

## **ЭФФЕКТИВНОСТЬ И ПОТЕНЦИАЛ ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЯ В ОБРАЗОВАТЕЛЬНЫХ УЧРЕЖДЕНИЯХ НЕРЮНГРИНСКОГО РАЙОНА**

*к.т.н., доцент каф. ЭТКиС Е.Ю. Сизганова  
ФГОУ ВПО «Сибирский федеральный университет»*

*Политехнический институт*

*к.т.н., доцент каф. ЭПиАПП Д.В. Антоненков  
ТИ(ф)ФГОУ ВПО «Северо-восточный федеральный университет»  
Д.Б.Соловьев*

*Инженерная Школа, Дальневосточный Федеральный Университет*

Низкая эффективность энергоиспользования обусловлена энергетической государственной политикой заниженных цен на энергоресурсы (в бюджетную сферу ресурсы отдавались по тарифам в 3 раза ниже себестоимости). Энергоемкость ВВП в России остается длительное время в 2-3 раза выше, чем в США, в 3,5 раза превышала энергоемкость ВВП Западной Европы, а эффективность использования электрической энергии в России – в 6 раз ниже, чем в Японии; в 2 раза ниже, чем в США; и даже в 1,4 раза ниже, чем в Индии и Китае.

Затраты на энергоносители в бюджетной и коммунальной сфере выросли многократно. Тенденция к дальнейшему повышению энергозатрат в ближайшей перспективе сохранится. Уравнивание внутренних и мировых цен – государственная политика в области цен на энергоносители. Это неизбежно приведет к дальнейшему повышению оплаты энергоресурсов.

Бюджетные организации, предприятия и учреждения, являются крупными потребителями топливо-энергетических ресурсов. Они вынуждены осуществлять мероприятия по повышению энергетической эффективности, поскольку энергосбережению в России стали уделять большое внимание. Расходы бюджетов всех уровней на энергозатраты составляют значительную часть всех бюджетных расходов. Поэтому одной из важнейших задач в области энергосбережения является проведение мероприятий, обеспечивающих снижение величины бюджетных средств, направляемых на дотирование энергопотребления организаций.

Структура электропотребления бюджетных организаций и учреждений представлена на рисунке 1 (на примере Нерюнгринского района). Самый энергоемкий объект из представленных на диаграмме – жилищно-коммунальное хозяйство (76% потребления электроэнергии); на втором месте – образовательные учреждения (13%).

В условиях дефицита бюджетных средств исполнительные власти РФ предпринимают меры для сокращения расходов энергоресурсов бюджетными организациями, вводя лимиты на потребление энергетических ресурсов. Лимиты определяются на основе норм удельных показателей электропотребления с учетом обеспечения безаварийного функционирования организаций и возможностей оплаты за потребляемые энергоресурсы.

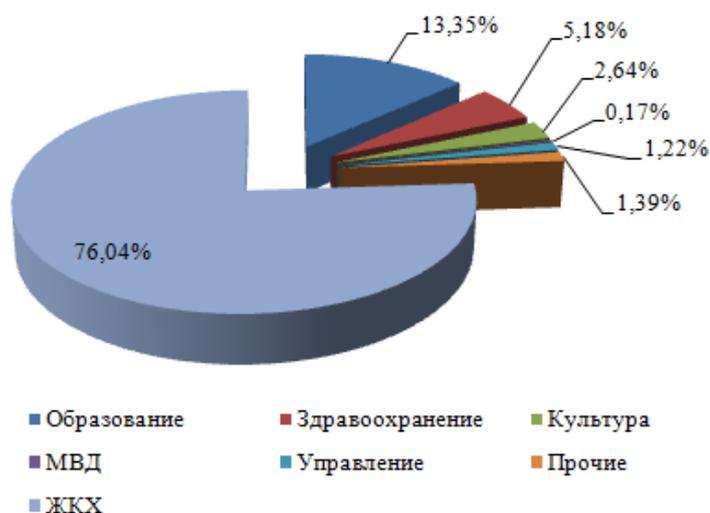


Рисунок 1. – Структура электропотребления бюджетных организаций и учреждений Нерюнгринского района

