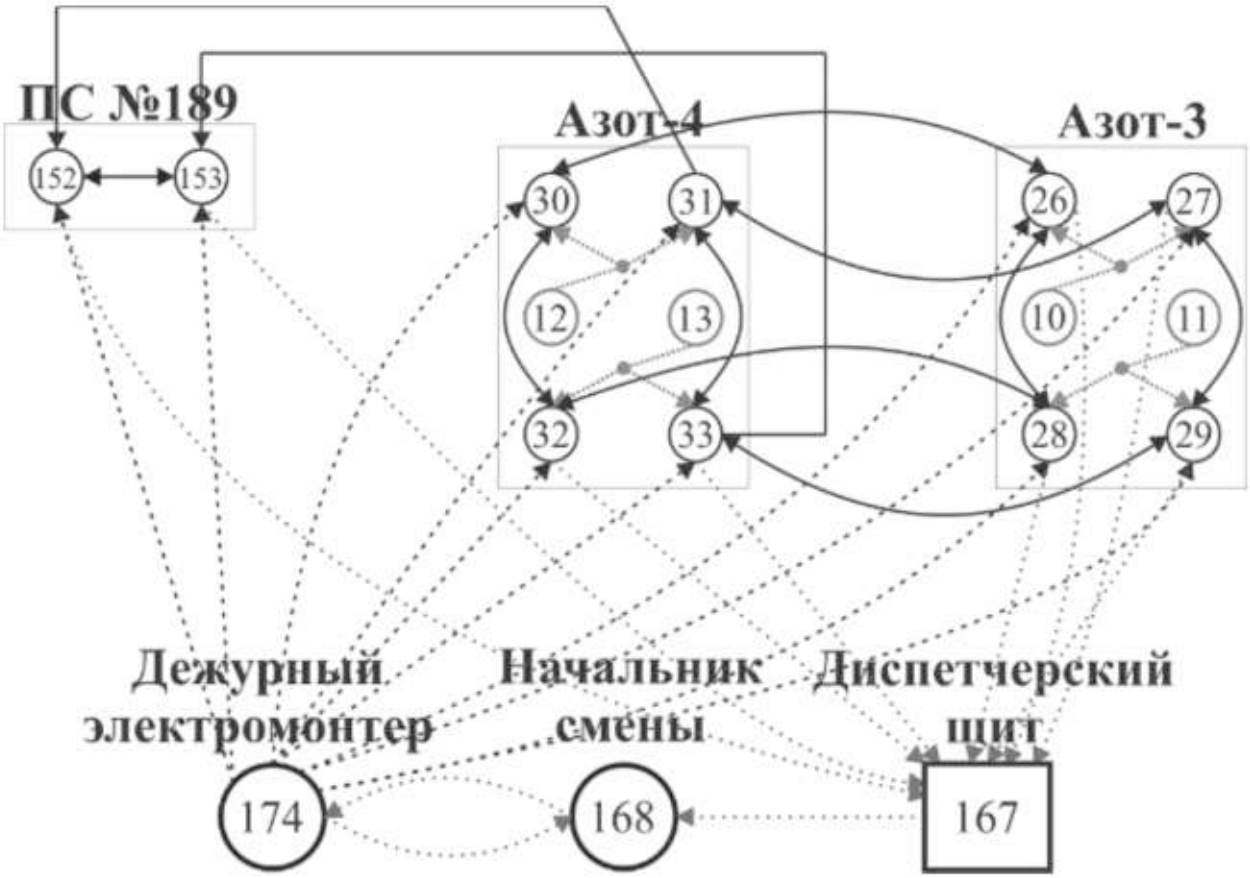


Рисунок 3.14 – ИЭМ района обслуживания ГПП «Азот-3,4'»

Таблица 3.4

Информационные параметры усовершенствованной СЭС КАО «АЗОТ»

Показатели					Изменение значения *R* от исходного, %
A	*H*(*p*)	*G*	*D*, бит/с	*R*, бит/с	
0,877	7,030	6,167	2,5162	13,668	20,01

Таким образом, при реализации предложенного варианта совершенствования исследуемой СЭС, можно добиться существенного увеличения значения информационного ресурса (на 20,01 %), а соответственно повышения эффективности функционирования СЭС КАО «АЗОТ».

Для оценки примерного экономического эффекта от совершенствования СЭС приведем упрощенный расчет, используя данные о размере средней заработной плате и численности дежурных электромонтеров ЦЭС КАО «АЗОТ».

На 9 районов обслуживания согласного штатного расписания ЦЭС КАО «АЗОТ» приходится 38 дежурных электромонтеров. Средняя заработная плата электромонтеров составляет 25 000 руб./мес. Так как заработная плата дежурных электромонтеров является основной составляющей расходов на оперативное управление СЭС КАО «АЗОТ», то перемножив их количество на среднюю заработную плату можно получить примерную стоимость месячной эксплуатации исследуемой СЭС, равную 950 000 руб.

При реализации предложенного варианта совершенствования число районов обслуживания уменьшится на 3, соответственно количество дежурных электромонтеров можно сократить на 12 чел. (1 район посменно обслуживают 4 дежурных электромонтера), что приведет к экономии средств на оплату труда в размере 300 000 руб. ежемесячно.

Также необходимо учесть расходы на эксплуатации автомобиля *Daewoo Matiz*. Для этого определим среднее расстояние, которое автомобиль будет проходить в течении рабочих суток и умножим это значение на стоимость 1-го км эксплуатации (8 руб. 38 коп.). В среднем дежурный электромонтер одного района

обслуживания выполняет около 30 эксплуатационных операций в дневную рабочую смену, в ночную примерно в 2 раза меньше – 15, соответственно 45 за одни рабочие сутки. В случае объединения районов количество эксплуатационных операций, выполняемых дежурным электромонтером, естественным образом увеличится и составит порядка 90 операций. Умножив полученное количество операций на среднее расстояние между обслуживаемыми объектами для объединенных районов (определено при помощи геоинформационной системы «Яндекс.Карты») и на количество рабочих дней в месяце (30 дней) получим следующие месячные стоимости эксплуатации автомобиля для районов: ПС №1' – 15 771 руб., ПС №5А' – 27 823 руб., ПС №132' – 15 927 руб., а в целом по всем районам – 59 522 руб. Таким образом, при реализации предложенного варианта совершенствования денежное выражение основной составляющей в месячной стоимости оперативной эксплуатации СЭС КАО «АЗОТ» составит 709 522 руб., а примерный экономический эффект – 240 478 руб. Безусловно, приведенный экономический расчет требует уточнения, а, следовательно, величина экономического эффекта может несколько измениться.

В целом, нужно отметить, что предлагаемый способ оказывает положительное влияние как на эффективность эксплуатации СЭС КАО «АЗОТ», так и снижает эксплуатационные затраты, что говорит о перспективности его практического внедрения.

3.4. Выводы по главе

Использование информационного метода в качестве основного инструмента для анализа СЭС КАО «АЗОТ» позволило дать следующую оценку структурной организации и состояния оперативной информации:

- достаточно высокие значения структурных показателей, обусловливаемые наличием нескольких мощных источников питания, разветвленной сетью питающих кабельных ЛЭП и отсутствием излишней перегрузки отдельных элементов

СЭС, позволяют сделать вывод, что структурную организацию исследуемой СЭС можно считать, в целом, упорядоченной, однако в СЭС присутствует потенциал для дальнейшего развития;

- присутствие дежурного электромонтера является основным негативным фактором, определяющим существующее значение оперативного показателя исследуемой эргатической СЭС.

Совершенствование эргатической СЭС КАО «АЗОТ предложенным способом позволит:

- повысить надежность электроснабжения цеховых потребителей;
- уменьшить время простоя электроприемников технологических установок;
- повысить производственную дисциплину, уменьшить количество нарушений ПОТЭЭ и снизить вероятность электротравматизма;
- уменьшить материальные затраты на оперативное управление СЭС.

ГЛАВА 4. ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУР СИСТЕМ ВНЕШНЕГО ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ГОРНЫХ И ПРОМЫШЛЕННЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ СИБИРСКОГО РЕГИОНА

Сибирский регион, или СФО занимает 5 144 953 км^2 (30,09% площади РФ) с населением 19 320 640 чел. (13,19% населения РФ), включает 12 субъектов (республики Алтай, Бурятия, Тыва и Хакасия, Алтайский, Забайкальский и Красноярский края, Иркутская, Кемеровская, Новосибирская, Томская и Омская области) и имеет особое значение для экономики РФ [98].

Благодаря наличию богатейших сырьевых и энергетических ресурсов, на территории округа действуют и развиваются мощные энергоемкие промышленные комплексы черной и цветной металлургии Новокузнецка, предприятия химического комплекса и углехимии Кемерово, машиностроения Новосибирска, Красноярска и Барнаула, нефтехимии Омска, Томска и Ангарска, крупнейшие заводы по электролизу алюминия в Красноярске, Саяногорске и Братске, крупные горные предприятия по добыче и обогащению каменного и бурого угля, металлических и неметаллических руд, нефти, газа и др. в отдельных регионах СФО [37].

Для большинства промышленных предприятий округа характерен принцип непрерывного производства со сложным технологическим циклом. Согласно ПУЭ такие предприятия определяются как потребители с высокими требованиями к надежности электроснабжения от двух независимых взаимно резервирующих источников питания (I и II категория), более того на территории округа расположено большое количество предприятий, относящихся к особой группе, для которых необходим третий независимый взаимно резервирующий источник питания.

Внешнее электроснабжение горных и промышленных предприятий региона осуществляет электроэнергетический комплекс ОЭС Сибири, который образуют 105 тепловых и гидравлических электростанций суммарной установленной мощностью 51808,33 МВт (по состоянию на 01.01.2016). Основная электрическая сеть комплекса сформирована на базе ЛЭП в габаритах класса напряжения 110, 220, 500

и 1150 кВ, общей протяженностью 97 350 км (по данным на 01.01.2016) [95].

Бесперебойное обеспечение электроэнергией потребителей СФО во многом зависит от эффективности функционирования систем внешнего электроснабжения (начиная от уровня системообразующих до распределительных СЭС). При этом качество структуры СЭС, является одной из основных характеристик, определяющих эффективность функционирования СЭС.

Выбор в пользу только структурного исследования во многом продиктован сложностью построения ИЭМ региональных СЭС, способных отразить все многообразие путей движения оперативной информации между большим количеством субъектов, участвующих в управлении рассматриваемых СЭС.

4.1. Структурный анализ систем внешнего электроснабжения горных и промышленных предприятий Кемеровской области

Кемеровская область – крупный территориально-производственный комплекс России с многоотраслевым хозяйством, играющий одну из ведущих ролей в экономике Сибирского региона.

На территории области сосредоточены крупные предприятия угольной и металлургической промышленности, предприятия химического комплекса, углехимии, нефтехимии, машиностроительные заводы, предприятия легкой и пищевой промышленности, производства строительных материалов и др., которые в целом составляют около трети основных производственных фондов Западной Сибири.

Развитая промышленность области определяет значительные потребности в электроэнергии. В долевом отношении Кемеровская область находится на 3-ем месте по электропотреблению среди субъектов СФО (рисунок 4.1) [38]. Многие предприятия области (в частности угольные шахты, сконцентрированные в центральном и южном районах Кузбасса) относятся к потребителям I-ой категории надежности, в том числе с электроприемниками особой группы.

Рисунок 4.1 – Долевое распределение электропотребления по регионам СФО

Таким образом, обеспечение надежного бесперебойного электроснабжения потребителей Кемеровской области имеет важнейшее значение как для обеспечения безопасности проведения работ (особенно в условиях подземных горных выработок), так и недопущения возможного экономического ущерба. Тем не менее, в последнее время наблюдается тенденция снижения надежности электроснабжения потребителей Кемеровской области.

Электроснабжение основной массы потребителей области осуществляется по распределительным сетям 10(6), 35 и 110 кВ, находящихся в эксплуатации филиала ПАО «МРСК Сибири» – «Кузбассэнерго-РЭС» (основная часть СЭС), а также иных региональных ТСО (ЗАО «Электросеть», ОАО «Кузбассэлектро» и др.). В дальнейшем для удобства исследования распределительных СЭС Кемеровской области использована структурное деление (по географическому признаку) на производственные объединения (ПО) «Кузбассэнерго-РЭС»: ПО «Северо-Восточные электрические сети» (СВЭС), ПО «Центральные электрические сети» (ЦЭС) и ПО «Южные электрические сети» (ЮЭС).

В качестве объектов структурного анализа были выбраны СЭС 35-110 кВ отдельных районов Кемеровской области: СВЭС, ЦЭС и ЮЭС. На основе принципиальных схем СВЭС, ЦЭС и ЮЭС (из-за большого размера схемы в работе не приводятся) были построены ориентированные графы (рисунки А.4-А.6 в приложении А). Детализация структур, рассматриваемых СЭС произведена до уровня отдельных СШ ПС. Ветви графа соответствуют воздушным и кабельным ЛЭП и отражают возможные направления движения электроэнергии в этих ЛЭП.

Для определения структурных показателей СЭС, каждый граф был преобразован в аналитический вид – матрицу смежности вершин, при помощи которых для СЭС были рассчитаны численные значения структурных показателей, приведенные в таблице 4.1 (при расчете энтропии структуры системы использовалась формула (2.11), из-за большой разницы в числе элементов рассматриваемых СЭС).

Таблица 4.1

Структурные показатели СЭС отдельных районов Кемеровской области

СЭС	A	$rank(M_G)$	$H(p)$	G
СВЭС (413)*	0,896	370	0,978	0,876
ЦЭС (451)	0,911	411	0,972	0,886
ЮЭС (338)	0,911	308	0,972	0, 886

* – в скобках указано число элементов в графе СЭС

Согласно [41] для достижения высокой надежности электроснабжения потребителей структура СЭС должна быть максимально приближена к «сотовой». Для реальных СЭС достичь таких показателей затруднительно, однако добиться значения упорядоченности, входящего в диапазон 0,94-0,96 представляется возможным.

Сопоставляя полученные данные для СВЭС, ЦЭС и ЮЭС с показателями «сотовой» структуры, взятой за эталон, можно сделать вывод о невысокой структурной организации рассмотренных СЭС. Так, показатели СВЭС свидетельствуют о недостаточных возможностях СЭС в отношении резервирования питания потребителей, в то время как ЦЭС и ЮЭС по данному параметру показали лучшие результаты. Однако по показателю перегрузки элементов связями ситуация

противоположная: распределение структурной нагрузки между элементами СВЭС более равномерно, нежели для элементов ЦЭС и ЮЭС, в которых присутствуют элементы с выраженной структурной перегрузкой.

Также в процессе структурного анализа при помощи формулы (2.13) были определены ранги элементов и выявлены особо важные элементы с точки зрения их структурной значимости – «ключевые точки». В таблице 4.2. для СВЭС, ЦЭС и ЮЭС представлено по 10 наиболее ответственных элементов, определенных при помощи расчета рангов элементов R_i.

Таблица 4.2

Результаты расчета рангов элементов СЭС районов Кемеровской области

СЭС	Наименование энергообъекта	R_i
СВЭС	II СШ 110 кВ ПС «Юрга»	0,031747
	I СШ 110 кВ ПС «Юрга»	0,030538
	I СШ 110 кВ ПС «Иверка»	0,025630
	I СШ 110 кВ ПС «Юргинская»	0,021930
	II СШ 110 кВ ПС «Юргинская»	0,019389
	I СШ 110 кВ ПС «Нова-Анжерская»	0,018451
	II СШ 110 кВ ПС «Нова-Анжерская»	0,018328
	II СШ 110 кВ ПС «Иверка»	0,018180
	I СШ 110 кВ ПС Анжерская»	0,017761
	II СШ 110 кВ ПС «Анжерская»	0,017687
ЦЭС	II СШ 110 кВ ПС «Новоленинская»	0,063294
	I СШ 110 кВ «Беловской ГРЭС»	0,049991
	II СШ 110 кВ «Беловской ГРЭС»	0,047175
	I СШ 110 кВ ПС «Новоленинская»	0,045691
	II СШ 110 кВ ПС «Беловская»	0,044912
	I СШ 110 кВ ПС «Беловская»	0,041944
	II СШ 110 кВ ПС «Краснополянская»	0,039581
	I СШ 110 кВ ПС «Афонинская»	0,036135
	II СШ 110 кВ ПС «Афонинская»	0,036135
	I СШ 110 кВ ПС «Краснополянская»	0,034325
ЮЭС	II СШ 110 кВ «Южно-Кузбасской ГРЭС»	0,080830
	I СШ 110 кВ «Южно-Кузбасской ГРЭС»	0,080236
	II СШ 110 кВ «Томь-Усинской ГРЭС»	0,066053
	I СШ 110 кВ «Томь-Усинской ГРЭС»	0,064085
	III СШ 110 кВ «Южно-Кузбасской ГРЭС»	0,051610

Продолжение таблицы 4.2

ЮЭС	IV СШ 110 кВ «Южно-Кузбасской ГРЭС»	0,045669
	I СШ 110 кВ «Кузнецкой ТЭЦ»	0,023280
	II СШ 110 кВ ПС «Кузнецкой ТЭЦ»	0,022872
	I СШ 110 кВ ПС «ЗСМК»	0,020644
	II СШ 110 кВ ПС «ЗСМК»	0,020644

Из полученных результатов следует выделить высокие значения рангов СШ ПС «Новоленинская» и ПС «Беловская» ЦЭС. 26.01.2014 повреждение ВЛ между этими ПС – ВЛ 110 кВ «Белово – Новоленинская-1,2», привело к прекращению электроснабжения семи угольных шахт Ленинск-Кузнецкого района («Шахта 7 Ноября», шахта «Костромская», шахта «Алексеевская», шахта «Заречная», шахта «Комсомолец», шахта «Кирова» и шахта «Байкаимская»), из-под земли были эвакуированы 1115 горняков. Данное происшествие можно считать беспрецедентным.

Также подобная ситуация наблюдается для ПС «ЗСМК» ЮЭС, аварии на которой (или на ее присоединениях) приводили к нарушениям электроснабжения угольных шахт юга Кузбасса. Таким образом, для элементов СЭС обладающих высоким рангом – «ключевых точек», необходимо осуществлять мероприятия по повышения надежности их работы, в том числе посредством реализации резервных схем электроснабжения потребителей, питающихся от данных элементов.

В качестве примера рационализации СЭС при помощи структурного анализа была рассмотрена схема внешнего электроснабжения угольных шахт, пострадавших в результате аварии 26.01.2014. Электроснабжение данных угольных шахт осуществляется посредством двухцепной ВЛ 110 кВ «Беловская – Новоленинская-1,2», при этом какие-либо резервные источники питания для данных потребителей фактически отсутствуют – и при серьезных аварийных ситуациях (повреждение и разрушение опор ЛЭП, падение дерева на провода и т.п.), как показала практика, отключаться обе цепи и «погаснут» все секции подстанций потребителей.

Для устранения данной проблемы ситуации с электроснабжением угольных шахт Ленинск-Кузнецкого необходимо создание специальных резервных схем питания горных предприятий (посредством создания альтернативных ЛЭП,

резервных перемычек и т.п.).

На основе принципиальной схемы электроснабжения горных предприятий данного района, представленной на рисунке 4.2, был построен ориентированный граф (рисунок 4.3), где отражены предложенные мероприятий по совершенствованию структуры (на графе обозначены пунктиром):

1) создание резервной перемычки между ПС «Полысаевская-3» и «Новоленинская» по стороне 35 кВ.

2) создание резервной перемычки между ПС «Заречная» и «Новоленинская» по стороне 35 кВ.

Значения структурных показателей для исходной и усовершенствованной СЭС представлены в таблице 4.3.

Таблица 4.3

Результаты расчетов структурных показателей СЭС

	A	$H(p)$	G
Исходный вариант СЭС	0,942	0,965	0,909
Усовершенствованный вариант СЭС	0,944	0,977	0,923

При помощи спутниковых снимков были определены расстояния от существующих точек присоединения ПС потребителей к предполагаемым. Как оказалось, данные расстояния не превышают 10 км, то есть реализация предлагаемых технических мероприятий экономически будет оправдана.

