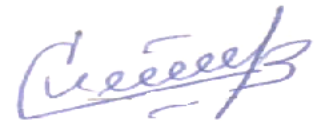


На правах рукописи



Исмоилов Саиджон Туронович

**РЕГУЛИРОВАНИЕ НАПРЯЖЕНИЯ НА ПОДСТАНЦИЯХ
РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНОЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СЕТИ С КОНТРОЛЕМ
РЕЖИМА ПРИЛЕГАЮЩЕГО РАЙОНА**

Специальность 05.14.02 – Электрические станции и электроэнергетические
системы

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Новосибирск 2014 г.

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Новосибирский государственный технический университет»

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор
Фишов Александр Георгиевич

**Официальные
оппоненты:**

Кокин Сергей Евгеньевич
доктор технических наук, доцент
Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего
профессионального образования «Уральский
федеральный университет», доцент кафедры
«Автоматизированные электрические системы»

Васильев Владимир Владимирович
кандидат технических наук,
ЗАО «Институт Автоматизации Энергетических
Систем», главный специалист по РЗА и ПА
отдела технического руководства

Ведущая организация: Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего
образования «Национальный исследовательский
Томский политехнический университет»,
г. Томск

Защита состоится «25» декабря 2014 года в 12 часов 00 минут на заседании диссертационного совета Д 212.173.01 при Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Новосибирский государственный технический университет» 630073, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Новосибирского государственного технического университета и на сайте http://www.nstu.ru/science/dissertation_sov/dissertations/view?id=1841.

Автореферат разослан « ____ » _____ 2014 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



Русина Анастасия Георгиевна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. В настоящее время самостоятельное (активное) поведение потребителей и распределенной генерации, способствующее эффективности системы в целом, непосредственно связано с созданием максимально возможного числа районов локального регулирования режима с распределенным управлением. Основой их формирования является локальность балансов реактивной мощности. Причина - невозможность ее передачи на большие расстояния вследствие возникающих чрезмерных потерь напряжений и активной мощности. Такие районы одновременно могут становиться и локальными рынками услуг по снижению потерь в сети, обеспечению качества электроэнергии (регулирования напряжения, снижения его колебаний, несимметрии и несинусоидальности). В отличие от обычного локального управления, осуществляемого по местным параметрам, «умное» локальное регулирование предполагает контроль режима прилегающего района сети и использование искусственного интеллекта (экспертных систем, работающих по правилам) при принятии решений, что при достаточном количестве управляемых узлов обеспечивает эффективность управления режимом напряжения сети в целом.

Появление в сети распределенных средств регулирования режима напряжения, принадлежащих разным субъектам, имеющих собственные цели регулирования, определяет необходимость качественно нового решения задачи регулирования напряжения в электрических сетях. Требуется разработка новых методов для управления режимов работы систем электроснабжения, включающих распределенную генерацию. В настоящее время во всем мире обратили внимание на создание интеллектуальных сетей (Smart Grid), технология которых в передовых странах мира развивается в последнее десятилетие. Smart Grid определяется как направление глобальной автоматизации и информатизации электроэнергетических систем с целью обеспечения доступности включения распределенной генерации в сеть, активного участия потребителей в осуществлении надежных режимов сети. Перечисленными задачами определяется **актуальность** настоящего исследования.

Объект исследования. Распределительные электрические сети напряжением 110-35/10-6кВ.

Предметом исследования является эффективность регулирования напряжения различными методами.

Цель исследования. Разработка технологии распределенного регулирования напряжения в нормальных и послеаварийных режимах систем электроснабжения с распределенной генерацией.

Задачи исследования. Для достижения поставленной цели решались следующие основные задачи:

1. Анализ развития систем и средств регулирования напряжения в электрических сетях, а также области применения экспертных систем;

2. Формирование принципов мультиагентного регулирования напряжения в электрических сетях;
3. Разработка способа “интеллектуального” регулирования напряжения в узле и системы мультиагентного регулирования напряжения в электрической сети;
4. Разработка методики анализа эффективности различных способов регулирования напряжения в электрических сетях;
5. Моделирование режимов сети при различных способах регулирования напряжения в сети, получение показателей сравнительной эффективности этих способов;
6. Исследование эффективности разработанных методов и алгоритмов управления в различных схемах электрической сети.

Метод исследования. Моделирование режимов электрических сетей с различными системами регулирования напряжения на математических и физических моделях.

Научная новизна работы заключается в следующем:

- Предложен способ мультиагентного (децентрализованного) регулирования напряжения в распределительной электрической сети, обеспечивающий компромиссное регулирование напряжения в интересах всех субъектов, участвующих в процессе, создающий технологическую основу локальных рынков услуг по регулированию режима в электрической сети;
- Доказана эффективность способа регулирования напряжения в узлах сети с контролем режима напряжения прилегающего района распределительной сети;
- Предложена структура регулятора напряжения с искусственным интеллектом (знаниевого типа), объединяющего в одном устройстве функции противоаварийного и технологического управлений локального и системного характера;
- Предложена методика оценки достижимости индивидуальных целей по напряжению в электрической сети и сопоставления способов регулирования напряжения.

Практическая значимость результатов работ состоит:

- В доказательстве эффективности мультиагентного регулирования напряжения;
- В обосновании и реализации принципов осуществления мультиагентного регулирования напряжения;
- В разработке методики анализа эффективности различных способов регулирования напряжения в электрических сетях.

Достоверность полученных результатов:

Подтверждена сопоставительными вычислительными экспериментами, проводившимися на базе специализированных компьютерных программ (ПВК Анарес-2000 и ПК Растр), а также сопоставлением теоретических расчетов с результатами экспериментальных исследований на физической модели энергосистемы.

Основные положения, выносимые на защиту:

- Контроль режима прилегающего района сети в сочетании с экспертными блоками в локальных регуляторах напряжения обеспечивают новые возможности децентрализации регулирования режимов электрических сетей;
- Децентрализованное регулирование напряжения, направленное на достижение индивидуальных целей субъектов процесса, осуществляемое по общим правилам, обеспечивает компромиссный режим электрической сети и представляет собой один из возможных вариантов решения задачи многокритериальной оптимизации;
- Экспертные блоки локальных регуляторов напряжения способны обеспечить эффективность регулирования напряжения как в нормальных, так и в послеаварийных режимах, тем самым совмещая функции технологического и противоаварийного управлений.

