

На правах рукописи



КИРИЛИН ИВАН ВИКТОРОВИЧ

**КЛАССИФИКАЦИЯ СОСТОЯНИЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЕЙ ПРОМЫШЛЕННЫХ
ПРЕДПРИЯТИЙ ДЛЯ УПРАВЛЕНИЯ КОМПЕНСАЦИЕЙ РЕАКТИВНОЙ
МОЩНОСТИ**

Специальность 05.14.02 – Электрические станции и электроэнергетические системы

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Красноярск 2011

Работа выполнена в Федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Сибирский федеральный университет», г. Красноярск

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор
Пантелеев Василий Иванович

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор
Христинич Роман Мирославович

кандидат технических наук, доцент
Бастрон Андрей Владимирович

Ведущая организация: Управление главного энергетика
Заполярный филиал ОАО «ГМК
«Норильский никель»

Защита состоится «22» июня 2011 г. в 16 часов на заседании диссертационного совета ДМ 212.099.07 при Сибирском федеральном университете по адресу: г. Красноярск, ул. Ленина, 70, ауд. А 204.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Сибирского федерального университета, по адресу г. Красноярск, пр.Свободный, 79.

Автореферат разослан «22» мая 2011 г.

Ученый секретарь диссертационного совета



Т.М. Чупак

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Главная задача электрической системы состоит в своевременном обеспечении основного и вспомогательных технологических процессов требуемым количеством электрической энергии заданного качества при минимальных потерях электроэнергии во всех элементах сети электроснабжения. За предшествующее десятилетие суммарные потери в энергосистемах России выросли и в абсолютном значении с 79 до 103 млрд. кВт·ч, и в процентах относительно общего отпуска электроэнергии в сеть с 8,5 до 13%, хотя потребление энергии уменьшилось в 1,34 раза. Анализ материалов Тематического селекторного совещания ОАО РАО «ЕЭС России» 22.11.2006 года «Решение проблем и задач по нормализации потоков реактивной мощности и уровней напряжения в распределительных электрических сетях» показывает, что практически для всех энергосистем ЕЭС России характерна работа распределительных сетей с низким значением коэффициента мощности.

Электрические станции изолированной Норильской энергосистемы, суммарной установленной мощностью 2491 МВт, питающие электроприемники Никелевого (22%), Медного (7%), Надеждинского металлургического (23%) заводов, а та же Норильской и Талнахской обогатительных фабрик (8%), работают с коэффициентами мощности, находящимися в пределах 0,7–0,9. В частности, среднесуточные значения коэффициентов мощности Талнахской обогатительной фабрики (ТОФ) составляют 0,602 – 0,834.

До сих пор одним из наиболее эффективных способов повышения качества электроэнергии (КЭ), а также снижения потерь в питающей и распределительной сетях систем электроснабжения промышленных предприятий (ЭСПП) является компенсация реактивной мощности (КРМ), суть которой заключается в повышении коэффициента мощности за счет использования локальных источников реактивной мощности (ИРМ), устанавливаемых в распределительных узлах и узлах нагрузки.

Повышенное потребление реактивной мощности электроприемниками промышленных предприятий является естественным процессом из-за наличия в ЭСПП большого количества ступеней трансформации напряжения и низких номинальных значений коэффициентов мощности (0,75–0,9) асинхронных электродвигателей. Суммарные значения потерь реактивной мощности в элементах сети весьма велики и достигают 50% мощности, поступающей в сеть. Примерно 70–75% из них составляют потери в трансформаторах различных ступеней напряжения. До 70% всей потребляемой промышленными предприятиями реактивной мощности приходится на долю асинхронных электродвигателей, хотя их суммарная

мощность составляет менее половины всей мощности нагрузки. Следовательно, без компенсации и регулирования потоков реактивной мощности в узлах промышленной нагрузки существенное снижение потерь практически невозможно.

Известно, что синхронные генераторы электростанций путем изменения тока возбуждения обеспечивают и регулируют баланс реактивной мощности. Увеличение реактивной мощности сверх номинальной может быть допущено в пределах, ограничиваемых номинальными токами статора и ротора. Работа генераторов с активной мощностью, выше номинальной также возможна, если турбина допускает длительные перегрузки. Однако полная мощность генератора при этом должна оставаться номинальной, а реактивная, следовательно, снижена за счет уменьшения тока возбуждения. Такой режим соответствует увеличению коэффициента мощности и приводит к уменьшению запаса статической устойчивости генератора.

Кроме генераторов электростанций баланс реактивной мощности обеспечивается синхронными компенсаторами (СК) и электродвигателями ЭСПП, батареями конденсаторов и статическими вентильными компенсаторами. Синхронные компенсаторы и двигатели (СД) могут генерировать и потреблять реактивную мощность (РМ), что задается системой их возбуждения в соответствии с U-образными характеристиками.

Батареи конденсаторов (БК) в силу своих физических свойств при потреблении незначительной величины активной мощности, являются практически идеальными экономичными источниками РМ. Однако реактивная мощность БК существенно зависит от напряжения U в узле нагрузки ($Q_{БК} = \omega CU^2$). Следствием этого является отрицательный регулирующий эффект батарей конденсаторов, т.е. при уменьшении напряжения в сети они снижают выдаваемую реактивную мощность, что приводит к еще большему снижению напряжения. К недостаткам БК можно отнести также ступенчатость регулирования их мощности и аварийность при наличии в сети гармоник высшего порядка.

Наиболее целесообразно для компенсации реактивной мощности в ЭСПП с незначительной долей электроприемников нелинейного характера использовать комбинацию из таких источников реактивной мощности, как СД и БК, *позволяющих изменять характер нагрузки*. Для достижения наибольшего эффекта от компенсации РМ в сетях промышленных предприятий, необходима разработка системы управления всеми возможными ИРМ с учетом их технических ограничений и экономической целесообразности. Поскольку в процессе функционирования изменяются характер и структура связей между отдельными элементами электрической системы и параметрами ее режима (происходит смена состояний), то для управления сложными объектами необходима система централизованного и адаптивного

управления. Такая система управления должна учитывать многообразие состояний электрических сетей и быть способной для произвольного периода времени обеспечить автоматическое получение информации о текущем режиме РМ и принятие решений по регулированию компенсирующих устройств, построенная на основе, например, принципов ситуационного управления (СУ).

Объект исследования: электрические сети промышленных предприятий.

Предмет исследования: распознавание и классификация состояний электрических сетей промышленных предприятий.

Целью диссертационной работы является разработка и применение методик и алгоритмов классификации состояний ЭСПП для решения задач управления РМ, как одних из наиболее актуальных в области повышения эффективности электропотребления.

Задачи исследования. Для достижения поставленной цели в работе решены следующие задачи:

1. Анализ текущего состояния проблемы регулирования режимов реактивной мощности и обоснование возможности применения для этого принципов ситуационного управления.

2. Синтез методики управления режимом реактивной мощности с учетом технико-экономических характеристик локальных ИРМ и многообразия состояний ЭСПП (разработка рекомендаций по регулирующим воздействиям), включающий:

- выбор метода классификации состояний ЭСПП и составление рабочего словаря признаков сложной многоуровневой системы распознавания образов;

- разработку алгоритма ситуационного управления, осуществляющего процессы: формирования многомерного вектора признаков состояний ЭСПП; разбиения множества возможных ситуаций ЭСПП на классы; отнесения текущей ситуации объекта к соответствующим классам с помощью решающих функций, описывающих границы кластеров;

- создание имитационной модели многоступенчатой радиальной системы электроснабжения, позволяющей воспроизводить различные состояния ЭСПП с учетом изменения напряжения питающей сети и регулирующего эффекта нагрузки;

- разработку алгоритма автоматической классификации и формирования решающих функций, основанных на анализе статических характеристик УН.

