

ЭНЕРГЕТИКА

Ю. Г. ГРИГОРЬЯН, К. В. ГАСПАРЯН, А. Ф. ДЬЯКОВ

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ СУТОЧНЫХ ГРАФИКОВ НАГРУЗОК
 ЭНЕРГОСИСТЕМ ПРИМЕНЕНИЕМ ОПЕРАТОРА
 ПРЕДСКАЗАНИЯ

В связи с непрерывным ростом производства и потребления электроэнергии важное значение приобретает прогнозирование нагрузок отдельных электростанций и целых энергетических систем. Такие прогнозы позволяют избежать потерь и более рационально распределять энергию среди потребителей. Предсказание потребления электроэнергии дает возможность упорядочить работу электростанций и создает условия для безаварийной работы сетей электроснабжения.

В настоящей работе применяется один из алгоритмов предсказания для прогнозирования суточных нагрузок энергосистем. Случайными факторами, влияющими на точность прогнозирования, являются метеорологические условия и коэффициенты годового прироста нагрузок, однако эти факторы в работе не учитываются.

Постановка задачи и описание алгоритма прогнозирования. Задача прогнозирования нагрузок ставится в следующем виде: зная нагрузки энергосистемы за какие-то n последовательных дней определить нагрузки в следующий $(n+1)$ -ый день. Ввиду того, что в отдельные дни недели и часы нагрузки энергосистемы претерпевают изменения, которые описывается стационарной случайной функцией $x(t)$ (представляющей собой стационарную последовательность значений), будущие значения нагрузок определим, пользуясь оператором предсказания Колмогорова [1]

$$g[x(t)] = r_0 + \sum_{i=1}^n r_{0i} x_{ni} + \sum_{n=1}^n \sum_{a=1}^n r_{nna} x_{na} x_{ni} + \dots + \sum_{a=1}^n \sum_{a-1=1}^n \sum_{a-2=1}^n r_{naa-1a-2} x_{na} x_{a-1a-2} x_{ni} + \dots \quad (1)$$

где $g[x(t)]$ — будущее предсказываемое значение функции; x_{ni} — значения этой функции в прошлом ($i = 1, \dots, n$); r_{ni} — корреляционные коэффициенты, определяющие влияние (вес) каждого члена формулы на предсказываемое значение функции; n — длина предистории.

Для предсказания будущего значения функции по трем данным о ходе изменения этой функции в прошлом получается формула:

$$g[x(t)] = r_0 + \sum_{n_1=2}^3 r_{n_1} x_{n_1} + \sum_{n_2=2}^3 \sum_{n_1=1}^3 r_{n_1 n_2} x_{n_1} x_{n_2} + \sum_{n_1=1}^3 \sum_{n_2=1}^3 \sum_{n_3=1}^3 r_{n_1 n_2 n_3} x_{n_1} x_{n_2} x_{n_3}. \quad (2)$$

В формуле (2) возьмем члены, не содержащие вторых и третьих степеней x_{n_i} , т. к. они существенно не улучшают предсказание. В результате получается выражение (3), по которому и будет вестись прогнозирование:

$$g[x(t)] = r_0 + r_1 x_1 + r_2 x_2 + r_3 x_3 + r_4 x_1 x_2 + r_5 x_2 x_3 + r_6 x_1 x_3 + r_7 x_1 x_2 x_3. \quad (3)$$

Здесь $g[x(t)]$ — значение функции $x(t)$ в будущий момент времени; x_1, x_2, x_3 — значения функции $x(t)$ в предшествующие моменты времени;

r_i — коэффициенты влияния (веса) каждого члена.