Применяемые способы определения лимитов имеют низкую точность расчетов параметров энергопотребления и не учитывают большинство факторов, определяющих энергозатраты, поэтому они не могут считаться научно обоснованными. Большинство действующих методик по лимитированию, нормированию электропотребления бюджетных организаций следуют классическим представлениям электротехники, которые основаны на расчете режимов работы электрооборудования, а именно на данные по отдельным электроприемникам с учетом числа токоприемников одинаковой мощности и числа таких групп, коэффициентов одновременности и использования, времени работы. Существует и подход, основанный на норме на единицу площади, объема здания или численности персонала. При этом не учитываются что удельные показатели, являющиеся среднеотраслевыми оценками уровня потребности в электроэнергии и ее электроэффективности, не распространяются на все бюджетные организации министерства, т.е. не учитываются ценологические свойства инфраструктуры бюджетных организаций. Иначе говоря, среднее может быть неприменимо к конкретному объекту, давая ошибку на 50, 100% и более.

Таким образом, существующую нормативную базу по электропотреблению нельзя корректно использовать для решения конкретных практических задач по энергосбережению. По существу сейчас все сводится к написанию некоторых чисел, приборно (по счетчику) не проверяемых, а получаемых в результате торга-соглашения между потребителем электроэнергии и тем, кто контролирует ее расход.

Понятие энергосбережения бюджетных организаций должно создаваться не на применении среднеотраслевых параметров электропотребления и распространении их на все учреждения министерства и ведомства, а на рыночной ценологической оценке электроэффективности, основанной на переходе от энергетических обследований отдельной организации к системному энергоаудиту всех учреждений выделенного класса объектов. Это уменьшит число энергетических аудитов, которые

являются трудоемкой и затратной составляющей управления энергосбережением бюджетных организаций.

Фактически каждая бюджетная организация проявляет ценологические свойства [7,8]. Это выражается в несоответствии схемы электроснабжения и учета электроэнергии административно-хозяйственному делению (структуре соподчинения и организационной деятельности) и генеральному плану (планировке помещений). Число отдельных электроприемников (включая освещение, нагревательные приборы, вентиляцию, специальные приборы и оборудование) настолько велико, что практически невозможно составить их перечень с указанием режима работы в течение года. Закономерности электропотребления каждой организации индивидуальны. Его необходимо лимитировать по статистическим данным на уровне раздела организация-энергосистема, применяя некоторые *техноценологические* положения [1,2,6]. В частности нормирование параметров электропотребления по электроприемникам не должно быть «расчетным» снизу, а затем агрегироваться на более высокие иерархические уровни.

Таким образом, в условиях жесткого государственного лимитирования бюджетных организаций особую актуальность приобретают работы по объективной оценке эффективности энергопотребления.

Сотрудниками кафедр «Электротехнические комплексы и системы» Сибирского федерального университета и «Электропривод и автоматизация производственных процессов» Северо-восточного федерального университета был проведен анализ электропотребления бюджетных организаций Нерюнгринского района на примере инфраструктуры образовательных учреждений. Динамика электропотребления представлена на рисунке 2. Координаты по оси X – объект исследования, по оси Y – значение электрической энергии, израсходованной за *i*-ый месяц, по оси Z – временной интервал (месяц).

