

**МИНИСТЕРСТВО СЕЛЬСКОГО ХОЗЯЙСТВА РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**  
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ  
ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«БРЯНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ АГРАРНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Институт энергетики и природопользования

Яковенко Н.И.

## **МЕТОДИКА ОПТИМАЛЬНОГО УПРАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОПОТРЕБЛЕНИЕМ**

Методические рекомендации  
по организации самостоятельной работы студентов  
по дисциплине «Управление электропотреблением»  
для студентов очной и заочной форм обучения  
направления подготовки  
13.04.02 Электроэнергетика и электротехника

Брянская область 2018

УДК 658.26:621.311 (076)

ББК 32.965.9

Я 47

Яковенко, Н. И. Методика оптимального управления электропотреблением: методические рекомендации по организации самостоятельной работы студентов по дисциплине «Управление электропотреблением» для студентов очной и заочной форм обучения направления подготовки 13.04.02 Электроэнергетика и электротехника / Н. И. Яковенко. – Брянск: Изд-во Брянский ГАУ, 2018. – 27 с.

Методические рекомендации по организации самостоятельной работы студентов являются обязательной частью учебно-методических комплексов учебных дисциплин, реализуемых в ФГБОУ ВО Брянский ГАУ, в том числе и по направлению подготовки 13.04.02 «Электроэнергетика и электротехника».

Цель изучения дисциплины – формирование у магистров системы знаний и практических навыков, необходимых для решения задач в области разработки и эксплуатации современного электротехнологического оборудования в агропромышленном комплексе.

Рецензент: профессор, д.т.н. Погоньшев В.А.

Рекомендовано к изданию учебно-методической комиссией института энергетики и природопользования, протокол № 6 от 10.04.2018 г.

© Брянский ГАУ, 2018

© Яковенко Н.И. 2018

## СОДЕРЖАНИЕ

Введение	4
Методика оптимального управления электропотреблением	5
Литература	24

## Введение

Методические рекомендации по организации самостоятельной работы студентов являются обязательной частью учебно-методических комплексов учебных дисциплин, реализуемых в ФГБОУ ВО Брянский ГАУ, в том числе и по направлению подготовки 13.04.02 «Электроэнергетика и электротехника».

Цель изучения дисциплины – формирование у магистров системы знаний и практических навыков, необходимых для решения задач в области разработки и эксплуатации современного электротехнологического оборудования в агропромышленном комплексе.

Цель методических рекомендаций для самостоятельной работы студентов – определить роль и место самостоятельной работы в учебном процессе; конкретизировать ее уровни, формы и виды; обобщить методы и приемы выполнения определенных видов учебных заданий; объяснить критерии оценивания.

Главной целью профессионального образования является подготовка квалифицированного работника соответствующего уровня и профиля, конкурентоспособного на рынке труда, компетентного, ответственного, свободно владеющего своей профессией и ориентированного в смежных областях деятельности, способного к эффективной работе по специальности на уровне мировых стандартов, готового к постоянному профессиональному росту, социальной и профессиональной мобильности. Решение поставленных задач невозможно без повышения роли самостоятельной работы студентов в освоении учебного материала, усиления ответственности преподавателей за развитие навыков самостоятельной работы, за стимулирование профессионального роста студентов, воспитание творческой активности и инициативы.

Самостоятельная работа студентов – планируемая учебная, учебно-исследовательская, научно-исследовательская работа, выполняемая во внеаудиторное (аудиторное) время по заданию и при методическом руководстве преподавателя, но без его непосредственного участия (возможно частичное непосредственное участие преподавателя при сохранении ведущей роли студентов).

Целью самостоятельной работы студентов является овладение фундаментальными знаниями, профессиональными умениями и навыками по профилю будущей профессии, опытом творческой, исследовательской деятельности, развитие самостоятельности, ответственности и организованности, творческого подхода к решению проблем учебного и профессионального уровней.

Для расширения знаний по дисциплине рекомендуется использовать интернет-ресурсы: проводить поиск информации в различных поисковых системах, на сайтах и в обучающих программах, рекомендованных преподавателем на лекционных занятиях. Для лучшего усвоения учебного материала и подготовки к занятиям предполагается активная внеаудиторная самостоятельная работа студентов с учебной литературой, с нормативными, методическими и справочными материалами.

## МЕТОДИКА ОПТИМАЛЬНОГО УПРАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОПОТРЕБЛЕНИЕМ

Энергоемкость российской продукции в 3 – 4 раза выше, чем в развитых европейских странах и США, и в 7 раз выше, чем в Японии (рис. 1). В последние 10 – 15 лет этот показатель у нас продолжает из года в год ухудшаться. Примечательно, что здесь мы контрастируем с некоторыми бывшими республиками СССР, ныне независимыми государствами. Примером может служить Литва, где за последние несколько лет отмечается высокий рост промышленного производства при неизменном уровне потребления электроэнергии. Думается, ситуация и не изменится, если мы не пойдем по пути, пройденному США, Германией, Японией и другими странами с начала энергетического кризиса 70-х годов XX века, когда на практике стали использоваться методы исследования и оптимизации больших электротехнических и электроэнергетических комплексов и систем.

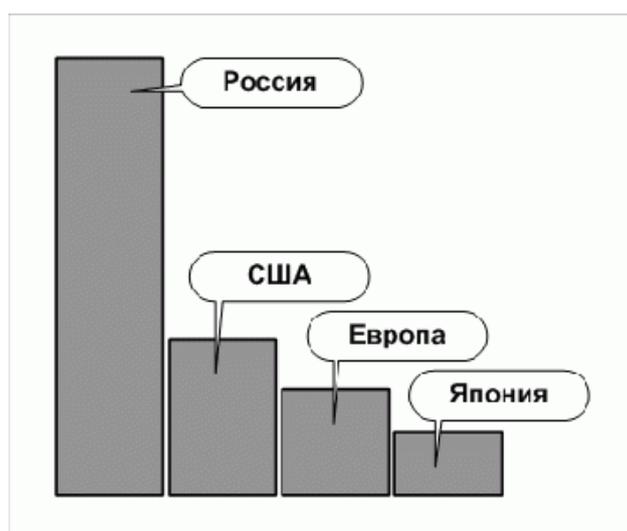


Рис. 1. Энергоемкость промышленного производства

Основу энергосбережения в электроэнергетике составляет планомерная реализация комплекса технических и технологических мер, которым должна предшествовать оптимизация электропотребления инфраструктуры на системном уровне. Ее целью является упорядочение электропотребления объектами инфраструктуры, экономия направленных на оплату за потребленную электроэнергию средств, полученная за счет организационных мероприятий, а также создание научно обоснованных предпосылок для проведения целенаправленных энергетических обследований с последующей реализацией технических и технологических мер по энергосбережению. Под инфраструктурой (техноценозом [8]) понимается регион в целом, город, район, крупное предприятие, фирма, группировка войск, сеть магазинов или заправочных станций и т.п. [7].

Методология исследований в области энергосбережения, в соответствии с [5,7], может быть условно разделена на три уровня (рис. 2).

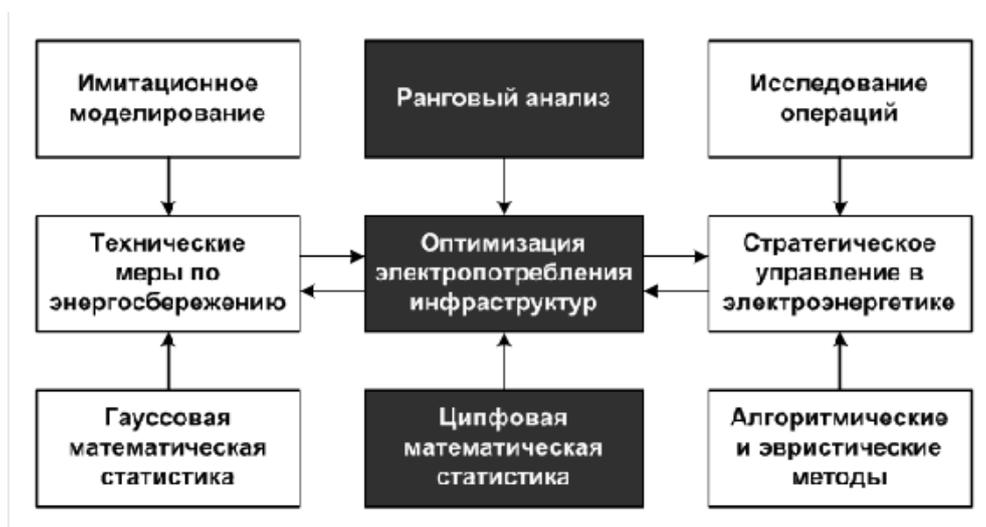


Рис. 2. Методологические уровни исследований в области энергосбережения

Первый уровень соответствует исследованиям, нацеленным на конкретные технические и технологические разработки, способствующие снижению энергопотребления (замена устаревшей светотехнической аппаратуры, внедрение энергосберегающих частотно-регулируемых электроприводов, модернизация внутреннего электрооборудования зданий и сооружений и т.д.). В основе методологии здесь лежит имитационное моделирование, которое базируется на аксиоматике гауссовых распределений. Это позволяет широко использовать вероятностные свертки при определении законов функционирования и квазипараллельные алгоритмы при моделировании. С другой стороны, на третьем уровне исследований (рис. 2) осуществляется стратегическое планирование и прогнозирование в электроэнергетике (маневрирование максимумами нагрузок в энергосистеме, снижение потерь в линиях электропередач, эффективный контроль над коэффициентом мощности и т.д.). Здесь находит применение методология исследования операций, которая в основном базируется на эвристических и алгоритмических процедурах.

