

УДК 621.31

А.В. Егоров¹, e-mail: avyegorov@yandex.ru; М.С. Ершов¹, e-mail: msershov@yandex.ru;Н.В. Симицына¹, e-mail: natallivm@rambler.ru¹ РГУ нефти и газа имени И.М. Губкина (Москва, Россия).

Определение вероятностных характеристик электрических нагрузок на основе нормативных коэффициентов и ограничений технологических режимов потребителя

Электрическая нагрузка промышленного объекта представляет собой случайный процесс, на участке стационарности которого ее можно рассматривать как случайную величину. Такое представление об электрической нагрузке достаточно распространено и используется в ряде методов расчета нагрузки. Исчерпывающую информацию о случайной величине дает ее закон, вид которого, как правило, задается априорно либо устанавливается на основе анализа большого объема экспериментального материала. В то же время в отраслях промышленности накоплен значительный объем информации о традиционных параметрах электрических нагрузок, представленных расчетными коэффициентами графиков нагрузки, такими как коэффициенты загрузки, формы, использования, спроса, максимума. Обычно данные коэффициенты используются для определения расчетных средних и среднеквадратических нагрузок. Предлагается расширить возможности применения этих коэффициентов, используя их для определения параметров закона распределения (плотности распределения), которые являются исчерпывающими характеристиками случайной величины.

После установления оценочной плотности распределения электрических нагрузок для отдельных потребителей решается задача получения плотности распределения нагрузки для объекта в целом. Эта задача решается с учетом различия коэффициентов включения потребителей, а также технологических ограничений на работу отдельных потребителей. Предложенные алгоритмы реализованы в виде пакета прикладных программ и продемонстрированы на примере расчета плотности распределения активной мощности установки получения серы газоперерабатывающего завода. Использование разработанной модели и ее программного обеспечения позволяет с большей обоснованностью оценивать нагрузки на стадии проектирования и с большей выгодой для предприятия регулировать договорные отношения с энергоснабжающей организацией на стадии эксплуатации производственного объекта.

Ключевые слова: энергетика, электрические нагрузки, определение характеристик.

А.В. Егоров¹, e-mail: avyegorov@yandex.ru; М.С. Ершов¹, e-mail: msershov@yandex.ru;Н.В. Симицына¹, e-mail: natallivm@rambler.ru¹ Gubkin Russian State University of Oil and Gas (Moscow, Russia).

Determination of probabilistic characteristics of electrical loads based on standard factors and limitations of technological user modes

Electrical load of industrial facility is a random process, which is stationary at the site can also be viewed as a random variable. This idea of the electrical load is quite common and is used in a number of methods for calculating the load. Comprehensive information about the random variable gives it a law, whose form is usually given a priori or set based on the analysis of a large amount of experimental material. At the same time in the industry has accumulated a significant amount of information about the traditional parameters of electrical loads represented by the estimated coefficient of load curves, such as load factors, form, use, demand, maximum. Typically, these ratios are used to determine the estimated average and RMS loads. It is proposed to extend the applicability of these factors, using them to determine the parameters of the law of distribution (density distribution), which are intended to be exhaustive characteristics of random variables.

After the establishment of the estimated density distribution of electrical loads for individual consumers solve the problem of obtaining the density distribution of the load for the entire facility. This problem is solved taking into account the difference in the coefficients enable consumers as well as technological limitations on the performance of individual consumers. The proposed algorithms are implemented as a software package and is demonstrated by calculating the density distribution of active power the sulfur gas processing plant. Using the developed model and its software allows greater validity to evaluate the load at the design stage and more profitably for the company to adjust the contractual relationship with the energy supply company at the stage of operation of production facilities.

Keywords: energy sector, electrical loads, determination of characteristics.