Апробация результатов работы. Результаты исследования докладывались и обсуждались на научных семинарах кафедры «Автоматизированные электроэнергетические системы» Новосибирского государственного технического университета (НГТУ), на 4-ой международной научно-технической конференции «Современные направления развития систем релейной защиты и автоматики энергосистем», г. Екатеринбург, 2013 г., на 4-ой международной научно-практической конференции «Актуальные проблемы энергетики АПК», г. Саратов, 2013г., на Днях Науки НГТУ в 2014 г., на научно-практическом семинаре «Smart Grid» (НГТУ, г. Новосибирск, 2013 г.).

Публикации. Всего по теме диссертации 5 работ, из которых 2 научных статьи в изданиях, входящих в перечень изданий, рекомендованных ВАК РФ, 3 публикации в материалах международных и всероссийских конференций.

Структура и объём работы. Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, списка использованных источников, включающего 109 наименований, и приложений. Объём работы составляет 133 страниц основного текста, включая рисунки и таблицы.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** показана актуальность темы диссертации, сформулированы цель и задачи исследования, обоснована научная новизна и практическая значимость полученных результатов, представлена структура и объём диссертационной работы.

В **первой главе** проведен анализ развития систем и средств регулирования напряжения в электрических сетях, а также области применения экспертных систем. Показаны современные особенности развития распределительных электрических сетей и методов регулирования напряжения.

Выявлено, что традиционное централизованное регулирования напряжения, осуществляемое в настоящее время сетевыми компаниями, не отвечает интересам собственников распределенной генерации, потребителей, обладающих средствами регулирования напряжения.

В настоящее время для распределительных электрических сетей характерен переход от пассивной сети, связывающей центры питания с узлами нагрузки (рисунок 1а) к сети с “активными” потребителями электроэнергии и распределенной генерацией, принимающими участие в регулировании режима сети для достижения собственных целей. Предпосылками этого перехода являются экономические, экологические и технологические факторы, побуждающие потребителей рационализировать электропотребление, участвовать

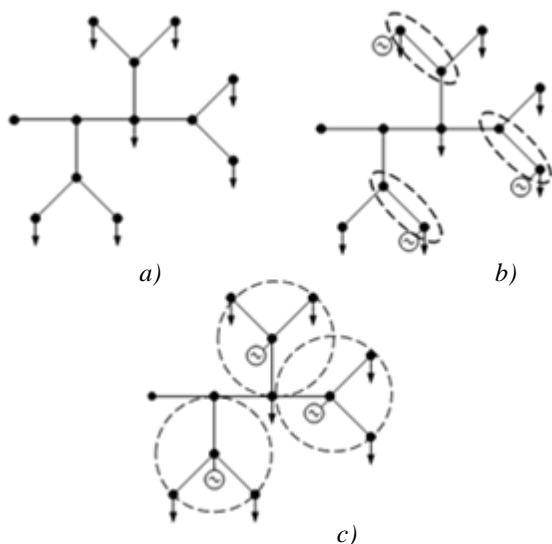


Рисунок 1 – Принципиальные схемы пассивной и активных сетей

в производстве электроэнергии и регулировании напряжения.

На рисунке 1 принципиально представлены сети: (а) – пассивная, (в, с) – с распределенной генерацией, в которых различны субъекты ее развития. В случае в – это потребители электроэнергии, в случае с – сетевая компания. Пунктиром выделены районы сети, режим которых контролируется по локальным параметрам узла подключения генератора.

Появление в сети распределенных средств регулирования режима напряжения, принадлежащих разным субъектам, имеющих собственные цели регулирования, даёт возможность качественно нового решения задачи регулирования напряжения в

электрических сетях на основе управления мультиагентного типа.

Во *второй главе* представлена концепция мультиагентного децентрализованного регулирования напряжения в распределительных электрических сетях, сформулированы принципы и правила его осуществления, представлена техническая реализация.

Под мультиагентным регулированием напряжения в электрической сети понимается вся совокупность мер, принимаемых каждым из субъектов процесса (сетевой компанией, потребителем электроэнергии, генерацией), для достижения собственных целей этого регулирования в рамках единых принципов и правил, обеспечивающих режим напряжения сети при компромиссе интересов.

Целями регулирования напряжения для участников процесса являются:

Для потребителей - оптимальное и стабильное напряжение на шинах электроприемников

$$\Delta U = U_i - U_{\text{жел}} \rightarrow \min. \quad (1)$$

где $U_i, U_{\text{жел}}$ - действительное и желаемое напряжения в узле сети.

Как правило, речь идет о номинальном или сниженном до 5% напряжении. Такое качество напряжения обеспечивает рациональное энергосбережение и минимальный износ оборудования. Эту задачу в настоящее время потребитель часто решает самостоятельно вне сетевой системы регулирования напряжения,

используя для поддержания желаемого напряжения на питающих шинах нормализаторы напряжения (в настоящее время на напряжении 0.4 кВ).

Суть метода состоит в применении вольтодобавочного трансформатора, мощность которого значительно меньше мощности нагрузки. Обмотка низшего напряжения этого трансформатора включается в фазу сети последовательно с нагрузкой. Обмотка высшего напряжения включается в сеть регулирования.

Для *распределенной по сети генерации цели регулирования образуют некоторое множество*. При отсутствии дополнительных коммерческих услуг – допустимое напряжение при минимуме потерь энергии, связанных с ее выработкой. При наличии локального рынка дополнительных услуг – поддержание востребованного стабильного напряжения в некоторых узлах прилегающего района сети, обеспечение допустимого режима напряжения в узлах прилегающего района, обеспечение минимальных потерь в сети прилегающего района

$$\Delta P_G \rightarrow \min, \quad (2)$$

или
$$U_i - U_{\text{жел}} \rightarrow \min \quad (3)$$

или
$$\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (U_i - U_{\text{жел}})^2}{n}} \rightarrow \min \quad (4)$$

или
$$\Delta P_C \rightarrow \min, \quad (5)$$

где $U_{\text{жел}}$ - желаемое напряжение в узле нагрузки;

$\Delta P_G, \Delta P_C$ – потери при выработке электроэнергии, в сети.