Связующим звеном в представленной классификации является промежуточный (второй, средний) уровень исследований. На нем осуществляется оптимизация электропотребления инфраструктур, будучи взятыми в целом. В качестве методологической основы на этом уровне широко применяется ранговый анализ, основывающийся на техноценологическом подходе, цифровой математической статистике и теории гиперболических безгранично делимых распре-

делений [1-9]. Именно этот уровень является ключевым при построении методологии управления энергосбережением инфраструктурных объектов. Учитывая принципиальные концептуальные и методологические отличия, лежащие в основе исследований на втором уровне, он рассматривается как системный по отношению к уровню исследований, касающихся конкретных технических и технологических решений в области энергосбережения [10]. Оптимизация энергосбережения на системном уровне осуществляется в рамках связанной методики в четыре этапа (рис. 3) [5,7].

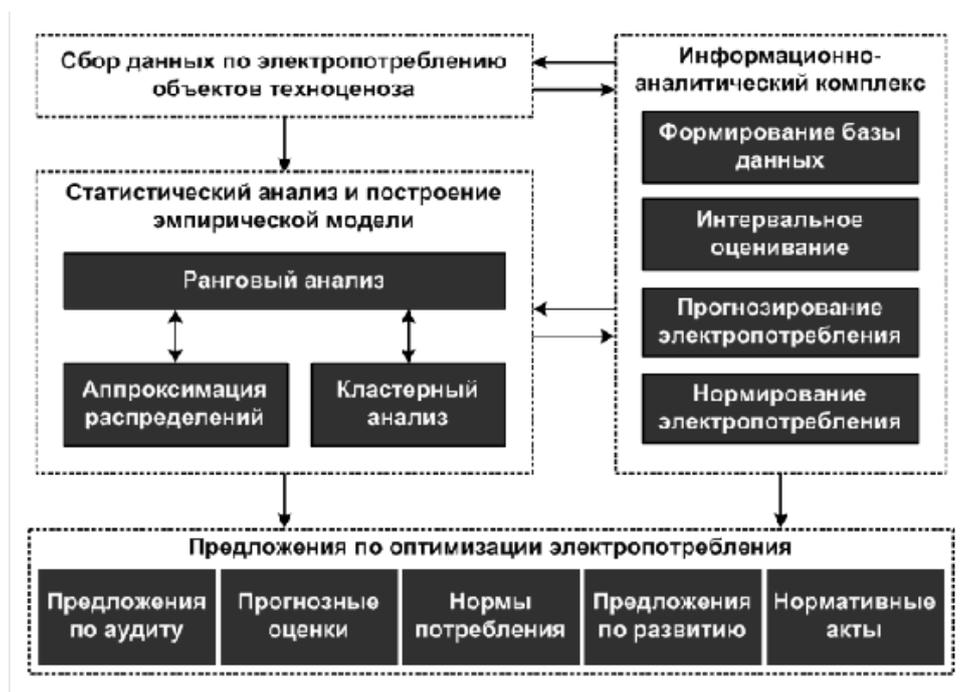


Рис. 3. Методика оптимального управления электропотреблением инфраструктурного объекта

На этапе анализа электропотребления инфраструктуры по специально разработанным формам запроса осуществляется сбор данных обо всех потребителях электроэнергии. Это позволяет получить развернутую картину электропотребления (с историей на глубину 5 – 6 лет и более), выявить объекты, которые обеспечиваются электроэнергией с нарушением существующих организационно-технических требований, подготовить электронную базу данных для дальнейшего многофакторного анализа. Рекомендуются собранные данные представлять в виде информационно-аналитического комплекса, который должен разрабатываться с использованием современного программного обеспечения [5,7].

Информационно-аналитический комплекс «Электроснабжение объектов, входящих в инфраструктуру» представляет собой развитую базу данных по

электропотреблению объектов инфраструктуры, включающую банк и систему управления данными, а также расчетные и графические модули. Комплекс может успешно использоваться при планировании и прогнозировании, а также позволяет оперативно отслеживать информацию о потребителях электроэнергии, обновлять исходные данные для анализа практически в реальном масштабе времени. По запросу из базы данных может быть получена информация о потребителях электроэнергии с необходимой степенью детализации и обобщения.

На этапе статистического анализа и построения эмпирической модели процесса электропотребления осуществляется полномасштабная статистическая обработка данных по электропотреблению, которая включает в себя интервальное оценивание, а также ранговый и кластерный анализ. Ранговый анализ позволяет упорядочить информацию, осуществить прогнозирование электропотребления отдельными объектами и инфраструктурой в целом, интервальное оценивание выявляет в динамике и наглядно представляет объекты с аномальным электропотреблением. Кластерный анализ позволяет разбить объекты по группам и осуществить нормирование электропотребления объектов в каждой группе с подробным статистическим описанием норм.

ч) от ранга (откладывается по оси абсцисс как номер по порядку, ряд натуральных чисел), который называется ранговым параметрическим распределением. В основе рангового анализа лежит техноценологический подход и теория безгранично делимых ранговых распределений [7,8]. Получение ранговых распределений осуществляется по результатам аппроксимации отранжированных экспериментальных данных по электропотреблению объектов инфраструктуры. Ранжирование объектов осуществляется по мере убывания их электропотребления. При этом первый ранг присваивается объекту с наибольшим электропотреблением, второй – объекту с наибольшим электропотреблением кроме первого и т.д. В результате получается упорядоченный график зависимости электропотребления (откладывается по оси ординат в кВт

Как показано в [7,8,11,12], строго математически каждое ранговое распределение в графической форме представляет собой совокупность точек, получаемых по эмпирическим данным (рис. 4).

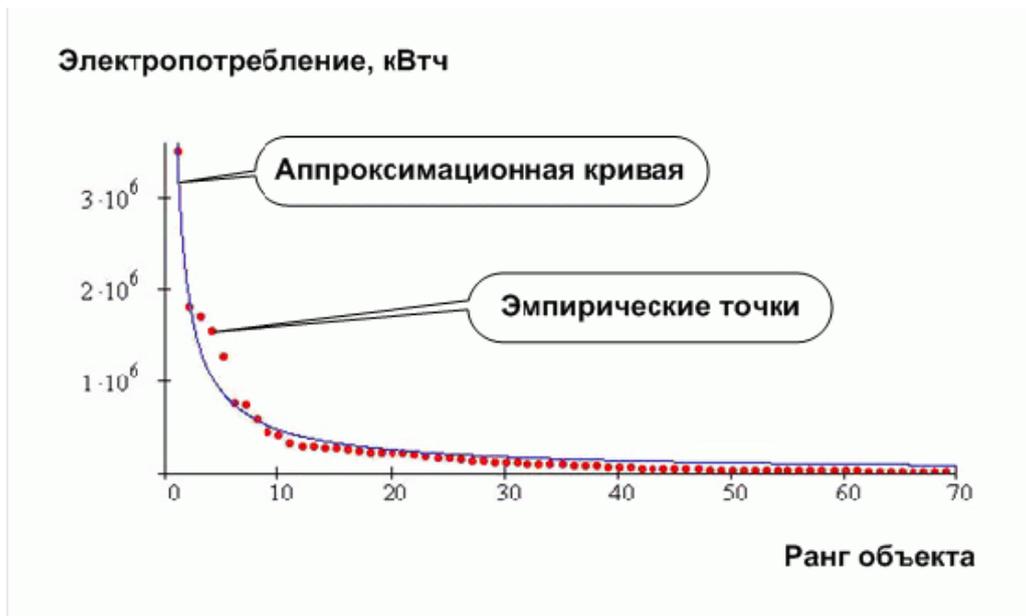


Рис. 4. Ранговое параметрическое распределение по электропотреблению (реальный пример)

Точки – результат анализа табулированного рангового распределения инфраструктуры. С точки зрения последующей оптимизации, большое значение имеет аппроксимация эмпирических распределений. Ее задача заключается в подборе аналитической зависимости, наилучшим образом описывающей совокупность эмпирических точек. При этом в качестве стандартной задается двухпараметрическая гиперболическая форма, подробно описанная в работах [4,5,7].

Методика прогнозирования электропотребления инфраструктуры основывается на теории структурно-топологической динамики ранговых распределений [4,5,11,12]. На рисунке 5 приведена структура прогнозной базы данных инфраструктурного объекта по электропотреблению. Предварительно осуществляется выделение из состава базы данных следующих информационно-аналитических подсистем. Фактические данные по электропотреблению объекта в текущем году составляют «Вектор верификации». Прогнозируемые данные в будущем году определяются как «Вектор прогнозирования». Все остальные известные данные по электропотреблению образуют основную «Матрицу данных». Кроме того, создается база методов прогнозирования, среди которых часть основывается на традиционной, так называемой, гауссовой методологии (G-методы) [13-15,21,22] а часть – на цифровой методологии (Z-методы) [1-12,26]. Процесс прогнозирования электропотребления объектов инфраструктуры реализуется в два взаимосвязанных этапа.