Полученное увеличение упорядоченности G около 1,5 % является значительным при предлагаемых небольших изменениях структуры схемы, так как вариации структурных показателей невелики даже для больших СЭС (с числом элементов до тысячи [59, 64]). Также проведенное ранжирование элементов для данной СЭС показало уменьшение значений рангов I и II СШ ПС «Новоленинская» на 1,29% и 1,49% соответственно (до совершенствования $R_{\text{ICШ}}$=0,160118 и $R_{\text{IICШ}}$=0,160118; после $R_{\text{ICШ}}$=0,158073 и $R_{\text{IICШ}}$=0,157765), что говорит о снижении структурной значимости данной ПС в рассмотренной СЭС.

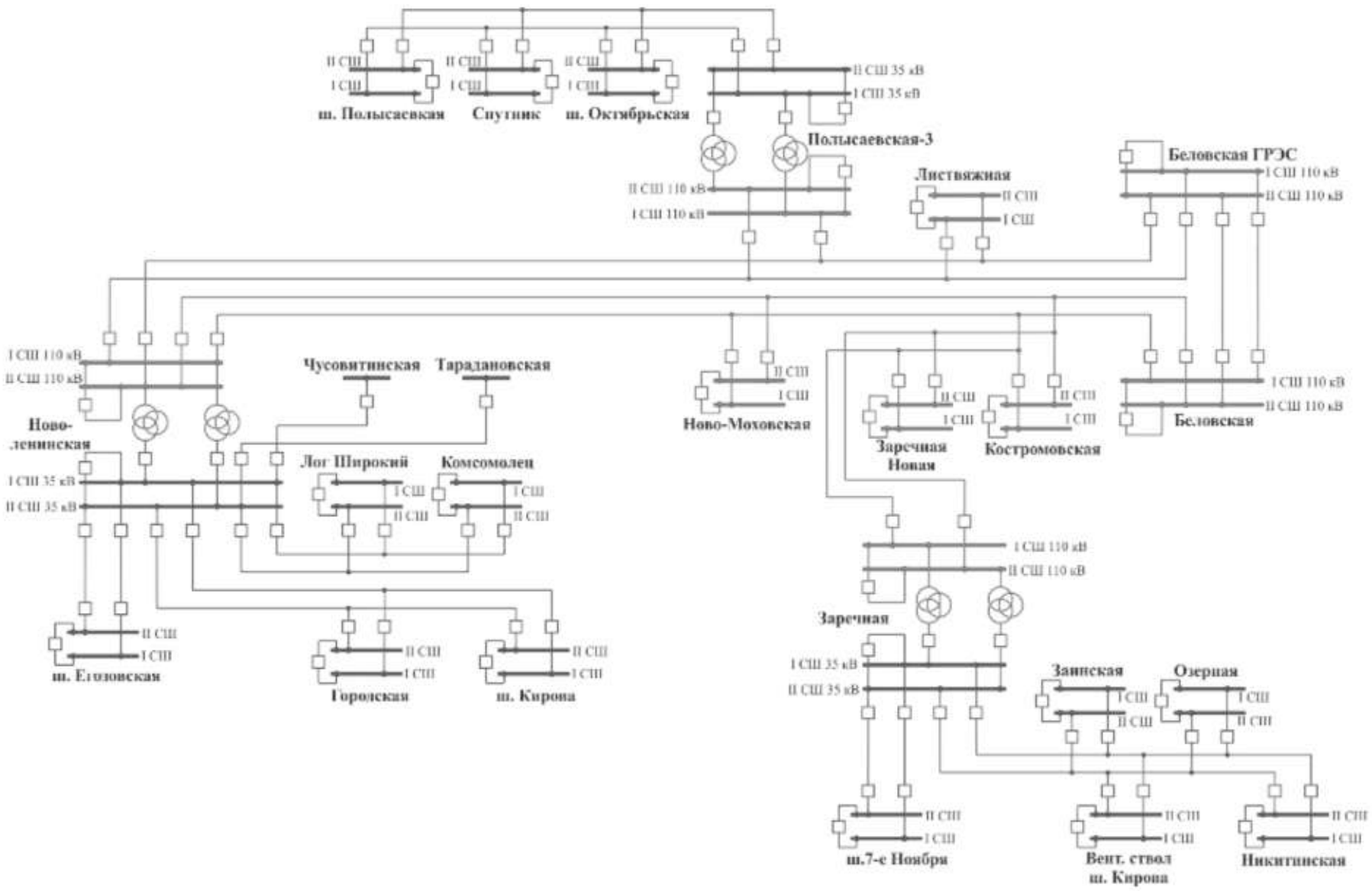


Рисунок 4.2 – Схема внешнего электроснабжения угольных шахт Ленинск-Кузнецкого района

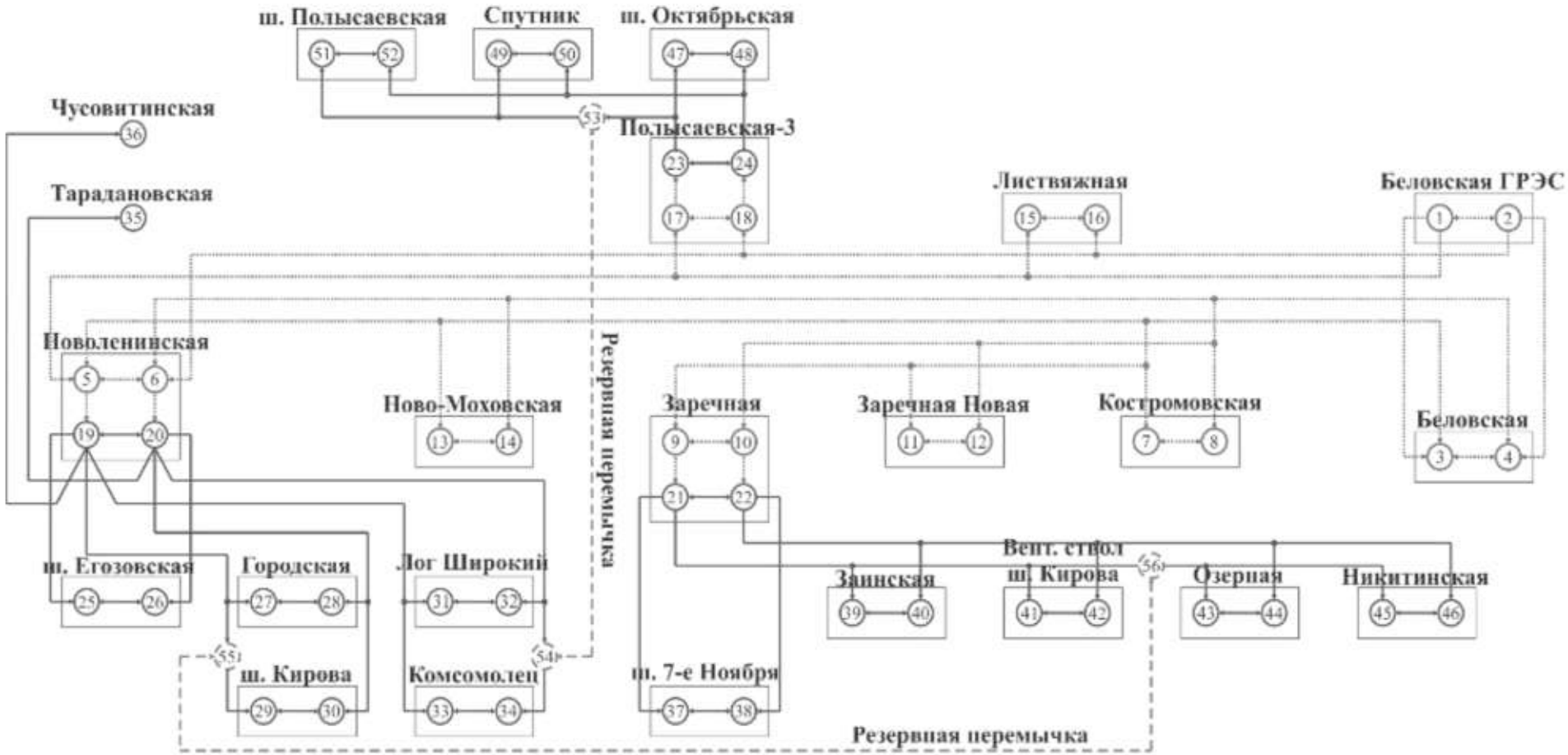


Рисунок 4.3 – Ориентированный граф СЭС угольных шахт Ленинск-Кузнецкого района

4.2. Совершенствование структуры системы электроснабжения потребителей Кемеровского района

Внешнее электроснабжение городских и сельских потребителей (в том числе малых предприятий) Кемеровского района обеспечивается распределительной СЭС, которую формируют 30 ПС – центров питания с высшим напряжением 35 и 110 кВ, воздушные и кабельные ЛЭП 10(6), 35 и 110 кВ общей протяженностью более 800 км (ЛЭП 0,4 кВ в исследовании они не рассматривались) и большое количество ТП потребителей. Энергообъекты СЭС расположены на территории общей площадью около 4370 м^2. Эксплуатацией СЭС Кемеровского района занимается подразделение ПО СВЭС «Кузбассэнерго-РЭС» – Кемеровские районные электрические сети.

Для СЭС Кемеровского района был построен ориентированный граф (рисунок А.7 в приложении А), отражающий топологию ЛЭП 110, 35 и 10(6) кВ, и определены значения ее структурных показателей: показатель смежности A = 0,254; энтропия структуры $H(p)$ = 0,917; упорядоченность структуры G = 0,234.

Анализ полученных значений позволил сделать следующие выводы о топологии данной СЭС:

- недостаток резервных схем питания при большой протяженности фидерных линий уменьшает надежность электроснабжения потребителей;
- повышенная концентрация фидеров у отдельных ПС 10(6)/35 кВ увеличивает структурную перегрузку этих элементов и снижает упорядоченность структуры СЭС;
- необходимо создание закольцованных фрагментов в структуре – «сот», причем первоначально в тех местах, которые требуют минимальных экономических затрат.

Помимо структурных недостатков, в СЭС Кемеровского района также присутствуют проблемы организационно-технического характера, влияющие на эффективность эксплуатации и время устранения аварийных ситуаций: элементы

СЭС зачастую могут находиться в ненадлежащем техническом состоянии, а руководители подразделений энергопредприятия лишь примерно представляют себе прохождение ЛЭП, так как отсутствует их план на карте района и др. [86].

Для совершенствования структуры СЭС Кемеровского района при помощи приложений картографического сервиса и геоинформационных систем («Карты Google», ГИС ФСК ЕЭС и др.) было определено несколько возможных мест для создания резервных перемычек на фидерных линиях большой протяженности (таблица 4.4). Предлагаемые варианты перемычек отражены на рисунке А.8 в приложении А (показаны пунктирными линиями).

Таблица 4.4

Возможные варианты создания резервных перемычек

№ п/п	Подстанция	Наименование фидерной линии
1	ПС 110/35/6 кВ «Оросительная»	Ф-6-16-МР и Ф-6-9-ПГ
2		Ф-6-13-ШМ и Ф-6-24-ПН
3	ПС 35/10 кВ «Береговая»	Ф-10-1-Т и Ф-10-9-П
4	ПС 35/10 кВ «Силинская»	Ф-10-2-Г и Ф-10-13-Л (2 шт.)
5		
6	ПС 35/10 кВ «Осиновская»	Ф-10-1А-Б1 и Ф-10-1-Ж
7	ПС 110/10 кВ «Водозабор»	Ф-10-20-МП и Ф-10-29-ЗВК
	ПС 110/10 кВ «Тепличная»	

Сравнение значений структурных показателей для исходной и усовершенствованной СЭС Кемеровского района приведены в таблице 4.5.

Таблица 4.5

Сравнение результатов расчетов структурных показателей СЭС Кемеровского района

	A	$H(p)$	G
Исходный вариант СЭС	0,254	0,917	0,234
Усовершенствованный вариант СЭС	0,262	0,921	0,242
Изменение, %	2,96	0,44	4,31

Как показал структурный анализ, создание всего 7 перемычек между фидерными линиями позволит повысить значения наблюдаемость структуры *A* (на 2,96%) и энтропии структуры (на 0,44%), что говорит об увеличении количества структурной информации в СЭС (в частности создании «сот», повышающих возможности СЭС в отношении резервирования питания потребителей) и некотором снижении структурной перегрузки отдельных элементов СЭС. В целом, увеличение значения упорядоченности структуры СЭС Кемеровского района на 4,31% является достаточно хорошим результатом.

4.3. Структурный анализ региональных систем электроснабжения Сибирского федерального округа

В качества объектов структурного анализа были определены 10 региональных СЭС, входящих в ОЭС Сибири (Алтайская, Бурятская, Забайкальская, Иркутская, Красноярская, Кузбасская, Новосибирская, Омская, Томская, Хакасская). На основе принципиальных схем рассматриваемых СЭС (из-за большого размера схемы в работе не приводятся) были построены ориентированные графы, показанные на рисунках А.9-А.18 в приложении А, а также проведена процедура расчета значений структурных показателей (таблица 4.6).

По данным отчетов СТК ОДУ Сибири были составлены таблицы 4.7-4.8, где для каждой СЭС представлена информация о числе наиболее значимых аварий (за 2010-2014 гг.), повлекших отключение большого числа потребителей и разделение системы на изолированные участки, а также о количестве вводов графиков временного отключения потребителей (за 2012-2014 гг.).

Сопоставление данных представленных в таблицах 4.7-4.8 с результатами структурного анализа СЭС ОЭС Сибири (таблица 4.5) свидетельствует о наличии зависимости между значениями структурных показателей и числом нарушений нормального электроснабжения потребителей [64].

Таблица 4.6

Структурные показатели СЭС ОЭС Сибири

СЭС	A	$rank(M_G)$	$H(p)$	G
Алтайская (528)*	0,850	449	0,975	0,829
Бурятская (177)	0,774	137	0,969	0,750
Забайкальская (284)	0,708	221	0,974	0,757
Иркутская (611)	0,879	537	0,980	0,862
Красноярская (835)	0,893	746	0,973	0,867
Кузбасская (630)	0,822	556	0,970	0,797
Новосибирская (573)	0,881	505	0,973	0,799
Омская (462)	0,803	371	0,976	0,784
Томская (264)	0,905	239	0,979	0,886
Хакасская (162)	0,907	147	0,969	0,879

* – в скобках указано число элементов в графе СЭС

Таблица 4.7

Количество наиболее значимых аварий в СЭС
ОЭС Сибири за 2010-2014 гг.

СЭС	Количество отключений
Алтайская	3
Бурятская	8
Забайкальская	10
Иркутская	7
Красноярская	6
Кузбасская	8
Новосибирская	1
Омская	0
Томская	1
Хакасская	0

Таблица 4.8

Ввод графиков временного отключения потребления в СЭС
ОЭС Сибири в 2012-2014 гг.

СЭС	Год			Всего
	2012	2013	2014	
Алтайская	-	-	-	-
Бурятская	10	3	2	15
Забайкальская	15	3	4	22
Иркутская	5	14	3	22

Продолжение таблицы 4.8

Красноярская	-	-	1	1
Кузбасская	7	2	-	9
Новосибирская	-	-	-	-
Омская	-	-	-	-
Томская	-	1	-	1
Хакасская	-	-	-	-

Так, Бурятская и Забайкальская СЭС, лидируя по количеству крупных аварий, имеют самые низкие структурные показатели. В то время как в Хакасской и Томской СЭС наблюдается минимальная аварийность, а значения их структурных показателей наиболее высокие из всех рассмотренных. Таким образом, можно констатировать, что при проведенном структурном анализе были выявлены промежуточные пороговые значения структурных показателей, отражающих эффективность функционирования СЭС.

Однако полученные пороговые значения актуальны только для СЭС, включающих в себя системообразующие и питающие сети (согласно классификации, представленной в [29]). При приближении к ПС промышленных потребителей (6 уровень СЭС предприятия согласно [35]) электроснабжение осуществляется в основном по распределительным сетям (подразумеваются сети напряжением 110-35 кВ) – системам внешнего электроснабжения, которые как правило более разветвленные и имеют большее число резервных схем питания (резервных перемычек) и т.д., что изначально определяет для них более высокие значения структурных показателей.

В процессе анализа также были получены неоднозначные результаты, например, для Иркутской и Красноярской СЭС. При достаточно высоких значениях структурных показателей Иркутской и Красноярской СЭС, количество нарушений нормального электроснабжения потребителей также значительно. Отчасти это объясняется тем, что ориентированные графы этих СЭС не учитывают некоторые важные межсистемные связи, аварии на которых оказывают значительное влияние на режим работы СЭС (например, транзит между ПС 500 кВ «Тайшет» и «Камала», нарушение работы которого фактически разделяет ОЭС Сибири на две

изолированные части – Западную и Восточную [61]). Для устранения выявленных недостатков метода необходимо внесение корректировок в процедуру структурного анализа на основе более глубокого изучения технической информации о СЭС и анализа аварийной статистики за более долгий период, что будет являться одной из задач дальнейших исследований по данной тематике.

Также в процессе структурного анализа были определены ранги элементов и выявлены особо важные элементы с точки зрения их структурной значимости – «ключевые точки». В таблице 4.9 для каждой СЭС представлены по 6 элементов с наибольшими значениями рангов R_i.

Таблица 4.9

Результаты расчета рангов элементов СЭС ОЭС Сибири

СЭС	Наименование энергообъекта	R_i
Алтайская	II СШ 500 кВ ПС «Барнаульская»	0,020028
	I СШ 500 кВ ПС «Барнаульская»	0,019976
	II СШ 500 кВ ПС «Рубцовская»	0,014089
	I СШ 500 кВ ПС «Рубцовская»	0,013945
	IV СШ 110 кВ «Барнаульской ТЭЦ-3»	0,013595
	III СШ 110 кВ «Барнаульской ТЭЦ-3»	0,013420
Бурятская	I СШ 220 кВ ПС «Районная»	0,054287
	III СШ 220 кВ ПС «Северная»	0,045530
	II СШ 220 кВ ПС «Районная»	0,040916
	III СШ 220 кВ ПС «Посольская-Т»	0,035501
	I СШ 220 кВ ПС «Северная»	0,030415
	I СШ 220 кВ «Гусиноозерской ГРЭС»	0,029738
Забайкальская	I СШ 220 кВ ПС «Холбон»	0,023700
	II СШ 220 кВ ПС «Холбон»	0,020365
	II СШ 220 кВ «Харанорской ГРЭС»	0,016925
	I СШ 220 кВ ПС «Маккавеево»	0,015020
	II СШ 220 кВ ПС «Маккавеево»	0,015001
	II СШ 220 кВ ПС «Читинская»	0,014338
Иркутская	III СШ 110 кВ «Иркутской ТЭЦ-10 (ГПП-2)»	0,026076
	II СШ 110 кВ «Иркутской ТЭЦ-10 (ГПП-2)»	0,025382
	I СШ 500 кВ ПС «УПК Тыреть»	0,025369
	II СШ 500 кВ ПС«УПК Тыреть»	0,025369
	I СШ 110 кВ «Иркутской ТЭЦ-10 (ГПП-2)»	0,023446
	II СШ 110 кВ «Иркутской ТЭЦ-10»	0,022667

Продолжение таблицы 4.9

Красноярская	III СШ 110 кВ «Красноярской ТЭЦ-2»	0,023103
	IV СШ 110 кВ «Красноярской ТЭЦ-2»	0,020766
	I СШ 110 кВ «Красноярской ТЭЦ-1»	0,018952
	I СШ 500 кВ «Назаровской ГРЭС»	0,016476
	II СШ 500 кВ «Назаровской ГРЭС»	0,014708
	II СШ 110 кВ «Красноярской ТЭЦ-1»	0,014346
Кузбасская	II СШ 110 кВ ПС «Кемеровская»	0,015352
	II СШ 220 кВ ПС «Кемеровская»	0,015156
	I СШ 220 кВ «Беловской ГРЭС»	0,013658
	III СШ 220 кВ ПС «Новокузнецкая»	0,013523
	III СШ 110 кВ ПС «ЗСМК»	0,013242
	IV СШ 110 кВ ПС «ЗСМК»	0,013202
Новосибирская	II СШ 220 кВ «Новосибирской ГЭС»	0,023411
	I СШ 220 кВ «Новосибирской ГЭС»	0,023343
	I СШ 110 кВ ПС «Восточная»	0,022919
	I СШ 220 кВ ПС «Тулинская»	0,021765
	II СШ 110 кВ ПС «Восточная»	0,018993
	II СШ 220 кВ ПС «Тулинская»	0,018206
Омская	I СШ 110 кВ ПС «Омской ТЭЦ-4»	0,028847
	II СШ 110 кВ ПС «Густафьево»	0,027700
	I СШ 110 кВ «Омской ТЭЦ-3»	0,021304
	II СШ 110 кВ ПС «Омской ТЭЦ-4»	0,020709
	I СШ 110 кВ ПС «Густафьево»	0,019419
	I СШ 110 кВ ПС «Весенняя»	0,018983
Томская	II СШ 110 кВ ПС «Восточная»	0,025704
	I СШ 110 кВ ПС «Зональная»	0,020739
	III СШ 110 кВ ПС «Плотниково»	0,020535
	II СШ 220 кВ ПС «Томская»	0,020001
	III СШ 110 кВ ПС «Поротниково»	0,019011
	I СШ 220 кВ ПС «Томская»	0,018461
Хакасская	II СШ 500 кВ ПС «Алюминиевая»	0,036279
	I СШ 500 кВ ПС «Означенное»	0,033132
	II СШ 500 кВ ПС «Означенное»	0,030604
	I СШ 110 кВ ПС «Абаканская-районная»	0,028919
	I СШ 220 кВ ПС «Означенное»	0,028646
	III СШ 110 кВ ПС «Лукьяновская»	0,027730

Результаты расследований наиболее серьезных аварий в СЭС ОЭС Сибири за 2010-2014 гг., приведенные в годовых отчетах СТК ОДУ Сибири, подтверждают, что в большинстве случаев причина их возникновения – выход из строя

энергообъектов, обладающих высоким рангом. Так, в Бурятской СЭС аварии на Гусиноозёрской ГРЭС зачастую приводили к отключению значительного числа потребителей, такая же ситуация наблюдается в Забайкальской СЭС при выходе из строя Харанорской ГРЭС, аварии на ПС «УПК Тыреть» и ПС «ЗСМК» неоднократно приводили к негативным последствиям для Иркутской и Кузбасской СЭС соответственно.

