

На правах рукописи

*Солодухин Александр Михайлович*

**Разработка методики определения электропотребления  
сельскохозяйственных потребителей региона на перспективу  
(на примере Калужской области)**

**Специальность 05.20.02 – Электротехнологии и электрооборудование в  
сельском хозяйстве**

**Автореферат  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук**

**МОСКВА 2011**

Работа выполнена в Федеральном государственном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Московский государственный агроинженерный университет имени В. П. Горячкина».

**Научный руководитель:** доктор технических наук, профессор  
*Лещинская Тамара Борисовна*

**Официальные оппоненты:** доктор технических наук, профессор  
*Кудрин Борис Иванович*  
доктор технических наук, профессор  
*Воробьев Виктор Андреевич*

**Ведущая организация:** Государственное научное учреждение  
«Всероссийский научно-исследовательский институт электрификации сельского хозяйства» (ГНУ ВИЭСХ)

Защита диссертации состоится 10 октября 2011 г. в 13.00 часов на заседании диссертационного совета Д 220.044.02 при ФГОУ ВПО «Московский государственный агроинженерный университет имени В. П. Горячкина» по адресу: 127550, г. Москва, ул. Лиственничная аллея, д.16-а, корпус 3, конференц-зал.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГОУ ВПО МГАУ.

Автореферат разослан 8 сентября 2011 г. и размещен на сайте ФГОУ ВПО  
МГАУ [www.msau.ru](http://www.msau.ru) «9» сентября 2011 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета,  
кандидат технических наук

С. А. Андреев

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность работы.** Система электроснабжения (СЭС) - большая сложная система, одним из свойств которой является динамика развития. Важным показателем при разработке и выборе вариантов развития СЭС является значение электропотребления на перспективу краткосрочную, среднесрочную и долгосрочную. Чем точнее прогноз электропотребления, тем режимы и параметры СЭС ближе к оптимальным. СЭС должна создаваться таким образом, чтобы при разумно минимальных затратах денежных средств, оборудования и материалов она обеспечивала надежное электроснабжение и подавала потребителям качественную электроэнергию, т.е. достигала целей функционирования.

В настоящее время СЭС сельских районов характеризуется почти стопроцентным износом электрооборудования (электрических сетей и трансформаторных подстанций), несовершенством схем питания, большой протяженностью воздушных линий 10 кВ, морально и физически устаревшим оборудованием и нуждается в коренной реконструкции и преобразовании. Требуется строительство новых районных трансформаторных подстанций 110/10; 35/10; 110/35/10 кВ что приведет к сокращению длин и радиусов ВЛ 10 кВ, снижению потерь электроэнергии в них, повышению надежности электроснабжения потребителей. Применение более совершенного электрооборудования (вакуумных выключателей, релейной защиты на микропроцессорах, изолированных проводов и др.) также повысит надежность электроснабжения.

Исходными данными при проектировании электрических сетей и планировании мероприятий по преобразованию СЭС сельских районов являются электрические нагрузки или электропотребление на перспективу.

Таким образом, разработка методики определения электропотребления сельскохозяйственных потребителей региона на перспективу является важной и **актуальной** задачей, так как методика определения электрических нагрузок, их достоверность оказывает существенное влияние на все последующие этапы проектирования.

Проблемой прогнозирования электропотребления для сельскохозяйственных районов занимались многие ученые, среди которых: И.А. Будзко, Б.И. Кудрин, С.Д. Волобровский, Б.В. Гнеденко, В.Ю. Гессен, А.Г. Захарин, Г.М. Каялов, П.Н. Клейн, Б.А. Князевский, А.А. Климов, Н.С. Канакин, А.П. Коршунов, М.С. Левин, Д.С. Лившиц, Ю.Л. Мукосеев, Г.И. Назаров, В.К. Плюгачев, А.А. Пястолов, П.Я. Пирхавк, В.Г. Стафийчук, Р.Я. Федосенко, Ю.А. Фокин, М.К. Харчев, В.М. Цвях, Л.Е. Эбин, В.В. Шереметьев, Пахамов А.В. и др.

Нормативными методами определения перспективного электропотребления в отрасли сегодня являются – экстраполяция временных рядов электропотребления и балансый метод. Их недостаток – проецирование тенденций прошлого на будущее, что снижает их точность и адекватность. Поэтому необходимо создать современные методы, основанные на учете большого количества факторов в динамике с применением новых достижений математики – нейронных сетей и техноценоза.

**Научная проблема.** Заключается в необходимости общей методологии определения электрических нагрузок на перспективу, применимой к различным регионам страны.

**Целью исследования** является разработка методики определения электропотребления сельскохозяйственных потребителей региона (на примере Калужской области) на перспективу, сравнение и анализ существующих методов прогнозирования электрических нагрузок, с выявлением наиболее качественного из них, по критерию наименьшей ошибки в прогнозе.

**Объектом исследования** являются методы прогнозирования электропотребления сельскохозяйственных районов Калужской области на перспективу.

**Методы исследования.** Для решения поставленных задач использовались методы основанные на ранговом анализе техноценозов и методы, в основе которых лежит аппарат нейронных сетей.

**Научная новизна.** Научную новизну результатов представляют: разработанные методы прогнозирования электропотребления сельскохозяйственных потребителей региона (на примере Калужской области), обеспечивающие единую методику определения расчетных нагрузок; показатели основных видов электрических нагрузок (промышленных, с/х, коммунально-бытовых), динамики их развития и других факторов, влияющих на перспективное электропотребление сельскохозяйственных потребителей области; математические модели, позволяющие с достаточной точностью выполнять краткосрочный прогноз ряда энергетических характеристик (электропотребления, мощности электродвигателей и т.п.), на основе исходных данных о развитии групп потребителей электроэнергетического направления.

**Практическая ценность работы.** Практическая значимость результатов заключается в разработанной методике определения электропотребления сельскохозяйственных потребителей региона на перспективу, которая может быть использована при проектировании новых электрических сетей (реконструкции существующих), а также полученных результатах исследования электрических нагрузок. Результаты диссертационной работы приняты и внедрены в ООО Инвестиционно-проектной группе «СИНЭФ».

**На защиту выносятся:** Методика прогнозирования электропотребления апробированная на сельскохозяйственных потребителях Калужской области.

**Апробация работы.** Основные положения и результаты диссертационной работы обсуждались на конференциях: 7-ая Международная научно-техническая конференция (Москва, ГНУ ВИЭСХ, 2010г.).

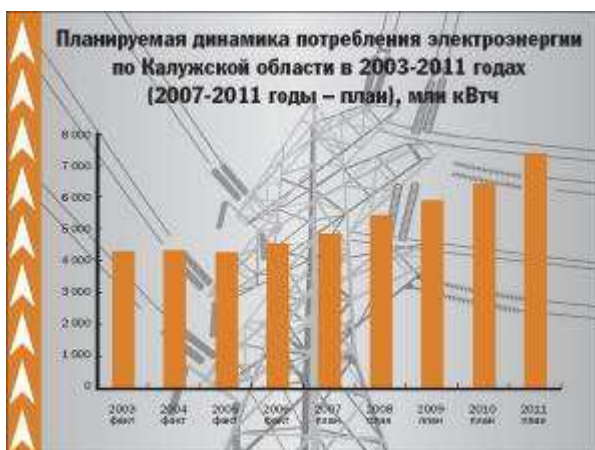
**Публикации.** Основные положения и выводы диссертации опубликованы в трудах научно-технической конференции и трех статьях, в изданиях, рекомендованных Высшей аттестационной комиссией Минобрнауки РФ.

**Структура и объем работы.** Диссертация состоит из введения, пяти глав, общих выводов и списка литературы, содержит иллюстрированный материал.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** обосновывается актуальность темы и проблема исследования; определяются его объект и цель; раскрывается научная новизна и достоверность исследования, его практическая ценность; формулируются основные положения, выносимые на защиту; указываются апробация научных результатов и публикации основных положений, структура и объем диссертации.

**В первой главе** «Электроэнергетический комплекс Калужской области» рассматривается история развития электроэнергетики Калужской области, взявшая свое начало в 1912 году, когда первая дизельная электростанция региона была введена в эксплуатацию и по настоящее время.