3. Выполнение экспериментальных исследований по классификации состояний электрической системы Талнахской обогатительной фабрики при управлении КРМ.

Методы исследований определялись поставленными задачами и основывались на математических моделях электромагнитных и электромеханических процессов в системах электроснабжения и электрических машинах, а также методах математического программирования. Математическое моделирование состояний электрических сетей в производилось в средах MatLab 7.0, Delphi 7.0 и MatCad 10. Классификация состояний ЭСПП была осуществлена в программах COMPACT 2.0 и пакете Simulink среды MatLab 7.0.

Научная новизна работы заключается:

1. В обосновании целесообразности использования принципов ситуационного управления параметрами режимов электропотребления промышленных предприятий при КРМ в узлах нагрузки.

2. В синтезированной методике управления режимом реактивной мощности с учетом технических (включая устойчивость) и экономических характеристик локальных ИРМ и многообразия состояний ЭСПП (т.е. в разработке рекомендаций по регулирующим воздействиям), включающей:

- выбор метода классификации состояний ЭСПП и составление рабочего словаря признаков сложной многоуровневой системы распознавания образов;

- алгоритм ситуационного управления, осуществляющего процессы: формирования многомерного вектора признаков состояний ЭСПП; разбиения множества возможных ситуаций ЭСПП на классы; отнесения текущей ситуации объекта к соответствующим классам с помощью решающих функций, описывающих границы кластеров;

- имитационную модель многоступенчатой радиальной системы электроснабжения, разработанную в программной среде Delphi 7.0, позволяющую воспроизводить различные состояния ЭСПП с учетом изменения напряжения питающей сети и регулирующего эффекта нагрузки;

- алгоритм автоматической классификации и формирования решающих функций, основанный на анализе статических характеристик УН.

Практическая значимость:

1. Созданный алгоритм управления потреблением реактивной мощности промышленных предприятий позволяет осуществить выбор рациональных ИРМ исходя из условий обеспечения требуемого энергосистемой коэффициента реактивной мощности, минимума потерь во всех элементах энергосистемы и устойчивости узла нагрузки.

2. Предложенный алгоритм ситуационного управления позволяет осуществлять регулирование параметров режима электропотребления в реальном времени.

3. Предложенная математическая модель потребления электроприемниками промышленного предприятия активной и реактивной мощности с учетом регулирующего эффекта нагрузки позволяет производить анализ и прогноз расхода электроэнергии на производстве, проверку рациональности текущего режима КРМ.

4. Разработанный алгоритм автоматической классификации и формирования решающих функций позволяет получить для каждой топологии сети наиболее целесообразное количество кластеров, определяемое шагом регулирования по напряжению и коэффициенту реактивной мощности.

На защиту выносятся:

1. Алгоритм СУ компенсацией реактивной мощности, позволяющий формировать множество классов возможных ситуаций ЭСПП и на основании многомерного вектора признаков текущего состояния схемы электроснабжения с помощью решающих функций.

2. Имитационная модель многоступенчатой радиальной системы электроснабжения, позволяющая воспроизводить различные состояния ЭСПП с учетом изменения напряжения питающей сети и регулирующего эффекта нагрузки для формирования базы схемных и режимных признаков.

3. Результаты анализа методов классификации и алгоритм классификации, основанный на использовании кластерного анализа для распознавания состояний электрических систем промышленных предприятий и формировании решающих функций.

4. Результаты экспериментальных исследований классификации состояний электрической системы Талнахской обогатительной фабрики при управлении КРМ.

Апробация работы. Материал диссертации в целом и отдельные ее вопросы докладывались автором и обсуждались на научных семинарах Сибирского федерального университета (г.Красноярск) и Норильского индустриального института (г. Норильск), в частности:

1) Всероссийской научно-технической конференции «Электроэнергия: от получения и распределения до эффективного использования»; г. Томск: Томский политехнический университет, 2008;

2) 10-й Всероссийской научно-практической конференции «Энергоэффективность систем жизнеобеспечения города»; г. Красноярск: Сибирский Федеральный университет, 2008;

3) Всероссийской научно-технической конференции «Электроэнергия: от получения и распределения до эффективного использования», г. Томск: Национальный исследовательский Томский политехнический университет, 2010;

4) III-й Региональной научной конференции «Научный потенциал Норильского промышленного района – XXI век», г. Норильск: Норильский индустриальный институт, 2011.

Публикации. По теме диссертации опубликовано 13 печатных работ, в том числе 2 в изданиях по перечню ВАК.

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав и заключения, изложенных на 173 страницах печатного текста, содержит 47 рисунков, 10 таблиц, 30 страниц приложения. Список используемой литературы состоит из 138 наименований работ отечественных и зарубежных авторов.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертационного исследования для электрических сетей горноперерабатывающей промышленности цветной металлургии; сформулированы основная идея, цель и задачи исследования; краткое содержание работы; указаны авторы научных исследований, внесших значительный вклад в развитие принципов ситуационного управления и методов классификации; приведены научная новизна и практическая ценность полученных результатов работы, отражены вопросы их реализации и апробации.

В первой главе приведен анализ литературных источников по теме исследований, подтверждена актуальность проблемы рядом нормативно-правовых правительственных распоряжений, изложена суть процесса компенсации реактивной мощности в схемах электроснабжения промышленных предприятий и произведен анализ средств управления потоками реактивной мощности (РМ).

Необходимость совершенствования управления потоками РМ обусловлена, прежде всего, требованиями снижения потерь при генерации и транспортировке электроэнергии. Кроме того, баланс реактивной мощности в любой энергосистеме обеспечивает стабильность одного из основных показателей качества электроэнергии – напряжения, и, в конечном итоге гарантирует устойчивость как электроприемников узлов нагрузки, так и генераторов электростанций.

Для разработки стратегии управления реактивной мощностью в узлах нагрузки промышленных предприятий необходим выбор наиболее эффективных с точки зрения технико-экономических показателей источников реактивной мощности, анализ характерных схем, состава электроприемников и режимов их работы. Для реализации разработанной стратегии необходима система адаптивного управления, учитывающая многообразие состояний исследуемого объекта и позволяющая в режиме реального времени поддерживать требуемые значения уровней напряжения и заданного значения коэффициента реактивной мощности.

В последнее время для решения задач управления объектами подобного рода широкое применение нашли методы и алгоритмы ситуационного управления, базирующиеся на теории распознавания образов.

Практическое осуществление принципа ситуационного управления производится после получения выборки из множества возможных состояний (ситуаций S_i) электрической системы промышленного предприятия и решения задач идентификации, оптимизации и классификации состояний ЭСПП.

Если предположить, что в распоряжении системы имеется n различных способов воздействия U_K на объект управления, то элементарный акт управления можно представить в виде

$$S_i ; Q_j \xrightarrow{U_K} Q_l,$$

т.е., если на объекте управления сложилась ситуация Q_j , а состояние объекта и системы управления, определяемые S_i , допускают использование воздействия U_K , то оно применяется и текущая ситуация Q_j переходит в новое состояние – Q_l .

Реализация ситуационного управления в режиме реального времени возможна, в основном, благодаря процессу классификации из-за того, что каждому из классов, еще на стадии их формирования, предлагается одно или ряд решений по управлению.