Ранг	Электропотребление объектов техноценоза по годам, кВтч									
	t-8	t-7	t-6	t-5	t-4	t-3	t-2	t-1	t	t+1
1	$W_{18}$	$W_{17}$	$W_{16}$	$W_{15}$	$W_{14}$	$W_{13}$	$W_{12}$	$W_{11}$	$W_{10}$	?
2	$W_{28}$	$W_{27}$	$W_{26}$	Вектор верификации			$W_{21}$	$W_{20}$	?	
3	$W_{38}$	$W_{37}$	$W_{36}$	$W_{35}$	$W_{34}$	$W_{33}$	$W_{32}$	$W_{31}$	$W_{30}$	?
4	$W_{48}$	$W_{47}$	$W_{46}$	$W_{45}$	Вектор прогнозирования			$W_{40}$	?	
5	$W_{58}$	$W_{57}$	$W_{56}$	$W_{55}$	$W_{54}$	$W_{53}$	$W_{52}$	$W_{51}$	$W_{50}$	?
6	$W_{68}$	$W_{67}$	Матрица данных			$W_{62}$	$W_{61}$	$W_{60}$	?	
7	$W_{78}$	$W_{77}$	$W_{76}$	$W_{75}$	$W_{74}$	$W_{73}$	$W_{72}$	$W_{71}$	$W_{70}$	?
.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....
n-1	$W_{(n-1)8}$	$W_{(n-1)7}$	$W_{(n-1)6}$	$W_{(n-1)5}$	$W_{(n-1)4}$	$W_{(n-1)3}$	$W_{(n-1)2}$	$W_{(n-1)1}$	$W_{(n-1)0}$	?
n	$W_{n8}$	$W_{n7}$	$W_{n6}$	$W_{n5}$	$W_{n4}$	$W_{n3}$	$W_{n2}$	$W_{n1}$	$W_{n0}$	?

Рис. 5. Структура прогнозной базы данных по электропотреблению

На первом этапе в качестве базы прогнозирования используется матрица данных, применительно к которой реализуются последовательно все имеющиеся в распоряжении методы прогнозирования. Статистическое сравнение полученных прогнозных результатов с соответствующими данными вектора верификации позволяет для каждого из объектов определить наиболее эффективный метод. Затем на втором этапе прогнозирования вектор верификации присоединяется к матрице данных и осуществляется окончательный прогноз электропотребления. Причем процедура для каждого объекта осуществляется именно тем методом, который на первом этапе был определен для него как наиболее эффективный. Данная методология прогнозирования электропотребления названа GZ-методом.

Для прогнозирования электропотребления G-методом используются многочлены определенного вида [5,7,12]. Предыстория электропотребления инфраструктуры разбивается на ряд этапов с определением наиболее подходящей аппроксимационной формы и соответствующих параметров многочлена. При этом используется база данных по электропотреблению инфраструктуры, а полученные аппроксимационные многочлены сами становятся элементом аналитических модулей базы данных. При необходимости может быть применено линейное или экспоненциальное сглаживание модели, которое существенно уточняет прогноз [5].

При прогнозировании электропотребления Z-методом (рис. 6) должны

учитываться техноценологические свойства инфраструктуры, сводящиеся в конечном итоге к понятию устойчивости гиперболических распределений [5-9,12]. При этом в конечном итоге предполагается, что ранг объекта на ранговом распределении по электропотреблению меняется незначительно (во всяком случае, он вполне прогнозируем).

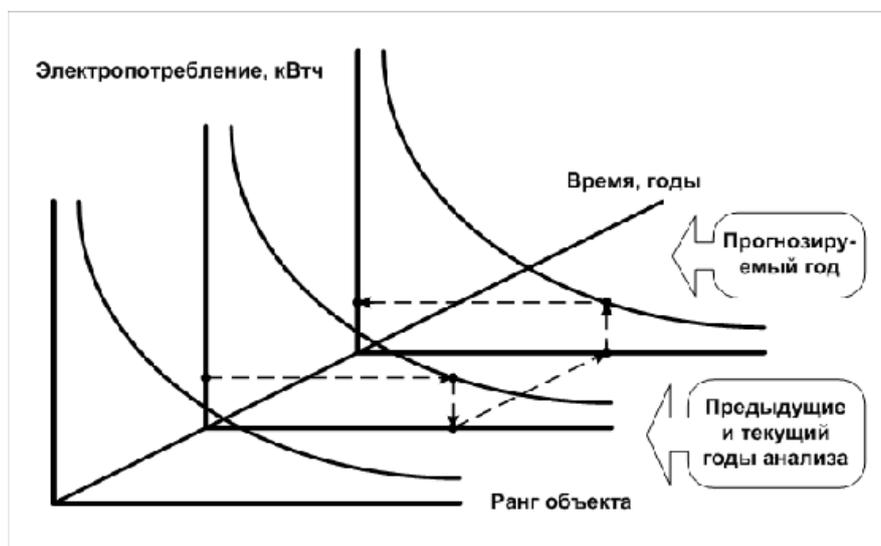


Рис. 6. Прогнозирование электропотребления инфраструктуры Z-методом

Для прогнозирования электропотребления объектов, обладающих малым электропотреблением (относящихся к саранчовым кастам), весьма эффективным является применение соответствующих норм, которые остаются устойчивыми на протяжении ряда лет (методология расчета норм будет рассмотрена несколько ниже). Однако данные нормы могут уточняться по результатам кластеранализа практически каждый год и включаться в общую базу данных.

Прогноз электропотребления инфраструктуры в целом осуществляется на основе интерполяции вперед основных параметров гиперболической формы рангового параметрического распределения [4,5,7]. Как показано в [5,6,7,11,12], погрешность расчетов подобными методами не превышает 2 – 4 %, что является высоким показателем.

Одной из важнейших аналитических процедур рангового анализа является интервальное оценивание рангового распределения по электропотреблению [5,7], которое осуществляется следующим образом (рис. 7). Распределение разбивается на ряд интервалов с таким расчетом, чтобы, во-первых, в каждом интервале было не менее 10 – 12 точек, а, во-вторых, отклонения значений эмпирических параметров от соответствующих теоретических значений, определяемых аппроксимационной кривой, были распределены внутри интервала по нормальному закону.

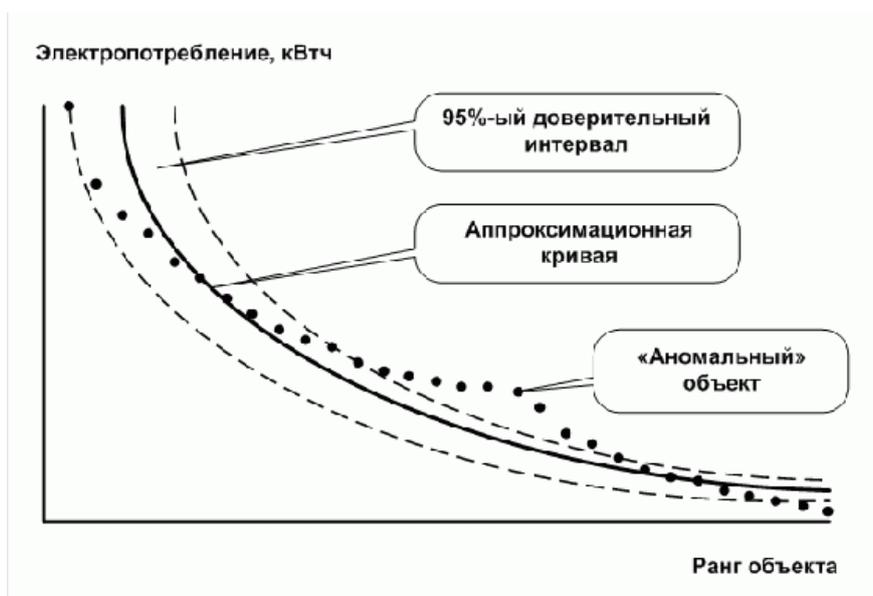


Рис. 7. Определение объектов с аномальным электропотреблением

Решение соответствующих уравнений позволяет определить ширину доверительного интервала на каждом из участков разбиения. Учитывая принятые в [4,5,7] допущения относительно экспериментальных точек, выходящих за пределы доверительного интервала, можно сделать следующие выводы. Если точка входит в доверительный интервал, то в пределах гауссового разброса параметров можно судить, что данный объект потребляет электроэнергию нормально для своего интервала разбиения рангового распределения (кластера).

Если точка находится ниже доверительного интервала, то это, как правило, свидетельствует о нарушении нормального технологического процесса электропотребления на данном объекте (частые отключения электроэнергии, неплатежи, избыточная экономия и т.п.).

Если точка находится выше интервала, то на соответствующем объекте имеет место аномально большое потребление электроэнергии. Именно на эти объекты в первую очередь должно нацеливаться углубленное энергетическое обследование (энергоаудит). Последовательная (на протяжении ряда лет) реализация методологии позволит каждый раз целенаправленно воздействовать на наиболее «слабые» объекты. При этом средства, нацеленные на проведение энергетических обследований, будут расходоваться эффективно, а общее электропотребление инфраструктуры будет снижаться [5,7].

В основе методики нормирования электропотребления объектов инфраструктуры лежит кластерный анализ (рис. 8).