**Рисунок 1** - Планируемая динамика потребления электроэнергии.

На данный момент (на первое полугодие 2009 года) потребление электроэнергии в области выросло по сравнению с аналогичным периодом 2008 года на 0,9%, причем наибольший рост потребления наблюдается у сельскохозяйственных потребителей и сельского населения. Так прирост потребления производственных сельскохозяйственных потребителей составил 6,5%, городского населения – 2,9%, сельского населения – 10,2%, а

также потребителей, приравненных к категории «население» - 4,8%. Однако, существует некоторое снижение энергопотребления промышленными предприятиями. поставка электроэнергии для потребителей Калужской области, за исключением населения, по регулируемым ценам в первом полугодии составила от 57% до 67%.

Данная глава дает представление о системе электроэнергетики Калужской области, это сделано для того чтобы понять что Калужская область является областью, которая не имеет характерных особенностей и отличий от других областей центрального региона. Это позволяет на ее примере разрабатывать методику определения электропотребления сельскохозяйственных потребителей на перспективу, которую в последующем можно применить к любой другой области.

**Во второй главе** «Математические модели и методы прогнозирования» рассмотрена сущность понятия «прогнозирование», как процесс разработки прогнозов.

Прогноз – конкретное предсказание, суждение о состоянии какого-либо явления в будущем на основе специального научного исследования. Классификация прогнозов осуществляется, по двум признакам временному и функциональному. По временному признаку различают прогнозы: кратко-, средне-, долгосрочные и сверхдолгосрочные. Функциональная классификация прогнозов предполагает их деление на исследовательские, программные и ресурсные.

Также в этой главе описаны существующие методы прогнозирования и произвелась попытка применения их для прогнозирования потребления электроэнергии сельскохозяйственными потребителями Калужской области.

*- Корреляционный и регрессионный анализы.*

Задачи корреляционного анализа сводятся к измерению тесноты известной связи между варьирующими признаками, определению неизвестных причинных связей (причинный характер которых должен быть выяснен с помощью теоретического анализа) и оценки факторов, оказывающих наибольшее влияние на результативный признак.

Для практического использования моделей регрессии большое значение имеет их адекватность, т.е. соответствие фактическим статистическим данным.

Корреляционный и регрессионный анализ обычно проводится для ограниченной по объему совокупности. Поэтому показатели регрессии и корреляции – параметры уравнения регрессии, коэффициенты корреляции и детерминации могут быть искажены действием случайных факторов. Чтобы проверить, насколько эти показатели характерны для всей генеральной совокупности, не являются ли они результатом стечения случайных обстоятельств, необходимо проверить адекватность построенных статистических моделей.

*- Анализ временных рядов.*

Временным рядом называют последовательность наблюдений, обычно упорядоченную во времени, хотя возможно упорядочение и по какому-то другому параметру. Основной чертой, выделяющей анализ временных рядов среди других видов статистического анализа, является существенность порядка, в котором производятся наблюдения. Если во многих задачах наблюдения статистически независимы, то во временных рядах они, как правило, зависимы и характер этой зависимости может определяться положением наблюдений в последовательности. Природа ряда и структура порождающего ряд процесса могут предопределять порядок образования последовательности.

На практике для количественной оценки динамики явлений широко применяются следующие основные аналитические показатели: абсолютные приросты, темпы роста и темпы прироста. Причем каждый из этих показателей может быть трех видов: цепной, базисный и средний.

Описание динамики ряда с помощью среднего абсолютного прироста соответствует его представлению в виде прямой, проведенной через две крайние точки. В этом случае, чтобы получить прогноз на L шагов вперед (L – период упреждения), достаточно воспользоваться следующей формулой:

$$\hat{y}_{n+L} = y_n + L\overline{\Delta y}, \quad (1)$$

где:

$y_n$  – фактическое значение в последней n-ой точке ряда (конечный уровень ряда);

$\hat{y}_{n+L}$  – прогнозная оценка значения (n+L)-го уровня временного ряда;

$\overline{\Delta y}$  – значение среднего абсолютного прироста, рассчитанное для временного ряда

$y_1, y_2, \dots, y_n$ .

Очевидно, что этой подход к получению прогнозного значения корректен, если характер развития близок к линейному. Оценивая наш временной ряд, можно заключить, что его характер развития не линеен (рисунок.2).

ГОДЫ	Потребление
1993	3682,5
1994	3413,16
1995	3231,3
1996	3133,6
1997	3108,7
1998	3043,7
1999	3276,1
2000	3380,1
2001	3398,2
2002	3388,7
2003	3345,7
2004	3376,1
2005	3314,72
2006	3301,41
2007	3345,25
2008	3520,24



**Рисунок 2** - Ряд потребления электроэнергии Калужской областью в млн.кВтч.

Однако если рассмотреть временной промежуток с 1999 по 2007 год, то здесь просматривается линейная зависимость с четкой тенденцией потребления электроэнергии. Попытаемся определить прогнозное значение электропотребления на 2008 год с помощью среднего абсолютного прироста для этого участка ряда.

Расчет цепных абсолютных приростов происходит по формуле  $\Delta y_t = y_t - y_{t-1}$ .

$\Delta y_2 = 3380,1 - 3276,1 = 104$  (млн. кВтч); ...;  $\Delta y_9 = 3345,25 - 3301,41 = 43,84$  (млн. кВтч).

Хотя визуально динамика близка к линейной, цепные абсолютные приросты изменяются на всем промежутке времени ряда. По мнению экспертов, условием для применения этого приема прогнозирования должно являться сохранение инерционности развития показателя для всего периода упреждения (момента прогноза). Поэтому мы не можем считать этот метод прогнозирования как наиболее достоверным, однако определим прогнозное значение.

Значение среднего абсолютного прироста определим по формуле:

$$\overline{\Delta y} = \frac{3345,25 - 3276,1}{8} = 8,644 \text{ (млн.кВтч)}, \quad (2)$$

т.е. в среднем ежегодно в исследуемом периоде потребление электроэнергии изменялось на 8,6 (млн.кВтч).

Теперь определим прогнозное значение электропотребление Калужской области на 2008 год с помощью выражения:

$$\hat{y}_{10} = y_9 + \overline{\Delta y} = 3345,25 + 8,644 = 3353,894 \text{ (млн.кВтч)}, \quad (3)$$

Полученный прогноз, как ожидалось, не оказался достаточно точным (электропотребление за этот год составило 3520,24 млн.кВтч). Поэтому здесь требуются иные подходы для прогнозирования.

**В третьей главе** «Внутриквартирные электрические нагрузки сельских потребителей» рассмотрена методика сбора и обработки информации, необходимой для определения электрических бытовых нагрузок.

Для формирования исходных данных, для расчетов электрических нагрузок жилых зданий (квартир) и коттеджей (частных домов) на перспективу, была подготовлена анкета, которая предоставлялась к заполнению владельцу (жителю) квартиры/дома, и состоящая из следующих вопросов:

1. Область проживания опрашиваемого.
2. Количество светоточек в доме/квартире.
3. Количество электрических бытовых приборов и их мощность.
4. Площадь дома/квартиры.
5. Количество комнат в доме/квартиры.
6. Количество жителей в доме/квартире.

Нагрузка жилого дома/квартиры находится как сумма бытовых нагрузок и освещения. В таблице 1 представлены показатели, характеризующие осветительную нагрузку обследованных домов.