Сущность процесса классификации заключается, в установлении правил отнесения объекта к одной или нескольким группам (категориям, классам) на основании измерения некоторого числа его характеристик (признаков) и описания классов.

Классификация также может производиться с использованием одновременно нескольких обобщенных признаков (интегрального показателя), функционально зависящих от ряда исходных признаков.

В последнее время для анализа сложных многомерных систем широкое применение получили методы автоматической классификации, такие как кластерный анализ и численная таксономия, именуемые в совокупности методами распознавания образов.

Однако при решении задач автоматической классификации значительно усложняется математический аппарат, используемый, в частности, для снижения размерности описания объекта, так как сложность объекта и глубина анализа его признаков прямо пропорциональны размерности информационного поля.

Во второй главе произведен синтез методики управления режимом реактивной мощности с учетом многообразия состояний ЭСПП, технических возможностей и экономических характеристик генерации реактивной мощности синхронными двигателями и батареями конденсаторов, представленный в виде алгоритма (рис. 1)

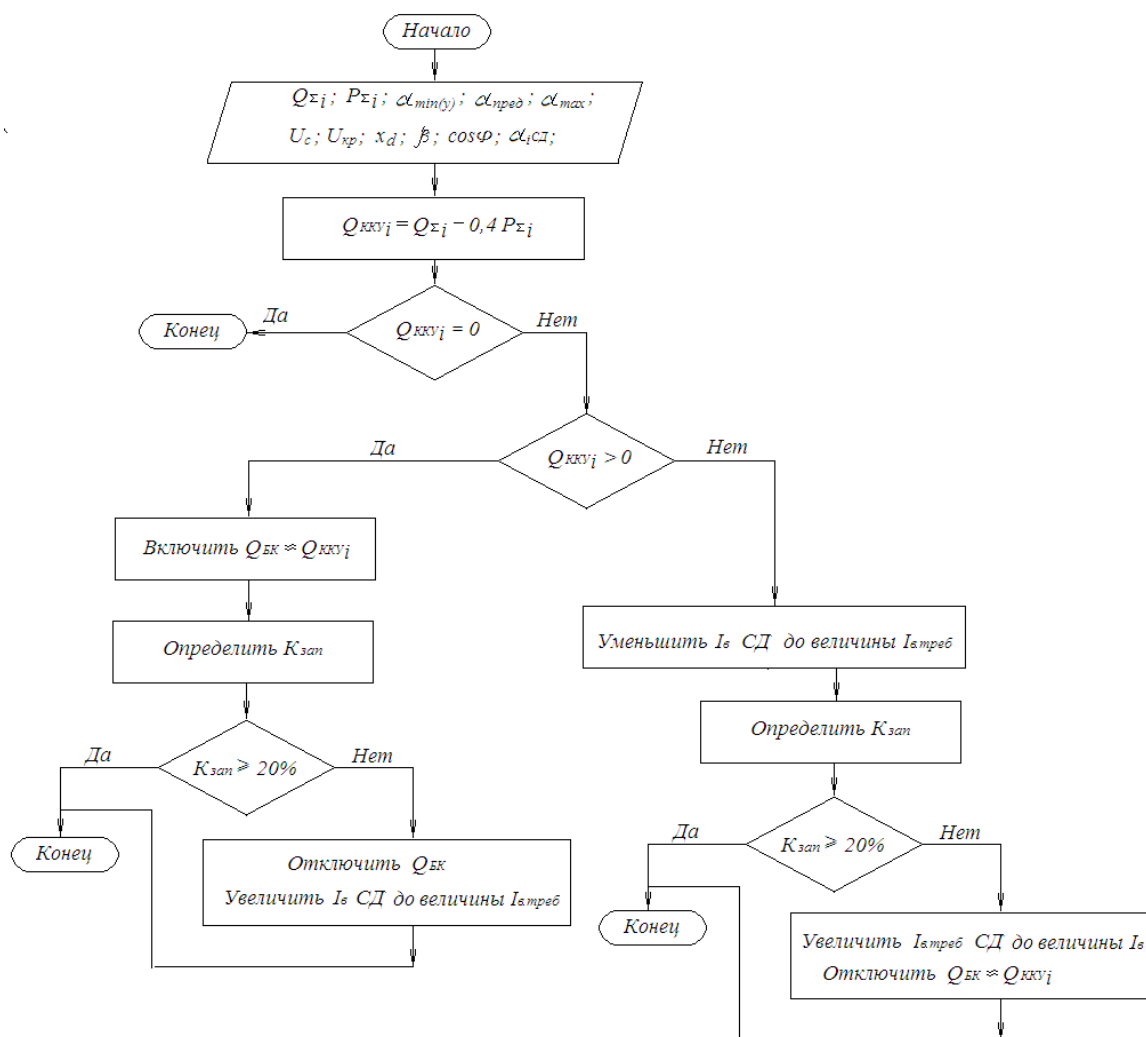


Рис. 1. Алгоритм управления КРМ УН

Согласно предложенному алгоритму процесс управления компенсацией реактивной мощности можно интерпретировать следующим образом:

1. Так как значения естественного коэффициента реактивной мощности в сетях до 1 кВ, как правило, обусловленные номинальными параметрами низковольтных АД (усугубляемыми их эксплуатацией с недогрузкой и при напряжениях, отличных от номинальных), а также большой протяженностью этих сетей, находятся в пределах $tg\varphi_{0,4кВ}=0,55\div 0,65$, то необходимость компенсации реактивной мощности в сетях 0,4 кВ обусловлена, как минимум, потребностью снижения потерь в ее кабельных линиях и трансформаторах.

Нормативными документами установлена величина требуемого коэффициента реактивной мощности в сети 0,4 кВ, равная 0,35. Для этого по характерным суточным графикам нагрузки 0,4 кВ необходимо для каждой i -той ступени определить значение мощности $BK_{0,4кВ}$ по формуле

$$Q_{BK_{i} \text{ расч.}} = P_i \cdot tg\varphi_i - P_i \cdot tg\varphi_{треб} = Q_{до КРМ} - Q_{после КРМ}, \text{ Мвар}$$

где P_i – активная мощность на шинах 0,4 кВ трансформатора каждой ступени суточного графика нагрузки, МВт; $tg\varphi_i$ – естественный коэффициент реактивной мощности той же ступени графика; $tg\varphi_{треб}$ – требуемое значение коэффициента реактивной мощности. Руководствуясь суммарным максимальным и минимальным расчетным значением мощности $BK_{0,4кВ}$ и количеством характерных ступеней графика нагрузки 0,4 кВ (с учетом $tg\varphi$ каждой ступени), следует принять к установке такое количество самих БК и секций в них, чтобы иметь возможность их переключением обеспечить требуемое значение $tg\varphi_{треб}$ (или близкое к нему значение) в течение суток.

2. В результате текущего контроля уровней напряжения и значений $tg\varphi$ на шинах 0,4 кВ цеховых трансформаторов следует разработать независимую от сетей 6-10 кВ локальную систему регулирования емкости $BK_{0,4кВ}$. Это значительно упростит систему управления КРМ УН. Причем, если в системе управления компенсацией реактивной мощности в сети 0,4 кВ произойдет сбой, выраженный завышенным, либо заниженным значением $tg\varphi$, то последствия этого сбоя будут компенсированы в сети 6-10 кВ. Сигнал же о повреждении, обусловленный значительным отклонением $tg\varphi$ в данной точке от заданного значения должен подаваться в качестве априорной информации на первую ступень системы классификации, т.е. будет учтен при формировании классов состояний объекта.

