УДК 621.3

Исследование и прогнозирование качества функционирования энергосистем зданий для занятий водными видами спорта при разнообразных внешних воздействиях.

http://vestnik.mpei.ru/vestnik/archive/article/420/

Цель статьи:

Задачи:

1. Определение наиболее целесообразного типа распределения массивов случайных величин.
2. Определение необходимого и достаточного числа наблюдений для обеспечения возможности прогноза теплопотребления объекта с точностью $\delta \geq 95\%$ и доверительной вероятностью $\gamma \geq 50\%$.
3. Определение необходимого набора факторов, изменение которых оказывает влияние на теплопотребление объекта.
4. Оценка точности и достоверности прогнозной модели для анализируемого здания для занятий водными видами спорта.

Дискретной (прерывной) случайной величиной называется случайная величина, которая принимает отдельные, изолированные возможные значения с определенными вероятностями. Число возможных значений дискретной случайной величины может быть конечным или бесконечным.

Непрерывной случайной величиной называется случайная величина, которая может принимать все значения из некоторого конечного или бесконечного промежутка. Множество возможных значений непрерывной случайной величины бесконечно и несчетно.

Расчёт базовой линии имеет основой периодические показания приборов учёта исследуемого вида энергоресурса в базовый период: (p_1, p_2, …, p_n). Данные могут быть преобразованы в массив ежемесячных приростов потреблённого энергоресурса $X=(x_1, x_2, \ldots, x_{k-1})$, где $x_i=p_{i+1}-p_i$ и $k=n-1$. Теоретически значения X могут принимать любое значение больше нуля: $x_i = [0; +\infty)$. Тогда полученный массив величин можно однозначно классифицировать как массив непрерывных случайных величин (НСВ). Каждая величина получена не в результате эксперимента, но в результате наблюдения за исследуемым объектом.

Приведём формулы основных числовых характеристик НСВ, адаптированные для условий анализа технической эффективности ЭСМ.

Математическое ожидание НСВ X, возможные значения которой принадлежат отрезку $[0; +\infty)$ [1, стр. 125]:

$$M(X) = \int_{0}^{+\infty} x * f(x)dx \text{, где} \tag{1}$$

f(x) – плотность распределения НСВ X.

Дисперсия:

$$D(X) = \int_{0}^{+\infty} [x - M(X)]^2 * f(x)dx \,. \tag{2}$$

Среднее квадратичное отклонение непрерывной случайной величины определяется равенством [1, стр. 126]:

$$\sigma(X) = \sqrt{D(X)} \,. \tag{3}$$

Вероятностный смысл параметра σ(X) - среднее квадратическое отклонение характеризует рассеяние случайной величины вокруг её математического ожидания [1, стр. 134].

Опираясь на приведённые первичные формулы необходимо проанализировать массив данных на предмет выявления его свойств, которые присущи тому или иному виду распределения. Из существующих распределений вероятностей для решения задачи целесообразно рассмотреть распределения, имеющие максимум которому предшествует нарастание функции и её убывание после. Рассмотрим наиболее часто употребляемые распределения НСВ.

1. Нормальное распределение – такое распределение вероятностей непрерывной случайной величины, которое описывается плотностью [1, стр. 127]:

$$f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-(x-M(X)^2) / (2\sigma^2)} . \tag{4}$$

Наиболее распространенные графики плотности нормального распределения нормальной кривой (кривой Гауса) показаны на рис. 1. При M(X)=0 и б=1 нормальную кривую называют нормированной [1, стр. 132].

2. Распределение «хи квадрат» подчинено закону плотности распределения [1, стр. 146]:

$$f(x) = \begin{cases} 0 & \text{при } x \le 0 \\ \dfrac{1}{2^{k/2} * \Gamma(k/2)} * e^{-x/2} * x^{(k/2)-1} \text{ (рис. 2), где} & \text{при } x > 0 \end{cases} \tag{5}$$

$$\Gamma(x) = \int_0^\infty t^{x-1} e^{-t} dt . \tag{6}$$

Г(x) – гамма-функция;

k – число степеней свободы (число интервалов измерения месячного потребления энергоресурса).