**Таблица 1** - Осветительная нагрузка домов.

Количество обследованных домов	Количество светоточек на 1 дом	Установленная мощность освещения на 1 дом (Вт)	Средняя мощность 1 светоточки (Вт)
69	10,812	1825,94	168,8809

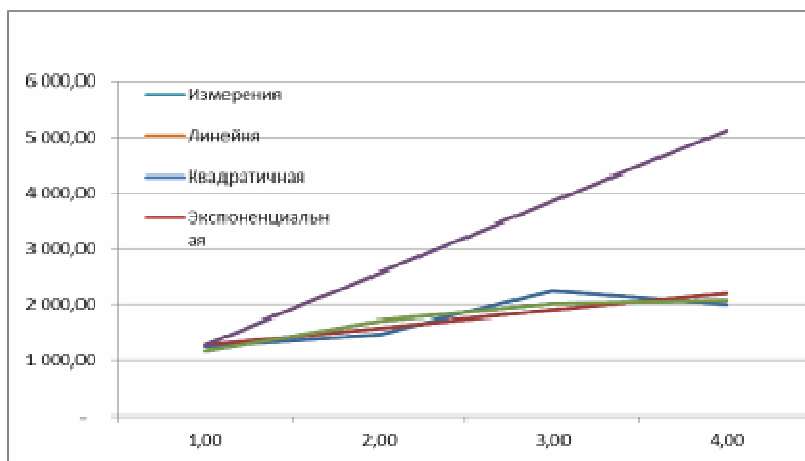
В работе приведены результаты исследования зависимости мощности освещения в доме/квартире от количества комнат, а также числовые оценки математического ожидания ( $m$ ), среднеквадратичного отклонения ( $\sigma$ ) и коэффициент вариации ( $v$ ) полученных статистических распределений.

Для того чтобы установить зависимость установленной мощности освещения ( $y$ ) от количества комнат в доме/квартире ( $x$ ) аппроксимируем функцию  $y=f(x)$  линейной ( $y=a_1+a_2x$ ), квадратичной ( $y=a_1+a_2x+a_3x^2$ ) и экспоненциальной ( $y=a_1e^{a_2x}$ ) функцией.

Полученные уравнения зависимостей выглядят так:

$$y=977,5987+303,3599x; y=394,48+886,48x-116,62x^2; y=1065,01e^{0,184x}. \quad (4)$$

Проанализировав полученные уравнения и построив график всех трех функций (рисунок 3), можно заключить, что наиболее подходящей зависимостью для нашего исследования является линейная зависимость.



**Рисунок 3** - Результаты аппроксимации: абсцисса - мощность, Вт; ордината - кол-во комнат

Получено следующее уравнение регрессии:

$$P_{осв}=977,5987+303,3599n, \quad (5)$$

где  $P_{осв}$  – установленная мощность освещения, Вт;

$n$  – количество комнат.

Определим степень линейной связи между  $P_{осв}$  и  $n$ , определив коэффициент корреляции Пирсона:  $r = 0,844836$  (при  $r = 1$  корреляция является полной прямой).

Полученные результаты позволяют сделать вывод, что одним из основных факторов, определяющим величину установленной мощности освещения является количество комнат в доме\квартире. Распределения домов по числу комнат в сельскохозяйственных регионах практически равны, однако, надо принять к сведению, что в таких регионах возрастает интерес к строительству коттеджей по индивидуальному проекту, с большим количеством комнат, что следует учесть при перспективном планировании осветительной нагрузки.

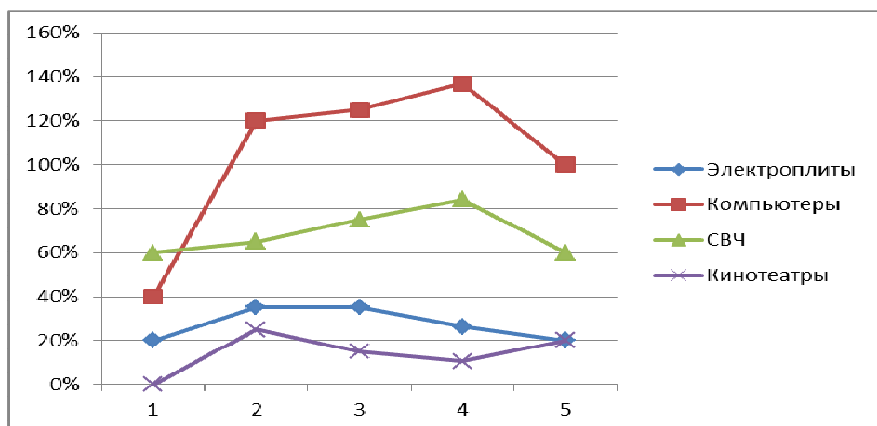
В таблице 2 приведены данные о показателях удельной установленной мощности электрических бытовых приборов на 1 дом/квартиру, осветительная нагрузка, а также суммарная нагрузка на 1 дом/квартиру.

**Таблица 2 - Показатели бытовой нагрузки.**

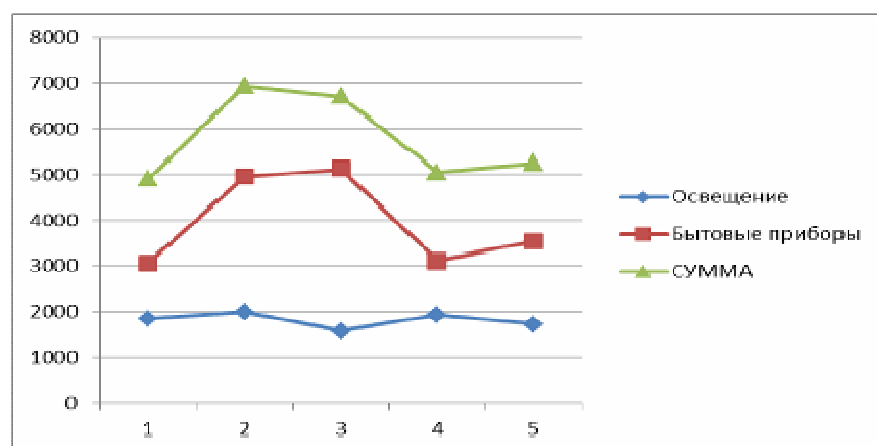
Количество обследованных домов	Осветительная нагрузка, Вт/дом	Бытовая нагрузка, Вт/дом	Суммарная нагрузка, Вт/дом
69	1825,94	4655,07	6481,01

Анализируя приведенное выше исследование, можно заключить, что установленная мощность освещения и бытовой нагрузки зависит от архитектурно-планировочных (число комнат, жилая площадь и т.д.) и социологических факторов (количество жителей, их возраст и т.д.).

Изменение уровней насыщения бытовых приборов и соответствующих нагрузок от численности семьи приведено на рисунках 4 и 5.



**Рисунок 4 - Уровни насыщения бытовыми приборами в зависимости от численности семьи: абсцисса – наличие бытовых электроприборов, % ордината – численность семьи.**



**Рисунок 5 - Уровни внутрисемейной нагрузки в зависимости от численности семьи: абсцисса – мощность общая, Вт ордината – численность семьи.**

Анализ показал что, при прогнозировании будущей бытовой нагрузки на этапе



строительства, следует учитывать перспективные изменения численности семьи, влекущие за собой и изменения бытовой нагрузки, а бытовая нагрузка обратнопропорциональна возрасту семьи.

В результате проведенного исследования получена возможность выявить зависимость перспективной расчетной электрической нагрузки от сегодняшней нагрузки.

В таблице 3 приведены данные о потреблении жилого сектора Калужской области за 15 лет с 1993 года по 2007 .

№№ п.п.	Год измерения	Потребление, млн.кВтч
1	1993	824,88
2	1994	764,5478
3	1995	723,8112
4	1996	701,9264
5	1997	696,3488
6	1998	681,7888
7	1999	733,8464
8	2000	757,1424
9	2001	761,1968
10	2002	759,0688
11	2003	749,4368
12	2004	756,2464
13	2005	742,4973
14	2006	739,5158
15	2007	749,336

**Таблица 3 -** Потребление населения за 15 лет.

В соответствии с методикой нахождения уравнения регрессии, рассмотренной ранее, был проведен анализ данных из таблицы 7, на основании которого, получена следующую зависимость:

$$W_{\text{нас.персп.}} = 0,9971W_{\text{тек.}} - 0,968, \quad r = 0,9958 \quad (6)$$

где  $W_{\text{нас.персп}}$  – перспективная нагрузка на жилой сектор , млн.кВтч;

$W_{\text{тек.}}$  – текущее потребление электрической энергии, млн.кВтч.