Введя обозначения:

$$x_1 = x_1; \quad x_2 = x_2; \quad x_3 = x_3; \quad x_1 x_2 = x_4; \quad x_2 x_3 = x_5; \quad x_1 x_3 = x_6; \quad x_1 x_2 x_3 = x_7. \quad (4)$$

уравнение предсказания (3) принимает линейный вид:

$$g = r_0 + \sum_{i=1}^7 r_i x_i. \quad (5)$$

Среднеквадратичная ошибка предсказания определяется выражением:

$$\Delta = \bar{\varepsilon}^2 = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N (g_0^{(k)} - g^{(k)})^2, \quad (6)$$

где $g^{(k)} = r_0 + \sum_{i=1}^7 r_i x_i^{(k)}$; $N = n - 3$; $x_i^{(k)}$, $k = 1, \dots, N$ — обучающая последовательность (предыстория);

$$\left. \begin{aligned} g_1^{(k)} &= x_1^{(k+3)}, \\ x_2^{(k)} &= x_1^{(k+1)}, \\ x_3^{(k)} &= x_1^{(k+2)}, \\ x_4^{(k)} &= x_1^{(k)} \cdot x_1^{(k+1)}, \\ x_5^{(k)} &= x_1^{(k-1)} \cdot x_1^{(k+2)}, \\ x_6^{(k)} &= x_1^{(k)} \cdot x_1^{(k+2)}, \\ x_7^{(k)} &= x_1^{(k)} \cdot x_1^{(k+1)} \cdot x_1^{(k+2)}. \end{aligned} \right\} k = 1, \dots, N$$

Ввиду положительной определенности квадратичной формы (6), минимум ошибки всегда существует и он единственен. Множественно-корреляционный (регрессионный) анализ позволяет выбрать коэффициенты влияния так, чтобы получить минимум среднеквадратичной ошибки предсказания.

Чтобы определить минимум среднеквадратичной ошибки находятся значения восьми частных производных и приравниваются к нулю:

$$\frac{\partial \Delta}{\partial r_i} = 0 \quad (i = 0, 1, \dots, 7)$$

или

$$\sum_{k=1}^N r_i \overline{x_i^{(k)} x_j^{(k)}} - \overline{x_i x_j} \quad (j = 0, 1, \dots, 7)$$

Эти уравнения являются основными расчетными уравнениями («нормальными уравнениями регрессии»).

В развернутом виде получается:

$$\left. \begin{aligned} r_0 + r_1 \overline{x_1} + r_2 \overline{x_2} + \dots + r_7 \overline{x_7} &= \overline{g_0} \\ r_0 \overline{x_1} + r_1 \overline{x_1^2} + r_2 \overline{x_2 x_1} + \dots + r_7 \overline{x_1 x_7} &= \overline{g_0 x_1} \\ r_0 \overline{x_2} + r_1 \overline{x_1 x_2} + r_2 \overline{x_2^2} + \dots + r_7 \overline{x_2 x_7} &= \overline{g_0 x_2} \\ \dots &\dots \\ r_0 \overline{x_7} + r_1 \overline{x_1 x_7} + r_2 \overline{x_2 x_7} + \dots + r_7 \overline{x_7^2} &= \overline{g_0 x_7} \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

где

$$\overline{x_i} = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N x_i^{(k)}; \quad x_0 = 1;$$

$$\overline{x_i x_j} = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N x_i^{(k)} x_j^{(k)};$$

$$\overline{g_0} = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N g_0^{(k)};$$

$$\overline{g_0 x_i} = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N g_0^{(k)} x_i^{(k)}.$$

Решение системы (8) для обучающей последовательности $x_i^{(k)}$ ($k = 1, 2, \dots, n$) даст некоторые значения r_i^0 ($i = 0, 1, \dots, 7$) корреляционных коэффициентов, которые при подстановке в (5) и дают требуемый оператор предсказания

$$g = r_0^0 + \sum_{i=1}^7 r_i^0 x_i \quad (9)$$

или, при подстановке в (3), оператор предсказания принимает вид:

$$g = r_0^0 + r_1^0 x_1 + r_2^0 x_2 + r_3^0 x_3 + r_4^0 x_1 x_2 + r_5^0 x_2 x_3 + r_6^0 x_1 x_3 + r_7^0 x_1 x_2 x_3. \quad (10)$$

Пусть теперь имеются три следующих друг за другом значения функции $x(t)$: x_1^0 , x_2^0 , x_3^0 , тогда, согласно (10), получается предсказываемое значение

$$\bar{x}_4^0 = r_0^0 + r_1^0 x_1^0 + \dots + r_7^0 x_1^0 x_2^0 x_3^0. \quad (11)$$

Даны нагрузки $\{P_j^i(k)\}$ для фиксированного k ,

где $k = 1, 2, \dots, 7$ — указывает на день недели;

$j = 1, 2, \dots, 24$ — указывает на час;

$i = 1, 2, \dots, n$ — порядковый номер нагрузок;

n — длина предыстории.