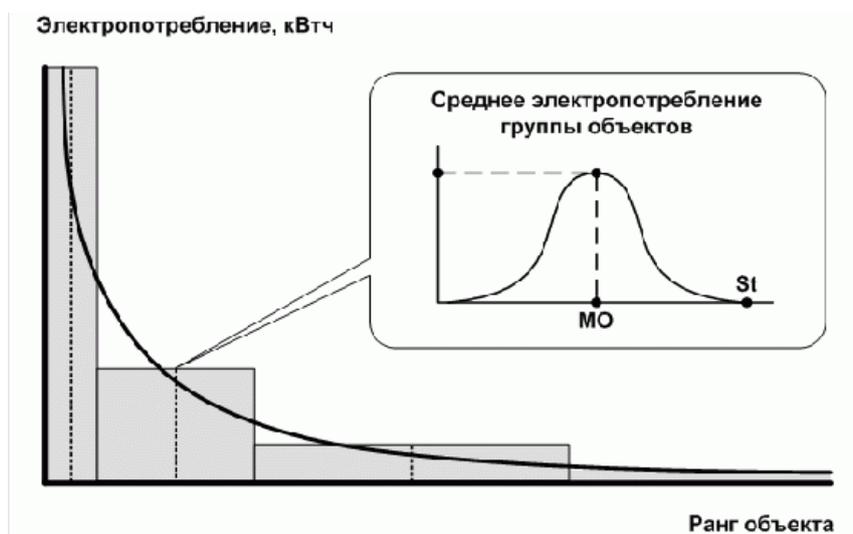


Рис. 8. Нормирование электропотребления объектами инфраструктуры

В соответствии с работами [5,7,9,10] кластер-процедуры реализуются на пространстве эмпирических данных по электропотреблению объектов инфраструктуры в соответствии со специальным критерием качества разбиения на классы. По результатам кластер-анализа объекты инфраструктуры разбиваются на группы (классы, кластеры) по «сходному» электропотреблению. После этого возникает возможность определения норм электропотребления внутри каждой из групп. Норма представляет собой среднее и эмпирический стандарт, определяемые на выборке значений электропотребления рассматриваемой группы. Количество групп разбиения целесообразно иметь таким, чтобы в наиболее многочисленные группы входило не более 10 – 12 объектов.

Представляется важным, что объекты группируются для нормирования не по отраслевому или технологическому принципу, как это делается в узаконенных министерствами и ведомствами методиках, а по сходному электропотреблению. При этом получаемые нормы эффективны только для исследуемой инфраструктуры и не применимы для других, однако для данной инфраструктуры они надежны. В любом случае их можно уточнять ежегодно, одновременно с изменением базы данных.

Таким образом, взаимосвязанная совокупность программно-реализованных процедур глубокой статистической обработки эмпирических данных по электропотреблению, включающая аппроксимацию, прогнозирование, интервальное оценивание и нормирование, составляет так называемую статическую модель электропотребления инфраструктурного объекта, которая весьма подробно описана в [4-7].

Следует отметить, что недостатками изложенной выше методологии, основанной на статической модели электропотребления, являются короткий горизонт прогнозирования (1 – 2 года, после чего ошибка резко возрастает), а также невозможность реализации критериев, основанных на корректном сравнении

вариантов управления электропотреблением. Устранение данных недостатков возможно лишь при условии создания динамической адаптивной модели, отражающей процесс электропотребления объектов инфраструктуры на глубину последующих 5 – 7 лет и более. При этом ключевым является наличие стохастической обратной связи, корректирующей базу данных по электропотреблению на основе результатов текущего моделирования.

Динамический характер модели придает развитая система входных параметров и стохастический аналитический аппарат, основанный на имитационных принципах моделирования. Корректирующее воздействие заключается в дополнении исходной базы данных модели, реализованной на предыдущих временных шагах, информацией об электропотреблении объектов инфраструктуры с учетом вероятных изменений в активном и пассивном информационном поле модели, а также системе исходных данных, характеризующих условия функционирования объектов, на последующих временных шагах (рис. 9).

Моделирование электропотребления объектов инфраструктуры осуществляется с использованием преобразующих функций, получаемых путем нелинейного преобразования соответствующих функций распределения. Законы распределения электропотребления при моделировании выбираются следующим образом. Если на объект со стороны системы управления не оказывается управляющее воздействие, направленное на внедрение энергосберегающих технологий, то используется нормальный закон, если оказывается – применяется закон Вейбулла – Гнеденко (рис. 10). При этом управляющее воздействие может выражаться, прежде всего, в стимулировании процесса энергосбережения.

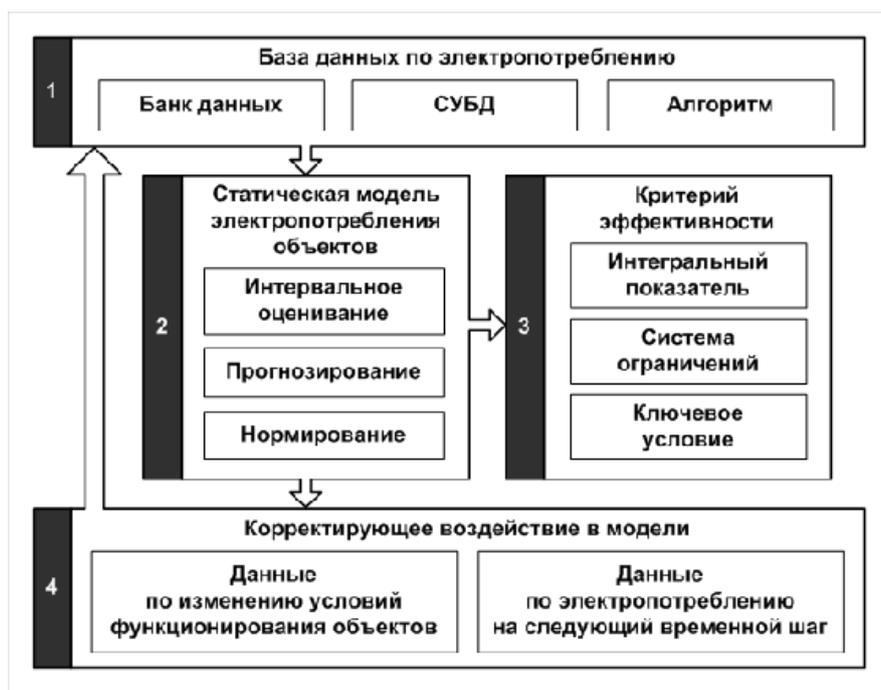


Рис. 9. Алгоритм реализации динамической модели электропотребления объектов инфраструктуры

Возможен вариант модельной реализации процесса электропотребления с использованием только нормального распределения. Предполагается, что при отсутствии управляющих воздействий, направленных на энергосбережение, в преобразующих функциях используются значения математического ожидания и среднего квадратичного отклонения электропотребления, непосредственно получаемые для объектов инфраструктуры в ходе процедур прогнозирования и нормирования (рис. 11 и 12). При наличии же такого воздействия, в них подставляются значения, получаемые по результатам моделирования.

В конечном итоге по результатам модельной реализации преобразующих функций формируются две матрицы, одна из которых содержит значения электропотребления объектов инфраструктуры на определенном временном интервале без реализации энергосберегающих управленческих воздействий, а вторая – с реализацией соответствующих воздействий.



Рис. 10. Законы распределения, используемые для моделирования процессов электропотребления

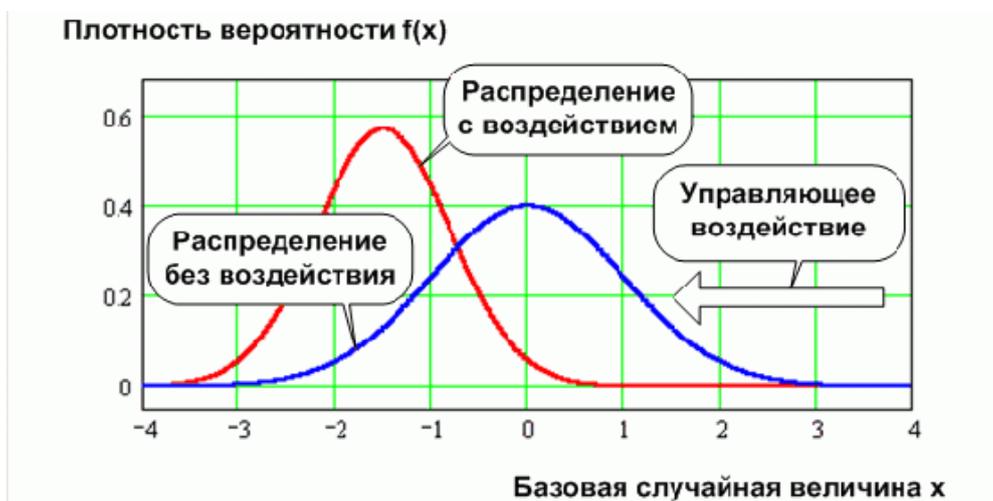


Рис. 11. Моделирование процессов электропотребления с использованием только нормального распределения