Анализ графиков нагрузок и периодogramм промышленных объектов нефтяной и газовой промышленности показывает, что для их описания и использования при определении нагрузок на стадии проектирования во многих случаях оправданно применение параметрической модели авторегрессии – проинтегрированного скользящего среднего [1]. Эта модель является общей, описывающей как стационарные, так и нестационарные временные ряды. Однако серьезным недостатком модели является отсутствие связи с технологией процесса и реальным состоянием объекта. В то же время именно технологический процесс определяет необходимость работы того или иного электроприемника, необходимость или, наоборот, невозможность совместной работы отдельных электроприемников или их групп, наконец, в целом реальное электропотребление объекта. Оценка влияния технологического процесса на электропотребление связана с необходимостью обработки значительных объемов информации, однако современные средства вычислительной техники позволяют решать эту проблему. Электрическая нагрузка объекта складывается из двух составляющих – детерминированной и случайной. При этом детерминированная составляющая определяется технологическим процессом, а случайная – влиянием ряда факторов, стохастических по своей природе, таких как метеоусловия, человеческий фактор и др. В то же время реальное состояние самого технологического процесса также слу-

чайно, ибо определяется влиянием набора факторов, сколько-нибудь строгий учет и контроль которых труден. Так, случайным образом изменяется состав сырья, время выхода в ремонт того или иного технологического оборудования и т.д. Однако при этом ряд параметров остается детерминированным. В данном случае в качестве детерминированных можно рассматривать ограничения, накладываемые на работу электроприемников технологическим процессом. По технологической схеме невозможна раздельная работа основных и подпорных насосов головной перекачивающей станции магистрального нефтепровода. Функционирование привода ротора буровой установки никогда не происходит без одновременной работы буровых насосов, в том числе и при неподвижном роторе. Совместная работа приводов лебедки и цементировочных насосов буровой установки невозможна ни при каких обстоятельствах.

По существу, электрическая нагрузка некоторого объекта представляет собой случайный процесс того или иного рода. Предполагается, что данный случайный процесс стационарен, квазистационарен или кусочно-стационарен. В таком случае на участке стационарности электрическую нагрузку можно представить как случайную величину. Такое представление об электрической нагрузке достаточно общепринято в исследовательских работах и используется в ряде методов расчета нагрузки, например в методе упорядоченных диаграмм [2]. Исчерпывающую информацию о случайной величине дает ее закон или

плотность распределения. Проблема, однако, заключается в том, что вид закона распределения, как правило, задается априорно либо устанавливается на основе анализа достаточно большого объема экспериментального материала. В то же время в отраслях промышленности накоплен значительный объем информации о традиционных параметрах электрических нагрузок, представленных в основном расчетными коэффициентами графиков нагрузки, такими как коэффициенты загрузки, формы, использования, спроса, максимума. Обычно данные коэффициенты используются для определения расчетных средних и среднеквадратических нагрузок. Предлагается расширить возможности применения этих коэффициентов, используя их для определения параметров закона распределения (плотности распределения), которые являются исчерпывающими характеристиками случайной величины. Оценка вида распределения электрической нагрузки для отдельного электроприемника предлагается искать в классе непрерывных классических одно- и двухпараметрических распределений. К данному классу относятся равномерное, нормальное, логарифмически нормальное и гамма-распределения. Известен и достаточно широко распространен параметрический способ оценки вида закона распределения, основанный на применении диаграмм Пирсона. Однако он требует знания высших (третьего и четвертого) моментов распределения, что обуславливает его неприемлемость для рассматриваемой задачи.

Ссылка для цитирования (for references):

Егоров А.В., Ершов М.С., Синицына Н.В. Определение вероятностных характеристик электрических нагрузок на основе нормативных коэффициентов и ограничений технологических режимов потребителя // Территория «НЕФТЕГАЗ». 2015. № 11. С. 154–158.

Egorov A.V., Ershov M.S., Sinitsyna N.V. Determination of probabilistic characteristics of electrical loads based on standard factors and limitations of technological user modes (In Russ.). *Territorija «NEFTEGAZ» = Oil and Gas Territory*, 2015, No. 11. P. 154–158.