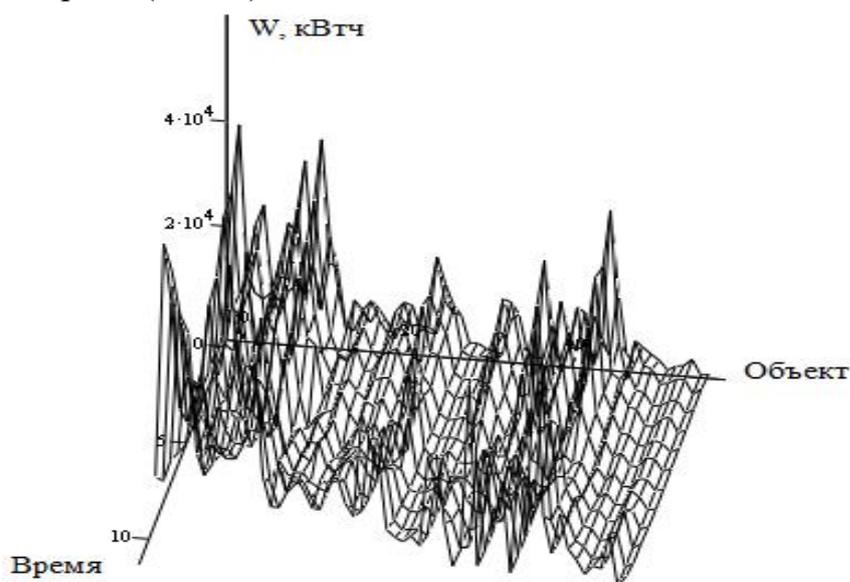


Рисунок 2. Динамика электропотребления инфраструктуры образовательных учреждений Нерюнгринского района

Трудно перечислить все прямые и косвенные факторы, которые оказывают влияние на уровень электропотребления. Проанализировать и учесть влияние каждого из этих факторов практически невозможно из-за отсутствия численных показателей большинства из них. Все это чрезмерно увеличивает сложность модели.

Сглаживание статистических данных об электропотреблении выполнено по методу наименьших квадратов (МНК), в качестве аппроксимирующих зависимостей использованы степенная, логарифмическая, экспоненциальная функции и полином четвертой степени. Получены коэффициенты аппроксимирующих зависимостей, для оценки качества сглаживания рассчитаны величины коэффициента детерминации и суммы квадратов остатков. Низкие значения коэффициентов детерминации и сравнительно высокие величины сумм квадратов остатков не позволяют использовать полученные модели для анализа и прогнозирования параметров электропотребления предприятия с приемлемой точностью.

В то же время, если проранжировать потребление электрической энергии в порядке убывания величины (рисунок 3) и применить для анализа полученного рангового распределения тот же математический аппарат, то качество регрессионных моделей существенно повышается.

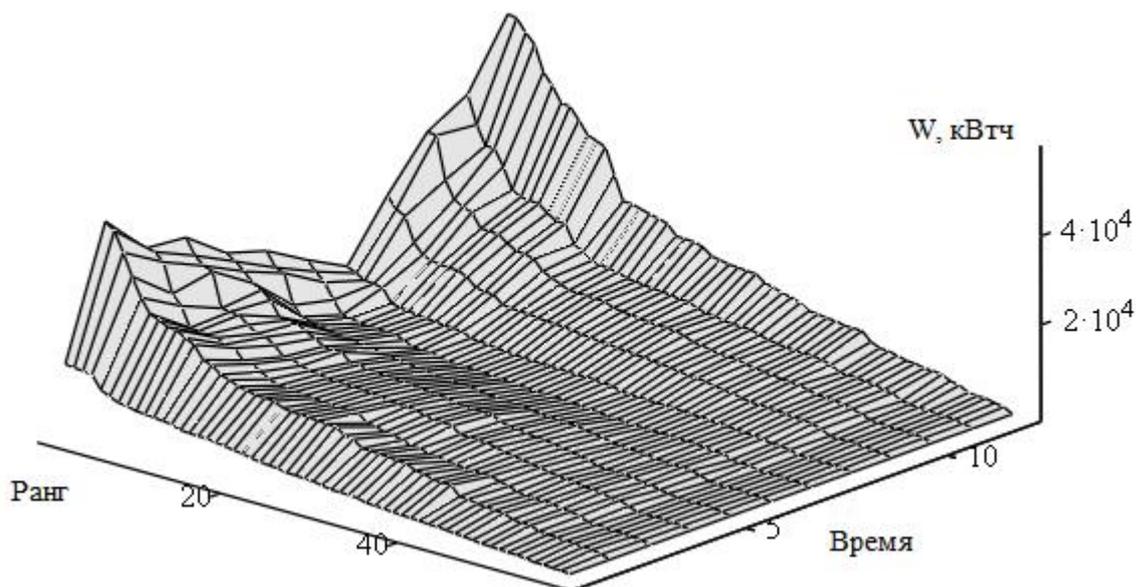


Рисунок 3. Ранговая поверхность электропотребления инфраструктуры образовательных учреждений Нерюнгринского района

Эффективность процесса энергосбережения инфраструктуры образовательных учреждений Нерюнгринского района по результатам моделирования оценена сопоставлением двух интегральных показателей, один из которых характеризует получаемый положительный эффект, а второй – затраты.