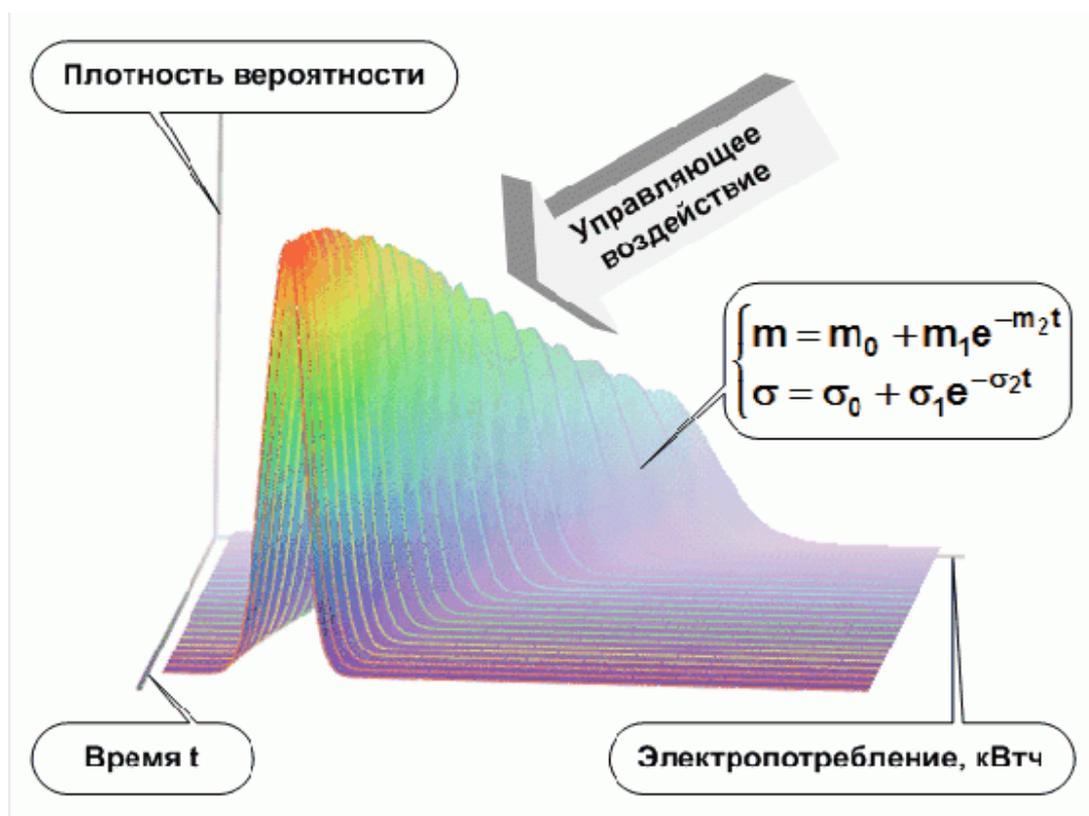


Рис. 12. Динамика изменения формы нормального распределения при модельной реализации управляющего воздействия

Кроме того параллельно формируются еще две матрицы, одна из которых содержит значения затрат на оплату за потребленную электроэнергию на объектах инфраструктуры в условиях первого варианта, а вторая – при реализации второго варианта функционирования.

Эффективность процесса энергосбережения на объектах инфраструктуры по результатам моделирования может быть оценена сопоставлением двух интегральных показателей, один из которых характеризует получаемый положительный эффект, а второй – затраты. Очевидно, что критерием эффективности [7] здесь является максимизация интегрального показателя, при выполнении ряда специальных ограничений [7]. Интегральный показатель положительного эффекта исчисляется в диапазоне от 0 до 1, левая граница которого соответствует полному отсутствию управляющих энергосберегающих процедур, а правая – «абсолютному энергосбережению», сводящему электропотребление к нулю. В свою очередь, интегральный показатель затрат исчисляется в диапазоне от 1 до бесконечности. Левая граница показателя соответствует состоянию с нулевыми затратами на выполнение мероприятий по энергосбережению, правая – бесконечным затратам. Очевидно, что при этом интегральный показатель эффективности находится в пределах от 0 до 1, приобретая свое критериальное значение при строгом выполнении равенства 1.

Система ограничений определяет необходимость реализации процесса электропотребления на всех объектах инфраструктуры в границах переменного доверительного интервала, определяемого в ходе процедуры интервального оценивания (без аномальных выбросов). При этом не допускается снижение электропотребления объектов ниже значения, определяющего минимальные технологические потребности, которые задаются нижней границей переменного доверительного интервала (см. рис. 7).

Моделирование процесса электропотребления инфраструктурного объекта осуществляется имитационными методами с использованием транзактного способа организации квазипараллелизма [1,2,5,7,25,28,29] (рис. 13). Оптимизационные процедуры в рамках модели реализуются с использованием градиентных методов многомерной оптимизации и выпуклого анализа. Многомерная оптимизация дополняется эффективными процедурами одномерного поиска, а выпуклому анализу предшествует проверка модели на чувствительность [1,2].

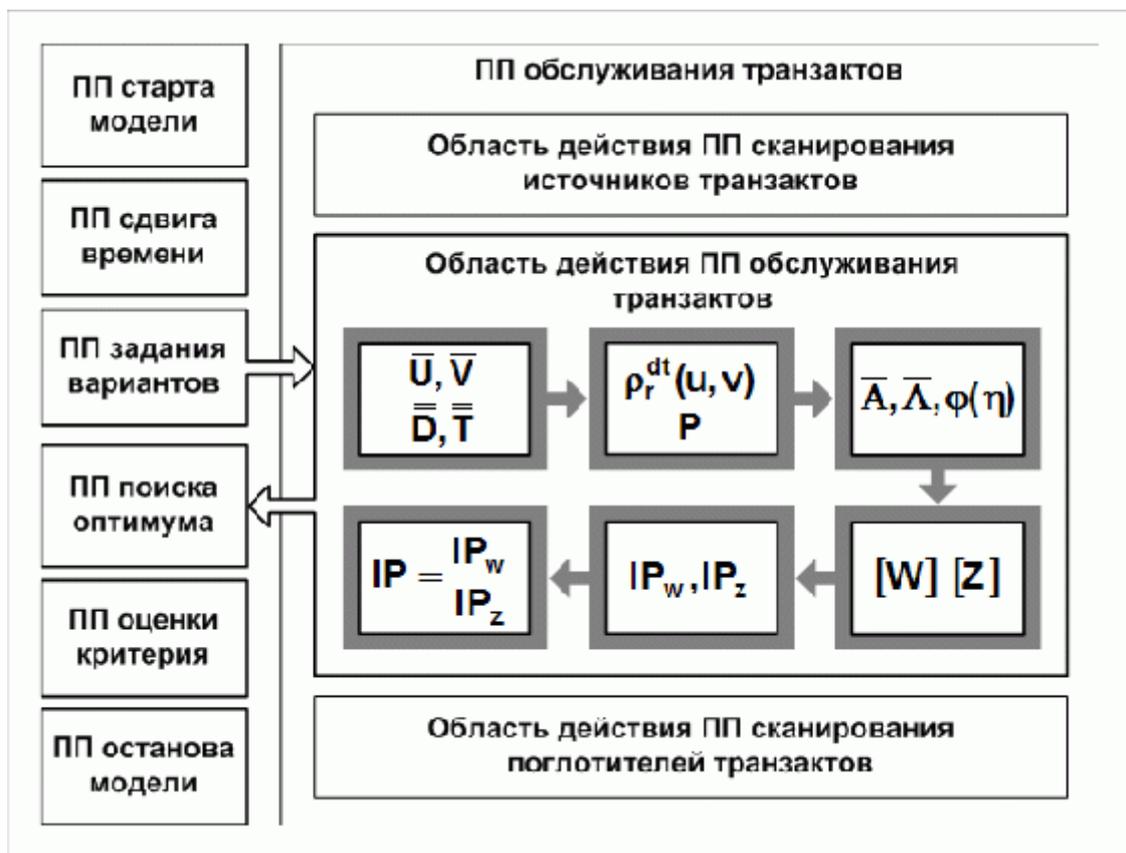


Рис. 13. Схема модели процесса электропотребления инфраструктуры при транзактном способе имитации (ПП – подпрограммы)

Простейшим и в то же время весьма эффективным является оптимизационный метод наискорейшего подъема с использованием одномерного поиска [1,7]. В качестве аналитического ядра целевой функции оптимизации принима-

ется формируемый имитационной моделью интегральный показатель эффективности. При этом циклично осуществляется одномерный поиск в направлении наискорейшего подъема с использованием авторской методологии, изложенной в [1]. Получив одномерный оптимум в направлении градиента, находят новый градиент и повторяют процесс до тех пор, пока последующие вычисления позволяют улучшать полученный результат. Достоинство метода состоит в том, что оптимизационные параметры можно использовать в качестве независимых переменных для поиска по методу чисел Фибоначчи [1], и это обеспечивает высокую эффективность метода. Наиболее существенным недостатком является невозможность определения глобального оптимума в случае мультимодальности гиперпространства отклика. Поэтому процедуры наискорейшего подъема дополняются проверкой на чувствительность и выпуклым анализом [1,2,7].

В ходе выпуклого анализа гиперпространства оптимизации предполагается последовательная проверка выполнения трех условий:

1. Область определения является выпуклым множеством.
2. Гиперпространство оптимизации есть вогнутая функция.
3. Оболочка гиперпространства не является аффинной.

Проверка выполнения данных условий проводится по методике, разработанной и реализованной автором в [1], с помощью эмпирического анализа канонического уравнения прямой, определяемой рабочими точками. Совместное выполнение трех условий позволяет заключить, что в данной области определения возможна эффективная оптимизация с использованием численных методов нулевого порядка (единственно доступных в условиях имитационного моделирования). Если оболочка гиперпространства оптимизации аффинна, то необходимо расширить область определения и повторить анализ. Если, в свою очередь, область определения не является выпуклым множеством, то необходимо разделить ее на ряд подмножеств и проводить анализ каждого из них в отдельности. Наконец, если гиперпространство не является вогнутой функцией, то оно должно быть рассечено промежуточной линейной гиперплоскостью с последующим анализом по частям. Более подробно технология данных операций изложена в [1]. Наряду с процедурами выпуклого анализа может также осуществляться анализ модели на чувствительность [1,2,25].