Требуется предсказать нагрузки $\bar{P}_{n+1}^j(k)$ следующего дня.

Выражение (3) для фиксированного k дает:

$$\begin{aligned} \bar{P}_{n+1}^j(k) = & r_0^j(k) + P_{n-2}^j(k) \cdot r_1^j(k) + P_{n-1}^j(k) \cdot r_2^j(k) + P_n^j(k) \cdot r_3^j(k) + \\ & + P_{n-2}^j(k) P_{n-1}^j(k) r_4^j(k) + P_{n-1}^j(k) P_n^j(k) r_5^j(k) + P_{n-2}^j(k) P_n^j(k) r_6^j(k) + \\ & + P_{n-2}^j(k) \cdot P_{n-1}^j(k) P_n^j(k) \cdot r_7^j(k), \end{aligned} \quad (12)$$

где $j = 1, 2, \dots, 24$,

т. е. по трем данным значениям нагрузок $P_{n-2}^j(k)$, $P_{n-1}^j(k)$, $P_n^j(k)$ предсказано непосредственно следующее значение нагрузки $\bar{P}_{n+1}^j(k)$ (k и j — фиксированы). Таким образом, осталось определить корреляционные коэффициенты $r_m^j(k)$, где $m = 0, 1, \dots, 7$. Для этого применяется вышеизложенный алгоритм прогнозирования.

Учитывая тот факт, что число уравнений системы (8) для однозначного решения не может быть меньше числа неизвестных, получается, что длина предыстории n должна быть не меньше 11 ($n \geq 11$) ввиду того, что система условных уравнений, из которых потом получается система нормальных уравнений (8), составляется по четырем последовательным данным. Так что для получения 8 нормальных уравнений нужно иметь минимум 11 значений нагрузок. В дальнейшем берется именно это минимальное число нагрузок, т. к. взяв их больше 11, эти нагрузки будут уже заметно отличаться друг от друга ввиду того, что значения нагрузок энергосистем существенно зависят от времени года, а среди них, наверняка, будут нагрузки из двух соседних эрмен года, и прогноз будет недостаточно точным.

Теперь рассмотрим подробнее принцип получения системы нормальных уравнений из системы условных уравнений.

Для получения системы условных уравнений берутся по 4 последовательных значения значения нагрузок:

$$P_{i-3}^j, P_{i-2}^j, P_{i-1}^j, P_{i+1}^j.$$

Решение системы (14) дает последовательность корреляционных коэффициентов $r_0^0, r_1^0, \dots, r_{T-1}^0$, которые при подстановке в (12) и дают требуемый оператор предсказания.

Для рабочих дней указанный метод позволяет получить предсказание со среднеквадратичным отклонением в пиках $\varepsilon = \sqrt{\sigma^2} = 10-15\%$.