Особенностью распределения «хи квадрат» является факт приближения его к нормальному с ростом числа степеней свободы.

3. Распределение Стьюдента подчинено закону плотности распределения [1, стр. 146]:

$$T = \frac{Z}{\sqrt{\frac{V}{k}}}\text{, где} \qquad (7)$$

Z – нормальная случайная величина, имеющая свойства: M(Z)=0 и б(Z)=1; V – независимая от Z величина, распределённая по закону χ^2 с k степенями свободы. С возрастанием k распределение Стьюдента быстро приближается к нормальному.

Рисунок 1.
Кривая Гауса для разных значений б.

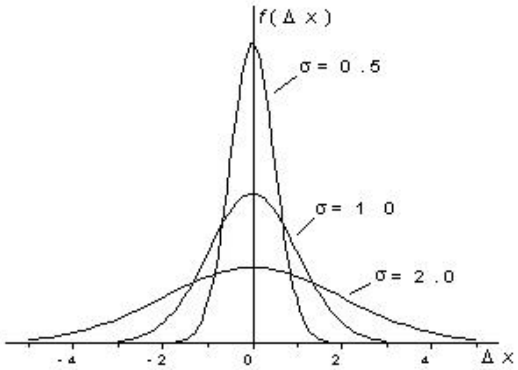
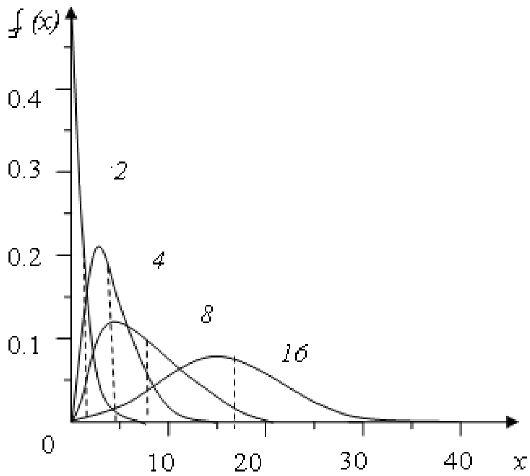


Рисунок 2.
График плотности вероятности и функции χ^2 – распределения для разных степеней свободы.



Опираясь на параметр M(X), для выявления типа распределения случайной величины также удобно пользоваться правилом трёх сигм. Если случайная величина распределена нормально, то абсолютная величина её отклонения от математического ожидания не превосходит утроенного среднего квадратического отклонения [1, стр. 135]. На практике правило в следующем виде: если распределение изучаемой непрерывной случайной величины неизвестно, но абсолютная величина отклонения превышает утроенное среднее квадратическое отклонений лишь в 0,27% случаев или меньше, то есть основание предполагать, что изучаемая величина распределена нормально; в противном случае она распределена не нормально.

Для абсолютного большинства случаев анализ типа распределения массивов исходного и уточняющих факторов показал соответствие их распределению Стьюдента. При выявлении типового распределения исходного фактора, уточняющие факторы приводятся к его сопоставимым условиям с учётом типа распределения.

Постановка задачи при обработке массива данных, полученных посредством последовательных наблюдений, является определение необходимого и достаточного числа экспериментов. Если требуется оценить математическое ожидание с наперёд заданной точностью δ и доверительной вероятностью γ, то минимальный объём выборки, который обеспечит эту точность, вычисляемую по формуле [1, стр. 216]:

$$n_{ИЗМ} = \frac{t^2 \sigma^2}{\delta^2}, \text{ где} \tag{7}$$

t – аргумент, которому соответствует значение функции Лапласа, равное γ/2 (табл. 1).