ч) между электропотреблением без реализации энергосберегающих мероприятий и процедур, с одной стороны, и электропотреблением, полученным в результате внедрения методологии оптимального управления электропотреблением с учетом системных ограничений и реализации комплекса технических и технологических мероприятий, с другой стороны. По результатам моделирования можно определить такой важный прогнозный параметр, как потенциал

энергосбережения объекта (рис. 14). При этом под потенциалом энергосбережения инфраструктурного объекта понимается полученная в результате моделирования на расчетную глубину времени абсолютная разница (в кВт

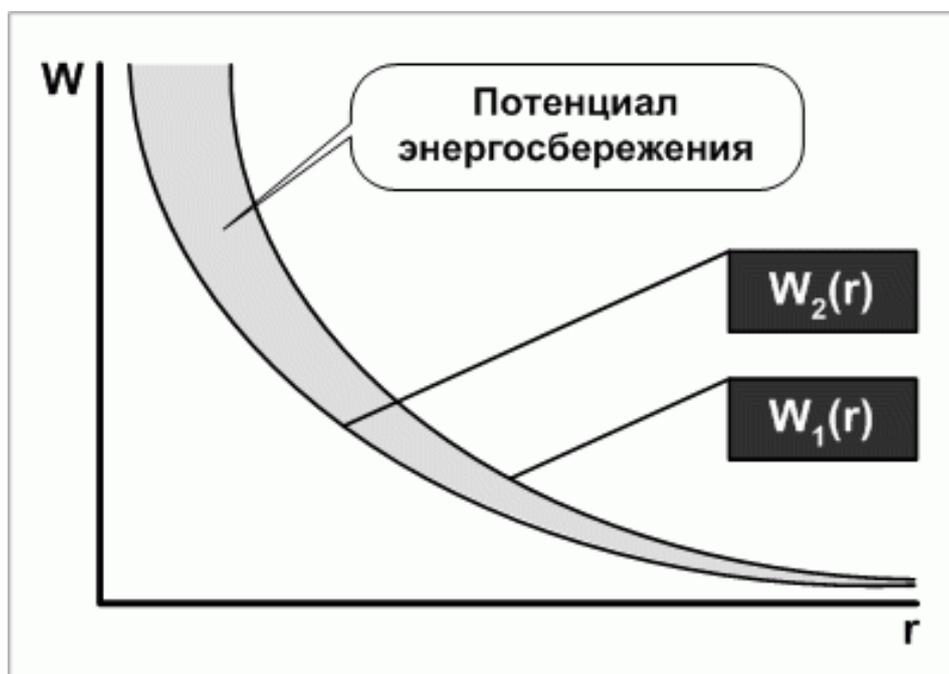


Рис. 14. К понятию потенциала энергосбережения инфраструктурного объекта

Как видно, речь идет о потенциале энергосбережения, определяемом по результатам системных исследований. Очевидно, что это понятие может дополнить существующее понятие потенциала энергосбережения в традиционном толковании, когда возможное кумулятивное энергосбережение определяется как сумма экономий электроэнергии на отдельных потребителях после реализации предлагаемых технических и технологических мероприятий по энергосбережению.

Реализация разработанной динамической модели электропотребления осуществлена применительно к одному из инфраструктурных объектов, расположенному на территории Калининградской области и включающему 69 слабосвязанных объектов с годовым электропотреблением от нескольких тысяч до миллионов кВт•ч (на рис. 15 показана упрощенная картограмма нагрузок объекта). При этом были использованы статистические материалы и программные продукты, полученные научной школой, возглавляемой автором, и изложенные в [5-7]. На рисунках 4, 16 – 19 показаны импортированные непосредственно из программ ключевые графические материалы, иллюстрирующие результаты расчетов. В качестве основной программно-вычислительной среды был использован пакет прикладного программного обеспечения Mathcad-2001i [5,7].

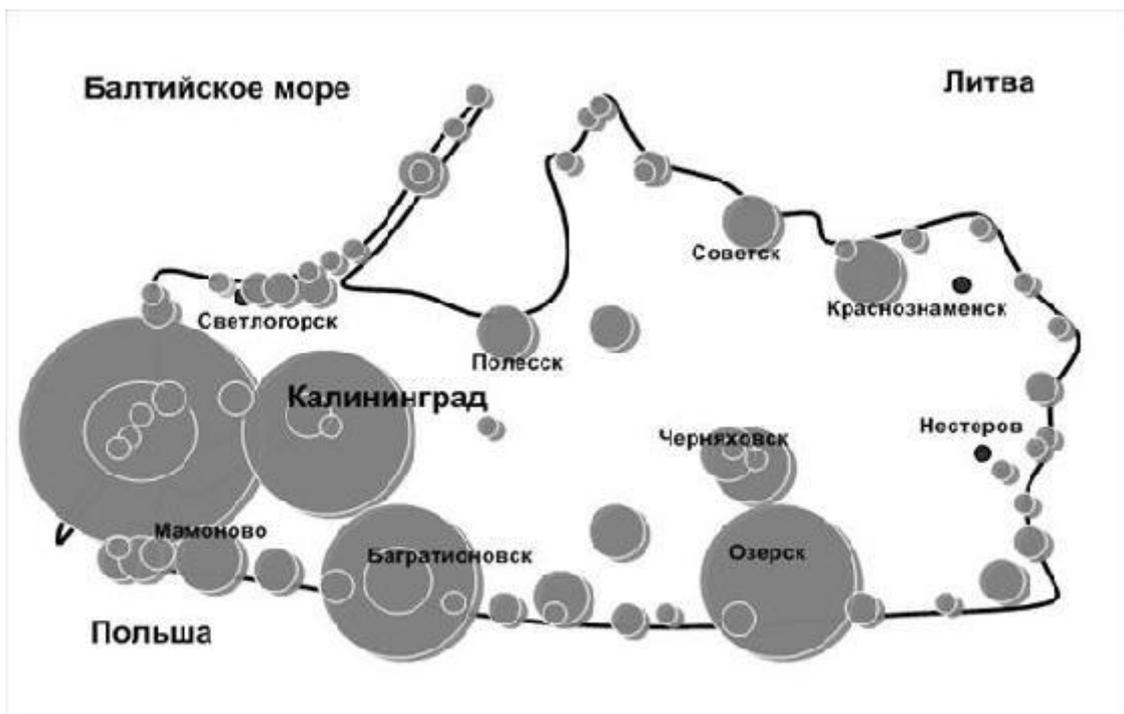


Рис. 15. Существующий на территории Калининградской области инфраструктурный объект реализации методологии