Для *сетевой компании*. Допустимость напряжения во всех узлах сети, качественное напряжение во всех узлах нагрузки, максимум пропускания электроэнергии при минимальных потерях в сети

$$\Delta P_C \rightarrow \min. \quad (6)$$

Сформулированы **принципы** осуществления мультиагентного распределенного регулирования напряжения с участием имеющейся генерации и потребителей:

- В нормальных режимах сети каждый субъект имеет право преследовать собственные цели регулирования, не создавая невозможности достижения целей другим субъектам.
- При нарушениях нормального режима сети поведение субъектов подчиняется цели предотвращения развития и ликвидации возникших нарушений.
- Для достижения целей каждый субъект эффективно использует собственные средства регулирования напряжения и доступную локальную информацию о режиме сети.

Определены адекватные принципам правила регулирования для всех субъектов (в процедурной форме). Базовая часть правил приведена ниже. Для их реализации в каждом узле активного поведения (нагрузки, генерации) необходим контроль режима прилегающего района сети.

Напряжения в узлах сети прилегающего района могут определяться как результат косвенных измерений по локальным режимным параметрам. Так, напряжение со стороны удаленных концов примыкающих к узлу линий определяется по измерениям активной, реактивной мощности по линии, напряжению в узле и известным параметрам линии.

Потери мощности и пропуск по району сети могут определяться как результат косвенных измерений по локальным параметрам на основе известных зависимостей потерь холостого хода от напряжения, нагрузочных потерь от тока в трансформаторах и линиях прилегающего района.

Правила регулирования в узлах сети

а. Регулирование на шинах электроприемников.

Если напряжение со стороны питания нормальное, то может поддерживаться желаемое напряжение на шинах.

Если напряжение со стороны питания ниже допустимого, то при отсутствии возможности выдачи дополнительной реактивной мощности должно поддерживаться пониженное напряжение. При наличии возможности выдачи дополнительной реактивной мощности она должна мобилизовываться до восстановления локального нормального режима.

Если напряжение со стороны питания выше допустимого, то при отсутствии возможности потребления дополнительной реактивной мощности должно поддерживаться повышенное напряжение. При наличии возможности потребления дополнительной реактивной мощности она должна мобилизовываться до восстановления локального нормального режима.

б. Регулирование в узлах включения генерации.

- регулирование в собственных целях генерации с контролем режима напряжения прилегающего района.

Если режим напряжений в прилегающей сети нормальный, то (выдача/потребление реактивной мощности) регулируется исходя из минимума потерь в генераторе.

Если напряжения в некоторых узлах прилегающей сети выше предельно допустимых, то снижается выдача или увеличивается потребление реактивной мощности генератора.

Если напряжения в некоторых узлах прилегающей сети ниже предельно допустимых, то увеличивается выдача или снижается потребление реактивной мощности генератора.

Если напряжения в некоторых узлах прилегающей сети выше предельно допустимых, а в некоторых ниже предельно допустимых, то реактивная мощность генератора изменяется исходя из минимума среднеквадратичных превышений допустимых пределов отклонений напряжения.

- регулирование в прилегающих к узлам включения генерации районах сети (как коммерческая услуга локального рынка)

На локальном рынке могут предоставляться услуги:

- сетевой компании - по поддержанию напряжения исходя из условия минимума потерь в прилегающем к узлу подключения генерации районе сети или

максимума пропуск энергии по району сети.

- потребителям в узлах района сети, прилегающего к узлу подключения генерации – по поддержанию желаемого уровня напряжения в некоторых узлах сети или районе сети в целом.

Поддержание желаемого уровня напряжения в некоторых узлах сети или районе в целом могут осуществляться на принципе обратной связи по отклонению от уставки.

Регулирование по условиям минимума потерь в прилегающем к узлу подключения генерации районе сети или максимума пропуск энергии по району сети может осуществляться на принципе обратной связи по реакции измеряемого параметра на изменение реактивной мощности генератора.

Правила:

Если при регулировании напряжения по условию минимума потерь в прилегающем к узлу подключения генерации районе сети увеличение напряжения возбуждения генератора приводит к снижению/увеличению потерь в сети, то осуществляют пропорциональное увеличение/снижение напряжения возбуждения.

Если при регулировании напряжения по условию максимума пропуск энергии по району сети увеличение напряжения возбуждения генератора приводит к увеличению/снижению пропуск энергии по району сети, то осуществляют пропорциональное увеличение/снижение напряжения возбуждения.

с. Регулирование напряжения сетевой компанией

Регулирование напряжения сетевой компанией может осуществляться на основе 3-х концепций:

- Централизованно путем заблаговременного планирования уставок локальных средств регулирования на базе прогноза режимов работы сети с учетом участия в процессе регулирования напряжения активных потребителей и распределенной генерации;

- Централизованно путем управления устройствами регулирования напряжения в реальном времени с учетом участия в процессе регулирования напряжения активных потребителей и распределенной генерации;

- Децентрализованно путем перехода к мультиагентному регулированию в реальном времени в соответствии с приведенными выше правилами.

Общее правило для всех участников процесса:

При регулировании напряжения приоритет по использованию отдается средствам пропорционально их ресурсу.

Реализация мультиагентного регулирования напряжения в сети

Техническая реализация мультиагентного регулирования напряжения в сети предполагает использование компьютерных алгоритмов косвенных измерений и искусственного интеллекта (экспертных систем) в каждом узле активного поведения. Обобщенная структура “интеллектуального” регулятора представлена на *рисунке 2*.