Важным для системы также является разброс величин рангов элементов системы ΔR_i. В таблице 4.10 были оценены величины ΔR_i для трех характерных групп каждой системы:

1 – группа включает в себя наиболее ответственные элементы СЭС, отказ которых способен вывести из строя большую часть СЭС, а также нарушить электроснабжение значительного числа потребителей;

2 – группа содержит элементы среднего уровня напряженности – элементы, выход из строя которых вызовет нарушение электроснабжения определенного числа потребителей, однако работоспособность СЭС в целом существенно не изменится;

3 – группа состоит из периферийных элементов, отказ которых не способен вызвать какие-либо серьезные последствия для работоспособности СЭС.

Для эффективной работы СЭС необходимо равномерное распределение величин рангов в каждой из групп, то есть минимальное значение ΔR_i. Анализ данных таблице 4.10 показывает оптимальную структурную «загрузку» элементов каждой группы, которая является лучшей для ответственных элементов в Кузбасской СЭС, в Новосибирской СЭС – для элементов 2-й группы и для потребителей 3-й группы – в Иркутской, Кузбасской и Омской СЭС.

В целом анализ полученных значений структурных показателей, а также принципиальных схем СЭС позволил выявить следующие наиболее характерные особенности.

1. Для Томской и Хакасской СЭС, обладающих схожей топологией схем, свойственно сбалансированное количество источников и приемников при относи-

Таблица 4.10

Диапазоны изменения ранга
для характерных групп элементов ΔR_i

СЭС	Наименование энергообъекта	Значение ΔR_i
Алтайская	1-я группа	0,018563
	2-я группа	0,001441
	3-я группа	0,00001
Бурятская	1-я группа	0,051334
	2-я группа	0,002666
	3-я группа	0,000021
Забайкальская	1-я группа	0,018962
	2-я группа	0,004312
	3-я группа	0,000227
Иркутская	1-я группа	0,024776
	2-я группа	0,001282
	3-я группа	0,000004
Красноярская	1-я группа	0,022669
	2-я группа	0,000429
	3-я группа	0,000005
Кузбасская	1-я группа	0,014436
	2-я группа	0,000892
	3-я группа	0,000004
Новосибирская	1-я группа	0,022952
	2-я группа	0,000415
	3-я группа	0,000005
Омская	1-я группа	0,02699
	2-я группа	0,001812
	3-я группа	0,000004
Томская	1-я группа	0,021745
	2-я группа	0,003802
	3-я группа	0,000016
Хакасская	1-я группа	0,030877
	2-я группа	0,00508
	3-я группа	0,000025

тельно достаточном количестве ЛЭП, что в свою очередь определяет высокие значения структурных показателей этих СЭС.

2. Низкие значения структурных показателей Бурятской и Забайкальской СЭС во многом объясняются неразветвленностью их структур – недостаточностью

резервных путей, большим числом «тупиковых» ветвей. Кроме того, имеется недостаток источников электроэнергии, присутствует перегрузка отдельных элементов отходящими линиями.

3. Остальным СЭС, структурные показатели которых попали в средний диапазон, также присущи указанные недостатки, а степень их проявления зависит от уровня структурной организации. Так, например, Иркутская и Красноярская СЭС обладает значительным количеством крупных источников, способных обеспечить электроэнергией основное количество приемников, однако при этом сеть системы разветвлена недостаточно и требует доработки [64].

Установленные диапазоны значений структурных показателей СЭС субъектов Сибирского региона, указаны в таблице 4.11.

Таблица 4.11

Установленные диапазоны значений структурных показателей СЭС

Классификация СЭС	Структурные показатели		
	A	$H(p)$	G
Класс I	0,774 – 0,818	0,969 – 0,973	0,75 – 0,796
Класс II	0,819 – 0,862	0,974 – 0,978	0,797 – 0,843
Класс III	0,863 – 0,907	0,978 – 0,982	0,844 – 0,89

Результаты, приведенные в [58], позволили классифицировать рассмотренные СЭС с точки зрения их структурной организации:

- класс I – СЭС с низкой структурной организацией. Для таких систем характерно следующее: отсутствие достаточного числа резервных схем электроснабжения, а также значительная перегрузка отдельных элементов, выход из строя которых может значительно снизить её работоспособность (структурные показатели СЭС субъектов в других регионах, относящихся к I классу, могут иметь меньшие значения по сравнению с данными таблице 4.11);
- класс II – СЭС со средней структурной организацией. В таких системах присутствует минимум резервных схем электроснабжения, наблюдается перегрузка элементов, однако последствия выхода их из строя не такие критичные, как для систем класса I;

- класс III – СЭС с высокой структурной организацией, располагающей достаточным числом резервных схем питания для обеспечения электроэнергией основной массы потребителей в случае аварии. При этом распределение нагрузки между элементами достаточно равномерное – отсутствуют элементы с ярко выраженной перегрузкой.

Для отдельных СЭС реально достижимы большие значения упорядоченности, входящие в диапазон 0,94-0,96 (актуальные значения для развития СЭС распределительного комплекса). Такие системы можно отнести к классу IV.

В таблице 4.12 приведено распределение СЭС ОЭС Сибири в соответствии с принятой классификацией.

Таблица 4.12

Структурная классификация СЭС ОЭС Сибири

СЭС	Класс системы
Алтайская	II
Бурятская	I
Забайкальская	I
Иркутская	III
Красноярская	III
Кузбасская	II
Новосибирская	II
Омская	I
Томская	III
Хакасская	III

Таким образом, проведенный структурный анализ СЭС Сибирского региона объективно позволил: подтвердить существование зависимости между структурными показателями и эффективностью функционирования СЭС, определить наиболее значимые элементы СЭС, классифицировать СЭС с позиции качества их структуры, а также установить причины частых случаев прекращения нормального электроснабжения потребителей для отдельных СЭС, связанных с недостатками структуры электросетевого комплекса

В завершении следует отметить особую перспективность дальнейшего

совершенствования и развития предлагаемого информационного метода для оценки эффективности функционирования СЭС для его применения при создании в России электрических сетей XXI века – Smart Grid.

Создание таких сетей подразумевают, в первую очередь, глубокую модернизацию существующего электросетевого комплекса, а, следовательно, в структуру СЭС будут внедрятся новые элементы и связи с определенной степенью влияния на всю СЭС. При этом при кажущемся однообразии большинства СЭС, каждая из них обладает некими индивидуальными особенностями, что подтверждает теория техноценоза Б.И. Кудрина [33, 34, 77], соответственно внесение одного и того же элемента в структуры разных СЭС будет по-разному влиять на функционирование СЭС.

При расширении возможностей информационного метода (а именно учет различных режимных параметров работы СЭС, организационных и экономических аспектов работы СЭС и т.п.), его применение представляется перспективным при проведении подобных анализов, и позволит помимо оценки структур СЭС на предмет их соответствия установленным закономерностям в построении и развитии сложных систем, также учитывать различные технико-экономические аспекты при возможных изменениях структур СЭС и внедрении новых элементов.

4.4. Выводы по главе

Проведенная при помощи информационного метода оценка структур СЭС различных уровней, расположенных на территории Сибирского региона, позволила:

- выявить наиболее значимые энергообъекты СЭС при помощи рангов элементов;
- установить существование зависимости между структурными показателями и эффективностью функционирования СЭС;
- определить характерные структурные недостатки СЭС различных уровней;

- предложить концепцию структурной классификации СЭС, а также определить промежуточные пороговые значения структурных показателей для такой классификации;
- разработать варианты совершенствования структур систем внешнего электроснабжения угольных шахт Ленинск-Кузнецкого района и СЭС Кемеровского района, направленные на повышение эффективности их функционирования, а, следовательно, на повышение надежности электроснабжения потребителей.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертации содержится решение научной задачи поиска способов повышения эффективности функционирования систем внешнего и внутреннего электроснабжения, имеющей важное значение для электрохозяйств предприятий и электросетевого комплекса.

На основании проведенных исследований получены следующие результаты.

1. Установлено, что недостатки структурной организации систем внешнего и внутреннего электроснабжения являются основной причиной прекращений подачи электроэнергии конечным потребителям. Для отдельных предприятий примерно 75% всех случаев нарушений электроснабжения связано со структурными недостатками СЭС. Задержки перемещения оперативной информации в путях, образованных в процессе ликвидаций аварий, могут существенно увеличивать время простоя производственного оборудования.

2. Разработана программа поэтапного исследования СЭС на основе анализа заложенной в ней структурной и оперативной информации с определением итогового комплексного показателя эффективности ее функционирования – информационного ресурса СЭС.

3. Предложен способ построения ИЭМ СЭС, учитывающей топологические и эксплуатационные характеристики ее функционирования, при помощи которой определяется информационный ресурс СЭС.

4. На основе проведенных исследований предложены и обоснованы рекомендации по повышению эффективности функционирования систем внутреннего электроснабжения, принятые к использованию в КАО «АЗОТ», которые позволили увеличить информационный ресурс на 20%, и добиться снижения эксплуатационных затрат примерно на 240 тыс. руб. в месяц.

5. Предложенный способ исследования структур СЭС, использованный в условиях региональных и районных СЭС Сибирского федерального округа, позволил выявить характерные недостатки их топологии и «ключевые точки», а также

разработать варианты структурного совершенствования для систем внешнего электроснабжения, реализация которых для угледобывающих предприятий Ленинск-Кузнецкого района Кемеровской области и городских и сельских потребителей Кемеровского района позволяет повысить упорядоченность их структур на 1,5 и 4,3% соответственно.

6. Предложена концепция классификации СЭС на основе упорядоченности их структур и определены промежуточные диапазоны значений для отнесения СЭС к конкретному классу.

Направлением дальнейшего развития работы является наполнение ИЭМ СЭС различными «стоимостными» показателями (нагрузки электроприемников, загрузки ЛЭП и т.п.), что позволит дать комплексную технико-экономическую оценку СЭС. Еще одним направлением дальнейшего развития работы является интеграция полученных результатов в концепцию Smart Grid.

ЛИТЕРАТУРА

1. О функционировании розничных рынков электрической энергии, полном и (или) частичном ограничении режима потребления электрической энергии: постановление Правительства РФ от 4 мая 2012 г. № 442 // Собрание законодательства РФ. – 2012 – № 23. – ст. 3008.

2. Стратегия развития электросетевого комплекса Российской Федерации: распоряжение Правительства РФ от 3 апреля 2013 г. № 511-р // Собрание законодательства РФ. – 2013. – № 14. – ст. 1738.

3. Стратегии развития химического и нефтехимического комплекса на период до 2030 года: распоряжение Правительства Российской Федерации от 18 мая 2016 г. № 954-р. // Собрание законодательства РФ. – 2016. – № 22. – ст. 3242.

4. Стратегия развития химического комплекса Кемеровской области на период до 2025 года: постановление Коллегии Администрации Кемеровской области от 20 июня 2011 г. № 276 // Электронный бюллетень Коллегии Администрации Кемеровской области. – 2011.

5. Правила устройства электроустановок: ПУЭ-7. – Новосибирск: Сиб. унив. изд-во, 2006. – 854 с.

6. Правила технической эксплуатации электроустановок потребителей. – М.: Изд-во НЦ ЭНАС, 2004. – 304 с.

7. Правила по охране труда при эксплуатации электроустановок. – М.: Изд-во Мини Тайп, 2014. – 152 с.

8. Проектирование электроснабжения промышленных предприятий. Нормы технологического проектирования. – М.: Тяжпромэлектропроект имени Ф. Б. Якубовского, 1994. – 31 с.

9. Инструкция по проектированию электроустановок угольных шахт, разрезов, обогатительных и брикетных фабрик / М.: Министерство топлива и энергетики РФ, Комитет угольной промышленности. – 1993. – 114 с.

10. Абдеев, Р.Ф. Философия информационной цивилизации / Р.Ф. Абдеев. – М.: ВЛАДОС, 1994. – 336 с.

11. Абраменкова, Н.А. Структурный анализ электроэнергетических систем / Н.А. Абраменкова, Н.И. Воропай, Т.Б. Заславская. – Новосибирск: Наука. Сиб. отд-ние, 1990. – 224 с.

12. Басакер, Р. Конечные графы и сети / Р. Басакер, Т. Саати; пер. с англ. под ред. А.И. Теймана. – М.: Наука, 1974. – 368 с.

13. Бесчастнов, М.В. Взрывобезопасность и противоаварийная химико-технологических процессов / М.В. Бесчастнов. – М.: Химия, 1983 – 472 с.

14. Богомолов, А.Р. Технология и технологическое оборудование (химическое производство) / А.Р. Богомолов, Е.Ю. Темникова. – Кемерово: 2011. – 202 с.

15. Бриллюэн, Л. Наука и теория информации / Л. Бриллюэн; пер. с англ. А.А. Харкевича. – М.: Изд-во физико-математической литературы, 1960. – 392 с.

16. Бриллюэн, Л. Научная неопределенность и информация / Л. Бриллюэн; пер. с англ. Т.А. Кузнецовой. – М.: Мир, 1966. – 267 с.

17. Варнавский, К.А. Структурный анализ систем электроснабжения МРСК Сибири / К.А. Варнавский, В.Н. Матвеев // Сборник докладов студентов, аспирантов и профессорско-преподавательского состава университета. По результатам IV Всероссийской, 57 научно-практической конференции молодых ученых «РОССИЯ МОЛОДАЯ», 24-27 апреля 2012 г. / Редкол.: В.Ю. Блюменштейн (отв. редактор) [и др.]; КузГТУ. – Кемерово, 2012. – С. 81–85.

18. Варнавский, К.А. Анализ путей повышения эффективности эксплуатации систем электроснабжения промышленных предприятий / К.А. Варнавский, В.Н. Матвеев // Промышленная энергетика. – 2016. – №4. – С. 14-18.

19. Васин, В. П. Области существования установившихся режимов электрических систем. / В. П. Васин; под ред. Л. А. Жукова – М.: МЭИ, 1982. – 84 с.

20. Винер, Н. Кибернетика или управление и связь в животном и машине / Н. Винер; пер. с англ. И.В. Соловьева и Г.Н. Поварова, под ред. Г.Н. Поварова. – 2-е издание. – М.: Наука; главная редакция изданий для зарубежных стран, 1983. – 344 с.

21. Войтов, О.Н. Анализ неоднородностей электроэнергетических систем / О.Н. Войтов, Н.И. Воропай, А.З. Гамм и др. – Новосибирск: Наука. Сибирская

издательская фирма РАН, 1999. – 256 с.

22. Волькенштейн, М.В. Энтропия и информация / М.В. Волькенштейн. – М.: Наука, 1986. – 192 с.

23. Волотковский, С.А. Электроснабжение угольных шахт / С.А. Волотковский, Ю.Т. Разумный, Г.Г. Пивняк и др. – М.: Недра, 1984. – 376 с.

24. Воронов, А.А. Устойчивость, управляемость, наблюдаемость / А.А. Воронов. – М.: Наука, 1979. – 336 с.

25. Гамм, А.З. Наблюдаемость электроэнергетических систем / А.З. Гамм, И.И. Голуб. – М.: Наука, 1990. – 200 с.

26. Герасименко, А.А. Передача и распределение электрической энергии: учебное пособие / А.А. Герасименко, В.Т. Федин. – Ростов н/Д: Феникс, 2008. – 715 с.

27. Гуревич, Ю.Е. Особенности электроснабжения, ориентированного на бесперебойную работу промышленного потребителя / Ю.Е. Гуревич, К.В. Кабиков. – М.: ЭЛЕКС-КМ, 2005. – 408 с.

28. Дьяков, А.Ф. Современные проблемы развития электроэнергетики / А.Ф. Дьяков, В.В. Молодюк // Энергоэксперт. – 2014. – № 2. – С. 10–14.

29. Идельчик, В. И. Электрические системы и сети: Учебник для вузов / В.И. Идельчик. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 592 с

30. Калман, Р. Очерки по математической теории систем / Р. Калман, П. Фалб, М. Арбиб; пер. с англ. под ред. Я.З. Цыпкина. – М.: Мир, 1971. – 400 с.

31. Кораблев, В.П. Электробезопасность на предприятиях химической промышленности [Справочник] / В.П. Кораблев – М.: Химия, 1991. – 240 с.

32. Краевская, Н.П. Электрооборудование химических производств: Учеб. пособие для вузов / Н.П. Краевская, Б.В. Гринберг. – Мн.: Выш. шк., 1990. – 144 с.

33. Кудрин, Б.И. Применение понятий биологии для описания и прогнозирования больших систем, формирующихся технологически / Б.И. Кудрин // Электрификация металлургических предприятий Сибири. Выпуск 3. − Изд-во Томского университета. − Томск, 1976. − С. 171–204

34. Кудрин, Б.И. Выделение и описание электрических ценозов / Б.И. Куд-

рин // Изв. ВУЗов. Электромеханика. – 1985. – № 7. – С. 49–54.

35. Кудрин, Б.И. Электроснабжение промышленных предприятий: Учеб. для студентов вузов / Б.И. Кудрин. – М.: Интермет Инжиниринг, 2005. – 672 с.

36. Кудряшов, Д.С. Некоторые проблемные вопросы электроснабжения угольных предприятий / Д.С. Кудряшов, А.С. Ярош, О.В. Наумов // Безопасность труда в промышленности. – 2014. – № 8. – С. 69–71.

37. Кузьбожев, Э.Н. Экономическая география и регионалистика (история методы состояние и перспективы размещения производительных сил): учеб. пособие / Э.Н. Кузьбожев, И. А. Козьева, М. Г. Световцева. – М.: Высшее образование, 2009. – 540 с.