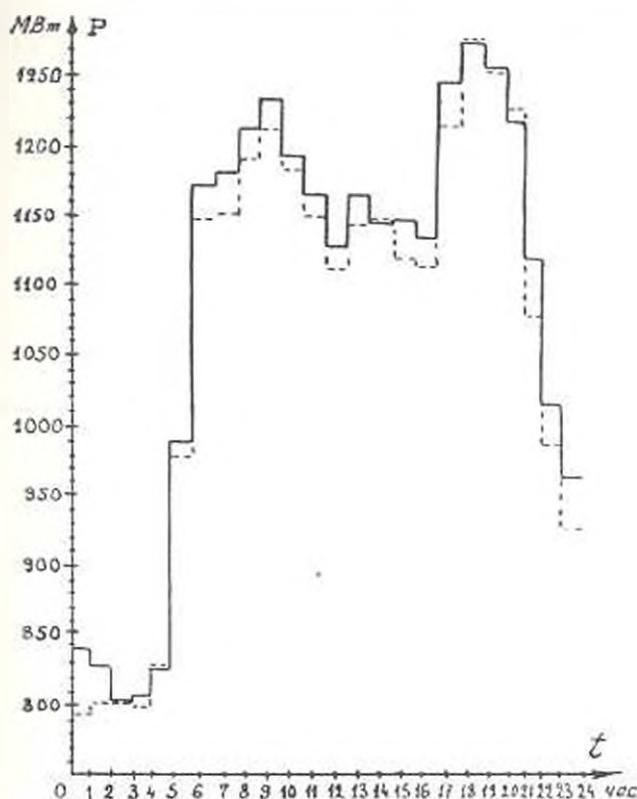


Рис. 1. Графики действительных и прогнозируемых нагрузок на 25 февраля 1974 г. для РЭУ Ставропольэнерго: — действительный график; --- прогнозируемый график.

В приложении дается типовый пример, решенный по предлагаемому методу на ЭВМ «Урал-14Д» на языке «Фортран-4», и построен прогнозируемый суточный график нагрузок, который приведен на рис. 1 (для сравнения приведен также наблюдаемый в действительности график нагрузок). Анализ совместного графика показывает, что точность прогнозирования выше для максимальных нагрузок дня.

З а к л ю ч е н и е

1. Результаты расчетов, выполненных для РЭУ Ставропольэнерго, показали, что наиболее точно прогнозируются максимальные нагрузки дня (ошибка порядка 1%), что обычно представляет наибольший интерес.

2. Точность прогнозирования можно улучшить, учитывая метеорологические условия и коэффициент годового прироста нагрузок.

3. Данная работа успешно внедряется в РЭУ Ставропольэнерго.

П Р И Л О Ж Е Н И Е

Программа PROGNOZ

Назначение. Предсказание суточных нагрузок.

Описание параметров

- JN=24 — число интервалов разбиения суток.
 MN=11 — число нагрузок предшествующих прогнозируемой.
 Y — массив нагрузок предшествующих прогнозируемой.
 LA — массив дат дней недели, для которых ведется прогноз.
 LB — массив наименований месяцев, для которых ведется прогноз.
 A — матрица левой части системы нормальных уравнений.
 B — массив свободных членов системы нормальных уравнений.
 X — массив неизвестных членов системы нормальных уравнений.
 UL — рабочий массив, используемый при решении системы нормальных уравнений.
 YX — матрица предшествующих нагрузок, состоящая из 11 строк, каждая из которых содержит 24 нагрузки соответствующего дня.
 GXT — матрица прогнозируемых нагрузок, состоящая из 8 строк, каждая из которых содержит 24 прогнозируемые нагрузки соответствующего дня.

```

SUBROUTINE APQST (AR, IP, IQ, IS, IT, X, N1)
  DIMENSION X (100)
  AR = 0; DO 11 = 1, N1
1  AR = AR + X (1) * * IP * X (1 - 1) * * IQ * X (1 - 2) * * IS * X (1 - 3) * * IT
  RETURN; END
c
      1
  DIMENSION A (8, 8), UL (8, 8), B (8), X (8), LA (8), LB (8),
  * Y (100), YX (11, 24), GXT (8, 24)
  COMMON IPS (45)
10  FORMAT (I3)
11  FORMAT (5F13,6)
16  FORMAT (40X, 'ПОНЕДЕЛЬНИК')
  WRITE 16
f
      2
  READ 10, JN, READ 10, MN
  N = MN - 3
  DO 5IK = 1, JN
  READ 11, (Y (I), I = 1, MN)
c
      3
  A (1, 1) = N
  CALL APQST (AT, 1, 0, 0, 0, Y, N)
  A (1, 2) = AT; A (2, 1) = AT
  CALL APQST (AT, 0, 1, 0, 0, Y, N)
  A (1, 3) = AT; A (3, 1) = AT
  CALL APQST (AT, 0, 0, 1, 0, Y, N)
  A (1, 4) = AT; A (4, 1) = AT
  CALL APQST (AT, 1, 1, 0, 0, Y, N)
  A (1, 5) = AT; A (2, 3) = AT; A (3, 2) = AT; A (5, 1) = AT
  CALL APOST (AT, 0, 1, 1, 0, Y, N)