3. В результате текущего контроля уровней напряжения и значений $tg\varphi$ всех ветвей сети 6-10 кВ и в месте подключения УН к питающей системе требуется регулировать величину и знак отклонения указанных параметров. При этом если требуется понизить $tg\varphi$, то

необходимо будет подключить дополнительную секцию батарей конденсаторов 6-10 кВ (как наиболее экономичный источник реактивной мощности по сравнению СД).

Если излишек понижения $tg\varphi$ приведет к нарушению устойчивости нагрузки 6-10 кВ или не удовлетворит требованиям энергосистемы (по причине возможности нарушения устойчивости генераторов электростанций), то от такой КРМ следует отказаться и регулировать реактивную мощность с помощью СД.

Если же данная ступень регулирования РМ с помощью БК удовлетворяет потребностям системы управления, тогда следует осуществить проверку сохранения устойчивости УН. Если критерии устойчивости удовлетворяют требованиям сохранения устойчивости узла нагрузки, то принимается решение о продолжении ее действия.

Если появляется риск нарушения устойчивости, СУ должна принять решение по отмене этого действия и заменить включение дополнительной секции БК увеличением тока возбуждения одного из СД, технико-экономические характеристики которого на данный момент времени предпочтительнее.

При возникновении необходимости повышения $tg\varphi$, следует снизить ток возбуждения включенных в данный момент времени СД, причем сначала того из них, который имеет наибольшие потери на генерацию РМ. При этом необходимо следить за сохранением устойчивости данного двигателя.

Недостаточное увеличение $tg\varphi$ указанным способом можно исправить снижением тока возбуждения и всех остальных подключенных к сети СД в приоритетном порядке значения потерь, и лишь в последнюю очередь прибегать к отключению отдельных секций БК.

Для вычисления требуемой для генерации реактивной мощности синхронными двигателями, путем изменения тока возбуждения, необходимо использовать зависимость между следующими его параметрами по формуле

$$I_{в.треб} = \sqrt{\frac{1 + \beta^2 \cdot x_d^2 \cdot \cos^2 \varphi_{ном} + \alpha_{треб}^2 \cdot x_d^2 \cdot \sin^2 \varphi_{ном} + 2\alpha_{треб} \cdot x_d \cdot \sin \varphi_{ном}}{1 + x_d^2 + 2x_d^2 \cdot \sin \varphi_{ном}}}$$

где $\alpha_{треб}$ – относительное значение требуемой от синхронного двигателя реактивной мощности, о.е; x_d – сопротивление СД по продольной оси полюсов соответствующее насыщению магнитной цепи при холостом ходе и номинальном напряжении статора, о.е; β – относительная нагрузка статора по активной мощности, о.е; $\cos\varphi$ – номинальное значение коэффициента мощности двигателя.

В третьей главе произведен анализ основных этапов построения систем распознавания, который показал, что в первом приближении все методы можно разделить на простые и

сложные в зависимости от того, физически однородная или неоднородная информация используется для описания объекта управления. К простым можно отнести распознающие устройства, в которых признаки рабочего словаря представляют собой лишь те или иные линейные размеры распознаваемых объектов, а к сложным - у которых признаки рабочего словаря имеют различную физическую природу. Простые и сложные системы распознавания подразделяются на системы без обучения, системы с обучением или самообучающиеся системы, в зависимости от того насколько они могут адаптироваться к изменяющимся условиям и принимать самостоятельные решения (без участия человека). Сложные системы также могут быть одноуровневыми, где информация о признаках распознаваемого объекта формируется путем прямых измерений (напряжение, ток), и многоуровневыми, где информация о признаках определяется на основе косвенных измерений как результат функционирования вспомогательных распознающих устройств (коэффициент мощности, потери активной энергии и т.д.). Выбор метода классификации зависит от того, какой системой распознавания можно описать ЭСПП и какой род информации используется для получения данных (логический, вероятностный, детерминированный).

Анализ методов классификации и особенностей режимов работы электрических сетей показал, что для совершенствования СУ следует применять сложную многоуровневую систему распознавания, построенную на основе кластерного анализа, поскольку:

- 1) признаки, характеризующие процесс электропотребления имеют различную физическую природу;
- 2) для определения состояния ЭСПП необходима как априорная, так и апостериорная информация, определяемая непосредственно в результате обработки данных технических средств и на основе косвенных измерений
- 3) при описании состояний электропотребления используются преимущественно количественные признаки
- 4) цель классификации может быть определена достаточно строго и точно, что обуславливает во многих практических случаях возможность формализации задачи классификации состояний электрических сетей.

Для практического использования принципов кластерного анализа при классификации состояний ЭСПП был произведен анализ алгоритмов кластеризации, которые в общем случае, подразделяются на две группы – иерархические и неиерархические. Суть иерархической кластеризации состоит в последовательном объединении меньших кластеров в большие (агломеративные методы) или разделении больших кластеров на меньшие (дивизимные методы). Результатом иерархического кластерного анализа является

построение дендрограмм, графически описывающих последовательность объединения (разделения) кластеров на основании их близости друг к другу. Однако иерархические методы кластерного анализа нецелесообразно использовать при больших объемах данных (более 50 ситуаций) из-за сложности и трудоемкости анализа результатов, поэтому они были исключены из дальнейшего рассмотрения.

При большом количестве наблюдений, как правило, используются неиерархические итеративные методы, заключающиеся в определении границ кластеров как наиболее плотных участков в многомерном пространстве или в минимизации меры различия объектов. Неиерархические методы показывают высокую устойчивость при работе с большим количеством признаков и значительным объемом выборки, а результаты разбиения удобно отображать в трехмерном пространстве в виде совокупности точек. В отличие от иерархических методов, которые не требуют предварительных предположений относительно числа кластеров для возможности использования этого метода необходимо иметь гипотезу о наиболее вероятном количестве кластеров.

Для реализации неиерархических методов кластеризации в данной работе были использованы алгоритмы k-средних (k-means), PAM (Partitioning around medoids), BIRCH (Balanced Iterative Reducing and Clustering using Hierarchies), квантовой, нечеткой и нейронной кластеризации.

Центральной частью третьей главы является разработка и описание алгоритма ситуационного управления параметрами режима ЭСПП с применением методов кластеризации (рис.2).

Основными этапами текущего алгоритма являются:

1) преобразование вектора состояний электроприемников $v = \{a_0, a_1, \dots, a_n\}$, где a_i – бинарное значение, определяющее состояние электроприемника (вкл./выкл.), в целочисленное десятичное значение по выражению

$$K_i = (a_{00} + a_{0k_0}) \cdot 2^0 + (a_{10} + a_{1k_1}) \cdot 2^1 + (a_{20} + a_{2k_2}) \cdot 2^2 + \dots + (a_{p1} + a_{pk_p}) \cdot 2^p$$

где $(a_{00} + a_{0k_0})$ – группа сигналов от однотипных электроприемников, а p – количество таких групп;

2) формирование вектора множества ситуаций S , состоящего из n текущих ситуаций S_i , определяемых напряжением питающей сети (U_i), коэффициентом реактивной мощности ($tg\varphi_i$) и значением коэффициента схемных ситуаций (K_i);

3) непосредственное осуществление процесса классификации состояний алгоритмами кластерного анализа и формирование решающих функций;

- 4) разработка решающих воздействий на объект управления для каждого из классов;
- 5) процесс отнесения текущей ситуации S_i к одному из имеющихся классов на основе решающих функций;
- 6) пополнение базы классов, решающих функций и решающих воздействий в случае несоответствия текущей ситуации ни одному из существующих классов.