38. Курбатов, А.П. Объединенная энергосистема Сибири (1959 – 2010 гг.) глазами участника событий / А.П. Курбатов. – Кемерово, 2010. – 116 с.

39. Ломов, Б.Ф. Справочник по инженерной психологии / Б.Ф. Ломов. – М.: Машиностроение, 1982. – 368 с.

40. Лоскутов, А.Б. Новый подход к построению электрических распределительных сетей России / А.Б. Лоскутов, Е.Н. Соснина, А.А. Лоскутов // Вестник БГТУ имени Шухова». – 2011. – №3. – С. 147–151.

41. Лоскутов, А.Б. Топология городских распределительных интеллектуальных электрических сетей 20 кВ / А.Б. Лоскутов, Е.Н. Соснина, А.А. Лоскутов // Промышленная энергетика. – 2012. – № 5. – С. 11–17.

42. Лоскутов, А.Б. Интеллектуальные распределительные сети 10-20 кВ с гексагональной конфигурацией / А.Б. Лоскутов, Е.Н. Соснина, А.А. Лоскутов, Д.В. Зырин // Промышленная энергетика. – 2013. – № 12. – С. 3–7.

43. Матвеев, В.Н. Некоторые характеристики шахтных электромеханических систем с позиции безопасности / В.Н. Матвеев, А.М. Мельтенисов // Управление электромеханическими объектами в горной промышленности: Сб. научн. тр. / Кузбас. политехн. ин-т. – Кемерово, 1984. – С. 109–113.

44. Матвеев, В.Н. Повышение безопасности эксплуатации взрывозащищенного электрооборудования в шахтной эргатической системе: Дис. ... канд. техн. наук. – Кемерово, 1988. – 213 с.

45. Матвеев, В.Н. Определение показателя безопасности взрывозащищенного электрооборудования / В.Н. Матвеев // Безопасность труда в промышленности. – 1996. – №2. – С. 19–20.

46. Матвеев, В.Н. Информационный подход к созданию шахтных технических систем / В.Н. Матвеев, Д.Б. Гвоздев // Тр. 13-ой Международной конференции ICAMC-98. – Словакия: Кошице, 1998 г. – С. 378–381.

47. Матвеев, В.Н. Эволюция материи и безопасность живого мира / В.Н. Матвеев // Вестн. Кузбасского гос. тех. унив. – 1998. – № 6. – С. 33–36.

48. Матвеев, В.Н. Методика определения насыщенности оперативной информацией шахтной пусковой аппаратуры / В.Н. Матвеев, Д.Б. Гвоздев // Вестн. Кузбасского гос. тех. унив. – 1999. – № 6. – С. 27–29.

49. Матвеев, В.Н. Совершенствование эргатической системы «Кемеровская горэлектросеть» / В.Н. Матвеев, А.М. Микрюков, С.Н. Науменко // Энергосбережение в городском хозяйстве, энергетике, промышленности / Тр. Третьей Российской научн.-технич. конф. Ульяновский гос. техн. ун-т. – Ульяновск, 2001 г. – С. 117–120.

50. Матвеев, В.Н. Информационная оценка системы / В.Н. Матвеев // Вестн. Кузбасского гос. тех. унив. – 2001. – № 2. С.63–68.

51. Матвеев, В.Н. Шахтные коммутационные аппараты нового уровня безопасности / В.Н. Матвеев; под общ. ред. Г.И. Разгильдеева. – Кемерово: КузГТУ, 2001. – 148 с.

52. Матвеев, В.Н. Структурный и параметрический синтез компонентов шахтной системы электроснабжения нового уровня безопасности / В.Н. Матвеев // Изв. вузов. Горн. Журн. – 2003. – № 3. – С.117–120.

53. Матвеев, В.Н. Повышение безопасности эксплуатации шахтных участковых систем электроснабжения и их компонентов: Дис. ... докт. техн. наук. – Кемерово, 2003. – 302 с.

54. Матвеев, В.Н. Оценка безопасности и эффективности электроснабжения разреза «Кедровский» / В.Н. Матвеев, А.М. Микрюков, Т.Ю. Романенко // Вестн. Кузбасского гос. тех. унив. – 2005. – № 2. – С. 43–46.

55. Матвеев, В.Н. Повышение безопасности и эффективности функционирования диспетчерской службы энергопредприятия / В.Н. Матвеев, А.М. Микрюков, С.Н. Науменко, Т.Ю. Романенко // Вестн. Кузбасского гос. тех. унив. – 2005. – № 2. – С. 41–43.

56. Матвеев, В.Н. Алгоритм синтеза системы управления электроснабжением промышленных объектов / В.Н. Матвеев, Т.Ю. Романенко // Вестн. Кузбасского гос. тех. унив. – 2006. – № 2. – С. 42–44.

57. Матвеев, В.Н. Информационная модель системы управления электроснабжением промышленных объектов / В.Н. Матвеев, С.А. Иванов, Т.Ю. Романенко // Энергетик. – 2006. – №10. – С.23–26.

58. Матвеев, В.Н. Анализ структур сложных электросистем с позиций безопасности и энергосбережения / В.Н. Матвеев, А.Н. Микрюков, В.Е. Беков // Вестн. Кузбасского гос. тех. унив. – 2010. – № 1. – С. 87–90.

59. Матвеев, В.Н. Структурный анализ питающих систем электроснабжения Сибирского региона / В.Н. Матвеев, К.А. Варнавский // Вестн. Кузбасского гос. тех. унив. – 2012. – № 3. – С. 152–155.

60. Матвеев, В.Н. Повышение эффективности использования системы электроснабжения Кемеровского района Кузбасса / В.Н. Матвеев, А.В. Элер // Вестн. Кузбасского гос. тех. унив. – 2012. – № 3. – С. 149–151.

61. Матвеев, В.Н. К вопросу о стратегической безопасности системы электроснабжения Сибири / В.Н. Матвеев, К.А. Варнавский // Природные и интеллектуальные ресурсы Сибири. Сибресурс 2012. Материалы XIV Международной научно-практической конференции, 1-2 ноября 2012 г. / редкол.: В.Ю. Блюменштейн (отв. редактор), В.А. Колмаков (зам. отв. редактора), КузГТУ. – Кемерово, 2012 – С. 19–22.

62. Матвеев, В.Н. К вопросу о надежности электроснабжения угольных шахт Кузбасса / В.Н. Матвеев, К.А. Варнавский // Современные тенденции и инновации в науке и производстве. Материалы III Международной науч.- практ. конф., Филиал КузГТУ в г. Междуреченск. – Междуреченск, 2014. – С. 62–63.

63. Матвеев, В.Н. Оптимизация систем электроснабжения шахт Кемеровской

области / В.Н. Матвеев, К.А. Варнавский // Инновации в технологиях и образовании: сборник статей участников VII Международной научно-практической конференции «Инновации образовании», 28–29 марта 2014 г.: в 4 ч. / Филиал КузГТУ в г. Белово. – Белово: Изд-во филиала КузГТУ в г. Белово, Россия; Изд-во ун-та «Св. Кирилла и Св. Мефодия», Велико Тырново, Болгария, 2014. – Ч. 1. С. 219–222.

64. Матвеев, В.Н. Структурный анализ эффективности систем электроснабжения Сибирского региона / В.Н. Матвеев, К.А. Варнавский // Энергетик. – 2014. – №12. – С. 31–33.

65. Нечипоренко, В.И. Структурный анализ и методы построения надежных систем / В.И. Нечипоренко. – М.: Советское радио, 1968. – 255 с.

66. Нечипоренко, В.И. Структурный анализ систем (Эффективность и надежность) / В.И. Нечипоренко. – М.: Советское радио, 1977. – 216 с.

67. Падалко, Л.П. Критерии и методы оптимального управления электроэнергетической системой / Л.П. Падалко. – Минск: Наука и техника, 1979. – 200 с.

68. Проблемы функционирования распределительного электросетевого комплекса на территории РФ // Электроэнергия. Передача и распределение. – 2014. – № 1. – С. 24–29

69. Разгильдеев, Г.И. Безопасный подход к созданию систем электроснабжения подземных участков угольных шахт / Г.И. Разгильдеев, В.Н. Матвеев // Электробезопасность. – 1995. – № 2. – С. 24–28.

70. Разгильдеев, Г.И. Концепция научных основ создания взрывозащищенного электрооборудования / Г.И. Разгильдеев, В.Н. Матвеев // Тр. 12-ой Международной конференции ICAMC-95. – Польша: Гливице, 1995 г. – С. 373-376.

71. Разгильдеев, Г.И. Метод оценки безопасностных свойств взрывозащищенного электрооборудования / Г.И. Разгильдеев, В.Н. Матвеев // Изв. ВУЗов. Горн. журн., 1996. – №12. – С. 132–135.

72. Разгильдеев, Г.И. Надежность электромеханических систем и электрооборудования: учеб. Пособие / Г.И. Разгильдеев. – 3-е изд., перераб. – Кемерово: ГУ КузГТУ, 2005. – 157 с.

73. Романенко, Т.Ю. Повышение эксплуатационной безопасности системы

электроснабжения угледобывающих предприятий: на примере ОАО «УК «Кузбассразрезуголь»: Дис. ... канд. техн. наук. – Кемерово, 2006. – 206 с.

74. Савинкин А.А. Электроснабжение угольных шахт / А.А. Савинкин // Уголь Кузбасса. – 2015. – №3. – С. 54.

75. Сарычев И.В. Анализ отключений в электрических сетях Кемеровского района / И.В. Сарычев // Вестн. Кузбасского гос. тех. унив. – 2005. – № 3. – С. 15–17.

76. Свами, М. Графы, сети, алгоритмы / М. Свами, К. Тхуласираман. – М.: Мир, 1984. – 300 с.

77. Сизганова, Е.Ю. Техноценозы в электротехнических системах и комплексах: монография / Е. Ю. Сизганова, Т. М. Чупак, А. Ю. Южанников. – Красноярск: Сиб. федер. ун-т, 2012. – 272 с.

78. Сирота, Е. Гаджеты охраны труда / Е. Сирота // Энергия единой сети, 2012. – №11 – С. 12

79. Упоров, Д.А. Состояние и развитие химической промышленности Кемеровской области в 1985-2005 гг. / Д.А. Упоров, Л.Л. Прилепская // Вестн. Кузбасского гос. тех. унив. – 2006. – № 6.1. – С. 145–149.

80. Ушаков, И.А. Курс теории надежности систем: учеб. Пособие для вузов / И.А Ушаков. – М.: Дрофа, 2008. – 239 с.

81. Хвощ, С.Т. Теория графов / С.Т. Хвощ, Н.Н. Варлинский, Е.А. Попов. – Л.: Машиностроение, 1987. – 640 с.

82. Фокин, Ю.А. Оценка надежности систем электроснабжения / Ю.А. Фокин, В.А. Туфанов. – М.: Энергоиздат, 1981. – 224 с.

83. Чеботаев, Н.И. Электрооборудование и электроснабжение открытых горных работ: Учебник для вузов / Н.И. Чеботаев. – М.: Издательство «Горная книга», 2006. – 474 с.

84. Шеннон, К. Работы по теории информации и кибернетике / К. Шеннон; пер. с англ. под ред. Р.Л. Добрушина и О.Б. Лупанова. – М.: Изд-во иностранной литературы, 1963. – 830 с.

85. Шумилин, Г.Д. Электрооборудование химических производств / Г.Д. Шумилин, Н.П. Краевская. – Мн.: Выш. шк., 1970. – 276 с.

86. Элер, А.В. Структурная оценка системы электроснабжения Кемеровского района / А.В. Элер, К.А. Варнавский, В.Н. Матвеев // Сборник докладов студентов, аспирантов и профессорско-преподавательского состава университета. По результатам IV Всероссийской, 57 научно-практической конференции молодых ученых «РОССИЯ МОЛОДАЯ», 24-27 апреля 2012 г. / Редкол.: В.Ю. Блюменштейн (отв. редактор) [и др.]; КузГТУ. – Кемерово, 2012. – С. 78–80.

87. Эйген, М. Гиперцикл: принципы самоорганизации макромолекул / М. Эйген, П. Шустер; пер. с англ. под ред. М.В. Волькенштейна и Д.С. Чернавского. – М.: Мир, 1982. – 268 с.

88. Бродт, Е.В. Повышение надежности угольных предприятий Кузбасса / Е.В. Бродт // «Энергетика и энергосбережение: теория и практика». Материалы II Всероссийской научно-практической конференции, 2 – 4 декабря 2015 г., Кемерово [Электронный ресурс] / ФГБОУ ВО «Кузбас. гос. техн. ун-т им. Т. Ф. Горбачева»; редкол.: О. В. Тайлаков, (отв. редактор), И.А. Лобур (зам. отв. Редактора) [и др.]. – Кемерово, 2015. – Режим доступа: http://science.kuzstu.ru/wp-content/Events/Conference/energ/2015/energ/pages/Articles/2/Brodt.pdf

89. Варнавский, К.А. Повышение надежности электроснабжения горных предприятий Кемеровской области / К.А. Варнавский, В.Н. Матвеев // Сборник материалов VI Всерос., 59-й научно-практической конференции с международным участием «Россия молодая», 22-25 апр. 2014 г., Кемерово [Электронный ресурс] / ФГБОУ ВПО «Кузбас. гос. техн. ун-т им. Т. Ф. Горбачева»; редкол.: В. Ю. Блюменштейн (отв. ред.) [и др.]. – Кемерово, 2014. – Режим доступа: http://science.kuzstu.ru/wp-content/Events/Conference/RM/2014/materials/pdf1/GI/GMIK/варнавский/index.html

90. Кудрин, Б.И. О долговременной энергетической стратегии и энергетической безопасности России / Б.И. Кудрин [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.kudrinbi.ru/public/10918/index.htm

91. Кудряшев, Д.С. О надежности электроснабжения угольных предприятий

Кузбасса / Д.С. Кудряшев // «Энергетика и энергосбережение: теория и практика». Материалы I Всероссийской научно-практической конференции, 3 – 5 декабря 2014 г., Кемерово [Электронный ресурс] / ФГБОУ ВПО «Кузбас. гос. техн. ун-т им. Т. Ф. Горбачева»; редкол.: В.П. Тациенко (отв. редактор) [и др.]. – Кемерово, 2014. – Режим доступа: http://science.kuzstu.ru/wp-content/Events/Conference/energ/2014/energ/pages/Articles/2/Kudrjashov.pdf

92. Кемеровское АО «АЗОТ» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://legacy.azot.kuzbass.net/

93. Матвеев, В.Н. Оценка эффективности мер по развитию систем электроснабжения России / В.Н. Матвеев, К.А. Варнавский // Природные и интеллектуальные ресурсы Сибири. Сибресурс 2014. Материалы XV Международной научно-практической конференции, 6–7 ноября 2014 г., Кемерово [Электронный ресурс] / ФГБОУ ВПО «Кузбас. гос. техн. ун-т им. Т. Ф. Горбачева»; редкол.: В.П. Тациенко (отв. редактор), В.А. Колмаков (зам. отв. редактора) [и др.]. – Кемерово, 2014. – Режим доступа: http://science.kuzstu.ru/wp-content/Events/Conference/Sibresource/2014/materials/pages/Articles/energosberegenie_i_resursosberegenie/matveev.pdf

94. Об основных мероприятиях модернизации российской электроэнергетики до 2020 года. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://minenergo.gov.ru/upload/iblock/124/1245a1e602cf85564c10ca574b6faeab.pdf

95. Объединенная энергетическая система Сибири [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://so-ups.ru/?id=oes_siberia

96. Предприятия «СДС-Азот» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.sds-azot.ru/ru/kompany/predpriyatiya

97. Самые дешевые автомобили в России в феврале 2016 года [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://megaobzor.com/samye-deshyovye-avtomobili-v-rossii-v-fevrale-2016-goda.html.

98. Сибирский федеральный округ [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://ru.wikipedia.org/wiki/ Сибирский_федеральный_округ.

99. Стоимость владения Daewoo Matiz [Электронный ресурс] – Режим доступа: http://autorating.ru/news/link/stoimost-vladeniya-daewoo-matiz

100. Структура ВРП Кузбасса [Электронный ресурс] – Режим доступа: http://www.kemerovostat.ru/bgd/KUZBASS/issWWW.exe/Stg/2014/d05.htm

101. Andriani, P. From exaptation to radical niche construction in biological and technological complex systems / P. Andriani, J. Cohen // Complexity. 2013. – №18. – P. 7–14.

102. Ding, Jie. Study of Key Technology and Implementation Structures for Smart Substation / Jie Ding, Yimin Ni, Haidong Zhang, Xiaobin Hua // Actual Trends in Development of Power System Protection and Automation. – Saint Petersburg, 2011. – P. 64-68.

103. Hines, P. The Topological and Electrical Structure of Power Grids / P. Hines, S. Blumsack, E. Cotilla Sanchez, C. Barrows // 43rd Hawaii International Conference on System Sciences, 5-8 January 2010 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://www.uvm.edu/~phines/publications/2010/hines_2010_structure.pdf

104. Marinovic, N. Electrotechnology in Mining / N. Marinovic. – Zagreb: EL-SIVER, 1990. – 621 P.

ПРИЛОЖЕНИЕ А

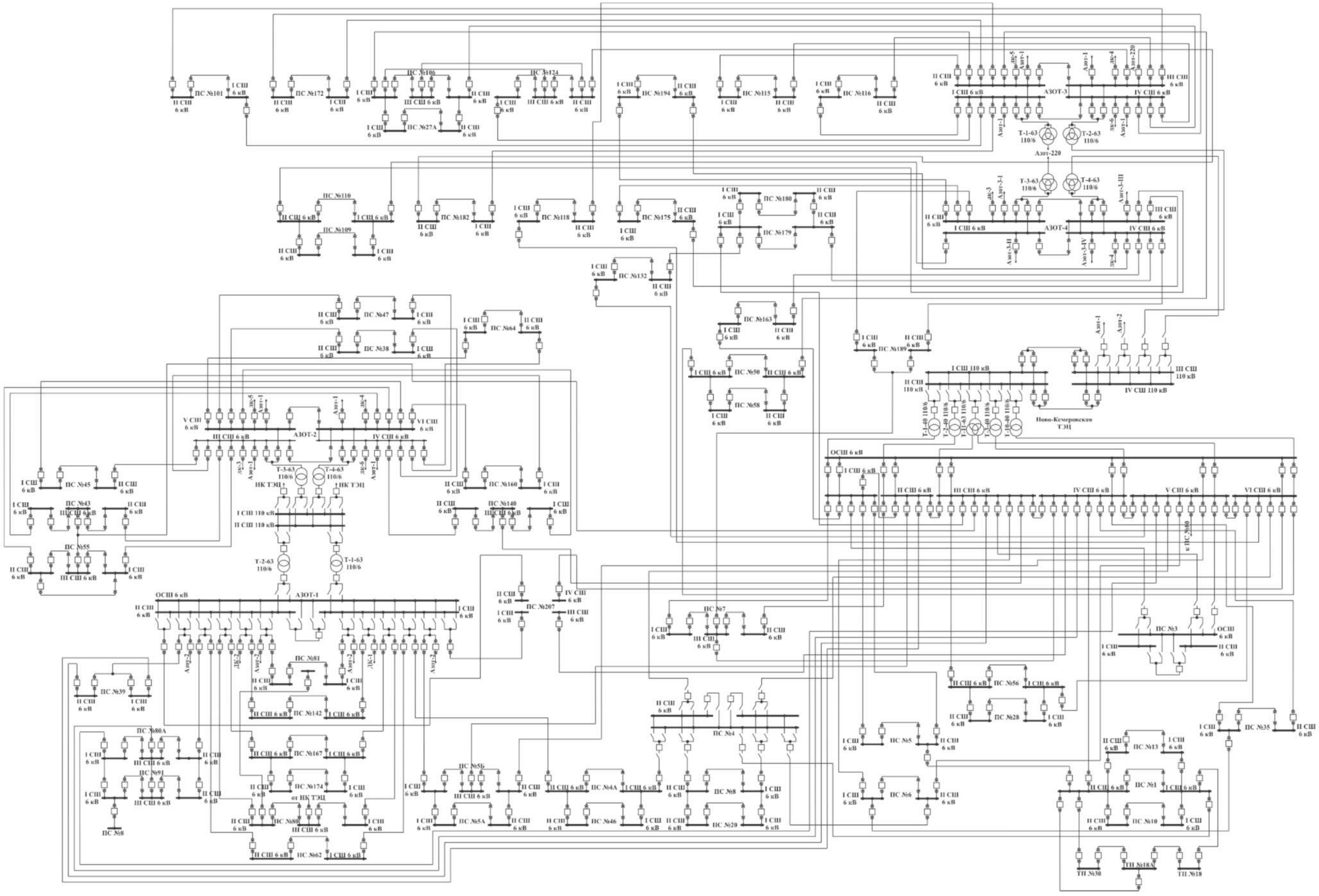


Рисунок А.1 – Принципиальная схема СЭС КАО «АЗОТ»