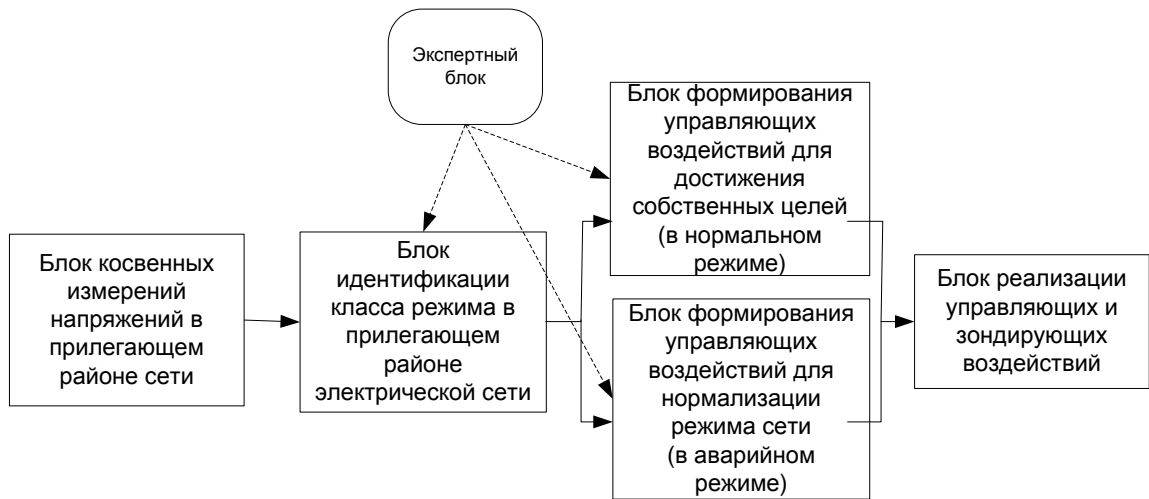


Рисунок 2 – Структура регулятора напряжения с контролем режима прилегающего района по правилам мультиагентного распределенного управления

Третья глава посвящена моделированию и анализу эффективности регулирования напряжения в электрической сети с распределенной генерацией.

При многоцелевом регулировании напряжения в электрической сети разными субъектами возникает неопределенность в оценке его эффективности, т.к. задача становится многокритериальной и речь должна идти об оценке качества компромисса при регулировании. В качестве показателей достижения целей в данной работе предлагается использовать:

- отклонения средних значений напряжений в узлах нагрузок от желаемых значений,
- среднеквадратические отклонения напряжений в узлах от желаемых значений

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n U_i - U_{жел}^2}{n}} \rightarrow \min \quad (7)$$

где U_i – i -тое значение напряжения, $U_{жел}$ – желаемое напряжение на шинах электроприемников потребителя;

- максимальные отклонения напряжений в узлах от желаемых значений

$$\delta_{max} = \frac{U_i - U_{жел}}{U_{жел}} \cdot 100\% \quad (8)$$

- значения пропуска или потерь активной мощности в сети.

Оценку эффективности многоцелевого децентрализованного регулирования напряжения в электрической сети предлагается проводить путем сравнения степеней достижения целей регулирования в условиях много режимности разными методами его осуществления на примерах реальных электрических сетей. При этом много режимность создается путем задания суточных графиков нагрузки и генерации.

В работе для разных распределительных электрических сетей (России, Таджикистана) оценивалась эффективность следующих способов регулирования напряжения в сети:

1. Централизованного - за счет использования средств регулирования сетевой компании с заданием уставок локальным регуляторам на основе предварительных расчетов характерных режимов. Задача сводится к обеспечению допустимости напряжений во всех узлах сети для всех режимов с минимизацией потерь мощности для каждого из них, т.е. обеспечивается доминирование цели сетевой компании,

$$U \in D, \quad \Delta P \rightarrow \min, \quad (9)$$

где D – область допустимых режимов напряжения электрической сети.

В этом способе уставки регуляторов определяются по результатам расчетов характерных режимов сети для прогнозных графиков электропотребления:

1.1) Централизованное регулирование в центрах питания (ЦП) с постоянными уставками на районных подстанциях (ПС) распределительной сети.

Данный тип регулирования применяется в распределительных сетях с низкой автоматизацией;

1.2) Централизованное регулирование в ЦП с адаптивными уставками на районных ПС распределительной сети.

Регулирование с адаптивными уставками предполагает такую работу регуляторов, при которой уставка напряжения или отпайки РПН трансформатора изменяют свое значение (положение) по заданной временной диаграмме

1.3) Централизованное регулирование в режиме реального времени с оптимизацией режима всей сети при полной управляемости.

2. Мультиагентного (децентрализованного) в интересах всех субъектов (сетевая компания, потребитель, распределенная генерация), участвующих в процессе регулирования, где системе регулирования ставится задача максимального достижения целей потребителей, сетевой компании и генерации.

В этом способе уставки определяются локальными регуляторами в реальном времени на основе контроля режима прилегающего района (района регулирования).

Результаты исследования для района Сургутской распределительной электрической сети (РЭС)

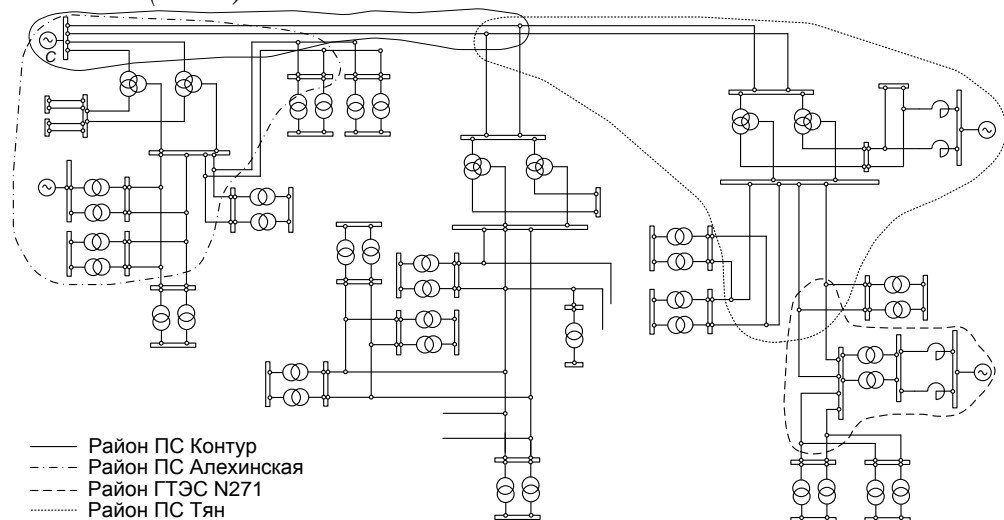


Рисунок 3 – Схема района Сургутской РЭС с обозначенными на ней зонами контроля режимов для каждого из локальных регуляторов

В районе Сургутской РЭС (рисунок 3) большая доля генерации (ГТЭС) расположена вблизи потребителей, что обусловлено эффективностью использования выработки электрической энергии на объектах добычи или транспортировки нефтепродуктов.