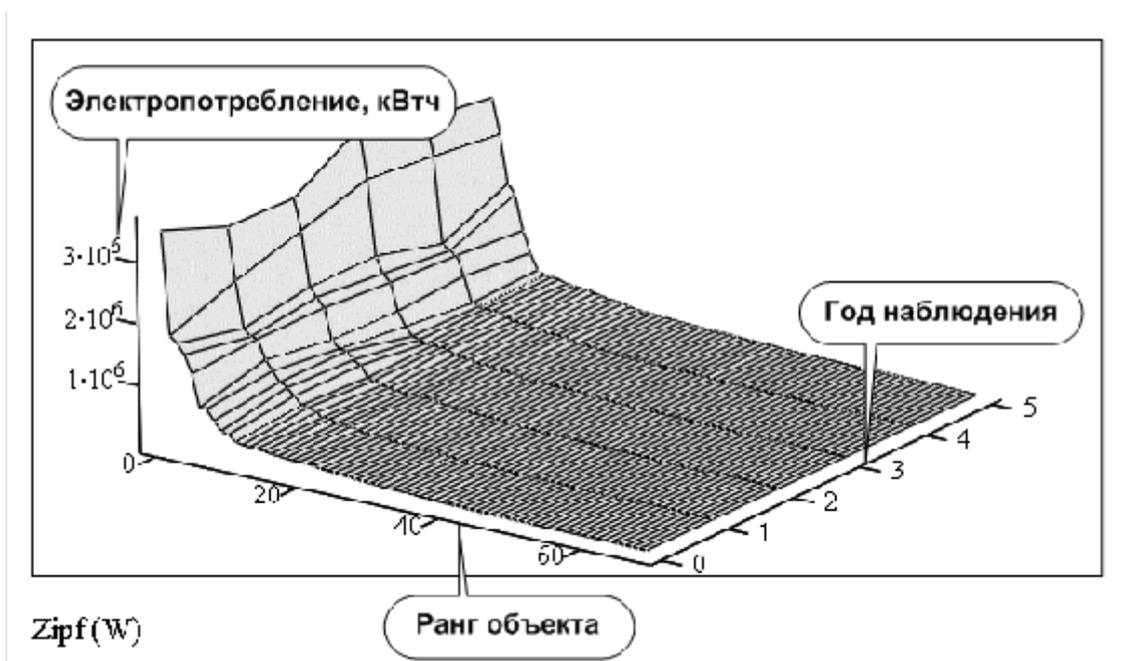


Рис. 16. Прогнозирование электропотребления по ранговой поверхности

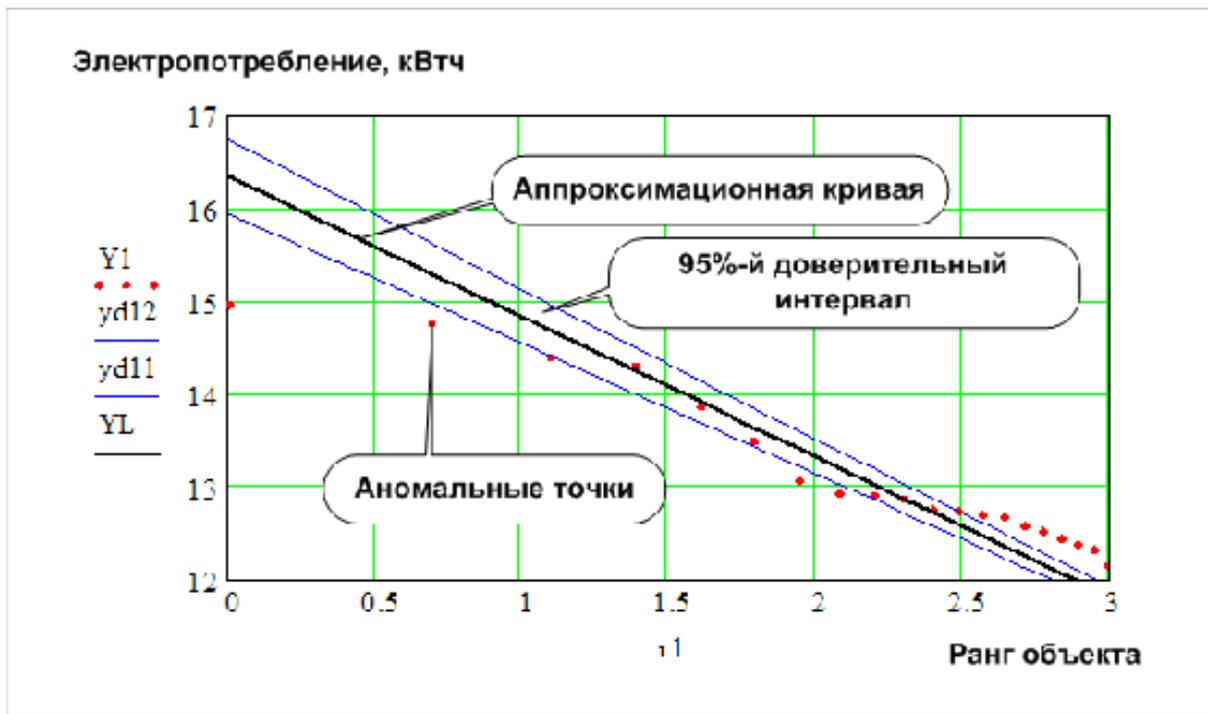


Рис. 17. Интервальное оценивание и определение объектов, аномально потребляющих электроэнергию

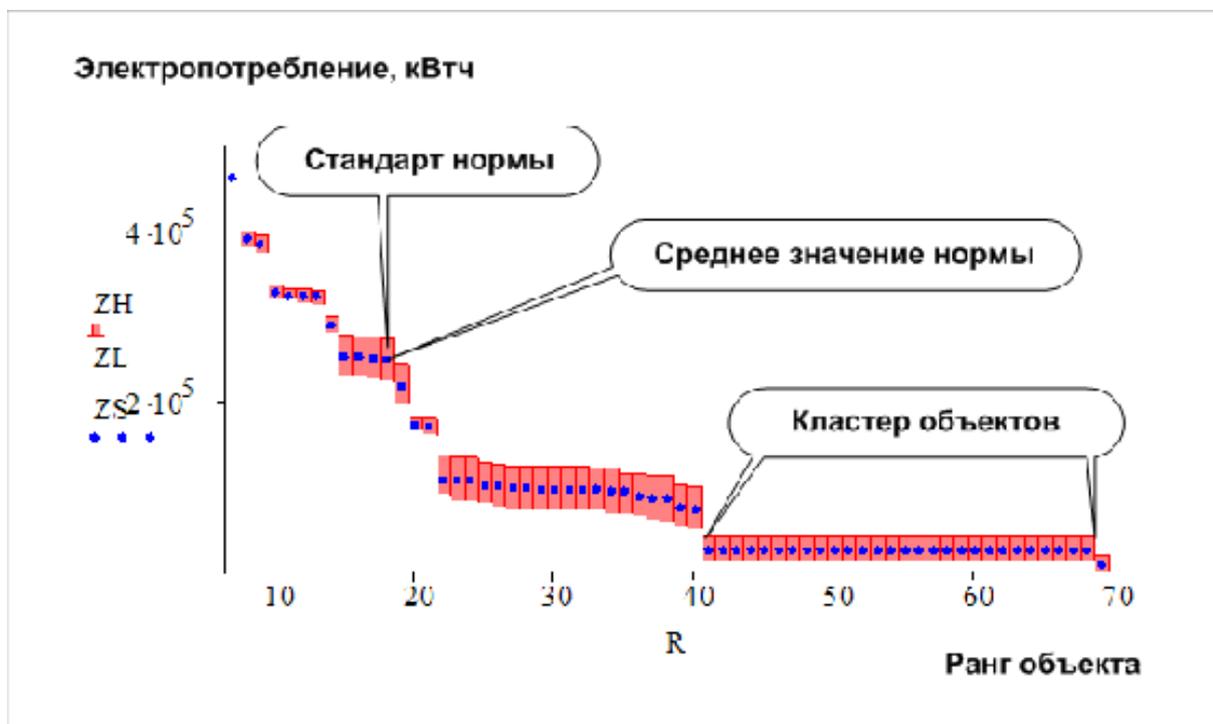


Рис. 18. Кластеризация и нормирование электропотребления

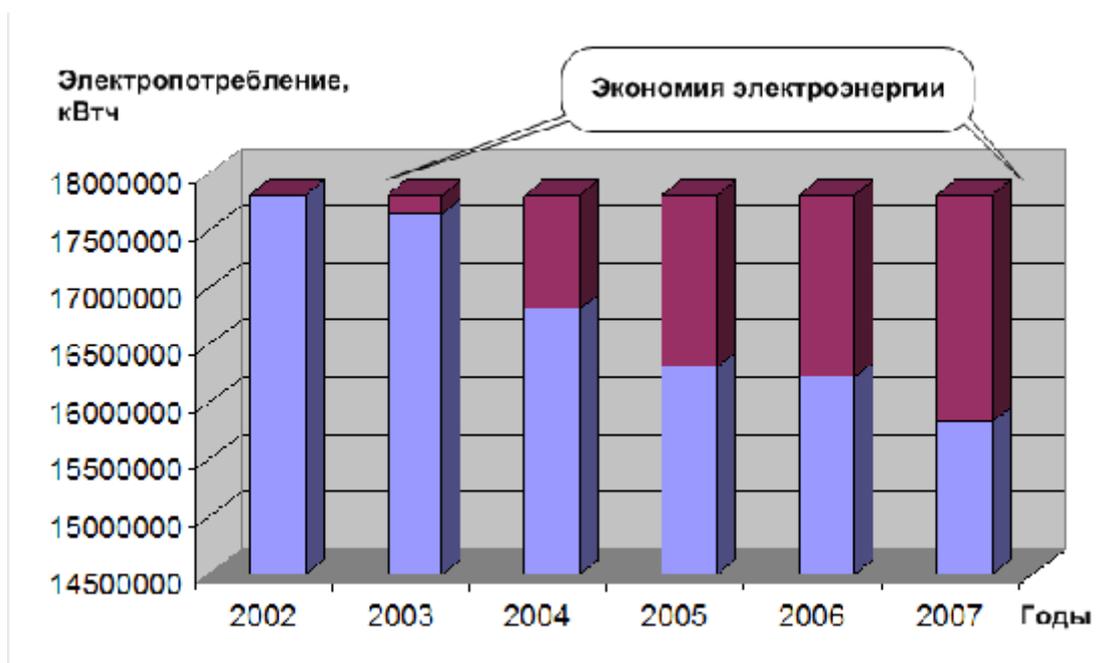


Рис. 19. Результаты реализации динамической модели применительно к исследуемому объекту

В работе [7] приводится пример реализации методики, состоящий из восьми расчетных модулей (общий алгоритм – рис. 20):

1. Первичная обработка статистической информации.
2. Проверка данных на соответствие критериям  $N$ -распределения.
3. Аппроксимация ранговых распределений.
4. Прогнозирование электропотребления объектов.
5. Интервальное оценивание процесса электропотребления.
6. Нормирование электропотребления инфраструктуры.
7. Оценка потенциала энергосбережения.
8. Определение первоочередных объектов для энергоаудита.

Алгоритм реализации методологии оптимального управления электропотреблением включает одиннадцать процедур (рис. 20). Исходная информация для моделирования формируется на основе базы данных (процедуры 1 и 2). На первом этапе осуществляется первичная обработка данных по электропотреблению, их проверка на соответствие критериям  $N$ -распределения, аппроксимация ранговых распределений, а также интервальное оценивание (процедуры 3 – 5). Далее процесс ветвится. При наличии аномалий осуществляется энергоаудит и реализация технических мер по энергосбережению на «аномальных» объектах (процедуры 6 и 7). После этого корректируется база данных и процедуры 3 – 5 повторяются. При отсутствии аномалий после процедуры 5 осуществляется прогнозирование и нормирование электропотребления (процедуры 8 и 9).