Положительный эффект, получаемый от внедрения методологии оптимального управления электропотреблением, оценивается интегральным показателем вида:

$$IP_w = \frac{\int_0^{\infty} W_1(r)dr - \int_0^{\infty} W_2(r)dr}{\int_0^{\infty} W_1(r)dr}, \quad (1)$$

где  $W_1(r)$  – ранговое параметрическое распределение образовательных учреждений по электропотреблению, построенное в результате имитационного моделирования, при условии отсутствия управляющего воздействия, направленного на энергосбережение;  $W_2(r)$  – ранговое параметрическое распределение образовательных учреждений по электропотреблению, полученное при наличии управляющего воздействия.

Затраты на внедрение методологии оптимального управления электропотреблением также оцениваются интегральным показателем техноценологического типа:

$$IP_z = 1 + \frac{\int_0^{\infty} Z_2(r)dr}{\int_0^{\infty} Z_1(r)dr}, \quad (2)$$

где  $Z_2(r)$  – ранговое параметрическое распределение образовательных учреждений по затратам на внедрение энергосберегающих технологий, построенное по результатам моделирования;  $Z_1(r)$  – ранговое параметрическое распределение образовательных учреждений по затратам на оплату за потребленную электроэнергию применительно к варианту без управляющих воздействий.

Критерием эффективности *техноценологического* типа [2] здесь является максимизация интегрального показателя эффективности:

$$IP = \frac{IP_w}{IP_z} \xrightarrow{k \in [1, n]} \max, \quad (3)$$

при выполнении ограничений:

$$W(r_k) - \frac{\{\Phi(p_\delta)\}^{-1}[\sigma_k]}{2} \leq w_k \leq W(r_k) + \frac{\{\Phi(p_\delta)\}^{-1}[\sigma_k]}{2}, \quad (4)$$

где

$$\{\Phi(x)\}^{-1} = \left\{ \frac{1}{2\pi} \int_0^{x/2} e^{-\frac{y^2}{2}} dy \right\}^{-1} - \text{обратная функция Лапласа, задающая}$$

нижнюю и верхнюю границы доверительного интервала;  $n$  – общее

количество образовательных учреждений;  $w_k$  – эмпирическое значение электропотребления  $k$ -го образовательного учреждения, получаемое по результатам имитационного моделирования;  $W(r_k)$  – электропотребление, соответствующее рангу  $k$ -го образовательного учреждения на кривой  $W(r)$ ;  $p_\delta$  – априорно принимаемая 95%-ная доверительная вероятность;  $[\sigma_k]$  – эмпирический стандарт распределения  $W(r)$  в кластере  $k$ -го образовательного учреждения.

Для реализации гауссового разброса параметров в пределах кластера доверительная вероятность  $p_\delta$  принимается равной 0,95. Эмпирический стандарт  $[\sigma_k]$  рассчитывается по результатам процедур интервального оценивания и кластер анализа [7,8].

Формально интегральный показатель  $IP_w$  исчисляется в диапазоне  $[0,1]$ , левая граница которого соответствует полному отсутствию управляющих энергосберегающих процедур, а правая – «абсолютному энергосбережению», сводящему электропотребление к нулю. В свою очередь, интегральный показатель  $IP_z$  исчисляется в диапазоне  $[1, \infty)$ . Левая граница показателя соответствует состоянию с нулевыми затратами на выполнение мероприятий по энергосбережению, правая – бесконечным затратам. Очевидно, что при этом интегральный показатель эффективности  $IP$  находится в пределах  $[0,1]$ , формально приобретая свое критериальное значение при строгом выполнении равенства:  $IP = 1$ . Реально критериальное значение показателя  $IP$  должно определяться с учетом минимальных технологических потребностей образовательных учреждений в электроэнергии, соответствующих нижней границе переменного доверительного интервала (левая часть неравенства (4)).