```

```

A (1, 6)=AT; A (3, 4)=AT; A (4, 3)=AT; A (6, 1)=AT
CALL APQST (AT, 1, 0, 1, 0, Y, N)
A (1, 7)=AT; A (2, 4)=AT; A (4, 2)=AT; A (7, 1)=AT
CALL APQST (AT, 1, 1, 1, 0, Y, N)
A (1, 8)=AT; A (2, 5)=AT; A (3, 7)=AT; A (4, 5)=AT
A (5, 4)=AT; A (6, 2)=AT; A (7, 3)=AT; A (8, 1)=AT
CALL APQST (AT, 2, 0, 0, 0, Y, N)
A (2, 2)=AT
CALL APQST (AT, 2, 1, 0, 0, Y, N)
A (2, 5)=AT; A (5, 2)=AT
CALL APQST (AT, 2, 0, 1, 0, Y, N)
A (2, 7)=AT; A (7, 2)=AT
CALL APQST (AT, 2, 1, 1, 0, Y, N)
A (2, 8)=AT; A (5, 7)=AT; A (7, 5)=AT; A (8, 2)=AT
CALL APQST (AT, 0, 2, 0, 0, Y, N)
A (3, 3)=AT
CALL APQST (AT, 1, 2, 0, 0, Y, N)
A (3, 5)=AT; A (5, 3)=AT
CALL APQST (AT, 0, 2, 1, 0, Y, N)
A (3, 6)=AT; A (6, 3)=AT
CALL APQST (AT, 1, 2, 1, 0, Y, N)
A (3, 8)=AT; A (5, 6)=AT; A (6, 5)=AT; A (8, 3)=AT
CALL APQST (AT, 0, 0, 2, 0, Y, N)
A (4, 4)=AT
CALL APQST (AT, 0, 1, 2, 0, Y, N)
A (4, 6)=AT; A (6, 4)=AT
CALL APQST (AT, 1, 0, 2, 0, Y, N)
A (4, 7)=AT; A (7, 4)=AT
CALL APQST (AT, 1, 1, 2, 0, Y, N)
A (4, 8)=AT; A (6, 7)=AT; A (7, 6)=AT; A (8, 4)=AT
CALL APQST (AT, 0, 0, 0, 1, Y, N)
B (1)=AT
CALL APQST (AT, 1, 0, 0, 1, Y, N)
B (2)=AT
CALL APQST (AT, 0, 1, 0, 1, Y, N)
B (3)=AT
CALL APQST (AT, 0, 0, 1, 1, Y, N)
B (4)=AT
CALL APQST (AT, 1, 1, 0, 1, Y, N)
B (5)=AT
CALL APQST (AT, 0, 1, 1, 1, Y, N)
B (6)=AT
CALL APQST (AT, 1, 0, 1, 1, Y, N)
B (7)=AT
CALL APQST (AT, 1, 1, 1, 1, Y, N)
B (8)=AT
4
NN=8
CALL DECOMPOSE (NN, A, U);
CALL SOLVE (NN, U, B, X)
5
DO 6: = 1, N
Y1=Y (J)
Y2=Y (J + 1)
Y3=Y (J + 2)

```

```

6   GXT(J, JK)=X(1)+X(2)*Y1+X(3)*Y2+X(4)*Y3
   +X(5)*Y1+Y2+X(6)*Y2+Y3+X(7)*Y1+Y3+X(8)*Y1+Y2-Y3
   DO 7, I=1, MN
7   YX(J1, JK)=Y(J1)
5   CONTINUE
20  FORMAT(12A3)
21  FORMAT(20I2)
22  FORMAT(I2, A3, I2, ' - ЧАС', 3F8.1, 5X, 'Д. Н.', F6.1, 3X, 'П. Н.', F6.1)
30  FORMAT(//)
с   6
   READ 21, LA; READ 20, LB
   DO 23, J=1, N
   WRITE 30
   DO 23, IQ=1, JN
   JP=JQ
23  WRITE 22, LA(J), LB(J), JR, YX(J, JQ), YX(J-1, JQ),
   +YX(J+2, JQ), YX(J+3, JQ), GXT(J, JQ)
   STOP; END

```

Требуемые функции и подпрограммы

1. Подпрограмма APQST

Назначение. Нахождение коэффициентов системы нормальных уравнений.