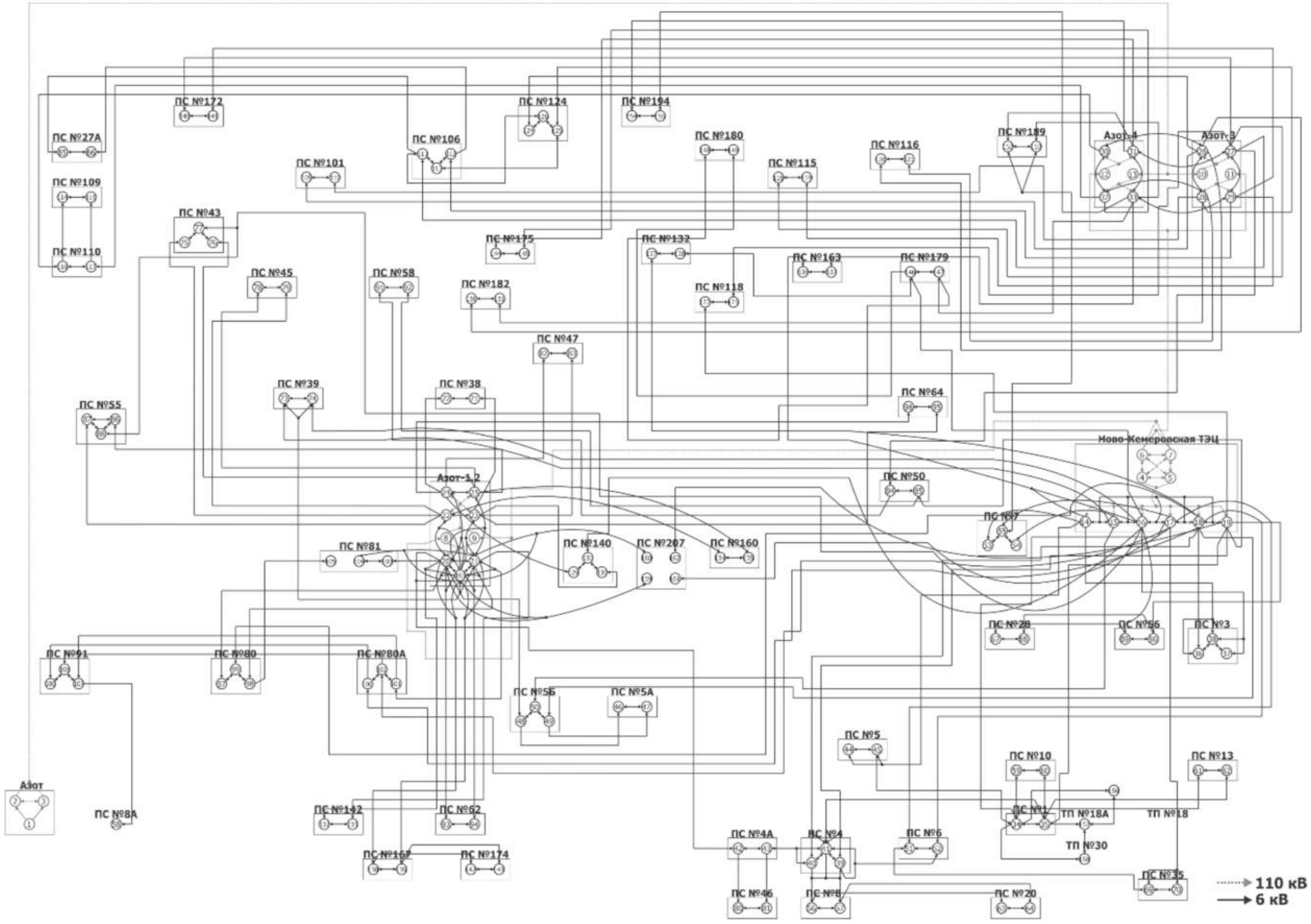


Рисунок А.2 – Ориентированный граф СЭС КАО «АЗОТ»