Характерные напряжения в ЦП 110 кВ, отпайки РПН трансформаторов РЭС и настройки локальных регуляторов при централизованном управлении определялись исходя из режимов максимальных и минимальных нагрузок электрической сети. Режим напряжения для способа 1.1 представлен на рисунке 4, а обобщенные характеристики режимов в таблицах 1,2.

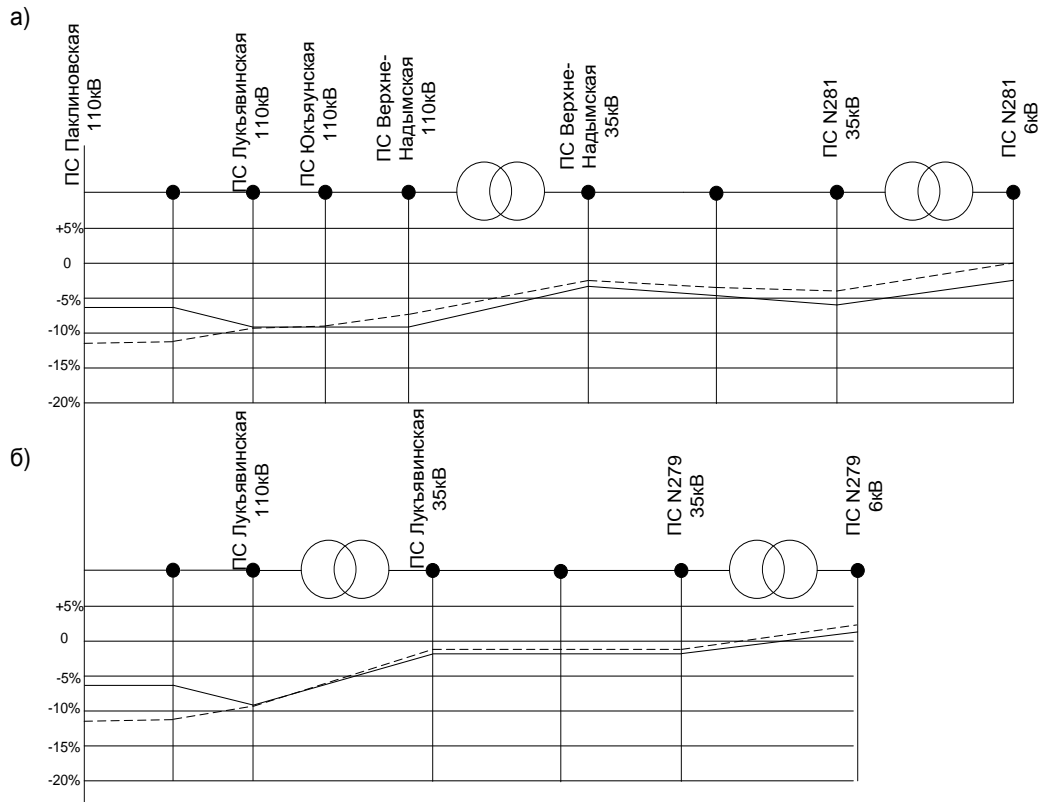


Рисунок 4 – Диаграмма отклонений напряжения от номинального для максимального и минимального режимов при централизованном регулировании:
а) для самого протяженного фидера, б) для самого короткого фидера

Таблица 1 – Характеристики совокупности характерных режимов для различных способов регулирования

Способ регулирования	U_{cp} , о.е.	σ^2 , о.е.	δ_{max} , %
Централизованное регулирование в ЦП с постоянными уставками в районных ПС	0,991	0,00056	5,5
Централизованное регулирование в ЦП с адаптивными уставками в районных ПС	0,998	0,00019	5
Централизованное регулирование в режиме реального времени с оптимизацией при полной управляемости	1,0021	0,00016	3
Мультиагентное регулирование при $U_n = U_{жел}$	1,0043	0,00017	5

U_{cp} - среднее напряжение на шинах; σ^2 - среднеквадратическое отклонение напряжения от желаемого; δ_{max} - максимальное отклонение напряжения от желаемого.

Таблица 2 – Превышение потерь активной мощности и энергии относительно централизованного регулирования с оптимизацией при полной управляемости

№	Способ регулирования	Превышение потерь относительно потерь при оптимизации в условиях полной управляемости (4)			
		ΔP в сети в режиме максимальных нагрузок		Суточные потери энергии	
		кВт	%	кВт*ч	%
1	Централизованное в ЦП с постоянными уставками в районных ПС	5,23	0.068,	94,32	0.066
2	Централизованное в ЦП с адаптивными уставками в районных ПС	4,23	0.056	79,56	0.056
3	Централизованное с оптимизацией при полной управляемости	0	0	0	0
4	Мультиагентное в районах сети	0,47	0.006	8,32	0.006

Полученные результаты свидетельствуют об эффективности компромиссного регулирования напряжения для мультиагентного способа, при котором незначительное снижение эффективности по критерию СК (минимум суммарных потерь в сети) сопровождается существенным повышением эффективности по критериям потребителей энергии.

Методика оценки достижимости индивидуальных целей по напряжению

1. Для сравнения эффективности достижимости индивидуальных целей по напряжению фиксируются концепции регулирования и цели для каждой из субъектов (потребитель, генерация, сетевая компания).