Уравнение тренда зависимости электропотребления от номера года имеет вид:

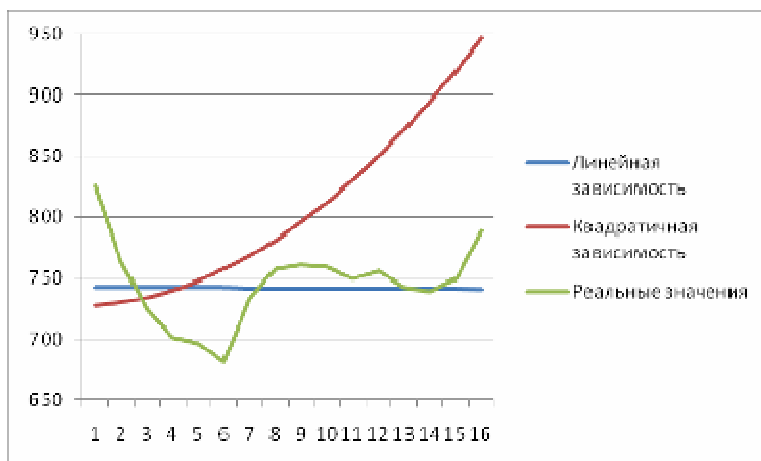
$$W_{\text{нас.персп.}} = 742,7726 - 0,09684n, \quad (7)$$

где  $W_{\text{нас.персп}}$  – перспективная нагрузка на жилой сектор , млн.кВтч;  
n – номер года.

Используя это уравнение, получено перспективное значение электропотребление на следующий временной промежуток, оно равно 741,2236 млн.кВтч, погрешность прогноза составляет 5,99% от фактического значения (788,5338 млн.кВтч). Однако, зависимость не близка к линейной, поэтому полученная погрешность будет меняться в зависимости от предыстории.

Прогнозное значение на 16-й год, по параболической модели, составляет 946,274 млн. кВтч, погрешность прогноза по модулю составляет 20,0% от фактического значения.

Как видно из рисунка 6, наиболее подходящая из зависимостей, это линейная зависимость.



**Рисунок 6 -** Соответствие данных исследования и найденной зависимости:

абсцисса – электропотребление, млн.кВтч  
ордината – года.

В результате исследования получены следующие зависимости:

- Зависимость мощности освещения от количества комнат:

$$P_{\text{осв}} = 977,5987 + 303,3599n, \quad (8)$$

где  $P_{\text{осв}}$  – установленная мощность освещения, Вт;

$n$  – количество комнат. (9)

- Зависимость бытовой нагрузки от количества комнат:

$$P_{\text{быт.}} = 6800,897 - 844,472n, \quad (10)$$

где  $P_{\text{быт.}}$  – установленная бытовая нагрузка на дом/квартиру, Вт;

$n$  – количество комнат. (11)

- Зависимость общей мощности от количества комнат:

$$W_{\text{сумм.}} = 7778,496 - 541,112n, \quad (12)$$

где  $W_{\text{сумм.}}$  – суммарная нагрузка дома/квартиры, Вт;

$n$  – количество комнат.

- Зависимость общей нагрузки от количества жителей:

$$W_{\text{сумм.}} = 6130,742 - 119,792n, \quad (13)$$

где  $W_{\text{сумм.}}$  – суммарная нагрузка дома/квартиры, Вт;

$n$  – количество жителей.

**В четвертой главе** рассмотрена «Разработка методики прогнозирования электропотребления техноценоза Калужской области» на основе рангового анализа техноценоза (на основе теории Кудрина Б.И.)

Техноценоз – ограниченная в пространстве и во времени, взаимосвязанная совокупность, далее неделимых, технических изделий/особей, объединенных слабыми связями. Прогнозирование проходит согласно следующим этапам:

Прогнозирование проходит согласно следующим этапам:

1. Выделение техноценоза, как совокупности изделий/особей ограниченных в пространстве и во времени (в нашем случае система электропотребления Калужской области была определена как техноценоз).

2. Определение семейства особей (потребители электроэнергии).

3. Обозначение видообразующих параметров (социологическая принадлежность потребителей).

4. Определение перечня видов особей техноценоза (мы имеем 5 групп потребителей: промышленные, с/х, населения, не промышленные и прочее).

5. Построение распределений и оптимизация ценоза.

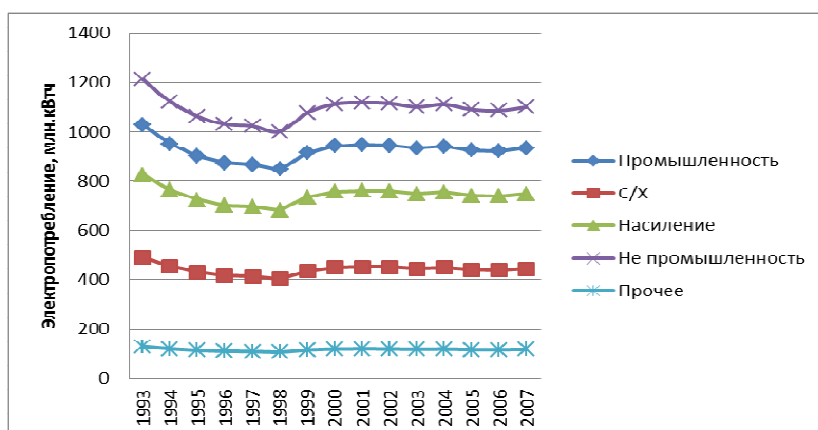
После того как данные об электропотреблении техноценоза имеются в нашем распоряжении, создается электронная база данных, которая представляет собой неупорядоченную совокупность значений исследуемых параметров особей техноценоза (таблица 4).

**Таблица 4 - Потребление техноценоза в период с 1993 г. по 2007 г. в млн.кВтч.**

ГОДЫ	$\Sigma$	Промышленность	СХ	Население	Не пром-ость	Прочее	$\Sigma$
1993	3682,5	1027,4175	489,7725	824,8800	1211,5425	128,8875	3682,50
1994	3413,16	952,2716	453,9503	764,5478	1122,9296	119,4606	3413,16
1995	3231,3	901,5327	429,7629	723,8112	1063,0977	113,0955	3231,30
1996	3133,6	874,2744	416,7688	701,9264	1030,9544	109,6760	3133,60
1997	3108,7	867,3273	413,4571	696,3488	1022,7623	108,8045	3108,70
1998	3043,7	849,1923	404,8121	681,7888	1001,3773	106,5295	3043,70
1999	3276,1	914,0319	435,7213	733,8464	1077,8369	114,6635	3276,10
2000	3380,1	943,0479	449,5533	757,1424	1112,0529	118,3035	3380,10
2001	3398,2	948,0978	451,9606	761,1968	1118,0078	118,9370	3398,20
2002	3388,7	945,4473	450,6971	759,0688	1114,8823	118,6045	3388,70
2003	3345,7	933,4503	444,9781	749,4368	1100,7353	117,0995	3345,70

2004	3376,1	941,9319	449,0213	756,2464	1110,7369	118,1635	3376,10
2005	3314,72	924,8069	440,8578	742,4973	1090,5429	116,0152	3314,72
2006	3301,41	921,0934	439,0875	739,5158	1086,1639	115,5494	3301,41
2007	3345,25	933,3248	444,9183	749,3360	1100,5873	117,0838	3345,25

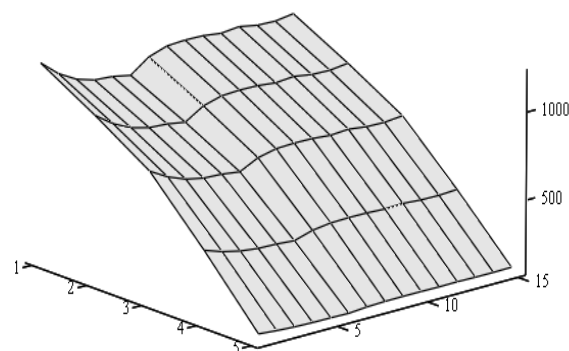
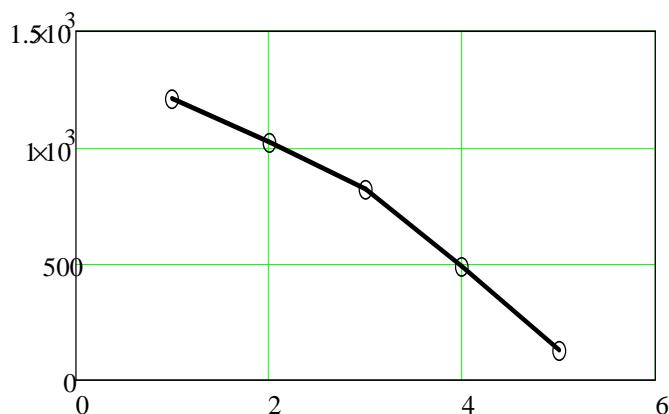
Несмотря на то, что мы имеем крайне малое количество групп потребителей, а именно: промышленность, с/х, население, не промышленность и прочее; постараемся применить ранговый метод исследования техноценозов к нашему региону, и проанализируем полученные результаты с предоставлением выводов о возможности использования данного метода для прогнозирования наших данных по электропотреблению области.