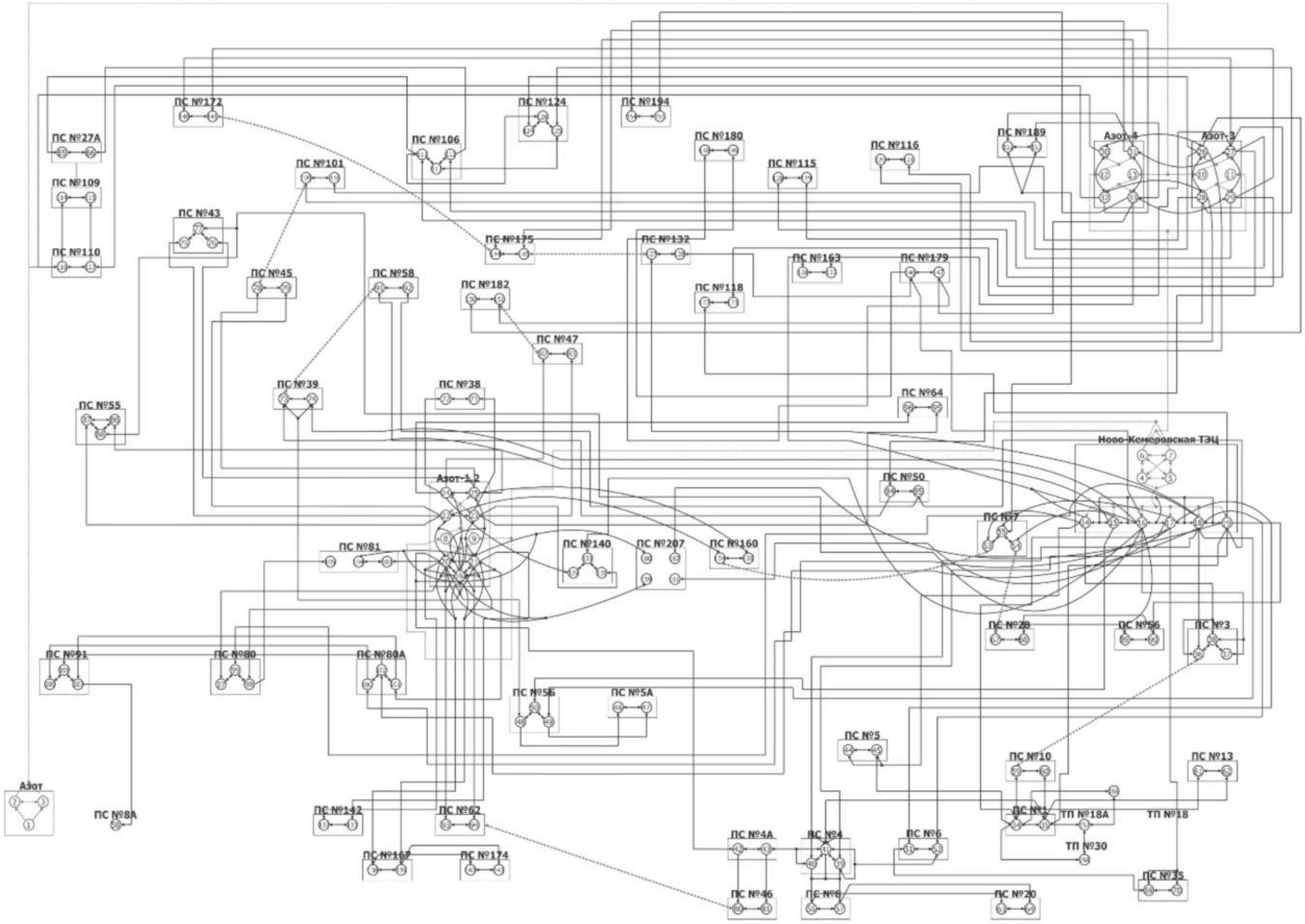


Рисунок А.3 – Ориентированный граф усовершенствованной СЭС КАО «АЗОТ

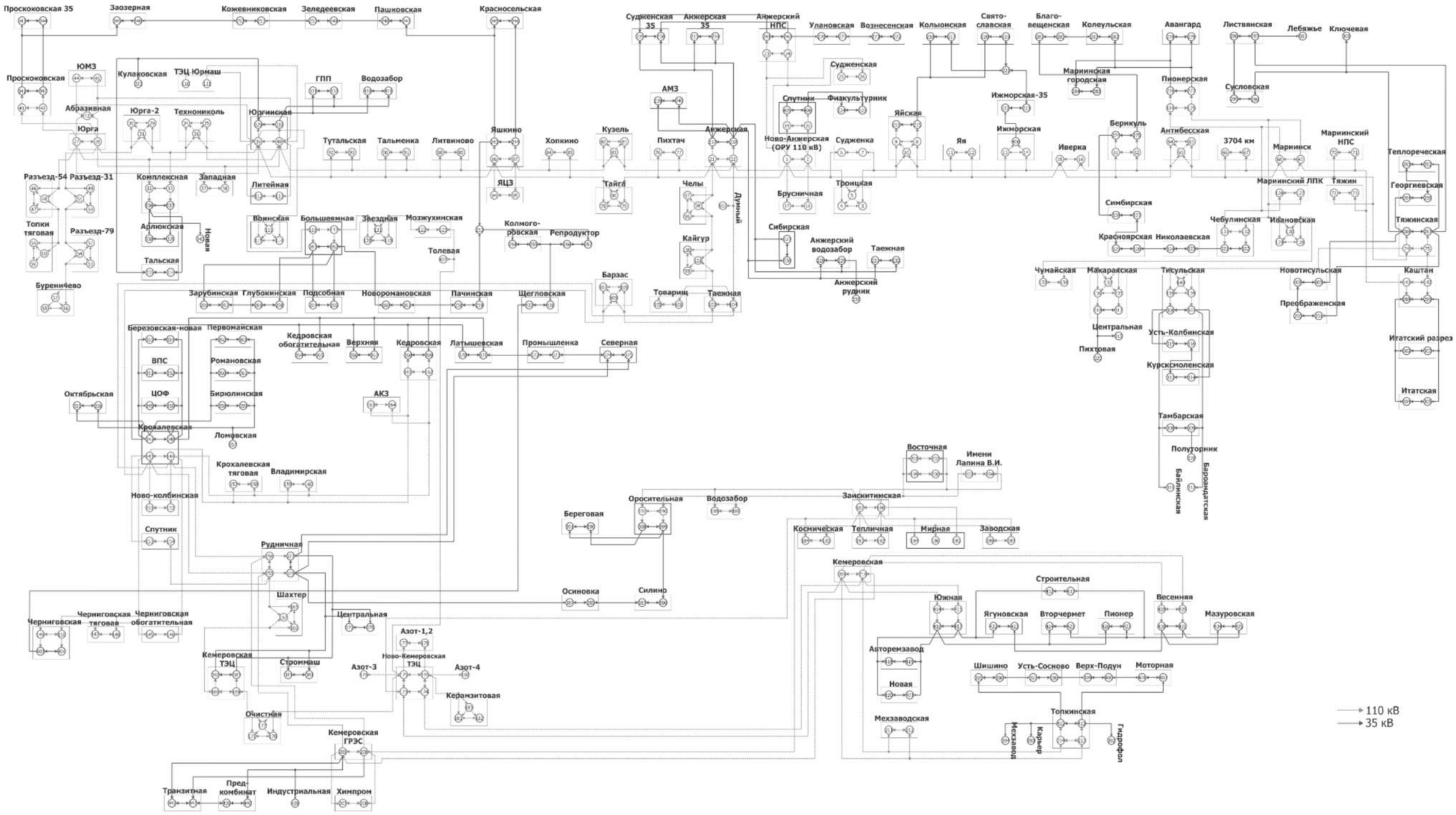


Рисунок А.4 – Ориентированный граф СВЭС

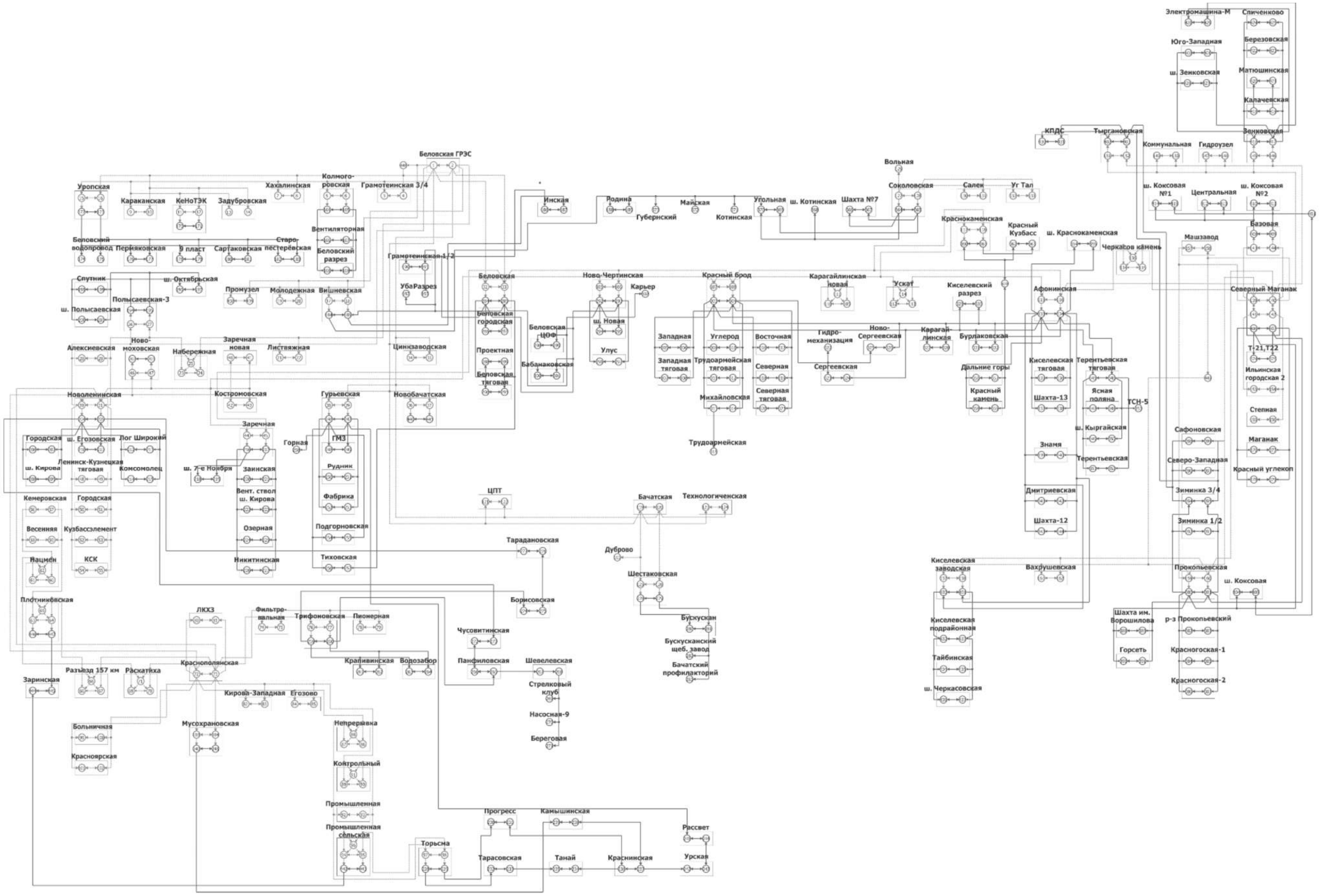


Рисунок А.5 – Ориентированный граф ЦЭС

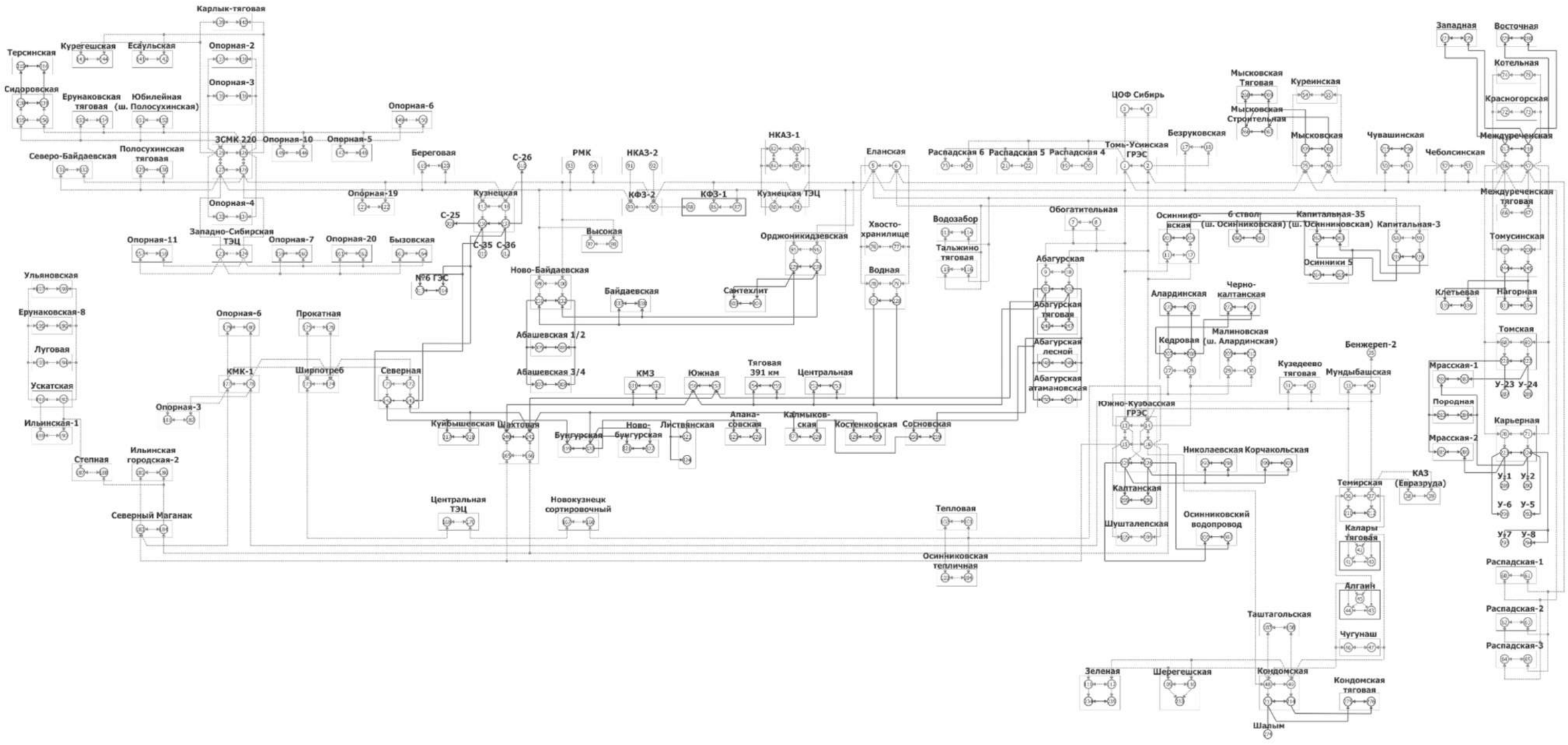


Рисунок А.6 – Ориентированный граф ЮЭС

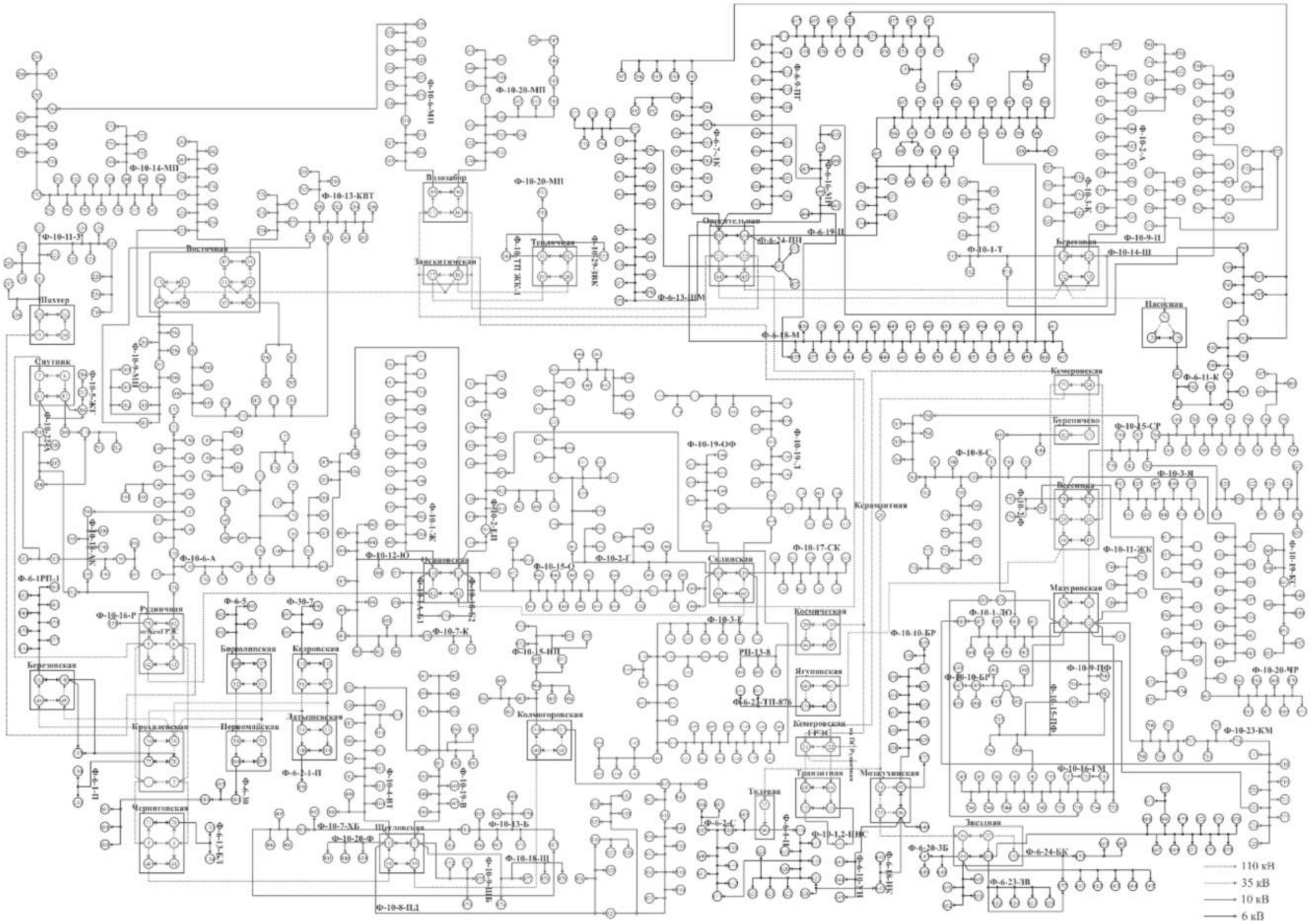


Рисунок А.7 – Ориентированный граф Кемеровского РЭС

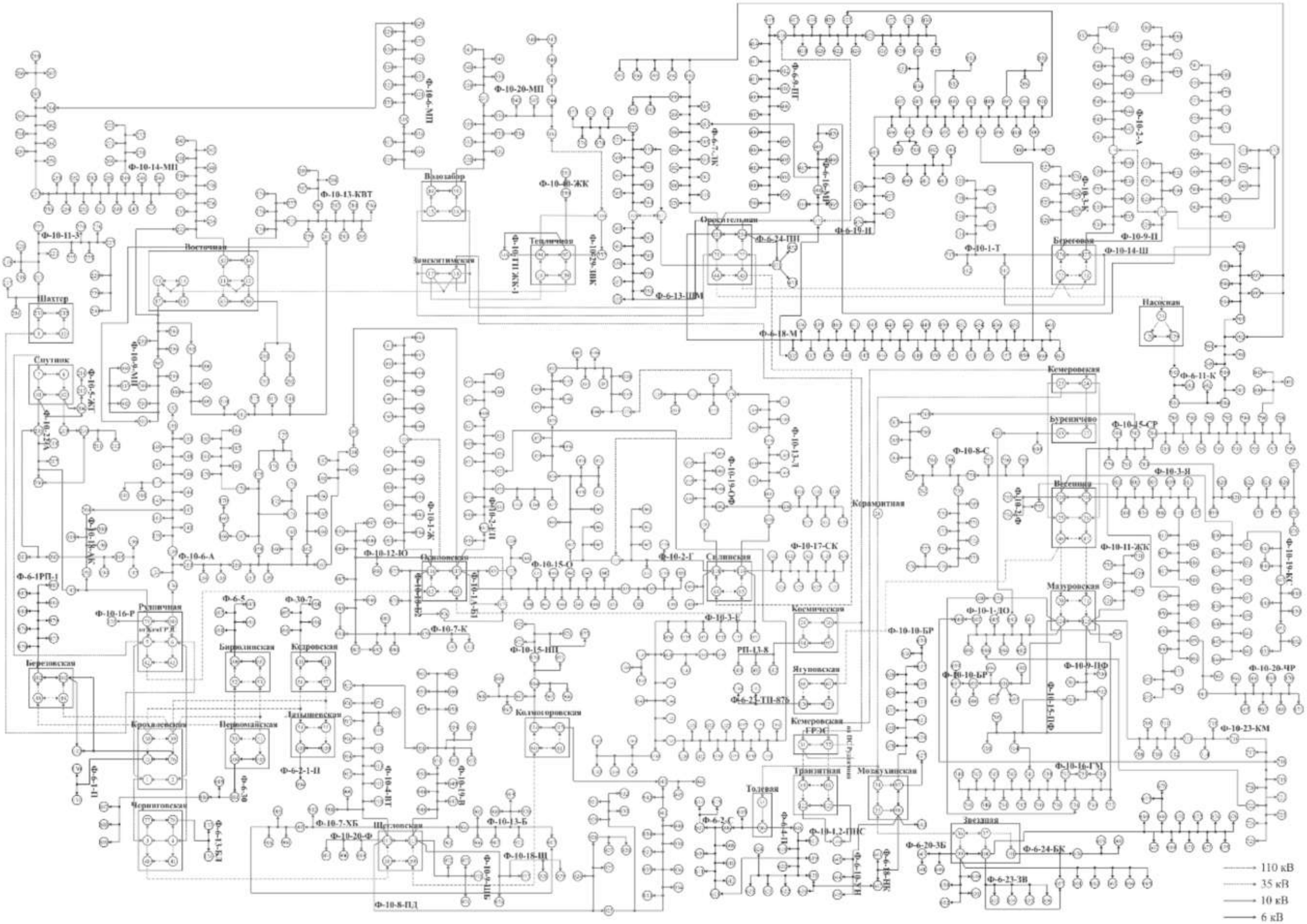


Рисунок А.8 – Ориентированный граф усовершенствованного Кемеровского РЭС

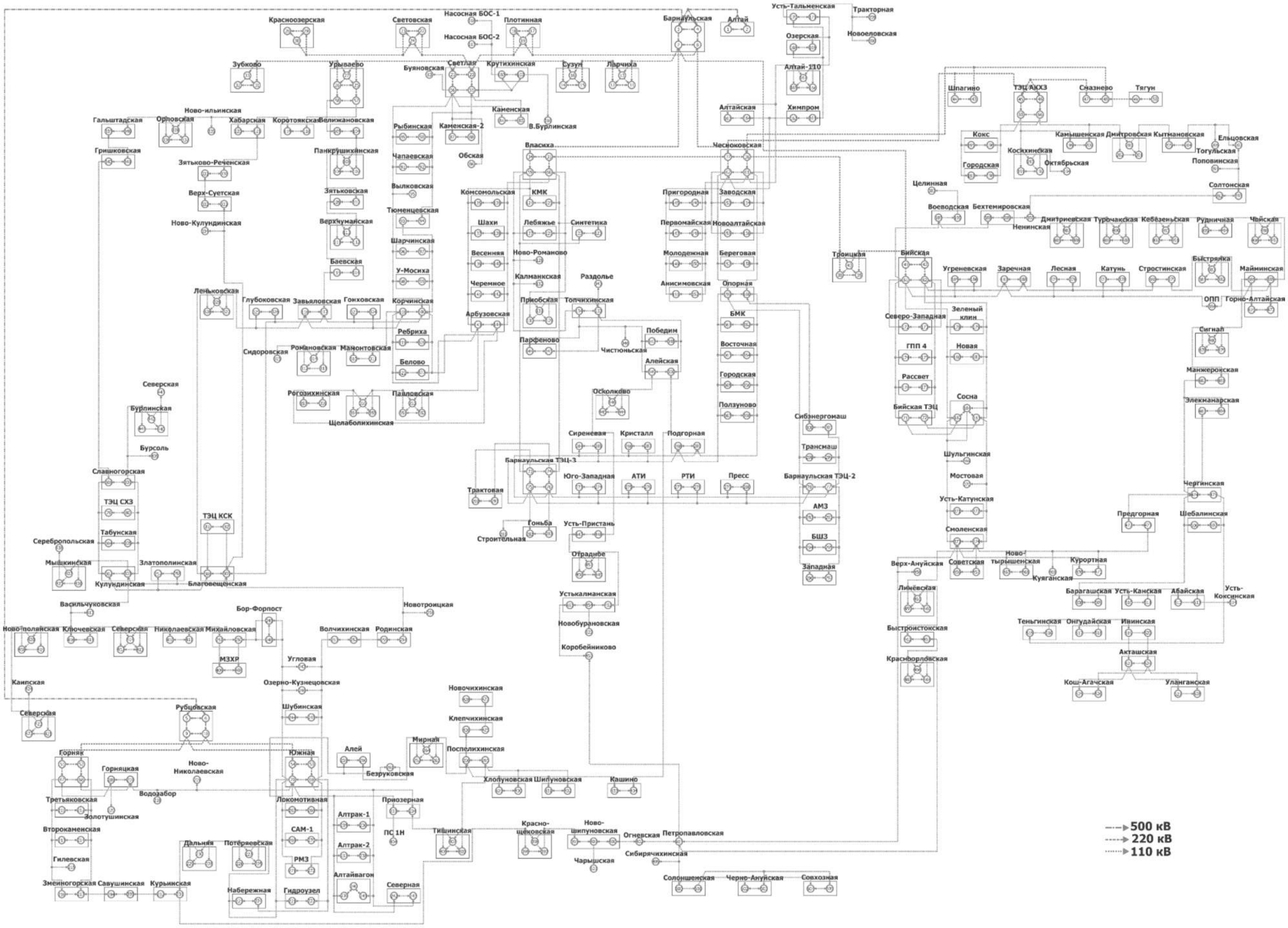


Рисунок А.9 – Ориентированный граф Алтайской СЭС

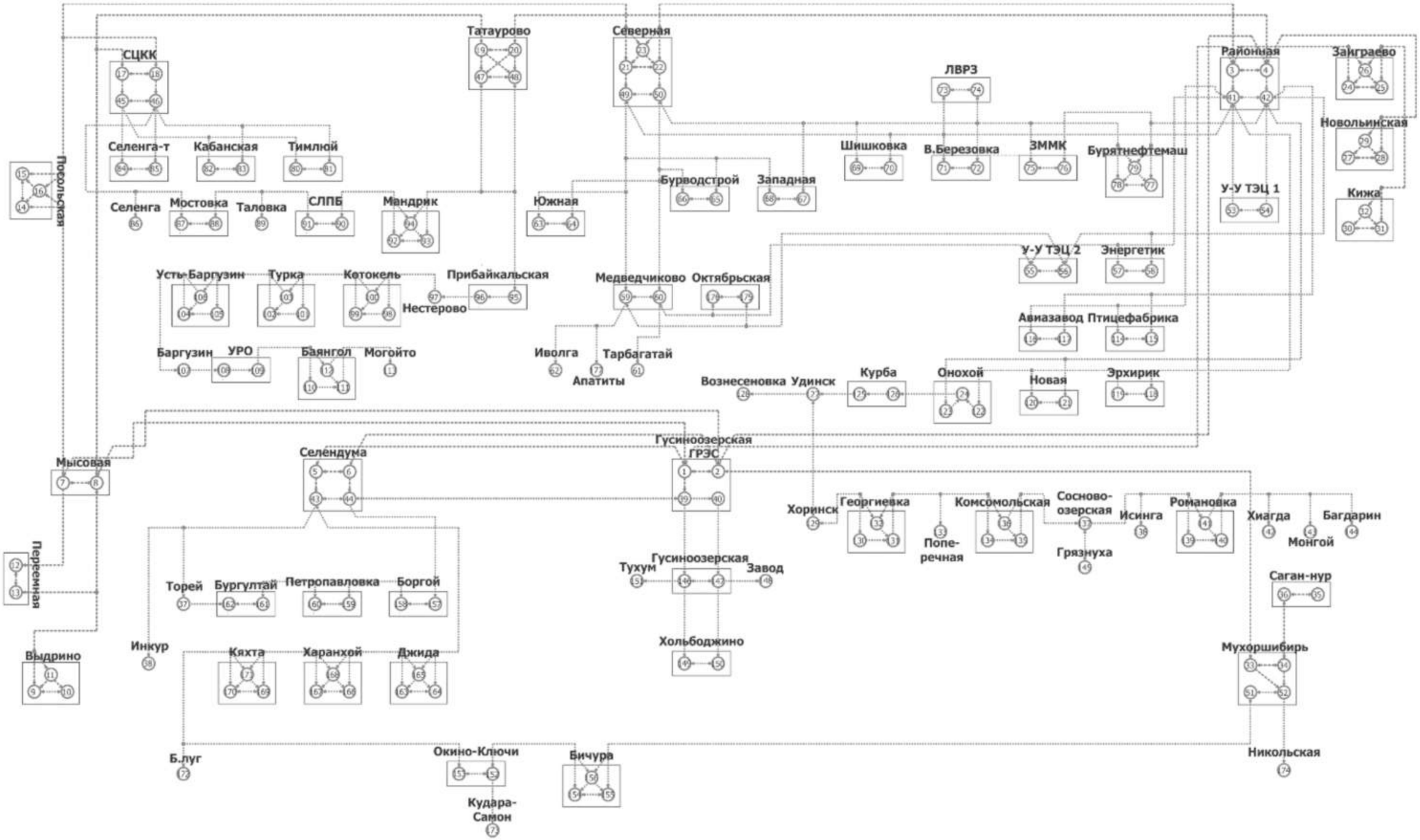


Рисунок А.10 – Ориентированный граф Бурятской СЭС

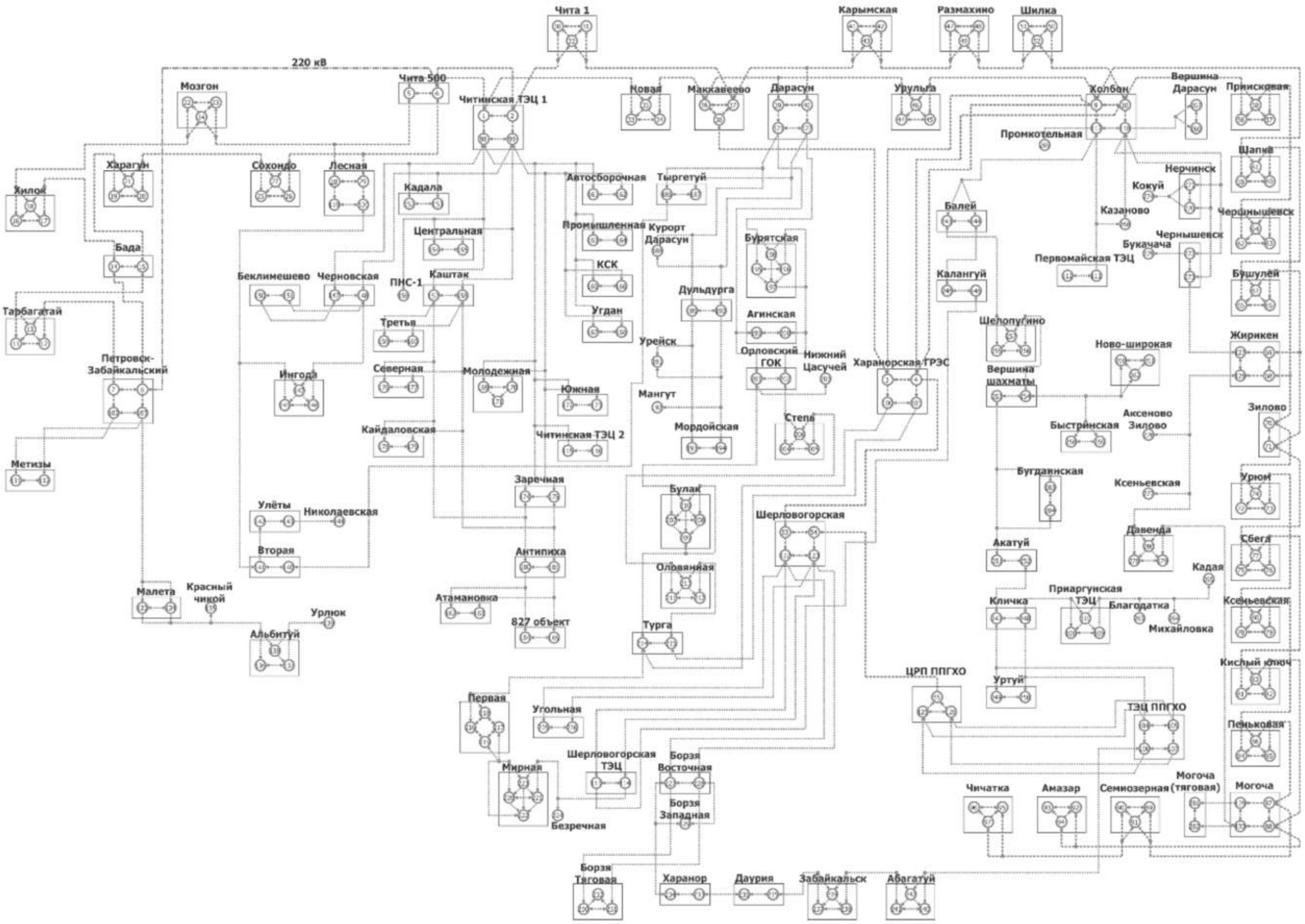


Рисунок А.11 – Ориентированный граф Забайкальской СЭС

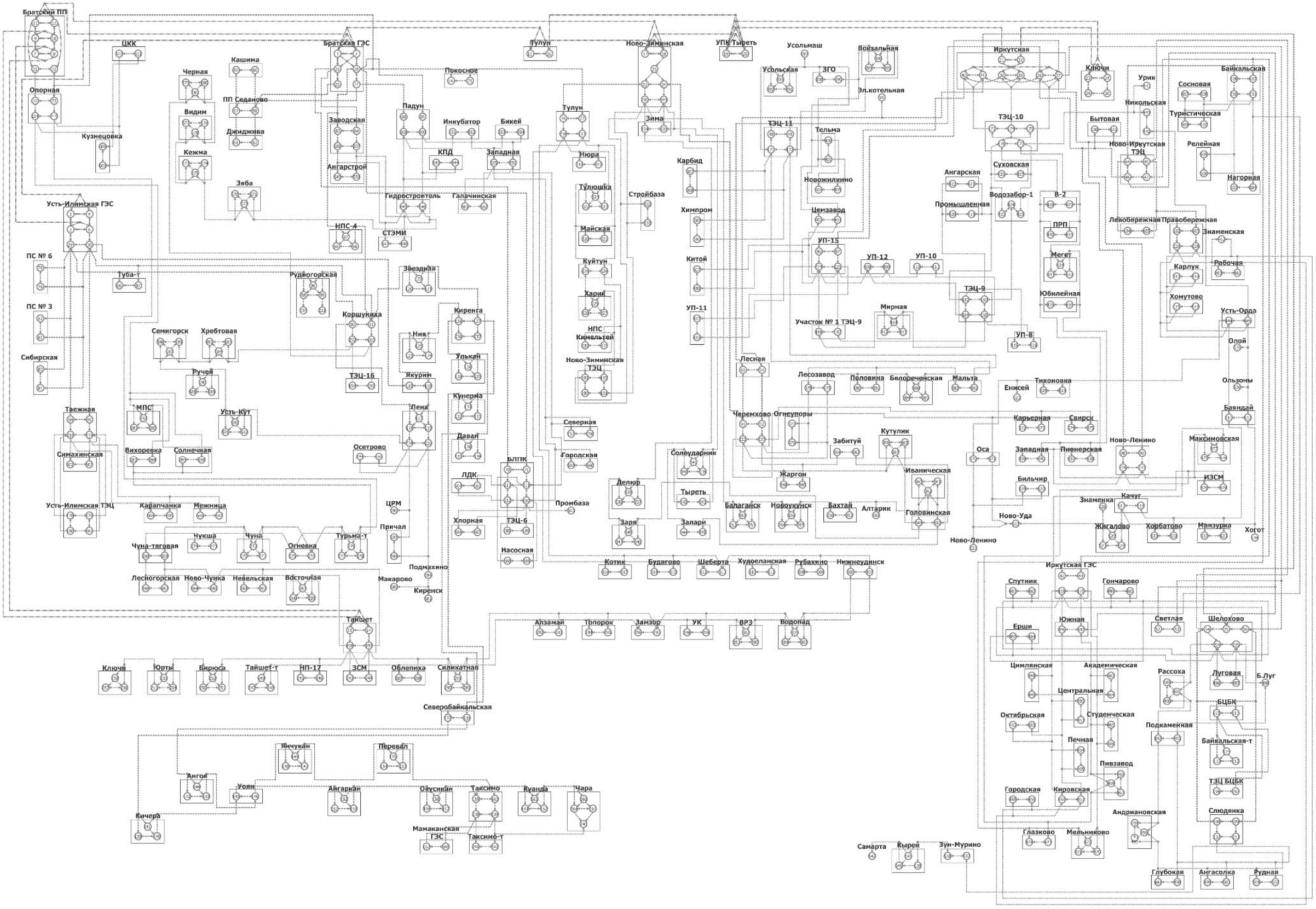


Рисунок А.12 – Ориентированный граф Иркутской СЭС

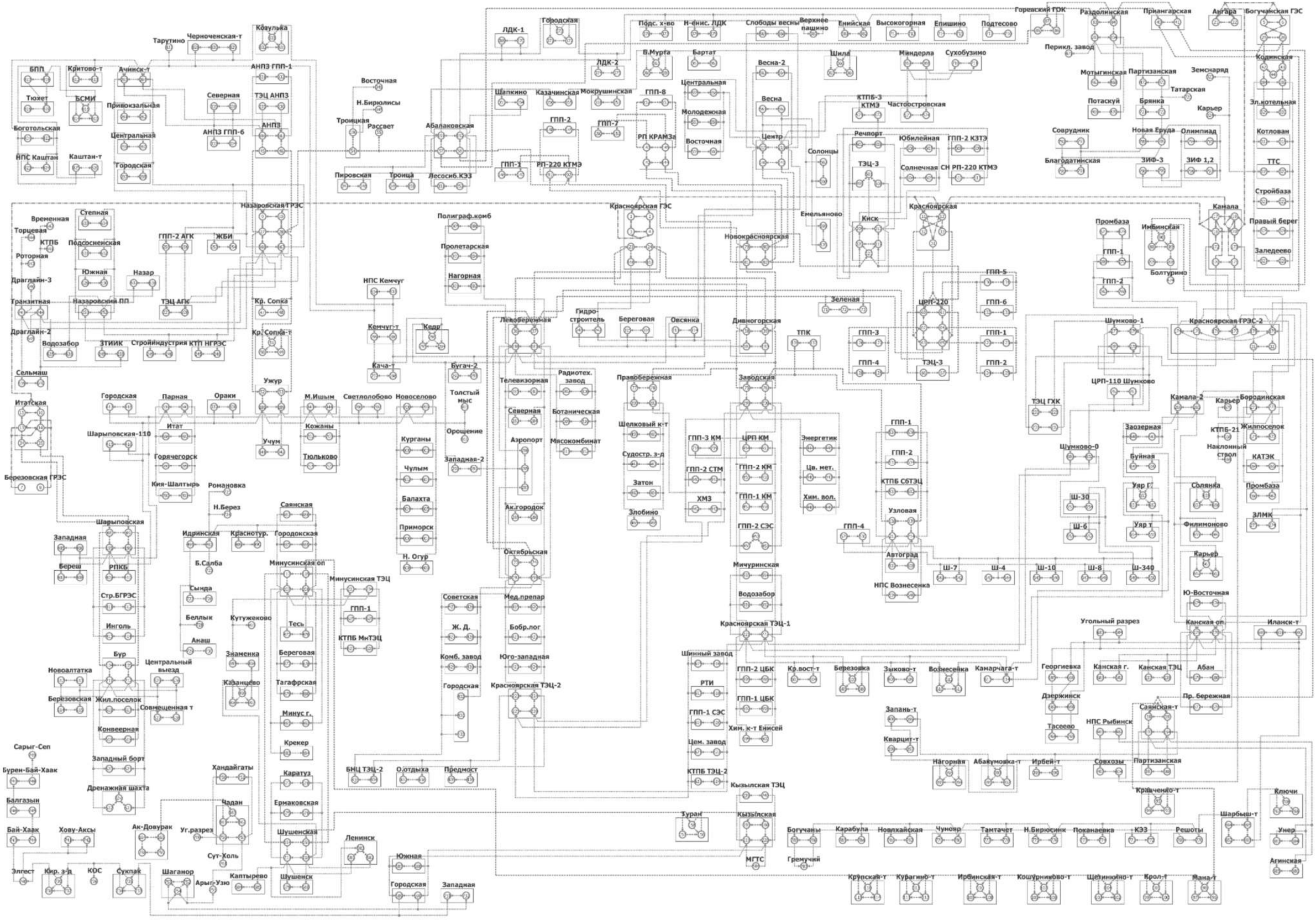


Рисунок А.13 – Ориентированный граф Красноярской СЭС

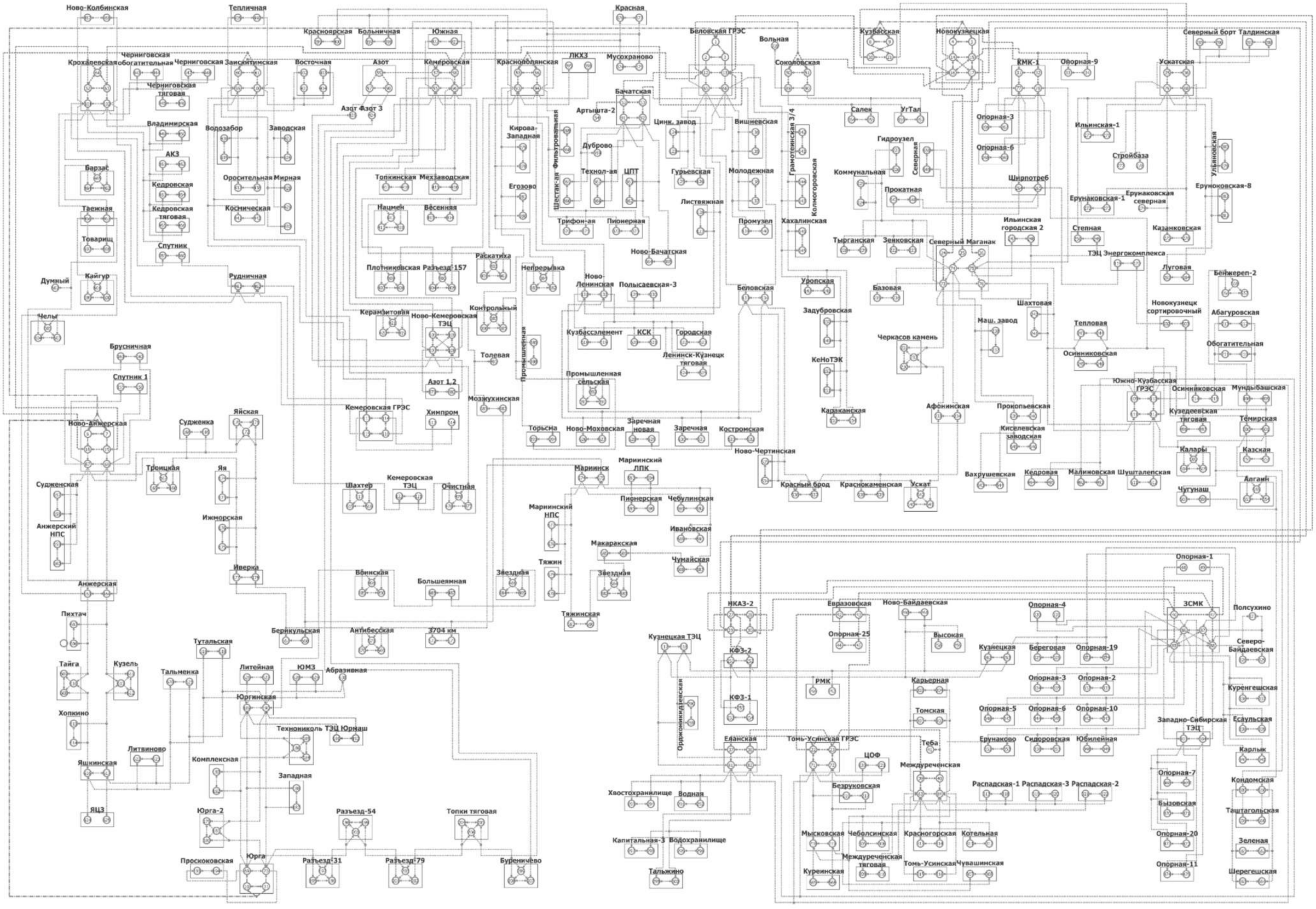


Рисунок А.14 – Ориентированный граф Кузбасской СЭС

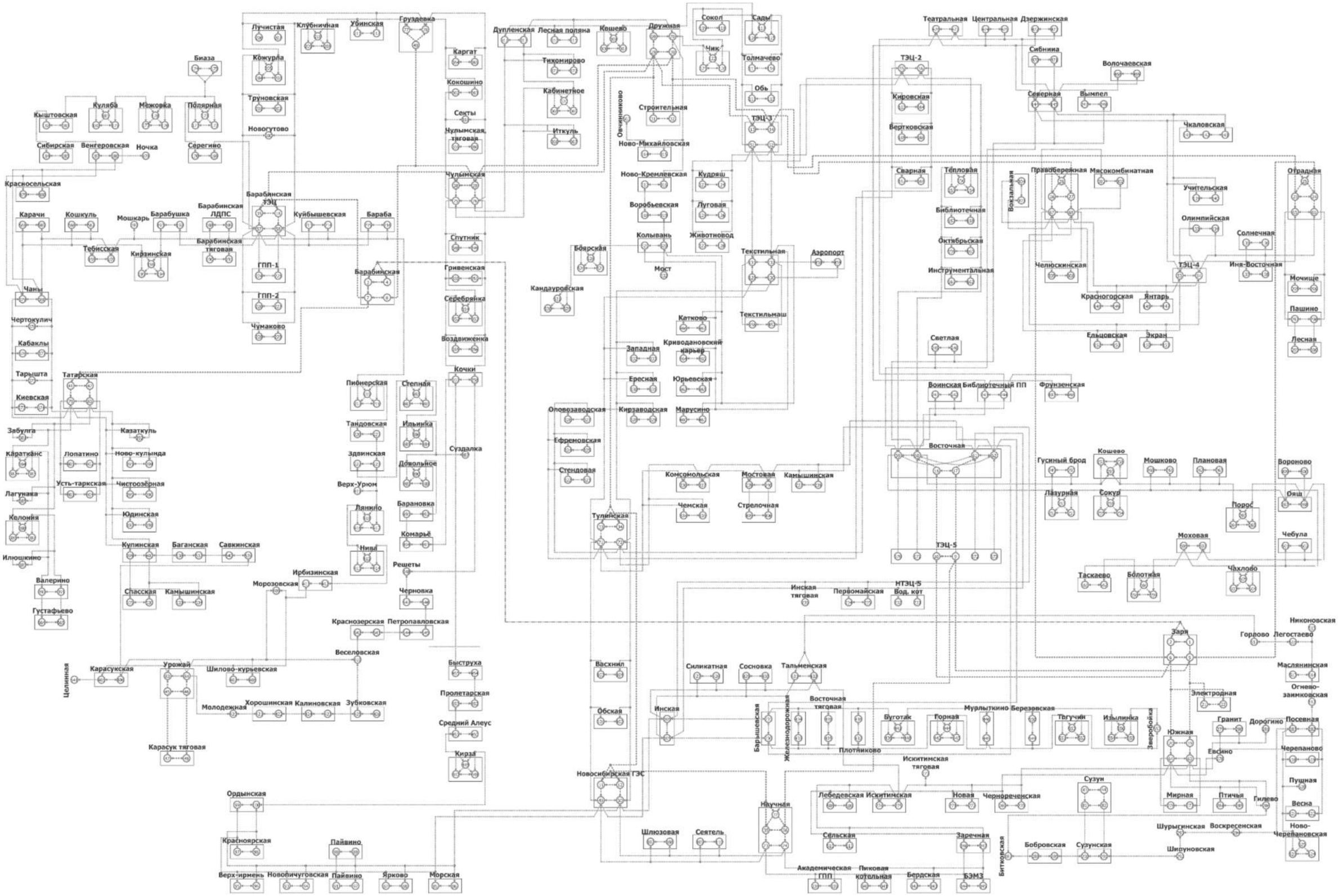


Рисунок А.15 – Ориентированный граф Новосибирской СЭС

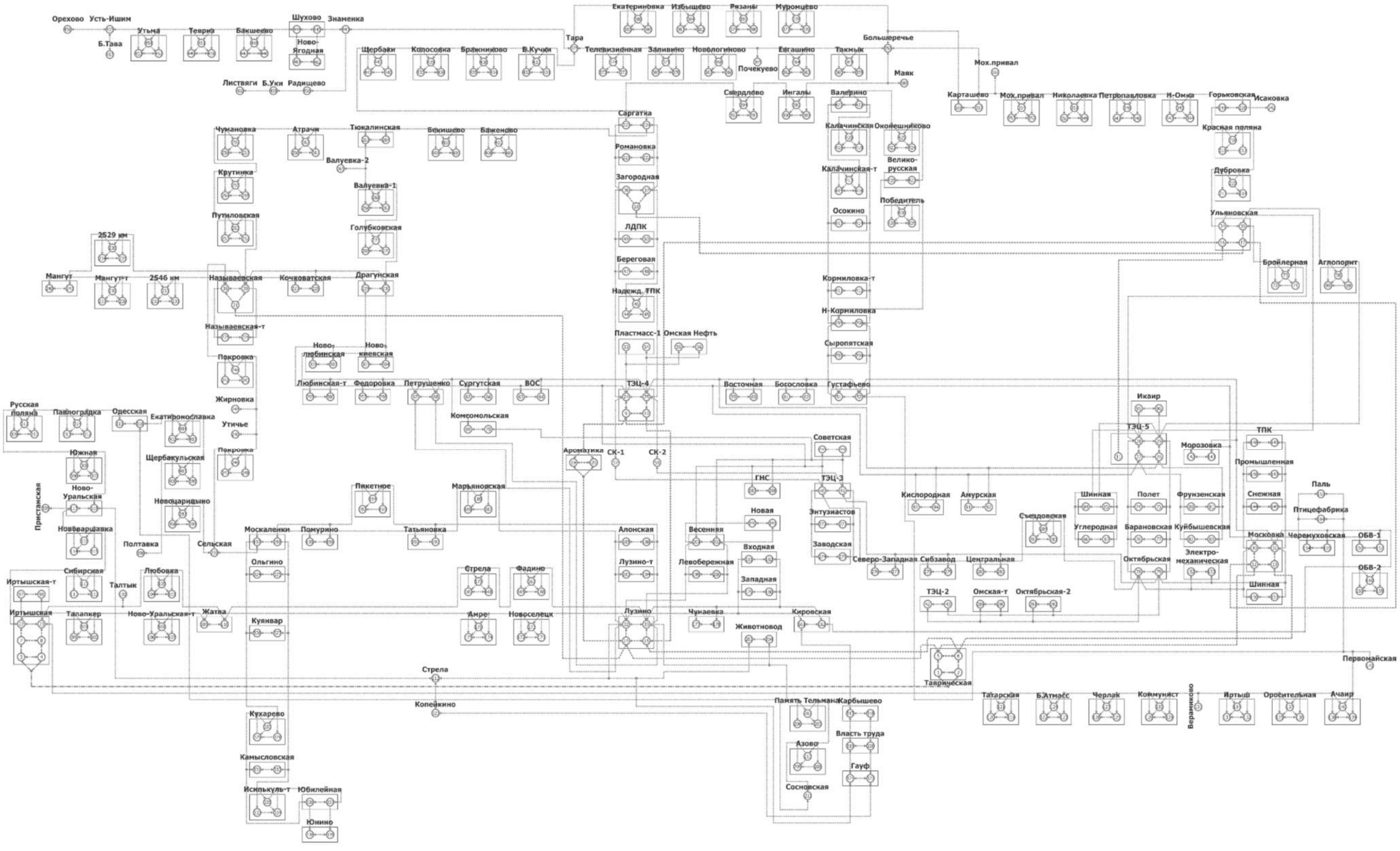


Рисунок А.16 – Ориентированный граф Омской СЭС

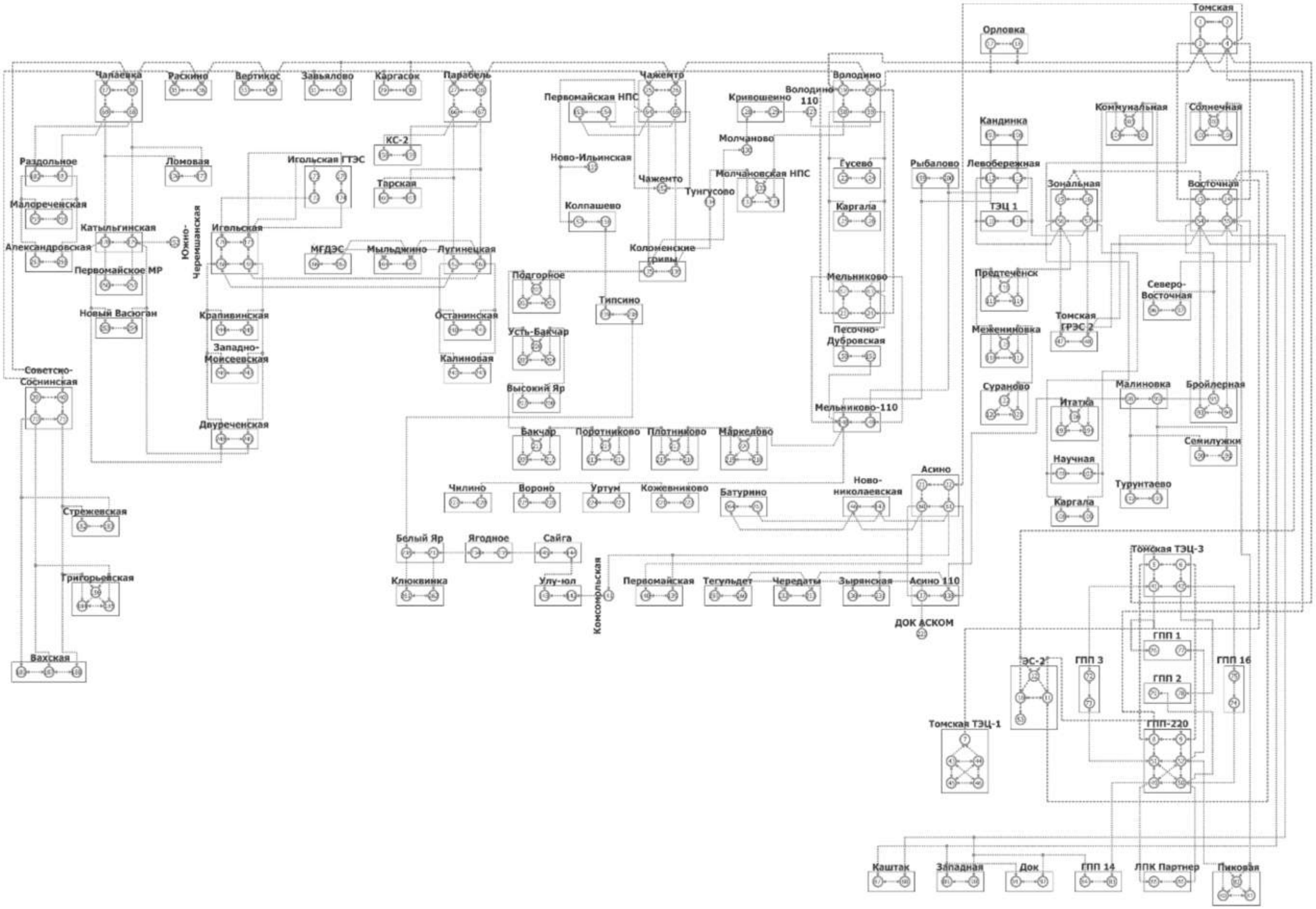


Рисунок А.17 – Ориентированный граф Томской СЭС

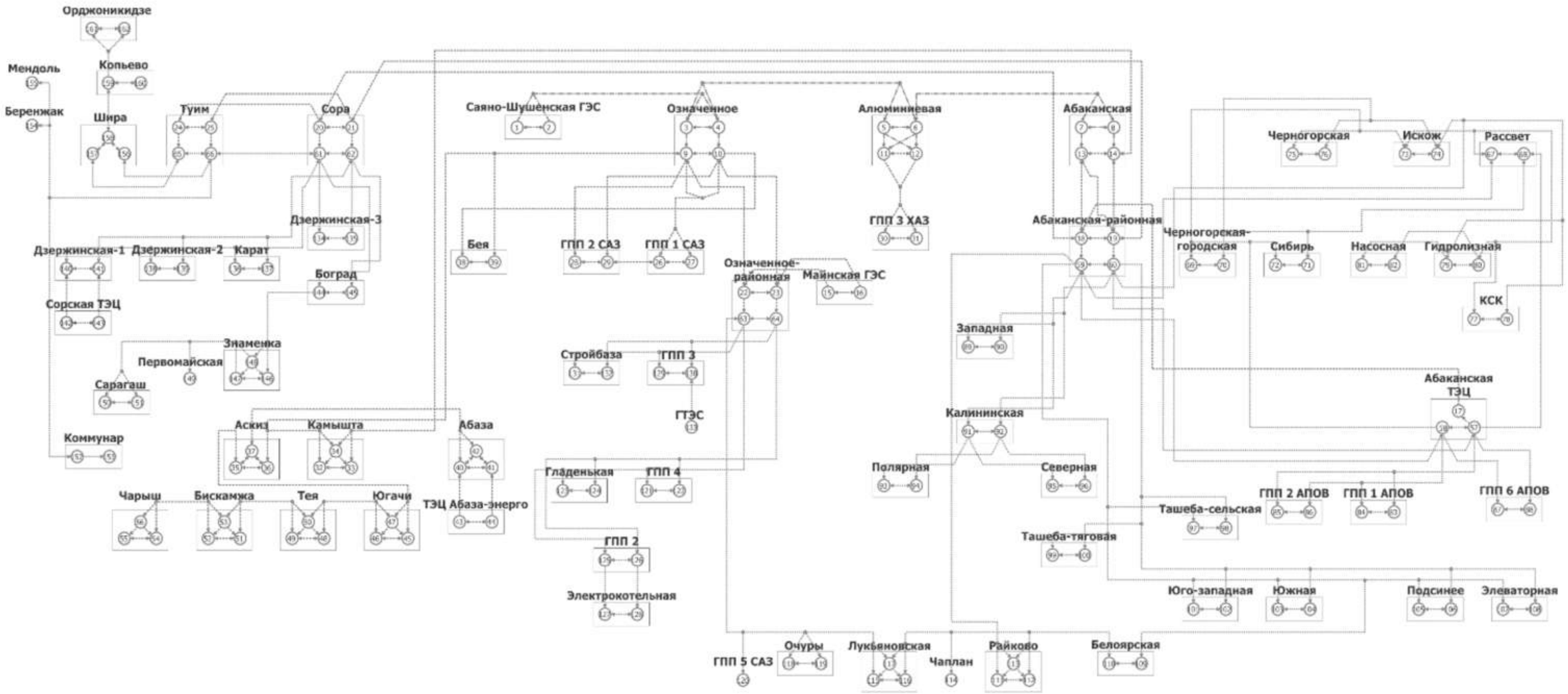


Рисунок А.18 – Ориентированный граф Хакасской СЭС

ПРИЛОЖЕНИЕ Б

Таблица Б.1

Расчет оперативного показателя района обслуживания ПС №1 (исходный вариант)

Путь	Вершины пути	Q_l	I_l	f_l	p_l	D_l, бит/с
1	2	3	4	5	6	7
Оперативные переключения коммутационных аппаратов фидерных линий конечных потребителей						
I_1	168-169 169-34	18	4,170	0,00133	0,979	0,00542
II_1	168-169 169-35	16	4,000	0,00133	0,979	0,00520
III_1	168-169 169-36	10	3,322	0,00133	0,979	0,00432
IV_1	168-169 169-37	10	3,322	0,00133	0,979	0,00432
V_1	168-169 169-53	8	3,000	0,00133	0,979	0,00390
VI_1	168-169 169-54	4	2,000	0,00133	0,979	0,00260
VII_1	168-169 169-59	6	2,585	0,00133	0,979	0,00336
VIII_1	168-169 169-60	4	2,000	0,00133	0,979	0,00260
IX_1	168-169 169-61	10	3,322	0,00133	0,979	0,00432
X_1	168-169 169-62	8	3,000	0,00133	0,979	0,00390
XI_1	168-169 169-156	2	1,000	0,00133	0,979	0,00130
XII_1	168-169 169-157	2	1,000	0,00133	0,979	0,00130
XIII_1	168-169 169-67	12	3,585	0,00133	0,979	0,00466
XIV_1	168-169 169-68	10	3,322	0,00133	0,979	0,00432
XV_1	168-169 169-158	2	1,000	0,00133	0,979	0,00130
XVI_1	168-169 169-89	6	2,585	0,00133	0,979	0,00336
XVII_1	168-169 169-90	8	3,000	0,00133	0,979	0,00390
Оперативные переключения вводных и межсекционных коммутационных аппаратов						
XVIII_1	168-169 169-34 34-35	8,667	3,115	0,00115	0,996	0,00355

Продолжение таблицы Б.1

1	2	3	4	5	6	7
XIX_1	168-169	8,667	3,115	0,00115	0,996	0,00355
	169-35					
	35-34					
XX_1	168-169	4,667	2,222	0,00115	0,996	0,00254
	169-36					
	36-38					
XXI_1	168-169	4,667	2,222	0,00115	0,996	0,00254
	169-37					
	37-38					
XXII_1	168-169	18	4,170	0,00115	0,996	0,00476
	169-38					
XXIII_1	168-169	4,5	2,170	0,00115	0,996	0,00248
	169-53					
	53-55					
	55-54					
XXIV_1	168-169	4,75	2,248	0,00115	0,996	0,00256
	169-54					
	54-55					
	55-53					
XXV_1	168-169	4	2,000	0,00115	0,996	0,00228
	169-59					
	59-60					
XXVI_1	168-169	4	2,000	0,00115	0,996	0,00228
	169-60					
	60-59					
XXVII_1	168-169	5,333	2,415	0,00115	0,996	0,00275
	169-61					
	61-62					
XXVIII_1	168-169	5,333	2,415	0,00115	0,996	0,00275
	169-62					
	62-61					
XXIX_1	168-169	2	1,000	0,00115	0,996	0,00114
	169-156					
	156-157					
XXX_1	168-169	2	1,000	0,00115	0,996	0,00114
	169-157					
	157-156					
XXXI_1	168-169	2	1,000	0,00115	0,996	0,00114
	169-157					
	157-158					
XXXII_1	168-169	2	1,000	0,00115	0,996	0,00114
	169-158					
	158-157					
XXXIII_1	168-169	6	2,585	0,00115	0,996	0,00295
	169-67					
	67-68					

Продолжение таблицы Б.1

1	2	3	4	5	6	7
XXXIV_1	168-169	6	2,585	0,00115	0,996	0,00295
	169-68					
	68-67					
XXXV_1	168-169	5,3333	2,415	0,00115	0,996	0,00275
	169-89					
	89-90					
XXXVI_1	168-169	4	2,000	0,00115	0,996	0,00228
	169-90					
	90-89					
Оперативные переключения коммутационных аппаратов резервных перемычек между ПС						