В случае с неизвестным значением σ генеральной совокупности используют оценку $\overset{\frown}{\sigma}$ для выборки:

$$s^2 = \overset{\frown}{\sigma}^2 = \frac{\sum_{i=1}^{k} (x_i - \overline{X})^2}{k-1}. \tag{8}$$

С учётом (8) формула (6) может быть преобразована:

$$n_{ИЗМ} = \frac{t^2 s^2}{\delta^2}. \tag{9}$$

Нетрудно заметить, что (9) существенно зависит от значений выборки; в рассматриваемом случае – от значений ежемесячного потребляемого энергоресурса.

Анализ выборок генеральных совокупностей, полученных на основе электро- и теплопотребления зданий, позволяет рассчитать значения минимально необходимого числа наблюдений, которые требуются для достижения заданной точности δ и доверительной вероятности γ (табл. 1.)

Таблица 1.

Значение минимального числа наблюдений для различных γ и δ.

		Точность прогнозной модели δ		
		50	75	95
Доверительная вероятность γ	0,99 (t=2.58)	4	364	364
	0,95 (t=1.96)	2	210	210
	0,90 (t=1,65)	1	149	149
	0,80 (t=1.29)	1	91	91
	0,50 (t=0,68)	0	25	25

Прогнозные модели, создаваемые для оценки функционирования инженерных систем, особенно требовательных к точности расчёта. Вместе с тем, редко можно встретить объект, имеющий достоверные данные о потреблении энергоресурсов более чем за 4-5 лет.

Согласно табл.2 для достижения точности 95% и доверительной вероятности 50% достаточно 25 последовательных наблюдений, что составляет 2 года и 1 месяц. При увеличении γ до 80%, число наблюдений возрастает до 91, что соответствует 7 годам 7 месяцам. В дальнейших расчётах примем минимальное число наблюдений, равное 36, что составляет 3 года.

При составлении прогнозной функции энергопотребления здания, важно определить необходимое и достаточное число значащих факторов. На теплопотребление зданий для занятий водными видами спорта, помимо энергопотребления обычными нагрузками, могут оказывать влияние:

- внеплановые ремонты для устранения аварий;
- энергопотребление суб. абонентов, утечки и потери в передающих сетях [2];
- плановые ежегодные эксплуатационные мероприятия (например, генеральная уборка и т.п.);
- плановые ежегодные спортивные мероприятия (соревнования);
- остановку здания на плановый ремонт и пр.
- дрейф погрешности прибора учёта от времени или из-за изменения показателей качества учитываемого ресурса и пр.

Несмотря на то, что здание снабжается различными видами энергоресурсов: электрическая энергия, тепловая энергия, холодная вода питьевого водопровода, - математические подходы к формированию функции энергопотребления здания одинаковы. На энергопотребление могут оказывать влияние:

I. среднемесячная температура наружного воздуха;
II. число часов работы основных электропотребителей и их мощность;
III. ежемесячное число посетителей;
IV. объёмы потребления иных энергоресурсов;
V. температура внутри здания;
VI. влажность наружного воздуха.

Следует помнить, что некоторые факторы могут влиять друг на друга, а значить необходимо проводить соответствующую проверку. Так например, на фактор «температура внутри здания» оказывают влияние:

1) показатели качества электрической энергии: уровень напряжения; cosφ; уровень гармонических составляющих тока напряжения;
2) $P_{ОБОРУД.УСТ.}$ – установленная мощность осветительных приборов в здании;
3) $P_{ОСВ.УСТ.}$ – установленная мощность осветительных приборов в здании;
4) $Q_{ОСВЕЩЕНИЕ}$ – теплоприток от осветительных приборов;
5) $Q_{ОБОРУДОВАНИЯ}$ – теплоприток от электрических приборов инженерных систем и бытовых;
6) $Q_{ИНФИЛЬТРАЦИИ}$ – потери тепловой энергии с утечками воздуха, а также с притоком холодного воздуха с улицы;
7) $Q_{ОГР.КОНСТРУКЦИЙ}$ – потери тепловой энергии через ограждающие конструкции (пол, стены, потолок, стекла окон, чердак и пр.);
8) $Q_{ЛЮДИ}$ – теплоприток от посетителей и работников здания (считается по нормам);
9) $Q_{ОТОПЛЕНИЕ.\ РАДИАТОРЫ}$ – теплопритоки через радиаторы от системы отопления;
10) $Q_{ОТОПЛЕНИЕ.\ ЛУЧИСТОЕ}$ - теплопритоки от системы электрического инфракрасного отопления;
11) $Q_{ОТОПЛЕНИЕ.\ ГВС}$ - теплопритоки от системы отопления, расходующиеся на подогрев питьевой воды для ГВС;
12) $Q_{РЕКУПЕРАЦИЯ}$ – теплопритоки от вторичного использования тепла вентиляционных выбросов и пр.

Использование факторов, с взаимным влиянием в расчётах не рекомендуется, т.к. это усложняет расчёт и снижает точность результатов. Значащие факторы группируются в массивы данных, пригодных для последующей обработки. На рис. 3 представлена структурная схема алгоритма прогнозирования технологического эффекта от проведения энергосберегающих мероприятий в действующих инженерных системах и верификации технического эффекта в сопоставимых условиях.

Далее методами многофакторной регрессии проводят верификацию массивов всех факторов с учётом сопоставимых условий. Для прогнозирования технологического эффекта от проведения энергосберегающих мероприятий в действующих инженерных системах выполняют анализ зависимостей между исходными и прогнозными значениями выбранных факторов, которые представляют собой количественные характеристики объёмов потребляемых энергоресурсов.

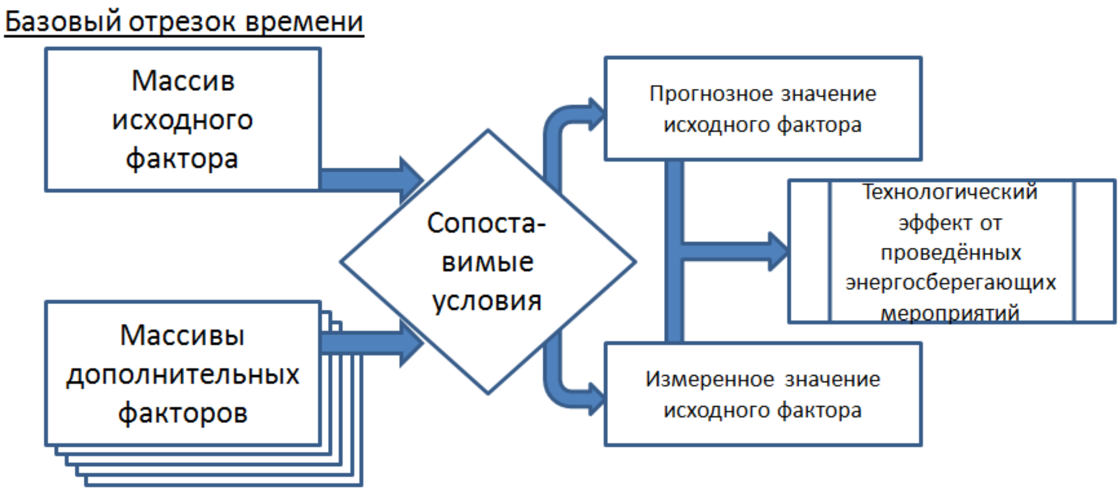


Рисунок 3. Блок-схема формирования прогнозной функции энергопотребления.

Результатом является математическая функция, описывающая зависимость прогнозного значения исходного фактора от каждого из уточняющих дополнительных факторов.