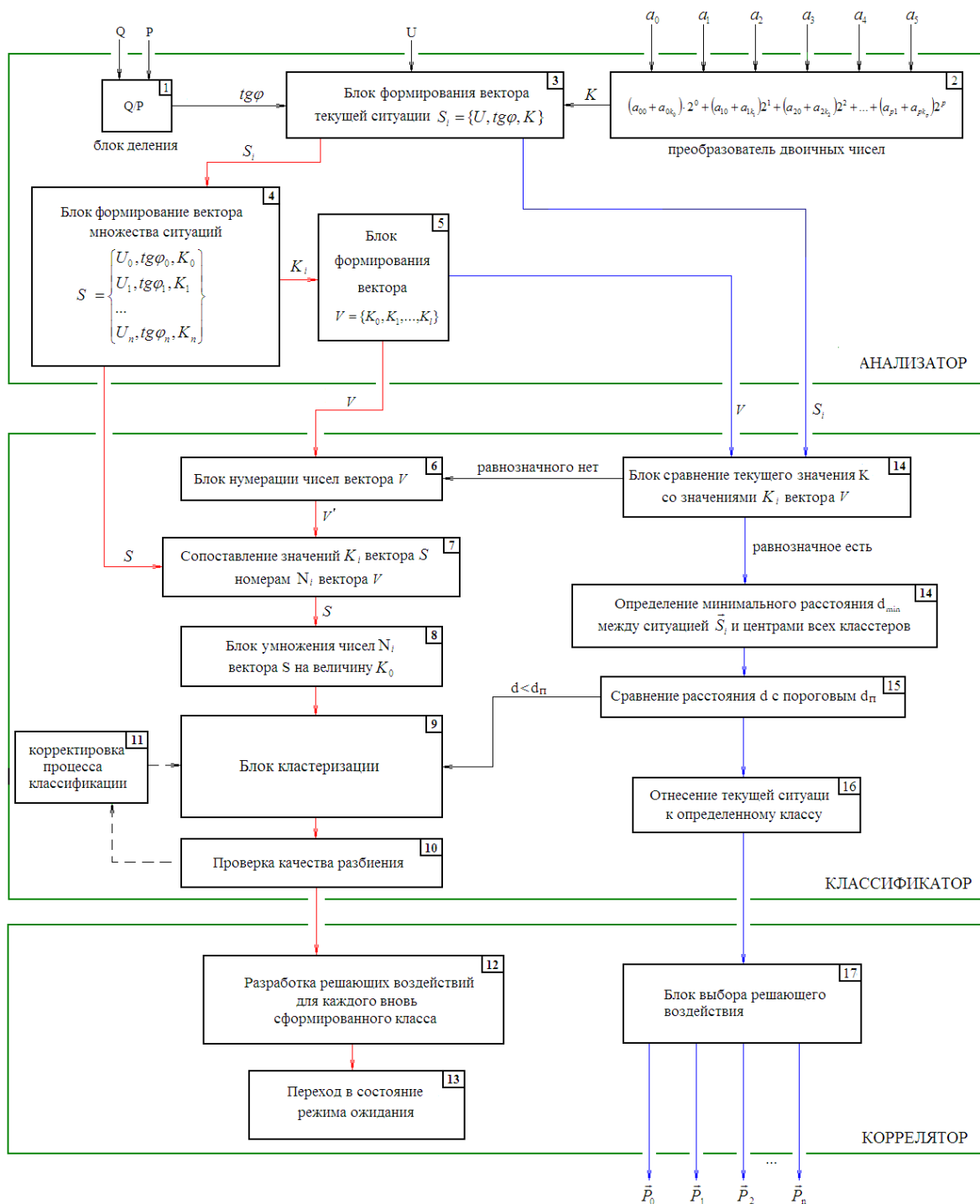


Рис. 2. Алгоритм ситуационного управления параметрами режима ЭСПП

Формирование решающей функции является конечной целью задачи классификации, так как именно она будет определять, к какому из имеющихся классов будет отнесена текущая ситуация, сложившаяся в ЭСПП. Использование функций статических характеристик (полученных в ходе аппроксимации экспериментальных данных) в качестве решающих функций позволит объединить в один класс состояния электрических сетей, требующих примерно одинаковых регулирующих воздействий, для повышения эффективности ее работы.

В четвертой главе производилась классификация состояний системы электроснабжения ТОФ в ситуационном управлении КРМ (рис. 3) для схемы электроснабжения одной из секций 6 кВ ГПП-40 ТОФ (РП-1Т).