Таблица. Состояние электроприемников воздухоудвки
Table. Blower electrical receivers' condition

Номер состояния Status number	Воздуходувка 1 Blower 1	Воздуходувка 1 Blower 1	Воздуходувка 1 Blower 1	Вероятность работы Work probability
1	0	0	0	0,01
2	1	0	0	0,01
3	1	1	0	0,32
4	0	1	1	0,32
5	1	0	1	0,32
6	0	0	1	0,01
7	0	1	0	0,01

В такой ситуации целесообразно создавать модели, построенные на основе технологических параметров и условий работы того или иного объекта. Таким образом, каждая технологическая установка, линия или производство в целом будут иметь свои собственные статистические модели электропотребления, в которых описываются индивидуальные особенности технологии и режимы работы объекта. Задавая имеющуюся информацию о характере нагрузки объекта и вид распределения, мы получаем в результате расчета плотность распределения мощности. Это позволяет достаточно обоснованно оценивать нагрузку на стадии проектирования, а также делать прогноз величины мощности в часы максимальной электрической нагрузки предприятия, заказывать объемы электрической энергии, наиболее приближенные к величине реального потребления и таким образом оптимизировать взаиморасчеты между потребителем и энергосистемой на стадии эксплуатации производственного объекта – потребителя электрической энергии.

Построение математической модели случайного процесса изменения нагрузки и определение его вероятностных характеристик требует классификации случайных процессов. В математической литературе их различают по виду вероятностного распределения ординат и зависимости характеристик процессов от времени.

Классификация случайных процессов основана на видах зависимости их вероятностных характеристик от времени. Различают стационарные и нестационарные случайные процессы.

Вероятностные характеристики по ансамблю реализаций нестационарного случайного процесса зависят от времени, а стационарного – не зависят. Из стационарных выделяют важный класс эргодических случайных процессов, у которых вероятностные характеристики, определяемые по ансамблю и по одной реализации, совпадают. Это объясняется тем, что одна достаточно продолжительная реализация содержит информацию о статических свойствах всего случайного процесса.

На стадии проектирования обычно известна номинальная мощность потребителя P_n и коэффициенты загрузки K_3 , максимума K_m и формы K_ϕ . По этим данным определяются следующие параметры неизвестной плотности распределения:

- математическое ожидание $M_p = P_n \cdot K_3$; (1)

- дисперсия $D_p = P_n \cdot K_3 \cdot (K_\phi - 1)$; (2)

- 95%-я квантиль $P_{0,95} = P_n \cdot K_3 \cdot K_m$. (3)

(Квантиль – значение случайной величины, которое не превышает с вероятностью 0,95.)

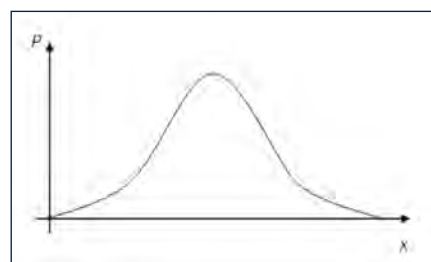


Рис. Плотность распределения электрической нагрузки объекта

Fig. Site electrical load distribution density

Вводится некоторое пространство параметров распределения активной мощности. Это пространство трехмерно и имеет координатами среднюю K_{cp} и среднеквадратичную $K_{ск}$ мощность, а также мощность $K_{0,95}$ соответствующую 95%-й квантили распределения. Любое классическое распределение однозначно задает в этом пространстве некоторую область порядка не выше двух. Эти области для j -го распределения заданы параметрически:

$$\begin{aligned} P_{cp} &= f_1^j(a_1, a_2); P_{ск} = f_2^j(a_1, a_2); \\ P_{0,95} &= f_3^j(a_1, a_2), \end{aligned} \quad (4)$$

где a_1, a_2 – параметры распределения. Расчетные коэффициенты графика нагрузки задают в данном пространстве точку с координатами x_1, x_2, x_3 . Расстояние от этой точки до i -й области определится следующим образом:

$$L^j = \sqrt{(\sum_{i=1}^3 [x_i - f_i^j(a_1, a_2)]^2)} \quad (5)$$

Реализация критерия

$$L^j(a_1, a_2) \xrightarrow{a_1, a_2} \min \quad (6)$$

позволяет найти наиболее достоверную оценку параметров закона распределения при его заданном виде. Данный критерий сводится к системе нелинейных уравнений

$$\sum_{i=1}^3 \frac{df_i^j(a_1, a_2)}{da_k} f_i^j(a_1, a_2) = 0; k=1,2, \quad (7)$$

которая решается численно методом градиентного спуска с переменным шагом. Последующая реализация критерия осуществляется перебором. Последовательная реализация приве-

денных критериев позволяет получить наиболее адекватную оценку вида и параметров закона распределения активной мощности.