В общем случае неравенство (4) определяет необходимость реализации процесса электропотребления во всех образовательных учреждениях Нерюнгринского района в границах гауссового переменного доверительного интервала, определяемого в ходе интервального оценивания. При этом не допускается снижение электропотребления объектов ниже значения, определяющего минимальные технологические потребности, которые задаются нижней границей переменного доверительного интервала. Оба условия (4) должны конъюнктивно выполняться на всей области определения рангового параметрического распределения ( $k \in [1, n]$ ).

Оптимизация процесса электропотребления осуществляется одновременно на двух системных уровнях: *первый уровень* – внедрение эффективных решений, направленных на энергосбережение в рамках конкретных технологических процессов (технические мероприятия); *второй уровень* – управление инфраструктурой образовательных учреждений Нерюнгринского организационными методами с целью снижения

электропотребления до минимального уровня, обеспечивающего нормальное функционирование образовательных учреждений.

Оптимизационные процедуры первого уровня непосредственно связаны с моделированием процесса электропотребления инфраструктуры, которое осуществляется имитационными методами с использованием транзактного способа организации квазипараллелизма (чередования). Процесс функционирования отдельных технических систем объектов инфраструктуры моделируется агрегатным методом. 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.

Оптимизация процесса электропотребления организационными методами (второй уровень оптимизации) осуществляется исключительно в границах текущего переменного доверительного интервала, описываемого выражением (4). Следовательно, оптимум электропотребления будет достигаться при таких значениях параметров управляющего воздействия, направленного на энергосбережение, которые формально обеспечат суммарное электропотребление инфраструктуры образовательных учреждений Нерюнгринского района, соответствующее нижней границе переменного доверительного интервала. Смысл оптимизации заключается не в поиске оптимального значения целевой функции в области варьирования параметров (как это было на первом уровне), а в определении оптимальной стратегии изменения параметров, которая минимизирует издержки оптимального управления электропотреблением на пути движения инфраструктуры к состоянию, обеспечивающему оптимум электропотребления на нижней границе переменного доверительного интервала (рисунок 4).

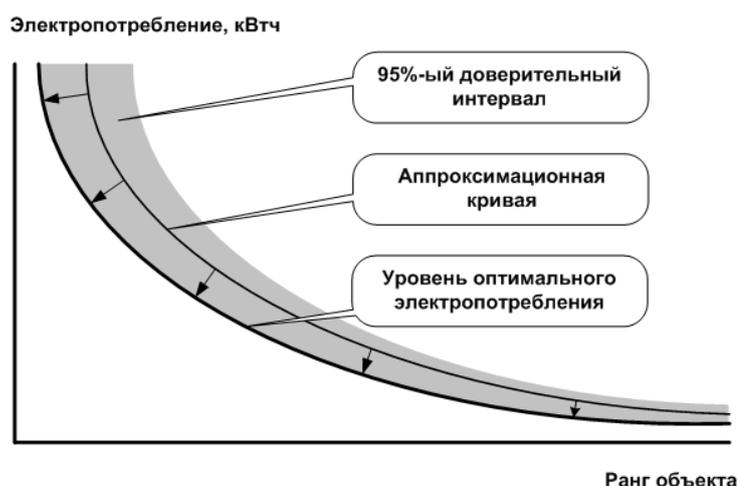


Рисунок 4. К понятию оптимума электропотребления образовательными учреждениями (стрелками условно показано направление оптимизации)

По результатам моделирования и двухуровневой оптимизации процесса электропотребления определяется такой важный прогнозный параметр, как

потенциал энергосбережения образовательных учреждений Нерюнгринского района (рисунок 5).