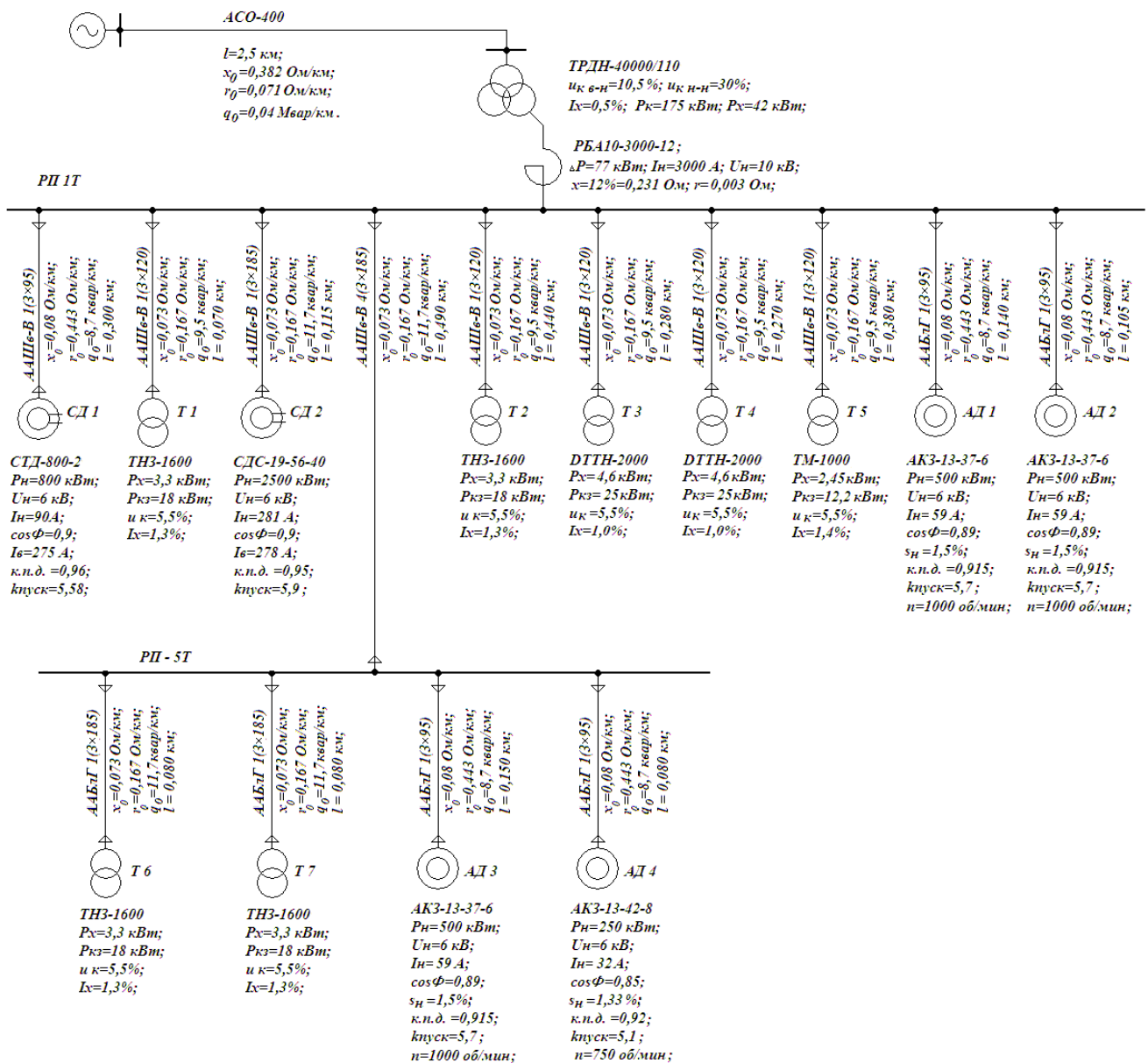


Рис. 3 Схема электроснабжения секции РП-1Т ГПП-40 ТОФ

При этом производилась оценка эксплуатационных параметров схемы электроснабжения УН ТОФ, то есть всесторонний анализ структуры схемы сети и состава электроприемников, характеристик возможных к установке и находящихся в эксплуатации ИРМ с учетом особенностей технологического процесса. Рассмотренный узел нагрузки, получающий питание от одной из обмоток 6 кВ трансформатора ТРДН-40000/110 через токоограничивающий реактор РБА-10-3000-12, имеет двухступенчатую радиальную структуру (РП-1Т и РП-5Т).

Электроприемниками 6 кВ РП-1Т являются синхронные электродвигатели шаровой мельницы типа СДС-19-56-40 ($P_H=2500$ кВт), нагнетателя воздуха типа СТД-800-2-РУХЛ ($P_H=800$ кВт), асинхронные двигатели дробилок АКЗ-13-37-6 ($P_H=500$ кВт) и АКЗ-13-42-8 ($P_H=250$ кВт). Нагрузкой 0,4 кВ являются асинхронные двигатели насосов, флотационных машин, конвейеров, классификаторов, вентиляторов и пр. производственных механизмов, а также освещение и бытовые электроприемники. Для расчетов параметров режима ГПП-40 использована ИМ, в которой была сформирована схема замещения данного УН.

При расчетах параметров режима в имитационной модели учитывались параметры схем замещения линий электропередач и кабельных линий, цеховых трансформаторов, реактора и трансформатора ГПП, суточные графики загрузки электродвигателей и цеховых трансформаторов, регулирующий эффект электродвигателей и батарей конденсаторов, а также возможное изменение значения напряжения в узле нагрузки в пределах $\pm 10\%$ от номинального значения.

В результате моделирования характерных режимов УН после компенсации реактивной мощности в сетях 0,4 кВ было получено 510 различных ситуаций, определяемых тремя типами признаков (U ; $\text{tg}\varphi$; K), десятью характерными ступенями графика нагрузки, двадцать одним значением напряжения для каждой из ступеней графика нагрузки при изменении напряжения с шагом в 1% (рис. 4). Для каждой из них были рассчитаны максимальные значения требуемых мощностей БК 6 кВ и токов возбуждения СД.

Анализ полученных ситуаций показал, что некоторые из них имеют одинаковые значения схемных коэффициентов K , т.е. одинаковый состав электроприемников при разных комбинациях положения выключателей. Такая картина наблюдается при включении и отключении однотипных электроприемников в различные периоды времени суточного графика нагрузки. Поскольку указанные ситуации соответствуют различным ступеням суточного графика нагрузки, то благодаря изменившейся загрузке цеховых трансформаторов, кривые статических характеристик (СХ), этих ситуаций весьма отличаются друг от друга крутизной и диапазоном изменения $\text{tg}\varphi$. Это говорит о

необходимости применения различных регулирующих воздействий, для одной топологии сети, т.е. к одному классу. В данной работе статические характеристики выражают зависимость коэффициента реактивной мощности $\text{tg}\phi$ от напряжения питающей сети U .

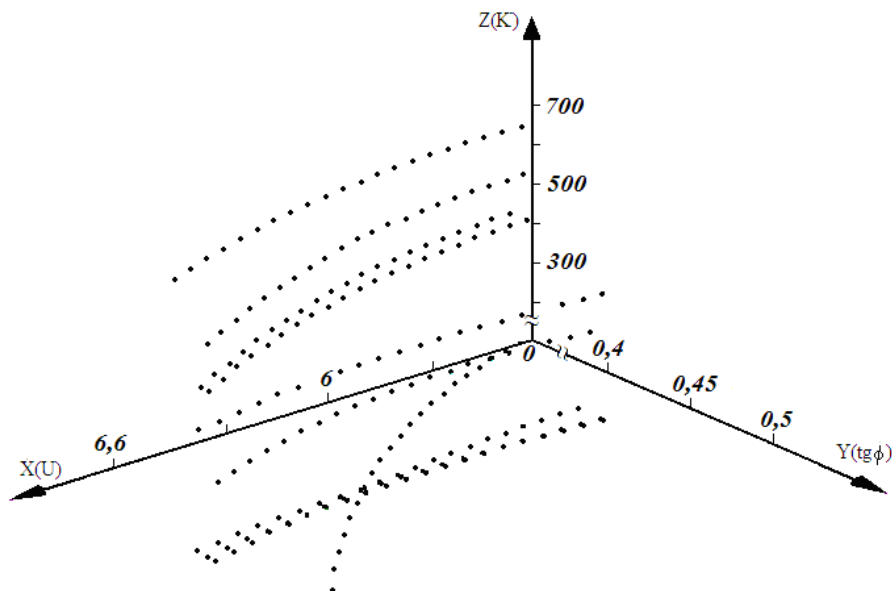


Рис. 4. Распределение множества ситуаций в пространстве

В частности, для УН РП-1Т в результате разбиения множества ситуаций, при десяти ступенях графика нагрузки было получено 7 классов, два из которых представляют собой набор из двух и трех статических характеристик. Такое распределение классов показало, что их количество определяется, в первую очередь, топологией сети. При этом статические характеристики различных ситуаций оказываются принадлежащими отдельным плоскостям пространства, параллельно расположенным относительно друг друга, что заметно упростило их дальнейшее исследование.

Применение стандартных методов автоматической кластеризации для групп статических характеристик отдельных топологий не позволило получить удовлетворительных результатов разбиения. Например, классификация множества состояний одной из топологий сети ($K=11$) с помощью метода K -средних при заданном числе классов, равном 5, привело к такому разбиению, при котором диапазоны изменения коэффициента реактивной мощности ($\text{tg}\phi$) в пределах отдельных кластеров весьма отличались между собой. При этом в первый класс попали ситуации со значениями $\text{tg}\phi$, изменяющимися в пределах от 0,364 до 0,376 (т.е. на 3,2%), а в последний – от 0,458 до 0,488 (т.е. на 6,2%). При числе классов, равном 10, в первом кластере оказались ситуации с $\text{tg}\phi$, изменяющимися на 0,55% (от 0,364 до 0,366), а в предпоследнем – на 3,9% (от 0,449 до 0,467).

Столь значительные изменения $\text{tg}\varphi$ в пределах таких кластеров предполагают невозможность разработки для них, единого регулирующего воздействия, способствующего повышению эффективности режима электропотребления.

В связи с этим в данной главе был разработан алгоритм автоматического формирования классов пошаговыми изменениями значений $\text{tg}\varphi$ и напряжения U (рис. 5).