**Рисунок 7 - Электропотребление групп потребителей.**

Прогнозирование основано на ранговом анализе. Ранговый анализ – метод исследования техноценозов, полагающий в качестве основного критерия форму

видовых и ранговый распределений. Ранговое распределение – убывающая последовательность значений параметров, упорядоченная таким образом, что каждое последующее число меньше предыдущего, и поставлено в соответствии рангу (ранг – номер по порядку ряду натуральных чисел, расположенных в порядке возрастания) (рис.9, 10).



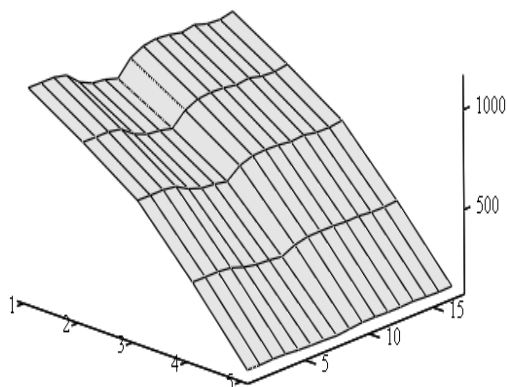
**Рисунок 8, 9 - Ранговое параметрическое распределение техноценоза (по состоянию на первый год исследований), трехмерная ранговая поверхность техноценоза: абсцисса – ранг объекта; ордината – электропотребление, млн.кВтч (рисунок 8); ордината – временной интервал (номер года исследования) (рисунок 9); аппликата – электропотребление, млн.кВтч.**

Необходимо определить является ли техноценоз взаимосвязанным по параметру электропотребления путем вычисления коэффициента конкордации, что показывает согласованность перемещения объектов по ранговой поверхности при переходе от одного временного интервала к последующему.

$$K_{\text{www}} := \frac{12 \cdot \text{SDKV}}{m^2 \cdot (n^3 - n)} \quad K=1 \quad (14)$$

Для совокупности данных, используемых в нашем исследовании, коэффициент конкордации значим, что свидетельствует о том, что наш техноценоз взаимосвязан по параметру электропотребления. Однако, не всегда исходные данные, полученные для исследования техноценоза, вполне корректны, что влияет на дальнейший его анализ и на такие процедуры как прогнозирование. Следовательно, необходимо провести предварительную процедуру верификации базы данных, которая включает следующие подпроцедуры: устранение нулевых данных, устранение явно ошибочных данных (выбросов), устранение абсолютно равных данных, восстановление утерянных данных.

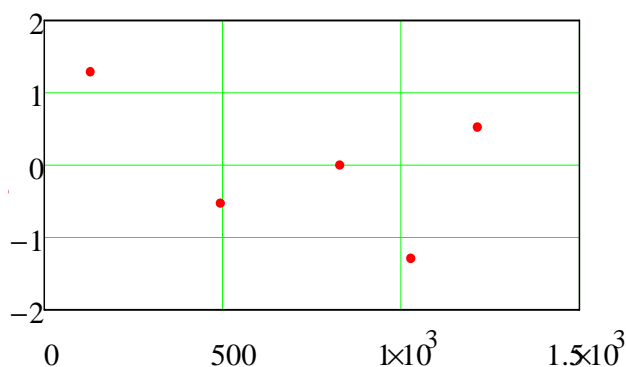
По завершению построена трехмерная ранговая поверхность (рисунок 10).



**Рисунок 10** - Верифицированная трехмерная ранговая поверхность: абсцисса - ранг объекта; ордината - непрерывное время (годы); аппликата - электропотребление, млн.кВтч.

Ключевое значение имеет проверка на соответствие критериям Н-распределения. Во-первых, совокупность данных не должна подчиняться нормальному закону и, во-

вторых, данные должны являться значимо взаимосвязанными (найденный выше коэффициент конкордации свидетельствует о взаимосвязанности техноценоза). В случае если обе гипотезы выполняются - исследуемый объект является техноценозом, а данные по его электропотреблению могут обрабатываться методами рангового анализа.



**Рисунок 11** - Проверка гипотезы о несоответствии распределения нормальному закону: абсцисса – электропотребление, млн.кВтч; ордината - квантили.

Из графика (рисунок 11) видно, точки не лежат вблизи какой-либо прямой, гипотеза о нормальном распределении генеральной совокупности отвергается. В данном случае мы имеем дело с ярко

выраженным техноценозом. Подобный вывод позволяет в дальнейшем при обработке статистических данных по электропотреблению использовать методологию рангового анализа.

Далее необходимо выявить математическую модель, путем аппроксимации этого распределения. Среди исследователей техноценозов выбрана следующая модель:

$$y = \frac{a}{1 + b \cdot x^c}$$

В работе аппроксимация проведена методом наименьших модулей, наименьших квадратов и линейный метод наименьших квадратов. Выявлено, что наиболее корректным является метод наименьших модулей:

$$y = \frac{a}{1 + b \cdot x^c} = \frac{1212}{1 + 0.653 \cdot x^2} \quad (16)$$

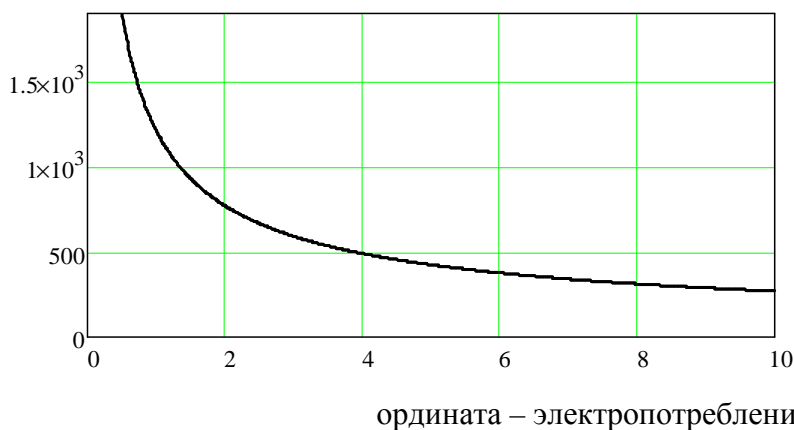


График результирующей аппроксимационной кривой параметрического распределения техноценоза представлен на рисунке 12.

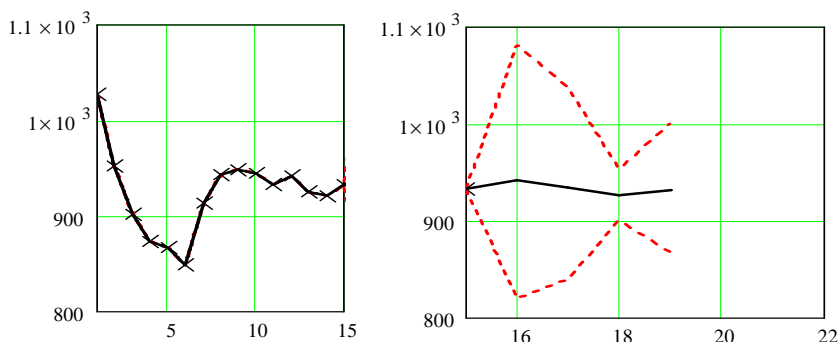
**Рисунок 12** - График результирующей аппроксимационной кривой параметрического распределения техноценоза: абсцисса – ранг объекта; ордината – электропотребление, млн.кВтч.

Найдены значения коэффициентов  $W$  и  $\beta$  за весь временной интервал (таблица 5).