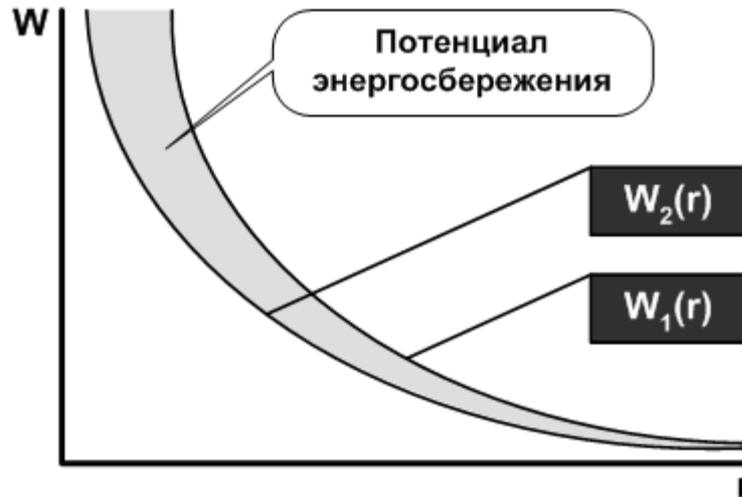


Рисунок 5. К понятию потенциала энергосбережения

Числитель критериального выражения (1), вычисленный по результатам оптимизационного процесса, рассматривается как потенциал энергосбережения образовательных учреждений Нерюнгринского района:

$$\Delta W_t = \int_0^{\infty} W_1(r) dr - \int_0^{\infty} W_2(r) dr, \quad (5)$$

при выполнении ограничений:

$$\begin{cases} IP = \frac{IP_w}{IP_z} \xrightarrow{k \in [1, n]} \max; \\ W(r_k) - \frac{\{\Phi(p_\delta)\}^{-1}[\sigma_k]}{2} \leq w_k \leq W(r_k) + \frac{\{\Phi(p_\delta)\}^{-1}[\sigma_k]}{2}, \end{cases} \quad (6)$$

где  $\Delta W_t$  – потенциал энергосбережения образовательных учреждений (кВт·ч) на глубину времени  $t$ .

Под потенциалом энергосбережения понимается полученная в результате моделирования на расчетную глубину времени абсолютная разница (в кВт·ч) между электропотреблением образовательных учреждений без реализации энергосберегающих мероприятий и процедур, с одной стороны, и электропотреблением, полученным в результате внедрения методологии оптимального управления электропотреблением на системном уровне с реализацией комплекса технических и технологических мероприятий, с другой стороны.

Реализация разработанной динамической модели электропотребления осуществлена с помощью информационно-аналитического комплекса.

Оценка эффективности методологии оптимального управления электропотреблением, а также потенциала энергосбережения образовательных учреждений Нерюнгринского района осложняется необходимостью осуществления практической внедренческой работы, растягивающейся на несколько лет. А ответ, как правило, необходимо иметь еще до принятия решения о внедрении методологии. Для решения этой задачи использована программа, позволяющая моделировать процесс реализации методики на глубину 5-7 лет и более, в основу которой положен алгоритм имитационного моделирования с динамическими обратными связями [2]. В качестве стандартных процедур, отражающих процесс электропотребления образовательными учреждениями Нерюнгринского района, используются модифицированные методики прогнозирования, интервального оценивания и нормирования [3,4,5]. Реализация конкретных значений электропотребления объектов в процессе моделирования осуществляется с использованием соответствующих преобразующих функций. Собственно оценка эффективности и потенциала энергосбережения образовательных учреждений выполняется по критериальным выражениям, основанным на законе оптимального построения техноценозов [2].

Для упрощения расчетов сделано допущение, что каждое образовательное учреждение в будущем будет потреблять электроэнергию по прогнозируемой стохастической норме с учетом гауссового разброса параметров внутри доверительного интервала соответствующего кластера техноценоза [8].

**Подготовка данных** Исходные данные считываются из файлов с результатами работы предшествующих расчетных программ предварительной обработки статистических данных:

– матрица упорядоченных реальных данных по электропотреблению за рассматриваемый период (12 месяцев 2011 г), кВтч

$W := \text{READPRN}("c:\text{mathcad\_dat}\text{Zipf.md}");$

– вектор рангов объектов;

$R := \text{READPRN}("c:\text{mathcad\_dat}\text{R.md}");$

– матрица рангов, соответствующих величине электропотребления каждого образовательного учреждения за временной интервал

$\text{Rang} := \text{READPRN}("c:\text{mathcad\_dat}\text{Rang.md}");$

**Интерполяция норм электропотребления.** Первоначально с использованием модифицированных программ прогнозирования, интервального оценивания и нормирования осуществлен кластерный анализ и интерполяция норм электропотребления объектов техноценоза на моделируемый единичный временной интервал (месяц) [2,3,4,5].