После установления оценочной плотности распределения электрических нагрузок для отдельных потребителей может быть поставлена задача получения плотности распределения активной мощности для объекта в целом. Эта задача решается с учетом различия коэффициентов включения потребителей, а также технологических ограничений на работу отдельных потребителей.

Пусть задана некоторая система потребителей электрической энергии. Число потребителей известно и равно K . Для каждого потребителя известна плотность распределения электрической нагрузки и индивидуальный коэффициент включения k_{ij} , который будем трактовать как вероятность работы i -го потребителя в некоторый произвольный момент времени. Между отдельными потребителями существуют связи, запрещающие их совместную работу. Система запрещающих связей формализуется

посредством матрицы запрещающих связей $[S]$, элемент которой s_{ij} равен 1, если совместная работа потребителей i и j запрещена, и нулю – в противном случае. Можно достаточно легко показать, что любой иной вид связи сводится к данному.

Вся система потребителей разбивается на группы по признаку наличия связей между потребителями внутри группы и их отсутствия вне ее. Таким образом, полученные группы между собой не связаны. Для группы составляется матрица включений $[B]$. Элемент матрицы $b_{ij} = 1$, если j -й потребитель включен в варианте l . Строку матрицы $[B]$ назовем вариантом включения. Если какой-либо вариант включения предполагает совместную работу потребителей, имеющих запрещающую связь, то его коэффициент включения (вероятность реализаций) будет равен нулю. Для любого разрешенного варианта включения l группы m , кроме первого, в котором все потребители отключены, коэффициент включения будет определяться как

$$k_{\{l\}}^{(m)} = 1 - \sum_{i=2}^{r_m} k_{\{i\}}^{(m)}, \quad (8)$$

где r_m – число потребителей в m -й группе.

Все варианты, содержащиеся в матрице включений, как реализуемые физически, так и не реализуемые вследствие наличия запрещающих связей, составляют полную группу событий. Тогда

$$k_{\{l\}}^{(m)} = \prod_{b_{ij}=k}^{i,j=k} k_{ij} \cdot \prod_{b_{ij}=0}^{i,j=k} (1 - k_{ij}); \quad (9)$$

$$i, j = 1; i \neq j; i, j \in m; S_{ij} \neq 1; b_{ij} = 1.$$

Плотность распределения активной мощности для варианта включения может быть найдена как свертка плотностей распределений включенных в нем потребителей, так как потребители независимы и имеют внутри варианта общий коэффициент включения. Варианты реализуются только по отдельности, и, следовательно, плотность распределения для группы в целом

$$\psi_m = \sum_{l=1}^{r_m} k_{\{l\}}^{(m)} \cdot \psi_{\{l\}}^{(m)}. \quad (10)$$

ВНИМАНИЕ!

Открыта подписка на журналы «ТЕРРИТОРИЯ «НЕФТЕГАЗ» и «КОРРОЗИЯ «ТЕРРИТОРИИ «НЕФТЕГАЗ»!

Журналы можно получать в России и в любой стране мира.

Подписка оформляется с любого месяца!

ОФОРМИТЬ ПОДПИСКУ ВЫ МОЖЕТЕ:

- в редакции – по адресу 142784, г. Москва, Киевское ш., БП «Румянцево», корп. Б, под. 5, эт. 5, оф. 505Б, издательство «Камелот Паблишинг», редакция журнала «Территория «НЕФТЕГАЗ», Тел./факс: +7 (495) 240-54-57, e-mail: info@neftegas.info
- по каталогу Роспечати – подписной индекс 36129

СТОИМОСТЬ ПОДПИСКИ

по России:

(в электронной или печатной версии на выбор)

для стран СНГ:

(в печатной версии)

1 номер любого журнала	1800 руб.	2200 руб.
6 номеров ТНГ	10800 руб.	13200 руб.
12 номеров ТНГ	21600 руб.	26400 руб.
15 номеров ТНГ+КТНГ	27000 руб.	33000 руб.