Концепции регулирования и цели регулирования приведены в разделе 2.1. диссертации.

2. Для планируемых режимов электропотребления в узлах сети и выработки активной мощности генераторами проводится расчет электрических режимов для сравниваемых концепций регулирования напряжения с моделированием работы соответствующих регуляторов. Режимы электропотребления в узлах сети и выработки активной мощности генераторами могут задаваться суточными, месячными, сезонными и годовыми графиками.

3. Определяются степени (коэффициенты) достижения целей для каждого из субъектов (потребитель, генерация, сетевая компания) при разных способах (концепций) регулирования напряжения. Расчет степеней (коэффициентов) достижимости целей производится по графикам напряжения в каждом из узлов сети при различных концепциях регулирования, при этом графики изменения напряжения могут быть суточными, месячными, сезонными и годовыми. По графикам изменения напряжения определяется продолжительность режимов, в которых цели субъектов достигнуты.

Коэффициент степени достижения целей для субъекта определяется по формуле:

$$K_{сд} = \frac{\sum_{i=1}^k t_i}{T}, \quad (10)$$

где $\sum_{i=1}^k t_i$ – продолжительность режимов, в которых цели субъекта достигнуты, k – число режимов, в которых цели субъекта достигнуты, T – общая продолжительность анализируемых режимов.

4. Рассчитываются обобщенные показатели удовлетворенности режимом напряжения всеми субъектами.

Для оценки степени удовлетворенности (неудовлетворенности) режимом напряжения потребителей и распределенной генерации используется число узлов нагрузки (генерации) сети, в которых коэффициент степени достижения целей больше заданного значения (например, 0,5).

5. По полученным результатам делаются выводы, причем они не являются объективно однозначными, а зависят от носителя тех или иных целей (потребитель, генератор, СК).

Пример. Оценка достижимости индивидуальных целей по напряжению для электрической сети в суточном цикле для Пенджикентского РЭС (Таджикистан)

На рисунке 5 представлено пять районов регулирования:

- районы ПС Джикурут и ПС Зерафшан имеют собственную генерацию;
- на остальных подстанциях напряжение регулируется только с помощью РПН трансформаторов.

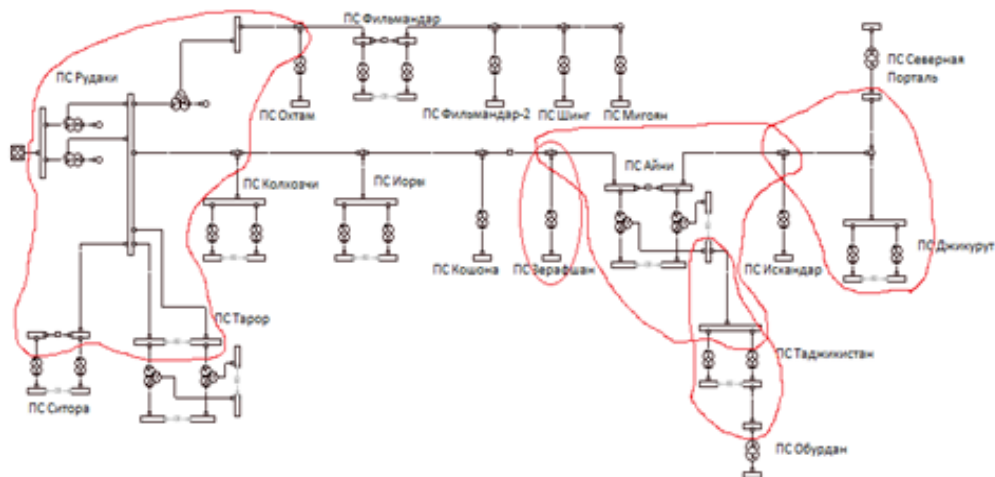


Рисунок 5– Принципиальная схема Пенджикентского РЭС

Сравним различные способы регулирования напряжения применительно к самому протяженному (центральному фидеру) 110 кВ.

В результате расчета определились требуемые отпайки РПН трансформаторов РЭС и напряжение на шинах 110 кВ ПС Рудаки:

- в режиме минимальных нагрузок равно 113 кВ (исходя из минимума потерь активной мощности в ПРЭС - 284 кВт (1,3%)).
- в режиме максимальных нагрузок равно 121 кВ (исходя из минимума потерь активной мощности в ПРЭС - 2690 кВт (3,74%)).

На *рисунке 6* представлены диаграммы распределения напряжения фидера ПС Рудаки – ПС Обурдан для максимального и минимального режима.