**Таблица 5** - Данные аппроксимации за весь интервал.

№ года	93	94	95	96	97	98	99	00	01	02	03	04	05	06	07
$W \cdot 10^3$	1,212	1,23	1,063	1,031	1,023	1,001	1,078	1,112	1,108	1,105	1,101	1,111	1,091	1,086	1,101
$\beta$	0,653	0,653	0,6653	0,653	0,653	0,653	0,646	0,647	0,653	0,653	0,653	0,547	0,546	0,619	0,654

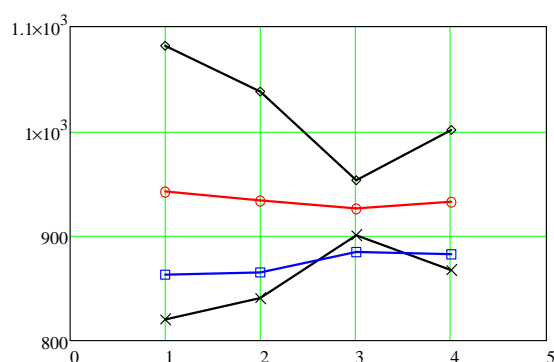
Ранговый анализ позволяет провести прогноз по средствам нескольких методов: G-метод на основе анализа главных компонент, G-метод на основе декомпозиции временных рядов, Z-методом на основе техноценологической методологии (крупный математический аппарат которых имеется в диссертации). Здесь представлен результат G-метода на основе декомпозиции временных рядов.



**Рисунок 13** - Электропотребление объекта (группы промышленность) на последующих временных шагах: абсцисса – номер года; ордината – электропотребление в относительных единицах;

Левая часть графика – электропотребление за известный период времени с реальными данными (крестики); правая часть графика – прогнозное значение электропотребления с 95%-ми доверительными границами (штриховые линии).

Рассматривая подробнее правую часть графика выявляем прогнозные минимальные и максимальные возможные значения и прогнозные доверительные 95%-ые интервалы с учетом тренда на год. Результат прогноза на 4 года представлен в таблице 10 и на рисунке 14.



**Рисунок 14 - Прогноз**  
электропотребления объекта на последующие  
4 года:

абсцисса – номер года;

ордината – электропотребление, млн.кВтч;  
EP(2) – EP(3) – прогнозный минимальный –  
медианный интервал с учетом тренда на год;  
EP(5) – EP(4) – прогнозный доверительный  
95%-ый интервал с учетом тренда на год.

**Таблица 6 - Таблица прогнозных значений**  
электропотребления объекта

(млн.кВтч)

Номер года	MIN	MAX	Доверительная верхняя граница	Доверительная нижняя граница
1	863,631	942,128	1082	820,103
2	865,734	933,892	1038	840,499
3	884,398	926,718	953,423	900,761
4	882,611	932,412	1002	867,774

На основе выше рассмотренного метода прогнозирования значений электропотребления на примере промышленного сектора Калужской области, был проведен прогноз для других групп с/х, население, не промышленность, прочее).

**Таблица 7 - Итоги прогноза.**

Наименование потребителя	Номер года	В период с 2008 года по 2011 год (1-4).			
		Минимальные значения	Медианные значения	Доверительные 95% границы	
ПРОМЫШЛЕННОСТЬ	1	863,631	942,128	820,103	1082
	2	865,734	933,9862	840,499	1038
	3	884,398	926,718	900,761	953,423
	4	882,611	932,412	867,774	1002
СЕЛЬСКОЕ ХОЗЯЙСТВО	1	411,695	449,115	390,945	515,939
	2	412,698	445,189	400,668	494,657
	3	421,595	441,769	429,385	454,499
	4	420,743	444,483	413,67	477,591
НАСЕЛЕНИЕ	1	693,381	756,404	658,434	868,95
	2	695,07	749,792	674,81	833,106
	3	710,054	744,032	723,191	765,472
	4	708,62	748,603	696,708	804,363
НЕ ПРОМЫШЛЕННОСТЬ	1	1018	1111	967,075	1276
	2	1021	1101	991,126	1224
	3	1043	1093	1062	1124
	4	1041	1100	1023	1181
ПРОЧЕЕ	1	108,341	118,188	102,88	135,773
	2	108,605	117,155	105,439	130,173
	3	110,946	116,255	112,999	119,605

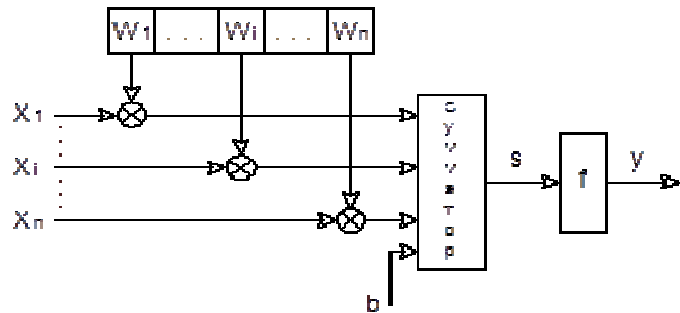
Теоретические значения, полученные прогнозным путем, с помощью методов рангового анализа техноценоза, соответствуют реальному значению, полученному опытным путем за 2008 год (промышленность 982,147 млн.кВтч, с/х 468,1919 млн.кВтч, население 788,5338 млн.кВтч, не промышленность 1158,159 млн.кВтч, прочее 123,2084 млн.кВтч) с вероятной ошибкой для каждой из групп потребителей в 4,07%. На основании этого можно заключить, что данная методика прогнозирования электропотребления Калужской области, как техноценоза, позволяет с достаточной вероятностью и известной ошибкой провести прогноз и получить вполне корректные данные о потреблении как в целом по региону, так и отдельно взятой той или иной группы потребителей.

Принимая во внимание расчетную ошибку данного метода прогнозирования, применительно к Калужской области, можно использовать полученные данные прогноза, как для планирования строительства новых сетей, так и для совершенствования уже существующих сетей, при выявлении такой необходимости. Преимущество модели заключается также в том, что она не требует привлечения большого количества данных, как это требуется в многофакторных моделях. Данная методика обеспечивает приемлемую точность необходимую для заключения договоров с энергосистемами и позволяет находить новые пути в решении вопросов энергосбережения.

**Пятая глава «Нейронные сети и применение их в прогнозировании».**

В последнее десятилетие, с огромными темпами развития технического прогресса и компьютеризации, наблюдается повышение интереса к интеллектуальным технологиям. Причина заключается в неограниченных возможностях и относительной простоты в использовании. Одной из таких технологий является технологии искусственных нейронных сетей. На основе их и проведен прогноз в данном разделе диссертации.

Искусственная нейронная сеть – совокупность моделей биологических нейронных сетей. Представляют собой сеть элементов (искусственных нейронов) связанных между собой синаптическими соединениями. Сеть обрабатывает входную информацию и в процессе изменения своего состояния во времени формирует совокупность выходных сигналов. На рисунке 15 представлена структура нейрона.



**Рисунок 15** - Структура искусственного нейрона.

Математическая модель нейрона имеет следующий вид:

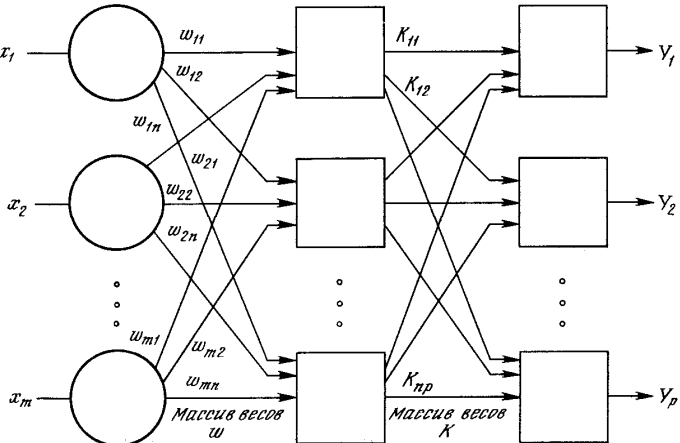
$$S = \sum_{i=1}^n w_i x_i + b, \quad (17)$$

$$y = f(S), \quad (18)$$

где  $w_i$  – вес синапса,  $i = 1 \dots n$ ;  $b$  – значение смещения;  $S$  – результат суммирования;  $x_i$  – компонент входного вектора (входной сигнал);  $y$  – выходной сигнал нейрона;  $n$  – число входов нейрона;  $f$  – нелинейное преобразование (функция активации).