**Модельная реализация стохастических значений электропотребления.** Ввиду недостаточной исследованности ряда динамических параметров, описывающих процесс электропотребления

образовательных учреждений Нерюнгринского района, в данной программе приняты два допущения [1-4]:

1. При отсутствии в системе управления образовательных учреждений Нерюнгринского района стимулирующих воздействий, направленных на энергосбережение, в качестве математического ожидания и стандарта принимаются соответствующие параметры нормы, вычисленной для кластера. В противном случае математическое ожидание уменьшается в  $k_1$  раз, а стандарт – в  $k_2$  раза.

2. Все результаты электропотребления, превышающие норму, заменяются ее максимальным значением для данного образовательного учреждения. В случае же если электропотребление объекта при моделировании окажется меньше нижней границы нормы, то в качестве электропотребления образовательного учреждения принимается минимальное значение нормы.

Полученные данные записываются в файлы и визуализируются результаты расчетов. При этом в файл "C:\mathcad\_dat\Dinam\_1.xls" записываются моделируемые результаты электропотребления образовательных учреждений Нерюнгринского района в будущем месяце при отсутствии мероприятий по энергосбережению,

$$D^T =$$

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	$1.196 \cdot 10^4$	$5.423 \cdot 10^4$	$4.61 \cdot 10^4$	$4.014 \cdot 10^4$	$3.612 \cdot 10^4$	$1.622 \cdot 10^4$	$1.981 \cdot 10^4$	$3.278 \cdot 10^4$	$3.777 \cdot 10^4$	...

а в файл "C:\mathcad\_dat\Dinam\_2.xls" – моделируемые результаты электропотребления образовательных учреждений Нерюнгринского района в будущем месяце в условиях проведения мероприятий по энергосбережению

$$D1^T =$$

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	$1.154 \cdot 10^4$	$5.399 \cdot 10^4$	$4.466 \cdot 10^4$	$3.448 \cdot 10^4$	$3.601 \cdot 10^4$	$1.453 \cdot 10^4$	$1.963 \cdot 10^4$	$3.271 \cdot 10^4$	$3.777 \cdot 10^4$	...

Созданная [2] в MathCad программа позволяет моделировать процесс электропотребления образовательных учреждений на один временной интервал (в данном случае месяц) вперед. После этого полученные результаты, записанные ранее в теле программы в файлы "Dinam\_1.xls" и "Dinam\_2.xls", в интерактивном режиме вне программы добавляются к исходной базе данных. При этом в отдельных файлах с одним и тем же именем "data.xls", но размещенных в разных папках, параллельно формируются две базы данных: одна с электропотреблением образовательных учреждений при отсутствии мероприятий по энергосбережению, а вторая – с электропотреблением в условиях проведения мероприятий по энергосбережению. Далее отдельно для каждой из баз данных реализуются все расчетные программы, включая настоящую. После получения новых результатов моделирования (на второй временной интервал) и добавления к базам данных расчеты повторяются в циклическом режиме. Количество прогонов модели соответствует требуемой глубине

прогноза. В процессе моделирования обе базы данных содержатся отдельно от рабочих файлов, размещенных в директории "C:\mathcad\_dat". После каждого прогона модели и интерактивной модификации баз данных эти файлы, замещая предыдущие, экспортируются в данную директорию как исходные для последующих расчетов. Естественно, при этом сохраняется исходный файл, содержащий данные по реальному электропотреблению образовательных учреждений за предыдущие месяцы (годы) функционирования.

Как показало моделирование (рисунок 5) потенциал энергосбережения образовательных учреждений Нерюнгринского района в 2011 году составил 56,49 тыс. кВт·ч, что соответствует 250,82 тыс.руб.