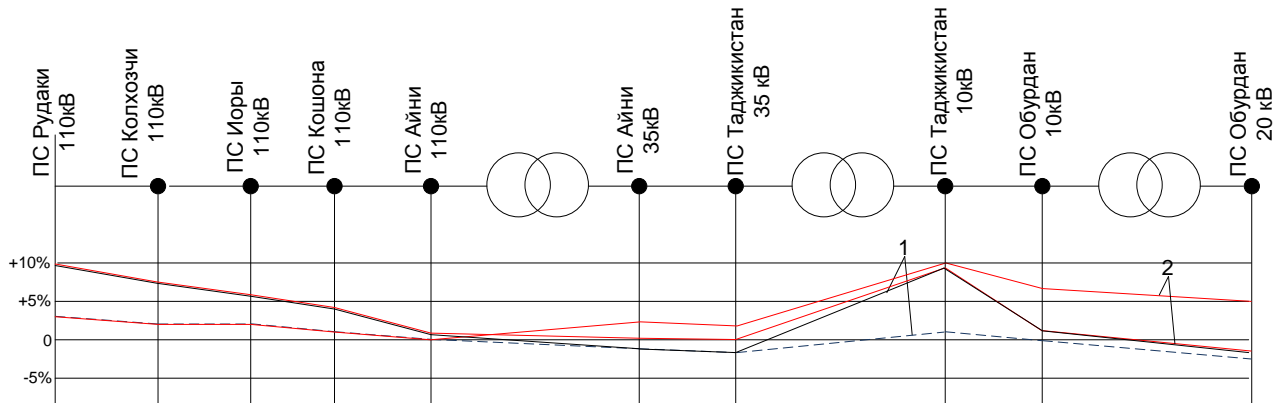
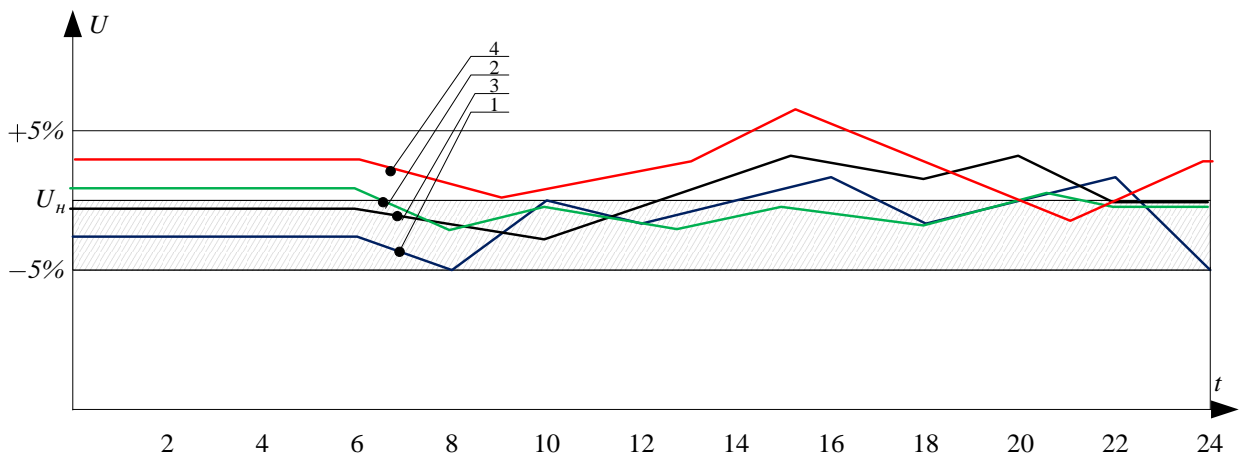


Рисунок 6 – Диаграмма распределения напряжения
Результаты расчетов приведены в *таблице 5* и на *рисунке 7*.

Таблица 3 – Характеристики совокупности характерных режимов для разных способов регулирования напряжения

Способ регулирования	\bar{U}_1 / \bar{U}_2 , о.е.	σ_1^2 / σ_2^2 , о.е.	$\delta_{\max 1} / \delta_{\max 2}$, %
Централизованное с уставкой по времени	1,0139/0,9876	0,018/0,023	5.0/13,3
Централизованное с уставкой по напряжению	1,0291/0,9765	0,016/0,007	5.0/4,1
Распределенное	1,0255/0,9732	0,015/0,005	5.0/2,05

\bar{U} - среднее напряжение на шинах; σ^2 - среднеквадратическое отклонение напряжения от желаемого; δ_{\max} - максимальное отклонение напряжения от желаемого.



- 1 - Централизованное регулирование в ЦП с постоянными уставками регуляторов районных ПС
- 2 - Централизованное регулирование в ЦП с изменяемыми по времени уставками регуляторов районных ПС
- 3 - Централизованное регулирование в режиме реального времени с глобальной оптимизацией
- 4 - Мультиагентное регулирование

Рисунок 7 – График изменения напряжения на узле нагрузки ПС Колхозчи 10 кВ

В *таблице 4* показаны значения коэффициента степени достижения целей генерации по напряжению при разных способах регулирования.

Таблица 4 – Коэффициенты степени достижения целей генерации по напряжению

Узел генерации	$K_{сд}$			
	Централизованное регулирование в ЦП с постоянными уставками в районных ПС	Централизованное регулирование в ЦП с адаптивными уставками в районных ПС	Централизованное регулирование в режиме реального времени с оптимизацией при полной управляемости	Мультиагентное регулирование (в интересах генерации)
ПС Айни	0,25	0,3	0,42	1
ПС Джикурт	0,42	0,33	0,5	1

Для оценки степени неудовлетворенности режимом напряжения потребителей определяем число узлов, коэффициент степени достижения целей в которых меньше 0,5.

Таблица 5– Обобщенные показатели неудовлетворенности потребителей

Способ регулирования напряжения	Число узлов, в которых $K_{сд}$ меньше 0,5			
	Централизованное регулирование в ЦП с постоянными уставками в районных ПС	Централизованное регулирование в ЦП с адаптивными уставками в районных ПС	Централизованное регулирование в режиме реального времени с оптимизацией режима при полной управляемости	Мультиагентное регулирование
Количество потребителей	6	6	3	4

Результаты моделирования режимов Пенджикенского РЭС показали, что оба метода (централизованный и децентрализованный) способны в равной степени обеспечить требуемый уровень напряжения на шинах электроприемников потребителей в расчетных условиях, однако достижение индивидуальных целей выше при мультиагентном регулировании. Кроме того, оно не нуждается в централизации управления.

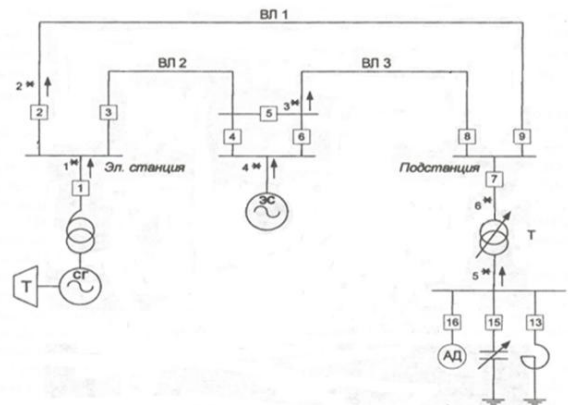
В четвертой главе представлены результаты экспериментального исследования работоспособности и эффективности мультиагентного регулирования напряжения. Для этого использована существующая в лаборатории кафедры АЭЭС микро модель активной электрической сети (МЭС) (рисунок 8), параметры оборудования приведены в таблице 6.