XXXVII_1	168-169	4,3333	2,115	0,00133	0,979	0,00275
	169-34					
	34-45					
XXXVIII_1	168-169	7,6667	2,939	0,00133	0,979	0,00382
	169-35					
	35-41					
XXXIX_1	168-169	3,3333	1,737	0,00133	0,979	0,00226
	169-55					
	55-152 (153)					
Послеаварийный осмотр						
XL_1	34-167	10	3,322	0,00144	0,987	0,00472
	167-168					
	168-169					
	169-34					
XLI_1	35-167	2	1,000	0,00144	0,987	0,00456
	167-168					
	168-169					
	169-35					
XLII_1	36-167	2	1,000	0,00144	0,987	0,00399
	167-168					
	168-169					
	169-36					
XLIII_1	37-167	9,25	3,209	0,00144	0,987	0,00399
	167-168					
	168-169					
	169-37					
XLIV_1	38-167	7	2,807	0,00144	0,987	0,00166
	167-168					
	168-169					
	169-38					
XLV_1	53-167	7	2,807	0,00144	0,987	0,00367
	167-168					
	168-169					
	169-53					

Продолжение таблицы Б.1

1	2	3	4	5	6	7
XLVI_1	54-167	2,25	1,170	0,00144	0,987	0,00257
	167-168					
	168-169					
	169-54					
XLVII_1	55-167	6	2,585	0,00144	0,987	0,00188
	167-168					
	168-169					
	169-55					
XLVIII_1	59-167	3,5	1,807	0,00144	0,987	0,00242
	167-168					
	168-169					
	169-59					
XLIX_1	60-167	2,5	1,322	0,00144	0,987	0,00166
	167-168					
	168-169					
	169-60					
L_1	61-167	3,25	1,700	0,00144	0,987	0,00399
	167-168					
	168-169					
	169-61					
LI_1	62-167	5,5	2,459	0,00144	0,987	0,00350
	167-168					
	168-169					
	169-62					
LII_1	156-167	2,25	1,170	0,00144	0,987	0,00166
	167-168					
	168-169					
	169-156					
LIII_1	157-167	4	2,000	0,00144	0,987	0,00284
	167-168					
	168-169					
	169-157					
LIV_1	67-167	7,5	2,907	0,00144	0,987	0,00413
	167-168					
	168-169					
	169-67					
LV_1	68-167	5,75	2,524	0,00144	0,987	0,00359
	167-168					
	168-169					
	169-68					
LVI_1	158-167	2,25	1,170	0,00144	0,987	0,00166
	167-168					
	168-169					
	169-158					
LVII_1	89-167	4,75	2,248	0,00144	0,987	0,00320
	167-168					
	168-169					
	169-89					

Продолжение таблицы Б.1

1	2	3	4	5	6	7
LVIII_1	90-167 167-168 168-169 169-90	5	2,322	0,00144	0,987	0,00330
Подготовка рабочего места и допуск бригады						
LIX_1	168-169 169-34	13	3,700	0,00050	0,495	0,00091
LX_1	168-169 169-35	11	3,459	0,00050	0,495	0,00085
LXI_1	168-169 169-36	8	3,000	0,00050	0,495	0,00074
LXII_1	168-169 169-37	8	3,000	0,00050	0,495	0,00074
LXIII_1	168-169 169-38	2	1,000	0,00050	0,495	0,00025
LXIV_1	168-169 169-53	7	2,807	0,00050	0,495	0,00069
LXV_1	168-169 169-54	4	2,000	0,00050	0,495	0,00049
LXVI_1	168-169 169-55	4	2,000	0,00050	0,495	0,00049
LXVII_1	168-169 169-59	4	2,000	0,00050	0,495	0,00049
LXVIII_1	168-169 169-60	3	1,585	0,00050	0,495	0,00039
LXIX_1	168-169 169-61	8	3,000	0,00050	0,495	0,00074
LXX_1	168-169 169-62	6	2,585	0,00050	0,495	0,00063
LXXI_1	168-169 169-156	2	1,000	0,00050	0,495	0,00025
LXXII_1	168-169 169-157	2	1,000	0,00050	0,495	0,00025
LXXIII_1	168-169 169-67	9	3,170	0,00050	0,495	0,00078
LXXIV_1	168-169 169-68	7	2,807	0,00050	0,495	0,00069
LXXV_1	168-169 169-158	2	1,000	0,00050	0,495	0,00025
LXXVI_1	168-169 169-89	6	2,585	0,00050	0,495	0,00063
LXXVII_1	168-169 169-90	6	2,585	0,00050	0,495	0,00063
ΣD_1 = 0,18633 бит/с						

ПРИЛОЖЕНИЕ В

СОГЛАСОВАНО:
Главный энергетик –
начальник управления
_____ В. В. Самойлов
«25» 06 2016 г.

УТВЕРЖДАЮ:
Главный инженер
КАО «АЗОТ»
_____ А. Н. Вишневский
«25» 06 2016 г.

РЕКОМЕНДАЦИИ

по повышению эффективности функционирования системы внутреннего электроснабжения КАО «АЗОТ»

Бесперебойная подача электроэнергии потребителям КАО «АЗОТ» обеспечивается непрерывным функционированием системы внутреннего электроснабжения, эксплуатацией которой занимаются структурные подразделения управления главного энергетика.

Сотрудниками КузГТУ (асп. Варнавский К.А., проф., д.т.н. Матвеев В.Н.) была разработана информационно-энергетическая модель системы внутреннего электроснабжения КАО «АЗОТ», учитывающая топологические свойства и особенности управляющих воздействий на энергообъекты системы. При помощи данной модели был проведен анализ структурной и оперативной информации системы внутреннего электроснабжения КАО «АЗОТ» и определен комплексный показатель, количественно характеризующий эффективность функционирования системы электроснабжения – информационный ресурс системы электроснабжения.