В качестве примера рассмотрим здание для занятий водными видами спорта – бассейн НИУ «МЭИ». Здание 1954 года постройки, общая площадь 2000 кв.м., отапливаемая – 1500кв.м. Составим прогноз потребления тепловой энергии с точностью не менее 95% и доверительной вероятностью не менее 50%. Поскольку в здании для занятий водными видами спорта тепловое потребление преобладает над потреблением электрической энергии, составим прогнозную функцию теплопотребления в зависимости от факторов I – VI. Исходные данные приведены на рис. 4, данные по погодным факторам взяты с сайта МетеоТВ [3]. Для сравнения расчёт выполнялся для случаев учёта трёх, четырёх, пяти и шести факторов. Результативным показателем значение нормированного R-квадрата. Чем точнее расчёт, тем ближе значение нормированного R-квадрата к единице [4, стр. 252].

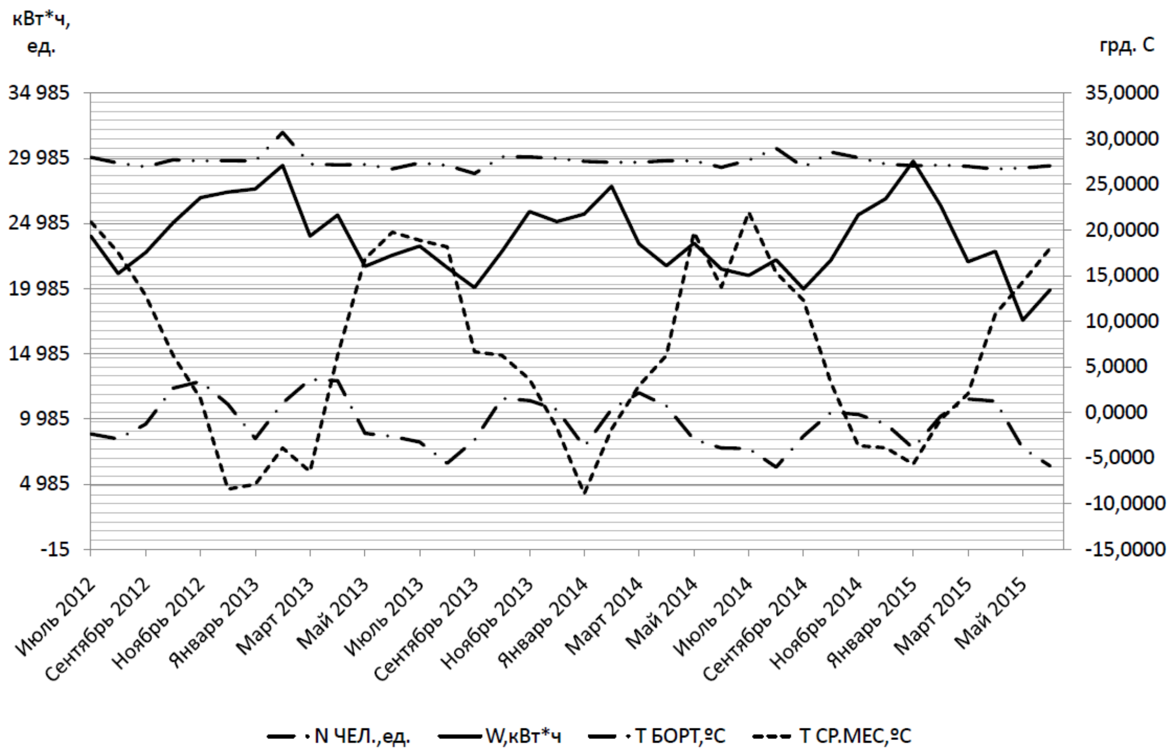


Рисунок 4. Исходные факторы для формирования функции теплопотребления.