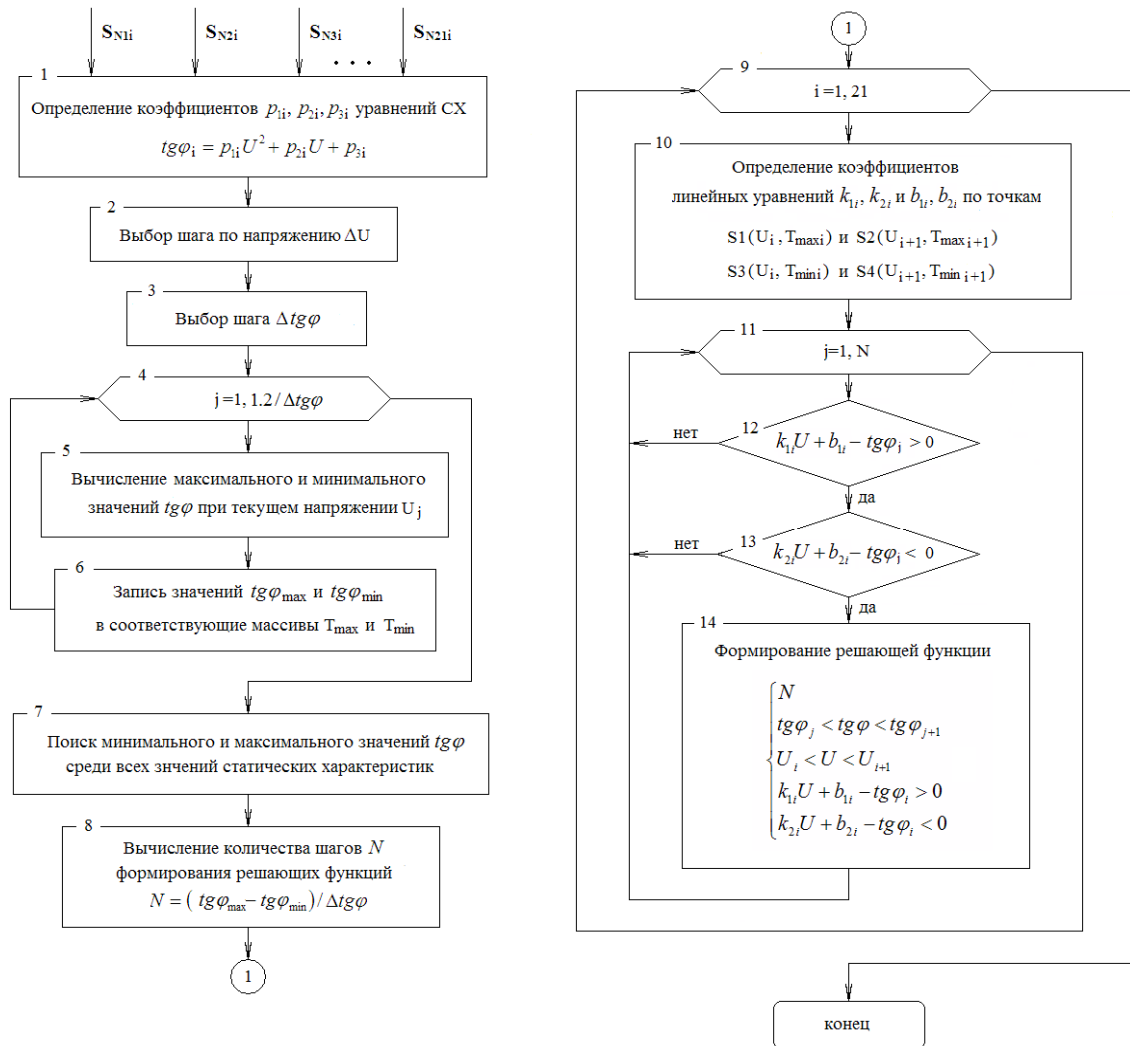


Рис. 5. Алгоритм формирования кластеров и решающих функций

В данном алгоритме области определения классов (рис.6), слева и справа образуются значениями $U_i \pm \Delta U$, т.е. изменениями напряжения на выбранный шаг ΔU , а сверху и снизу – либо значениями $\text{tg}\varphi_i \pm \Delta \text{tg}\varphi$, соответственно принятому шагу по коэффициенту реактивной мощности $\Delta \text{tg}\varphi$ (например, кластеры 2, 3, 6, 24), либо непосредственно участками кривых статических характеристик (например, кластеры 11-15, 21,23).

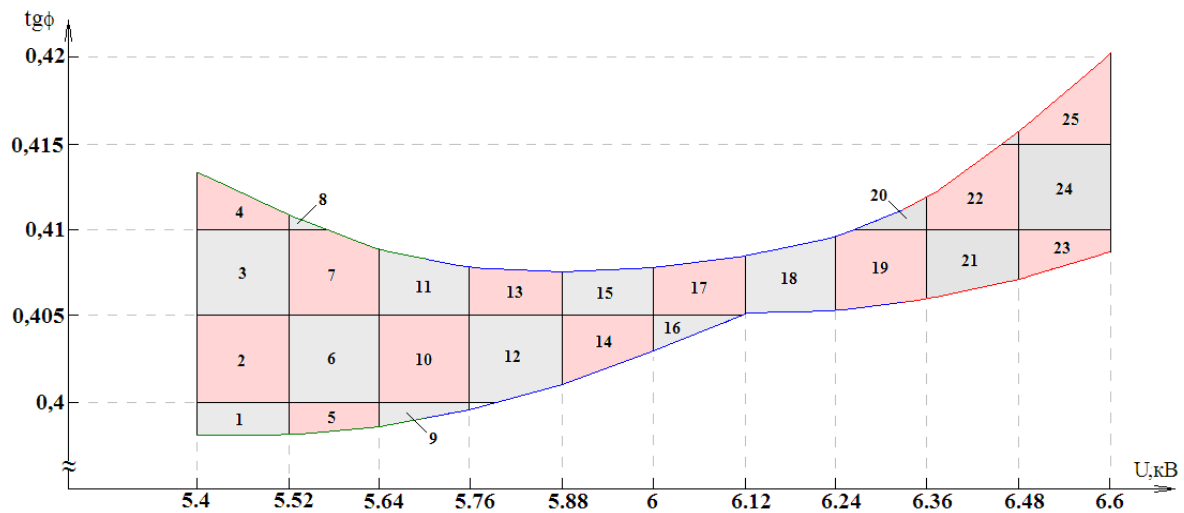


Рис. 6. Результат разбиения семейства характеристик на классы

Решающие функции для полученных классов могут быть представлены в виде системы уравнений

$$P\Phi_i = \begin{cases} N \\ U_i + \Delta U > U > U_i \\ \text{tg}\varphi_i + \Delta \text{tg}\varphi > \text{tg}\varphi > \text{tg}\varphi_i \\ k_{\max} U_i + b_{\max} - \text{tg}\varphi_i < 0 \\ k_{\min} U_i + b_{\min} - \text{tg}\varphi_i > 0 \end{cases}$$

где N - номер схемной ситуации, определяемый топологией сети; ΔU – выбранный шаг напряжения; $\Delta \text{tg}\varphi$ - выбранный шаг изменения коэффициента мощности; k_{\max} и b_{\max} – коэффициенты уравнения СХ имеющей максимальное значение $\text{tg}\varphi$ на i -м шаге; k_{\min} и b_{\min} – коэффициенты уравнения СХ имеющей минимальное значение $\text{tg}\varphi$ на i -м шаге; U_i и $\text{tg}\varphi_i$ – значения напряжения и коэффициента мощности i -го шага; U и $\text{tg}\varphi$ – значения напряжения и коэффициента мощности текущей ситуации.