На рисунке 16 представлена многослойная нейронная сеть, как объединение нейронов.

**Рисунок 16** - Многослойная (двухслойная) сеть прямого распространения.

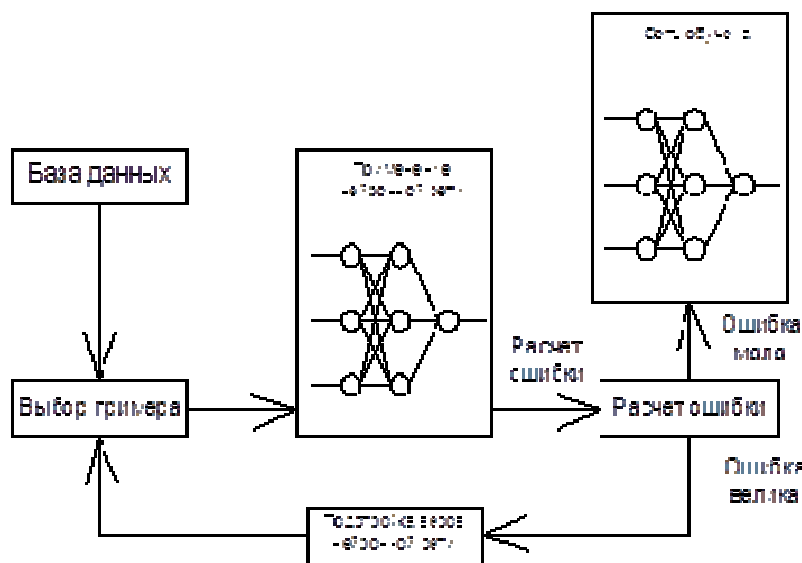


**Рисунок 16** - Многослойная (двухслойная) сеть прямого распространения.

Слева направо: входной слой, скрытый слой, выходной слой.



Процесс функционирования нейронной сети зависит от величин синаптических связей. Поэтому, задавшись архитектурой сети, необходимо найти значения переменных весовых коэффициентов. Этот этап называется обучением нейронной сети, и от того, насколько качественно он будет выполнен, зависит способность сети решать поставленные перед ней проблемы во время функционирования. Процесс обучения представлен на рисунке 17.

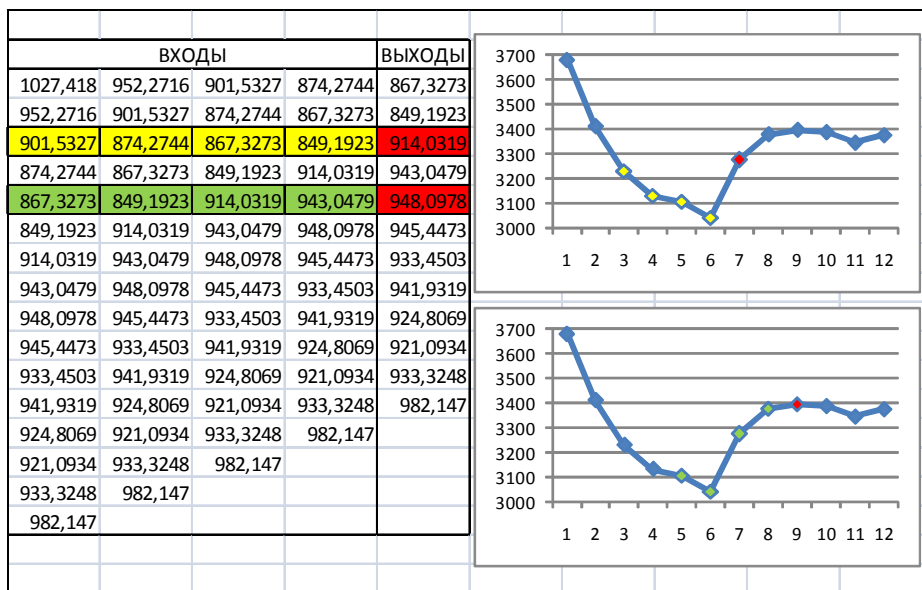


При прогнозировании задача заключается в создании нейронной сети, с помощью которой, можно прогнозировать значения электропотребления того или иного региона, основываясь на имеющихся данных по электропотреблению за последнее время, используя все тот же временной ряд.

**Рисунок 17** - Процесс обучения нейронной сети

Очевидно, что прогнозирующая нейронная сеть должна иметь всего один выход и столько входов, сколько предыдущих значений мы используем для прогноза (например, 4 последних значения).

Очевидно, что прогнозирующая нейронная сеть должна иметь всего один выход и столько входов, сколько предыдущих значений мы используем для прогноза (например, 4 последних значения).



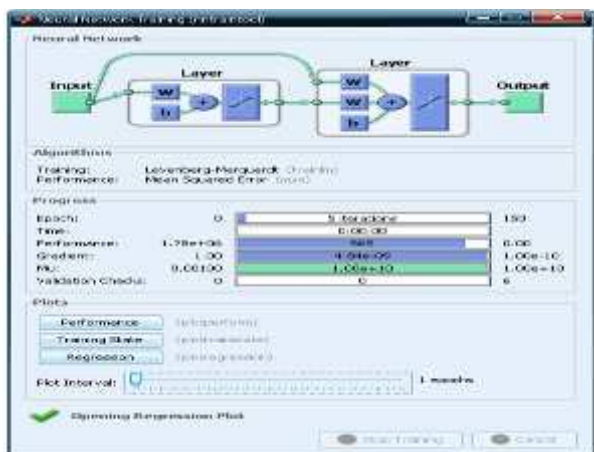
На рисунке 18 представлена обучающая выборка.

**Рисунок 18** - Обучающая выборка.

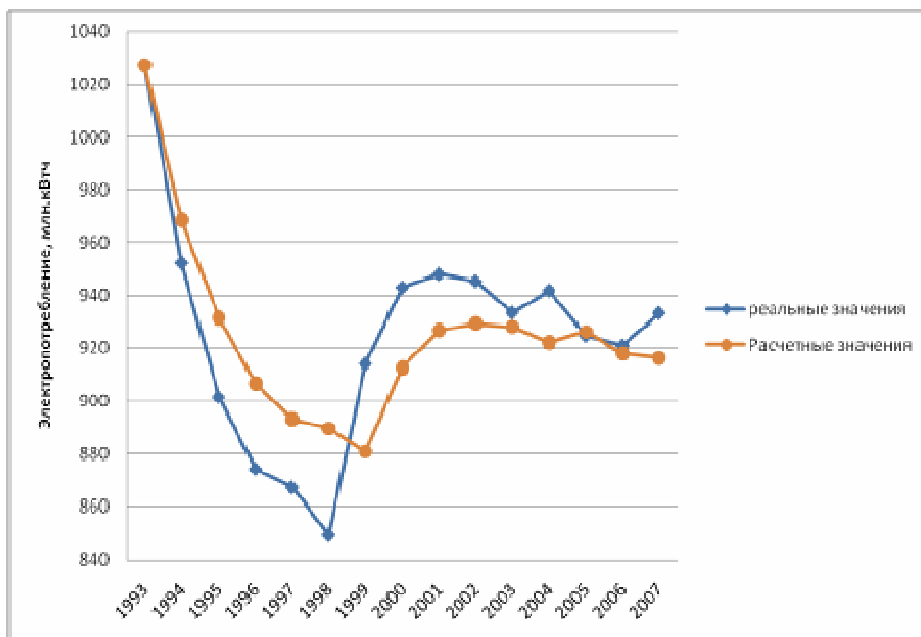
Здесь на вход подается 4 известных значения и на выходе указывается 5-ое значение. Во второй строке указываем также 4 значения, но 4-ое значение это 5-ое с первой строки, и

т.д. Однако для четвертой снизу строки заданы все четыре входных значения, но неизвестно значение выхода нейронной сети, именно к этой строке мы будем применять обученную нейронную сеть для получения прогнозного значения на последующий год.