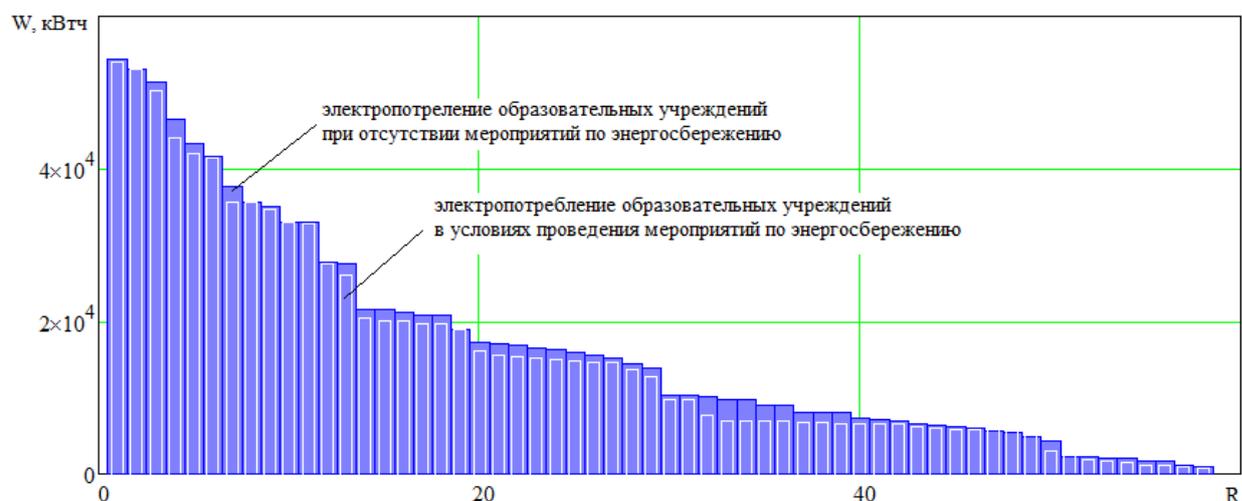


Рисунок 5. Сравнение электропотребления образовательных учреждений Нерюнгринского района к исходу цикла моделирования для двух вариантов

Внедрение методологии оптимального управления электропотреблением с учетом критерия (3) позволит сэкономить в ближайшие пять лет до 283,4 тыс. кВт·ч (1258,3 тыс. руб.) за счет организационных и технических мероприятий с быстрым сроком окупаемости. Немаловажным резервом является также оптимизация собственно процесса углубленных энергетических обследований (энергоаудита), проводимых на аномальных объектах техноценоза после соответствующих процедур интервального оценивания.

### Литература:

1. Кудрин Б.И. Введение в технетику. - Томск: Изд. ТГУ, 1993. - 552 с.
2. Гнатюк В.И. Закон оптимального построения техноценозов. - М.: ЦСИ, 2004. - <http://www.baltnet.ru/~gnatukvi/ind.html>.
3. Сизганова Е.Ю., Филиппов В.П. Ценологическая методология нормирования электропотребления на системном уровне Материалы V Всероссийской научно-практической конференции «Красноярск. Энергоэффективность: достижения и перспективы: Материалы V

Всероссийской научно-практической конференции» / Под ред. В.М. Журавлева, В.А. Кулагина. Красноярск: ИПЦ КГТУ, 2004. С.176-180.

4. Сизганова Е.Ю., Пантелеев В. И., Филиппов В. П. Нормирование потребления энергоресурсов в инфраструктуре образовательных учреждений г. Красноярска материалы Всероссийской науч.-тех.конф. «Электроэнергия: от получения и распределения до эффективного использования»: – Томск: изд-во ТПУ, 2008, с. 140-142

5. Sizganova E.Yu. Norms of the power consumption in budgetary sphere / A.Yu. Yuzhannikov, E.Yu. Sizganova, V.P. Filippov // II International conference RAE «Priority trends in development of science, technologies and technology», Bechichi (Montenegro), on June 8 to 15 2007. Proceeding of M.; Fundamental researches, 2007.- № 8.- P.41-42.

6. Chupak T.M. Cenologikal model of an estimation of a condition of the transformer on the basis of numbers Fibonacci / A.Yu. Yuzhannikov, T.M. Chupak, E.Yu. Sizganova // IV International conference RAE «Modern problems of science and education», Pool (Croatia), on July 7 to 14 2007. Proceeding of M.; Fundamental researches, 2007.- № 9.- P.75-76.

7. *Williams C. B.* Patterns in the Balance of Nature and Related Problems in Quantitative Ecology. London; New York- Acad Press, 1964.

8. *Watterson G. A.* Models for the Logarithmic Species Abundance Distributions.– Theor. Popul. Biol., 1974, N 6.