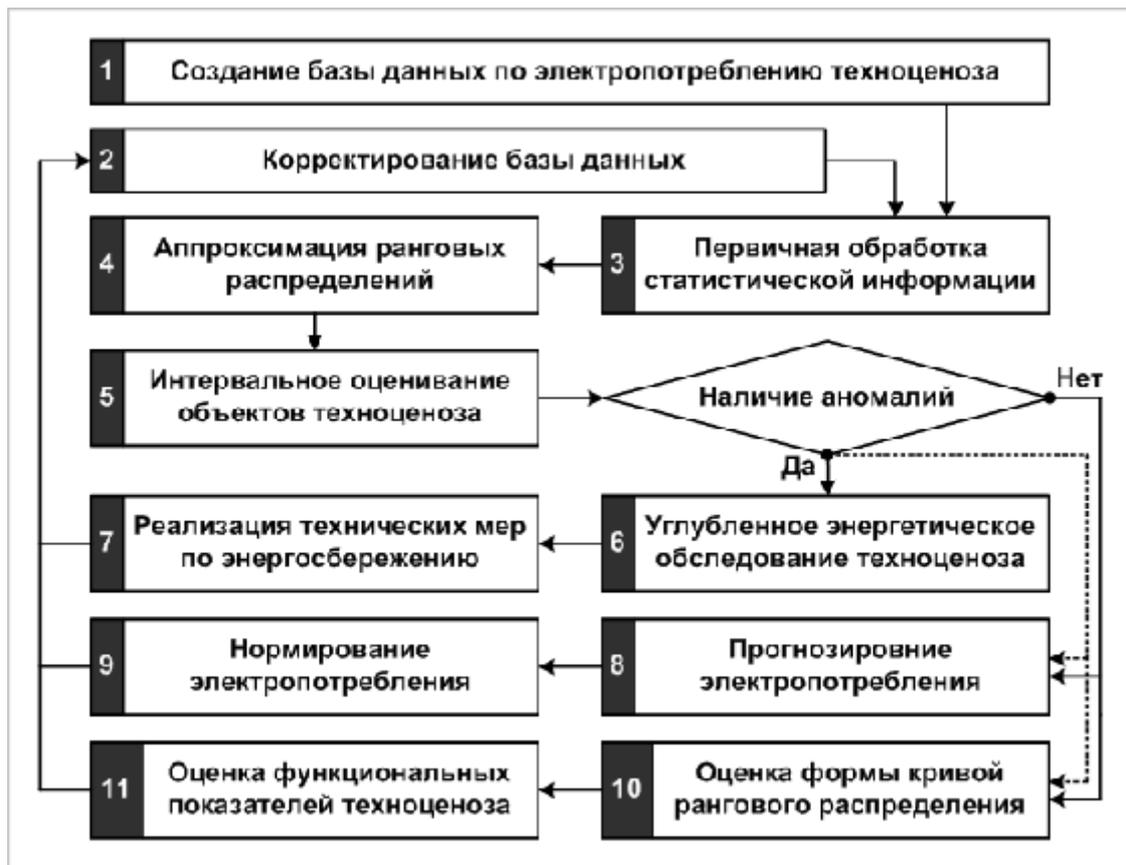


Рис. 20. Алгоритм реализации разработанной методологии оптимального управления энергосбережением

Далее вновь корректируется база данных и процесс повторяется. После того, как будет исчерпан потенциал организационных мер по энергосбережению, на объекте должна осуществляться структурная перестройка посредством номенклатурной оптимизации (процедуры 10 и 11) [2,7]. Далее процесс циклично повторяется. В качестве критерия эффективности электропотребления объекта на ключевых этапах алгоритма используется целевой функционал и система ограничений, основанные на законе оптимального построения техноценозов [7].

Как показало моделирование, внедрение на объектах инфраструктуры методологии оптимального управления энергосбережением позволит сэкономить в ближайшие пять лет до миллиона долларов в основном за счет организационных и технических мероприятий с быстрым сроком окупаемости (рис. 19). Немаловажным резервом является также оптимизация собственно процесса углубленных энергетических обследований (энергоаудита), проводимых на объектах после соответствующих процедур интервального оценивания.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Гнатюк В.И. Моделирование и оптимизация в электроснабжении войск. Вып. 4. Ценологические исследования. М.: Центр системных исследований, 1997. 216 с.
2. Гнатюк В.И. Оптимальное построение техноценозов. Теория и практика. Вып. 9. Ценологические исследования. М.: Центр системных исследований, 1999. 272 с.
3. Гнатюк В.И. Лекции о технике, техноценозах и техноэволюции. Калининград: КВИ ФПС РФ, 1999. 84 с.
4. Гнатюк В.И., Лагуткин О.Е. Ранговый анализ техноценозов. Калининград: БНЦ РАЕН–КВИ ФПС РФ, 2000. 86 с.
5. Гнатюк В.И., Северин А.Е. Ранговый анализ и энергосбережение. Калининград: ЗНЦ НТ РАЕН–КВИ ФПС РФ, 2003. 120 с.
6. Гнатюк В.И. Теория и методология рангового анализа техноценозов. Калининград: БНЦ РАЕН–КВИ ФПС РФ, 2000.
7. Гнатюк В.И. Закон оптимального построения техноценозов. Вып. 29. Ценологические исследования. М.: Изд-во ТГУ–Центр системных исследований, 2005. 384 с.
8. Кудрин Б.И. Введение в технетику. Томск: Изд. ТГУ, 1993. 552 с.
9. Ценологическое определение параметров электропотребления многономенклатурных производств / Б.И. Кудрин, Б.В. Жилин и др. Тула: Приокск. кн. изд-во, 1994. 122 с.
10. Прокопчик В.В. Повышение качества электроснабжения и эффективности работы электрооборудования предприятий с непрерывными технологическими процессами. Гомель: ГГТУ, 2002. 283 с.
11. Фуфаев В.В. Ценологическое влияние на электропотребление предприятия. Вып. 10. Ценологические исследования. Абакан: Центр системных исследований, 1999. 124 с.
12. Фуфаев В.В. Ценологическое определение параметров электропотребления, надежности, монтажа и ремонта электрооборудования предприятий региона. М.: Центр системных исследований, 2000. 320 с.

## Дополнительная литература

13. Прикладная статистика: классификация и снижение размерности / С.А. Айвазян и др. М.: Финансы и статистика, 1989. 607 с.
14. Бусленко Н.П. Моделирование сложных систем. М.: Изд-во «Наука», 1978. 399 с.
15. Бусленко В.Н. Автоматизация имитационного моделирования сложных систем. М.: Наука, 1977. 240 с.
16. Гнатюк В.И. Сайт Техника, техносфера, энергосбережение. М.: 2000–2008. – Режим доступа <http://www.gnatukvi.ru>.
17. Гнатюк В.И. Закон оптимального построения техноценозов. Компьютерная версия, перераб. и доп. М.: Изд-во ТГУ–Центр системных исследований, 2005–2008. – Режим доступа <http://gnatukvi.narod.ru/ind.html>.
18. Журнал Электрика. 2003. № 2–6; 2004. № 7; 2005. № 2; 2006. № 1, 7, 12; 2007. № 2, 3, 7, 8, 11, 12. – Цикл статей, раскрывающих опыт применения пакета Mathcad для решения задач оптимального управления электропотреблением техноценозов.
19. Кибернетические системы ценозов: синтез и управление // Кибернетические проблемы биологии: труды междисциплинарного семинара. М.: Наука, 1991. 105 с.
20. Кудряшов С.А. Классификация в системных исследованиях. М.: Электрика, 1995. 38 с.
21. Кудрин Б.И. Электрика как развитие электротехники и электроэнергетики. 3-е изд., испр. Томск: Изд-во Томск. ун-та, 1998. 40 с.
22. Кудрин Б.И. Проблемы создания и управления ценозами искусственного происхождения // Кибернетические системы ценозов: синтез и управление. М.: Наука, 1991. С. 5–17.
23. Кудрин Б.И., Крылов Ю.К. Целочисленное аппроксимирование ранговых распределений и идентификация техноценозов. Вып. 11. Ценологические исследования. М.: Изд-во «Центр системных исследований», 1999. 79 с.
24. Исследование операций: В 2-х т. Х. Майзер, Н. Эйджин Р. Тролл и др. М.: Мир, 1981. Т. 1. 640 с.
25. Максимей И.В. Имитационное моделирование на ЭВМ. М.: Радио и связь, 1988. 231 с.

26. Математическое описание ценозов и закономерности технетики. Философия и становление технетики. Вып. 1, 2. Ценологические исследования. Абакан: Центр системных исследований, 1996. 452 с.
27. Сухарев А.Г., Тимохов А.В., Федоров В.В. Курс методов оптимизации. М.: Наука, 1986. 328 с.
28. Хайтун С.Д. Проблемы количественного анализа науки. М.: Наука, 1989. 280 с.
29. Чайковский Ю.В. Элементы эволюционной диатропики. М.: Наука, 1990. 272 с.
30. Четыркин Е.М., Калихман И.Л. Вероятность и статистика. М.: Финансы и статистика, 1982. 319 с.
31. Яблонский А.И. Математические модели в исследовании науки. М.: Наука, 1986. 352 с.
32. Якимов А.Е. Имитационные модели статического состояния ценоза // Кибернетические системы ценозов: синтез и управление. М.: Наука, 1991. С. 27–36.

Учебное издание

Яковенко Николай Иванович

## **МЕТОДИКА ОПТИМАЛЬНОГО УПРАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОПОТРЕБЛЕНИЕМ**

Методические рекомендации  
по организации самостоятельной работы студентов  
по дисциплине «Управление электропотреблением»  
для студентов очной и заочной форм обучения  
направления подготовки  
13.04.02 Электроэнергетика и электротехника

Редактор Осипова Е.Н.

---

Подписано к печати 11.11.2019 г. Формат 60x84. 1/16.  
Бумага офсетная. Усл. п. 1,56. Тираж 25 экз. Изд. № 6540.

---

Издательство Брянского государственного аграрного университета  
243365, Брянская обл., Выгоничский район, с. Кокино, Брянский ГАУ