Обращение

CALL APQST (AR, IP, IQ, IS, IT, X, NI)

Описание параметров

X — массив нагрузок;

IP, IQ, IS, IT — показатели степеней при нахождении коэффициентов системы нормальных уравнений, принимающие значения 0, 1, 2.

NI — MN — 3.

2. Подпрограмма SOLVE (библиотечная подпрограмма)

Обращение

CALL DECOMPOSE (NN, A, U)

CALL SOLVE (NN, UL, B, X)

NN — порядок системы.

X — массив неизвестных.

Метод:

Прогнозирование проводится последовательно для каждого часа.

Перевод комментариев в текст

1. Начало программы.
2. Ввод данных.
3. Расчет коэффициентов.
4. Решение системы.
5. Определение прогнозируемых величин.
6. Ввод информации для печати и печать.

ՅՈՒ. Գ. ԳՐԻԳՈՐՅԱՆ, Գ. Վ. ԿԼԱՊԱՐՅԱՆ, Ա. Ն. ԳՅԱԿՈՎ

**ԷՆԵՐԳԱՀԱՄԱԿԱՐԳՆԵՐԻ ԲԵՌՆՎԱԾՔՆԵՐԻ ՕՐԱԿԱՆ ԳՐԱՆԻՍՆԵՐԻ
ՆԱՆԱԳՈՒՇԱԿՈՒՄԸ ԿԱՆԽԱԳՈՒՇԱԿՄԱՆ ՕՊԵՐԱՏՈՐԻ
ԿԻՐԱՌՄԱՆ ՀԻՄԱՆ ՎՐԱ**

Ա մ փ ո փ ու ս

Հողվածում կիրառվում է էներգահամակարգերի բեռնվածքների օրական գրաֆիկների կանխագուշակման ալգորիթմներից մեկը: Այդ ալգորիթմի օգտագործումը հիմնավորված է նրանով, որ շաբաթվա նույնատեսն օրերին և ժամերին էներգահամակարգերի բեռնվածքները փոփոխվում են բնդհանուր օրինաչափությամբ (իրենցից ներկայացնում են արժեքների ստացիոնար հաջորդականություն) և Կախված շաբաթվա օրից և ժամից արվում է բեռերի հաջորդականությունը:

Ունենալով նախորդ օրերի բեռնվածքների արժեքները, հողվածում շաբաղրված ալգորիթմը նետրավորություն է տալիս նախագուշակել անմիջապես հաջորդ օրվա բեռնվածքները:

Տվյալ ալգորիթմով կազմված են ծրագրեր «Նախի-2» և «Ուրալ-14» և ԼՂՏ համար («Ճորտրան-1» լեզվով):

Ստավրապոլի ՇէՎ համար կատարված հաշվարկների արդյունքները ցույց տվեցին, որ առավել ճշգրիտ նախագուշակվում են օրվա մաքսիմալ բեռնվածքները (սխալի կարգը 1%), իսկ բնդհանրապես, օրվա բնթացրում սխալի կարգը ստացվել է մինչև 5%: Հաշվի առնելով ևղանակի պայմանները և էներգահամակարգի բեռնվածքների տարեկան ածի զործակիցը, կարելի է լավացնել նախագուշակման ճշտությունը:

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. Новахненко А. Г., Ланс В. Г. Прееказание случайных процессов. «Наукова думка», Киев, 1971.
2. Фармер Э. Д. Метод предсказания нестационарных процессов и его применение к задаче оценки нагрузки. Тр. II междунар. конгресса ИФАК, М., 1963.