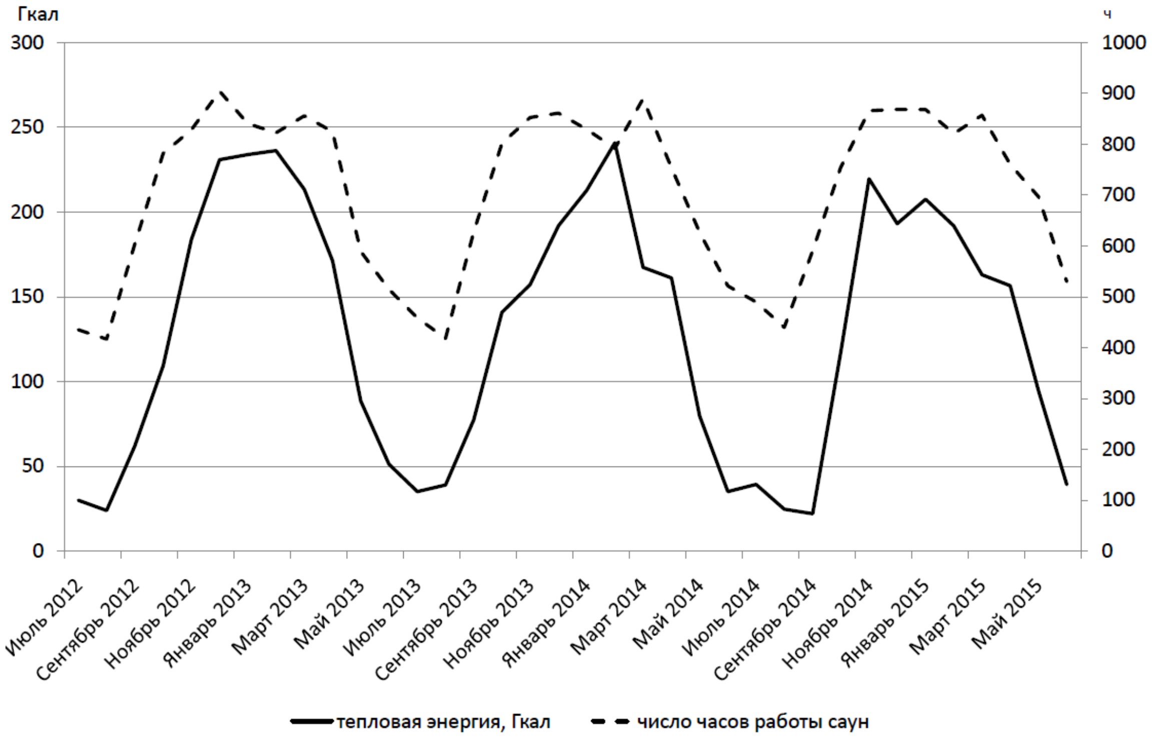


Рисунок 5. Результирующие факторы для формирования функции теплопотребления.

Функции теплопотребления, сформированные для различного числа значащих факторов, представлены ниже:

три фактора, нормированный R-квадрат = 0,886:

$$Y = 83{,}924 + 0{,}001 \cdot X1 - 6{,}120 \cdot X2 + 0{,}006 \cdot X3 \qquad (10)$$

четыре фактора, нормированный R-квадрат = 0,8837:

$$Y = 96{,}335 + 0{,}001 \cdot X1 - 6{,}120 \cdot X2 + 0{,}006 \cdot X3 - 0{,}487 \cdot X4 \qquad (11)$$

пять факторов, нормированный R-квадрат = 0,9035:

$$Y = -105{,}955 + 0{,}001 \cdot X1 - 3{,}58 \cdot X2 + 0{,}0007 \cdot X3 + 2{,}515 \cdot X4 + 0{,}19 \cdot X5 \qquad (12)$$

шесть факторов, нормированный R-квадрат = 0,9257:

$$Y = -51{,}28 + 0{,}005 \cdot X1 - 4{,}15 \cdot X2 + 0{,}0003 \cdot X3 + 1{,}315 \cdot X4 + 0{,}15 \cdot X5 - 1{,}1 \cdot X6 \qquad (13)$$

Графики отклонений прогнозных значений от фактических для четырёх- (11), пяти- (12) и шестифакторного (13) прогнозов представлены на рис. 6.