После составления выборки выбираем архитектуру сети, и используя пакет Neural Networks Toolbox обучаем сеть (рис.19). Функция имеет вид: `net=newcfc(PR,[S1 S2...SN1],[TF1 TF2...TFN1],BTF,BLF,PF`







**Рисунок 19** - Процесс обучения в MATLAB «Neural Network Training».

**Рисунок 20** - Графический результат работы нейронной сети.

Ошибка имеет непостоянный характер (табл.8), однако максимальное отклонение составляет всего  $\Delta=4,5\%$ , это показывает, что сеть работает оптимально при заданных ей значениях параметров электропотребления.

ГОДЫ	Реальные значения, млн.кВтч	Расчетные значения, млн. кВтч	Ошибка, %
1993	1027,418	1027,418	0
1994	952,2716	968,4623	1,671795
1995	901,5327	931,4801	3,215034
1996	874,2744	906,5095	3,555958
1997	867,3273	893,0946	2,88517
1998	849,1923	889,6757	4,550355
1999	914,0319	880,7507	-3,77873
2000	943,0479	912,6608	-3,32951
2001	948,0978	926,9407	-2,28247
2002	945,4473	929,426	-1,72378
2003	933,4503	928,1216	-0,57414
2004	941,9319	922,2174	-2,13773
2005	924,8069	926,3915	0,171051
2006	921,0934	917,9636	-0,34095
2007	933,3248	916,1361	-1,87622

**Таблица 8** - Числовой результат работы нейронной сети.

После получения обученной нейронной сети, зададим новые входящие параметры и получим прогнозное значение электропотребления на 2008 год. Получен следующий результат:

a =  
 Columns 1 through 11  
 931.4801 906.5095 893.0946  
 889.6757 880.7507 912.6608  
 926.9407 929.4260 928.1216  
 922.2174 926.3915  
 Columns 12 through 14  
 917.9636 916.1361 922.1556

Таким образом получено прогнозное значение за 2008 год равное 922,1556 млн.кВтч, отклонение от фактического значения  $\Delta=6,108\%$  (982,147 млн.кВтч).

Рассчитаем значения электропотребления группы промышленных потребителей Калужской области используя созданную нейронную сеть в период с 2008 по 2011 года и сравним их с данными полученными путем рангового анализа (таблица 9).

**Таблица 9** - Сравнение результатов прогноза.

Метод	2008 г.	2009г.	2010г.	2011г.
Ранговый метод	942,128	933,9862	926,718	932,412
Метод нейронных сетей	911,3035	919,4593	921,1628	915,5518

Сравнение фактических данных с данными полученными ОАО «Калужская сбытовая компания» и результатами исследования данной диссертации отражено в таблице 10.

**Таблица 10** - Сравнение результатов прогноза.

Года	Фактическое значение электропотребления, млн.кВт.ч.	Ранговый анализ, млн.кВт.ч.	ОАО «Калужская сбытовая компания», млн.кВт.ч.
2008	3520,24	3376,835	4370,22
2009	3662,1	3347,1222	4774,87
2010	3853,21	2231,774	4766,77
2011	---	3342,467	3925,29

Согласно данным таблицы 10 делаем вывод, что прогнозные значения электропотребления, полученные согласно методике рангового анализа техноценоза, наиболее точно отображают действительный фактический результат нежели прогнозные данные полученные экспертами ОАО «Калужская сбытовая компания».

В таблице 11 показано отклонение расчетных значений электропотребления области от фактических, выраженное в процентах.

**Таблица 11** - Сравнение результатов прогноза. Ошибка прогноза.

Года	2008	2009	2010
Ранговый анализ, %	4,073727928	8,601015811	13,79203314
ОАО «КСК», %	-24,14551281	-30,38611726	-23,70906335

Анализ данных показывает – метод, основанный на ранговом анализе техноценоза, увеличивает свою погрешность с увеличением интервала глубины прогнозирования, следовательно, данный метод пригоден для краткосрочного прогнозирования (от 1 до 4 лет). Однако результат, который показал метод прогнозирования ОАО «КСК» значительно отличается от фактического, наибольшая ошибка здесь составляет 30,38%, а это 850 млн.кВт.ч. По одноставочному тарифу Калужской области для населения, проживающего в сельских населенных пунктах, на один кВт.ч приходится 2,07 руб., согласно этому 850 млн.кВт.ч это 1759,5 млн.руб. То есть небольшая ошибка в прогнозе ОАО «КСК» стоит государству потерей ежегодно около полутора триллиона рублей. В условиях рыночной экономики такие потери денежных средств не допустимы, соответственно этим подчеркивается актуальность разработанной нами методики и применение ее для расчетов прогнозных значений электропотребления различных регионов нашей страны.

#### **Основные выводы.**

В работе получены и защищаются следующие результаты:

1. На основе анализа статистического материала электропотребления сельским хозяйством Калужской области установлено, что погрешность прогноза электропотребления, выполненного по методике энергосистем составила свыше 30% на 2009 год и около 24% на 2010 год, что позволяет сделать вывод о необходимости создания более точных методов прогнозирования электропотребления.

2. Рассмотрено три математические модели перспективного электропотребления сельского хозяйства Калужской области – линейная, квадратичная, экспоненциальная (бытовые нагрузки). Наиболее точный прогноз дает линейная модель при экстраполяции временных рядов электропотребления, но ее погрешность также велика.

3. В диссертации разработаны методы краткосрочного (от 1 до 5 лет) прогнозирования электропотребления сельского хозяйства области, основанные на представлении системы электроснабжения техноценозом и с использованием математического аппарата нейронных сетей.

4. Ошибка рангового анализа составляет 4,07%, ошибка метода с применением нейронных сетей – 7,2%. Можно заключить, что сеть реагирует на новые данные менее точно, чем на данные прогнозируемые на один год вперед. Чем больше период прогнозирования тем меньше точность прогноза с использованием нейронных сетей. Следовательно этот метод пригоден только для кратковременного прогнозирования от 1 до 4 лет.

5. Экономический эффект для Калужской области при повышении точности прогноза может составить до триллиона рублей ежегодно.

Основные положения исследования отражены в следующих **публикациях**:

1. Солодухин, А.М. Оптимизация электроснабжения на основе рангового анализа ч.1 [Текст] / А.М. Солодухин // Сельский механизатор. - научно-производственный журнал / Учредители: Министерство сельского хозяйства Российской Федерации, ООО «Нива», ФГБОУ ВПО МГАУ им. В.П. Горячкина – М., 2010. – ISSN 0131-7393, 2010, №10. – с. 26 – 27.

2. Солодухин, А.М. Оптимизация электроснабжения на основе рангового анализа ч.II [Текст] / А.М. Солодухин // Сельский механизатор. - научно-производственный журнал / Учредители: Министерство сельского хозяйства Российской Федерации, ООО «Нива», ФГБОУ ВПО МГАУ им. В.П. Горячкина – М., 2010. – ISSN 0131-7393, 2010, №11. – с.27, 29.

3. Солодухин, А.М. Оптимизация электроснабжения сельскохозяйственных районов на основе рангового распределения [Текст] / А.М. Солодухин // Труды 7-й Международной научно-технической конференции «Энергообеспечение и энергосбережение в сельском хозяйстве» часть 1. «Проблемы энергообеспечения и энергосбережения» / Учредитель: ГНУ ВИЭСХ – М., 2010. – ISSN 0131-5277, 2010. – с. 250 – 255.

4. Солодухин, А.М. Прогнозирование электропотребления региона на основе нейронных сетей [Текст] / А.М. Солодухин // Техника в сельском хозяйстве. – научно-теоретический журнал / Учредитель: Российская академия сельскохозяйственных наук – М., 2011. – ISSN 0131-7105, 2011, №4. – с. 18 – 19.

Подписано к печати \_\_.\_\_.2011. Формат 60×84/16. Гарнитура Таймс.

Бумага офсетная. Печать трафаретная. Усл.-печ. л. . Тираж 100 экз. Заказ № .

Отпечатано в издательском центре ФГОУ ВПО МГАУ.

Адрес: 127550, Москва, Тимирязевская, 58. Тел. 976-02-64.