Таблица 6 – Параметры МЭС

$U_{инп},$ В	Генератор			ТР-р ген-ра			Подстанция				
	$U_G,$ В	$P_G,$ Вт	$Q_G,$ ВАР	$X,$ Ом	$R,$ Ом	K_m	ТР-р			$P_{н. max}$ Вт	
							$S_{тр.},$ ВА	$X,$ Ом	$R,$ Ом		РПН
220	220	100	50	17,5	1	1	100	17,5	1	$\pm 6 \times 1,5\%$	100
Линия электропередачи							Нагрузка				
$U_{мод},$ кВ	Длина линии, км		$X_L,$ Ом	$R_L,$ ОМ	$C,$ мкФ	$C,$ мкФ	$X_p,$ Ом	$S_{ад},$ ВА			
110	20		32	16	0,5	1÷4	900		80		



а)



б)

Рисунок 8 – Микро модель активной электрической сети:
 а) Конструктивное исполнение МЭС, б) Электрическая схема

Режимы напряжения и их характеристики получались при изменении режимов электропотребления по заданным графикам нагрузки и использовались при оценке эффективности различных способов регулирования напряжения.

Проводились исследования следующих способов:

1. Традиционное регулирование. При постоянстве напряжения в центре питания ($U_{цп} = const$) и регулировании напряжения сетевой компанией на шинах нагрузки с поддержанием допустимого напряжения.
2. Мультиагентное регулирование напряжения генератором в интересах потребителя с поддержанием желаемого напряжения.
3. Мультиагентное регулирование напряжения генератором в интересах СК по условиям минимума потерь в прилегающем к узлу подключения генерации районе сети и максимума пропускания энергии по району сети.

Экспериментальным путем были получены:

1. Характеристики режима напряжения при поддержании постоянства напряжения в центре питания для цепочечной и кольцевой схем.
2. Характеристики регулирования напряжения при изменении нагрузки в соответствии с заданным графиком для традиционного способа регулирования при цепочечной и кольцевой структуре сети.
3. Характеристики регулирования напряжения при изменении нагрузки в соответствии с заданным графиком для мультиагентного регулирования в интересах потребителя и сетевой компании при цепочной и кольцевой структуре сети.

Данные для сравнения эффективности регулирования напряжения приведены в *таблице 7*.

Таблица 7 – Результаты расчета показателей качества регулирования напряжения (по отклонению напряжения от желаемых и нормируемых значений)

№	Способ регулирования напряжения	Потери мощности в сети		Среднеквадратическое отклонение напряжения от желаемого		Максимальное отклонение напряжения от номинального		
		ΔP_1 %	ΔP_2 %	σ_1^2 о.е	σ_2^2 о.е	$\delta_{1max}, \%$	$\delta_{2max}, \%$	
1	При $U_{щп} = const$ в ЦП	5,1	3,53	0,01	0,01	3,94	4,5	
2	Традиционное регулирование $U_{щп} = const$ в ЦП (при регул на ПС с помощью Р и БСК)	4,06	3	0	0	4,72	4,72	
3	Мультиагентное регулирование в интересах потребителя	4,57	3,15	0	0	4,72	4,72	
4	Мультиагентное регулирование в интересах СК	при $\Delta P \rightarrow min$	2,86	2,55	0,0064	0,016	1,57	5,3
		при макс. пропуске ээ	3,7	3,215	0,006	0,006	4,725	4,725

Примечание: 1- при отключенной ВЛЗ, 2- при включенной ВЛЗ

Полученные результаты подтверждают работоспособность и эффективность компромиссного регулирования напряжения на основе мультиагентного способа, при котором незначительное снижение эффективности по критерию СК сопровождается существенным повышением эффективности по критериям потребителей энергии.

В **заключении** сформулированы основные научные и практические результаты работы.

В **приложении** к диссертации содержатся материалы, подтверждающие внедрение и использование результатов исследований.

Основные результаты диссертационной работы заключаются в следующем:

1. Предложен способ мультиагентного (децентрализованного) регулирования напряжения в распределительной электрической сети, основанный на контроле режима прилегающего к узлу локального регулирования района сети и использовании искусственного интеллекта знаниевого типа (подана заявка на изобретение).

2. Произведено исследование на имитационной и физической моделях эффективности существующих и предложенного способа регулирования напряжения в электрические сети.

3. Разработана методика оценки технической эффективности различных способов регулирования напряжения в электрических сетях.

4. Доказана работоспособность и эффективность предложенного способа регулирования напряжения.

Основные положения диссертации опубликованы в работах:

1. **Исмоилов С.Т.** Распределенное регулирование режима напряжения электрической сети // Вестник Таджикского технического университета им. акад. М.С.Осими - 2014, - №1 (25), с. 59-63.
2. **Исмоилов С. Т., Фишов А. Г.** Моделирование и анализ эффективности регулирования напряжения в электрической сети с распределенной генерацией // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока - 2014, - № 1-2, с. 302-305.
3. **Исмоилов С. Т., Труфакин С. С., Фишов А. Г.** Мультиагентное регулирование напряжения в электрических сетях с распределенной генерацией и активными потребителями / 4-ая Международная научно-техничская конференция "Современные направления развития систем релейной защиты и автоматики энергосистем": аннотации докладов, Екатеринбург, 3–7 июня 2013, Екатеринбург, – 2013, с. 99-100.
4. **Исмоилов С. Т., Труфакин С. С.** Регулирование напряжения в распределительных сетях Таджикистана с малыми ГЭС /Актуальные проблемы энергетики АПК: материалы 4 междунар. науч. практ. конф. – Саратов, - 2012, с. 113-117.
5. **Фишов А. Г., Исмоилов С. Т., Труфакин С. С.** В компромиссном режиме. Мультиагентное регулирование / Журнал ЭНЕРГОНАДЗОР // - 2013, - № 9(50), - с. 34-35

Подписано в печать «__» _____ 2014 г. Формат
_____, объем ___ п.л. тираж ___ экз. заказ №
___ подписано в печать _____ г.

Отпечатано в типографии
Новосибирского государственного технического университета
630073, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20
тел./факс. (383) 346-08-57