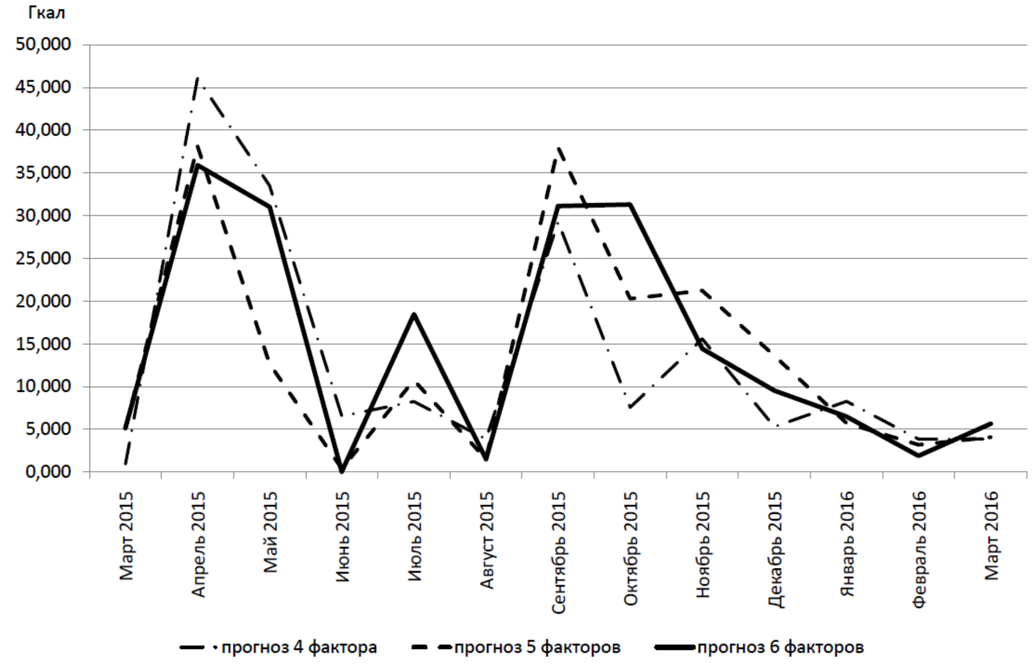


Рисунок 6. Отклонения прогнозных факторов от фактических значений теплопотребления исследуемого объекта.

Расчёт показал, что с увеличением числа значащих факторов, точность расчёта неуклонно повышается. Для шестифакторного прогноза погрешность расчёта составляет 7,43%, что является достаточно малой для подобных моделей величиной.

Прогнозирование качества функционирования энергосистем зданий для занятий водными видами спорта и анализ их изменений при разнообразных внешних воздействиях показал пригодности и достаточную точность расчёта при использовании метода много факторного регрессионного анализа. Недостаток рассматриваемого способа состоит в сложности интерпретации получаемых коэффициентов при значащих факторах с точки зрения электро- и теплотехнических процессов. Преимущество использования данного способа состоит в использовании только доступных первичных исходных данных при достижении необходимой точности расчёта. Результаты работы могут применяться для прогнозирования объёмов электро- и теплопотребления зданий для занятий водными видами спорта.

Источники:

1. Теория вероятностей и математическая статистика: учеб. Пособие для бакалавров / В.Е. Гмурман. – 12-е изд. – М.: Издательство Юрайт, 2013. – 479 с.: ил.

2. Lambert G. ISO 50001 pilot programme: US companies implement standard with government support / G. Lambert // ISO Focus+. — 2011.05, p.11-14.

3. Официальный сайт Телекомпания «Метео-ТВ». Режим доступа: http://www.meteo-tv.ru/weather/archive/

4. Анализ данных: учебное пособие / Ш.У. Низаметдинов, В.П. Румянцев. – М.: Издательство НИЯУ МИФИ, 2012. – 288 с.