В результате применения разработанного алгоритма, с шагом $U = 0,12$ кВ и шагом по $\text{tg}\varphi = 0,005$, было получено 149 классов и решающих функций, для одного из которых произведен расчет управляющих воздействий.

Заключение. В настоящей работе предложено решение актуальной задачи управления компенсацией реактивной мощности промышленных узлов нагрузки на основе разработанного алгоритма ситуационного управления с применением принципов автоматической классификации.

Применение основных положений диссертационной работы к электроэнергетической системе Талнахской обогатительной фабрики привело к следующим результатам:

1. Анализ состояния компенсации реактивной мощности систем электроснабжения предприятий производственного объединения обогатительных фабрик Норильского промышленного района показал, что одним из наиболее эффективных способов повышения качества электроэнергии и снижения потерь в питающих (110 кВ) и распределительных сетях (6/0,4 кВ) данных предприятий является оптимальное управление потоками РМ.

2. Компенсация реактивной мощности в сетях 0,4 кВ привела к изменению коэффициентов мощности на шинах низшего напряжения цеховых трансформаторных подстанций (ЦТП) с 0,812 – 0,828 до 0,880 – 0,896, что способствовало существенному снижению потерь мощности в трансформаторах 6/0,4 кВ и кабельных линиях, питающих их.

3. Анализ характерных режимов работы электроприемников ТОФ позволил с помощью разработанной в среде Delphi 7.0 ИМ EPCAD построить суммарные графики нагрузки секции РП-1Т и определить потери мощности и напряжения в распределительной сети 6 кВ с учетом регулирующего эффекта нагрузки при изменении напряжении на шинах РП-1Т в пределах, допустимых ГОСТом.

4. На основании анализа состава и режимов работы электроприемников УН ТОФ, технических возможностей и экономических характеристик локальных ИРМ РП-1Т, требований энергоснабжающей организации по поддержанию значений коэффициента реактивной мощности на границе балансовой принадлежности предприятия $\text{tg}\varphi=0,4$, был разработан алгоритм компенсации реактивной мощности.

5. С учетом особенностей структуры сети ТОФ была разработана многоуровневая система распознавания СУ КРМ, построенная на основе кластерного анализа, обеспечивающая высокую устойчивость и быстроедействие при работе с большим количеством признаков и значительным объемом выборки.

6. Формирование решающей функции, определяющей к какому из разработанных классов будет отнесена текущая ситуация ЭСПП в процессе классификации СУ, предложено на основе статических и динамических характеристик узла нагрузки.

7. Основным результатом внедрения основных положений диссертационной работы на сегодняшний день является комплекс мероприятий, направленных на оптимизацию режимов электропотребления, подтвержденный экономическим эффектом в размере 419409,1 руб/год.

Основные положения диссертации опубликованы в следующих работах

В изданиях, рекомендованных ВАК РФ

1. **Кирилин И.В.** Выбор средств управления реактивной мощностью в системах электроснабжения предприятий цветной металлургии [текст] / И.В. Кирилин, П.М. Козлов. // Ежемесячный производственно-технический журнал «Промышленная энергетика». - 2010. - №8. - С. 46-52.
2. **Кирилин И.В.** Создание имитационной модели для выявления искажений форм кривых токов и напряжения в сетях рудников [текст] / И.В. Кирилин, А.А. Массов, П.М. Козлов // Ежемесячный производственно-технический журнал «Промышленная энергетика». - 2011. - №5.

В других изданиях

3. **Кирилин И.В.** Моделирование синхронных электродвигателей с учетом изменения уровня напряжения питающей сети [текст] / И.В. Кирилин, Р.А. Олимов // Электронный журнал «Инженерное образование», МГТУ им. Н.Э.Баумана [сайт]. URL: <http://www.techno.edu.ru> (дата обращения: 16.03.11).
4. **Кирилин И.В.** Классификация состояний электрических систем промышленных предприятий для управления параметрами режима [текст] / П.М. Козлов, И.В. Кирилин, А.А. Массов // Производственно–технический, информационно–аналитический и учебно-методический журнал «Электрика». – 2011. - №5. - С. 14-17.
5. **Кирилин И.В.** О необходимости использования уточненных параметров режима работы синхронных электродвигателей при моделировании [текст] / Ю.А. Дмитриев, П.П. Зайцев, И.В. Кирилин. // Производственно–технический, информационно–аналитический и учебно-методический журнал «Электрика». - 2007. - №6. - С. 29-31.
6. **Кирилин И.В.** Современное состояние проблемы управления режимами реактивной мощности и напряжения в электрических сетях промышленных предприятий [текст] / А.С. Амузаде, С.А. Бурдинский, И.В. Кирилин. // Энергоэффективность систем жизнеобеспечения города», Материалы 10-й всероссийской научно-практической конференции 20-21 ноября 2008 года. - С.161-164.
7. **Кирилин И.В.** Построение имитационной модели электрической системы промышленного предприятия [текст] / А.С. Амузаде, С.А. Бурдинский, И.В. Кирилин. // Энергоэффективность систем жизнеобеспечения города», Материалы 10-й всероссийской научно-практической конференции 20-21 ноября 2008 года. - С.164-168.

8. **Кирилин И.В.** Применение алгоритма ситуационного управления в управлении режимами потребления реактивной мощности системы электроснабжения промышленного предприятия [текст] / А.Н. Филатов, А.С. Амузаде, С.А.

Бурдинский, И.В. Кирилин. // Энергоэффективность систем жизнеобеспечения города», Материалы 10-й всероссийской научно-практической конференции 20-21 ноября 2008 года. - С.158-160.

9. **Кирилин И.В.** Особенности управления реактивной мощностью в схемах электроснабжения предприятий цветной металлургии [текст] / И.В. Кирилин, П.М. Козлов. // Научный вестник Норильского индустриального института. Научно-практический журнал. - 2010. - № 6. - С. 31-37.

10. **Кирилин И.В.** Разработка алгоритма системы управления параметрами режима ЭСПП для повышения эффективности функционирования ее потребителей [текст] / И.В. Кирилин. // Электроэнергия: от получения и распределения до эффективного использования: материалы Всероссийской научно-технической конференции / Национальный исследовательский Томский политехнический университет. – Изд-во Томского политехнического университета. - 2010. - С. 274-276

11. **Кирилин И.В.** Управление режимами потребления реактивной мощности и уровнями напряжения в узлах нагрузки [текст] / И.В. Кирилин, А.Н. Филатов. // Электроэнергия: от получения и распределения до эффективного использования: сб. науч. трудов Всероссийской научно-техн. конф. – Томск: изд-во Томского политехнического университета. - 2008. - С. 67-68.

12. **Кирилин И.В.** Управление параметрами режима электрической системы промышленных предприятий с помощью процесса классификации состояний [текст] / И.В. Кирилин, А.А. Массов, П.М. Козлов. // Научный вестник Норильского индустриального института. Научно-практический журнал. – 2011. - № 8, С. 48–57.

13. **Кирилин И.В.** Повышение эффективности управления параметрами режима электрической системы промышленного предприятия [текст] / И.В. Кирилин, А.А. Массов, П.М. Козлов. // Научный потенциал Норильского промышленного района - XXI век: сб. науч. трудов / Науч. ред. М.А. Маркеев; Норильский индустр. ин-т. – НИИ. - 2011. - С. 178-181.