Проведенные расчеты показали, что в исследуемой системе электроснабжения заложены потенциально высокие возможности для повышения информационного ресурса, а при реализации предложенных сотрудниками КузГТУ мероприятий, приведенных в приложении, возможно добиться увеличения информационного ресурса системы внутреннего электроснабжения КАО «АЗОТ»

на 20%, что позволит:

- повысить надежность электроснабжения потребителей КАО «АЗОТ»;
- ускорить процесс оперативного управления силовым коммутационным оборудованием системы электроснабжения;
- повысить производственную дисциплину и снизить вероятность нарушения электротехническим персоналом требований ПОТЭЭ при проведении эксплуатационных операции;
- уменьшить затраты на оперативное управление системой электроснабжения КАО «АЗОТ».

Профессор кафедры «Горные машины и комплексы» КузГТУ — В.Н. Матвеев

Аспирант кафедры «Горные машины и комплексы» КузГТУ — К.А. Варнавский

ПРИЛОЖЕНИЕ

Электроснабжение потребителей КАО «АЗОТ» осуществляется по кабельным линиям 6 кВ через распределительные подстанции (ПС), которые запитаны от трех главных понижающих ПС (ГПП) 110/6 кВ («Азот-1,2», «Азот-3», «Азот-4»), а также от генераторного распределительного устройства 6 кВ Ново-Кемеровской ТЭЦ. Питание ГПП происходит по воздушным линиям 110 кВ от ПС «Азот-220» и от Ново-Кемеровской ТЭЦ. Круглосуточное оперативное управление системой осуществляется дежурными электромонтерами девяти районов обслуживания под общим руководством начальника смены.

Для определения информационного ресурса системы внутреннего электроснабжения КАО «АЗОТ» на основе принципиальной схемы электроснабжения потребителей, характеризующей структурную информацию системы, была построена информационно-энергетическая модель, состоящая из девяти частей (по количеству районов обслуживания). Помимо структурной информации в модели отражены пути движения оперативной информации при выполнении персоналом следующих эксплуатационных операций: оперативные переключения силовых коммутационных аппаратов ПС, выполнение послеаварийных осмотров, подготовка рабочих мест и допуск ремонтных бригад. За возможные состояния элементов в путях были приняты следующие: включенные, нормально и аварийно отключенные положения силовых коммутационных аппаратов; прием сигналов о положении силовых коммутационных аппаратов, а также о возникновении аварийных отключений; информационный обмен между дежурными электромонтерами и начальником смены; исполнение дежурными электромонтерами полученных команд. Информационный ресурс существующей системы внутреннего электроснабжения КАО «АЗОТ» составил R = 11,389 бит/с.

Для повышения информационного ресурса системы предложены следующие мероприятия, оказывающие положительное воздействие на структурную и оперативную информацию системы внутреннего электроснабжения КАО «АЗОТ»:

1. для увеличения количества структурной информации и улучшения топологических свойств системы предложено к установке три резервных перемычки между отдельными цеховыми ПС: между ПС №160 и ПС №7, между ПС №132 и ПС №175, между ПС №175 и ПС №172;

2. для увеличения информационной насыщенности, качественно и количественно характеризующей оперативную информацию системы, предложено уменьшить количество районов обслуживания до шести, путем объединения следующих районов: районов ПС №1 и ПС №6; районов ПС №5 и ПС №80, а

также двух ПС (№47 и №55) района ГПП «Азот-1,2»; районов ПС №39 и ПС №132, а также двух ПС (№163 и №179) района ГПП «Азот-3,4». В связи с увеличившимися расстояниями между обслуживаемыми ПС оперативному персоналу полученных укрупненных районов потребуются транспортные средства для перемещения между ними. Кроме того, предлагается использование оперативным персоналом мобильных видеорегистраторов для записи производимых эксплуатационных операций, что будет способствовать снижению вероятности ошибочных действий и повышению производственной дисциплины.

Проведенный расчет показал, что при реализации предложенных мероприятий по совершенствованию системы внутреннего электроснабжения КАО «АЗОТ» информационный ресурс системы увеличится на 20,01 % и составит R =13,668 бит/с.

Грант

в размере 30 000 руб.

в области энергоэффективности
и энергосбережения

вручается

Варнавскому
Кириллу Александровичу

аспиранту кафедры ГМиК

Вице-президент
по угольной отрасли
ЗАО ХК «СДС» –
Управляющий директор
ОАО ХК «СДС-Уголь»

Ю.С. Дерябин