Группы по условию их выделения между собой не связаны. Следовательно, их электрические нагрузки – независимые случайные величины, чьи плотности распределения могут быть свернуты для получения плотности распределения активной мощности для объекта в целом.

Таким образом, предлагаемые алгоритмы последовательно реализуют представление об электрической нагрузке как о случайной величине, обладающей некоторым, как правило, априорно неизвестным, законом распределения. В случае кусочной стационарности графика электрической нагрузки объекта электроснабжения участки стационарности реализуются только отдельно друг от друга. Следовательно, после получения плотности распределения для каждого из участков они могут быть также просуммированы. Таким образом, будет получена плотность распределения для объекта в целом и для каждого участка стационарности графика нагрузки, что соответствует тому или иному технологическому режиму.

Предложенные алгоритмы реализованы в виде пакета прикладных программ. Работу пакета проиллюстрируем на примере расчета плотности распределения активной мощности установки получения серы газоперабатывающего завода. При расчете плотности распределения всей установки возникли сложности, связан-

ные с учетом совместимости работы некоторых электроприемников. Исходя из этого, были проведены последовательные свертки, которые позволили свести конечный расчет плотности распределения к логике, которая заложена в данных алгоритмах. Так как такая ситуация может встречаться достаточно часто, рассмотрим ее на примере свертки электроприемников воздухоудовок реакторных печей. Одним из критериев свертки являлась невозможность работы трех электродвигателей воздухоудовки одновременно. По регламенту работы установки возможно семь различных состояний электродвигателей воздухоудовки, два из которых при нормальном режиме постоянно находятся в работе и один – в резерве. В результате получили, что воздухоудовка состоит из семи фиктивных электроприемников, в которых коэффициент включения каждого равен вероятности работы данного электроприемника, что отражено в приведенной ниже таблице.

По итогам расчета плотности распределения группы мнимых объектов получили один объект, параметры которого: $P=P_{ср}$, кВт=4970; $K_{\phi}=1,012$; $K_{з}=0,65$; $K_{н}=1,23$.

В дальнейшем расчете воздухоудовки учитывались как один объект.

По технологии работы установки возможна раздельная работа двух воздухоудовок, газодувки и компрессора для по-

дачи воздуха в печь дожига. Исходя из этого условия, провели свертку данных потребителей с целью представления этих трех объектов как одного.

В результате двух проведенных сверток получили четыре независимых друг от друга объекта электропотребления. Результаты расчета для установки в целом приведены на рисунке. По характеру кривой $P(x)$ можно предположить, что функция распределения близка к нормальной.

Полученная математическая модель позволяет оценивать и прогнозировать с достаточно высокой степенью точности потребление данным объектом электрической энергии, а также характер этого потребления. В данную модель входят как накопленная информация о характере потребления данным объектом электрической энергии, так и результаты вычислений, отраженные численно (для всего объекта в целом и для группы объектов) и графически в плотности распределения по отношению к значениям мощности данного объекта. Использование разработанной модели и ее программного обеспечения позволяет с большей обоснованностью оценивать нагрузки на стадии проектирования и с большей выгодой для предприятия регулировать договорные отношения с энергоснабжающей организацией на стадии эксплуатации производственного объекта.

Литература:

1. Меньшов Б.Г., Доброжанов В.И., Ершов М.С. Теоретические основы управления электропотреблением промышленных предприятий. М.: Нефть и газ, 1995.
2. Справочник по энергоснабжению и электрооборудованию промышленных предприятий и общественных зданий / Под общей ред. профессоров МЭИ(ТУ) С.И. Гамазина, Б.И. Кудрина, С.А. Цырука. М.: Издательский дом МЭИ, 2010.
3. Ершов М.С., Егоров А.В., Сорокотягин Д.П., Ивановский И.В. Вероятностные алгоритмы электрических нагрузок // Промышленная энергетика. 1998. № 2. С. 16–17.
4. Жежеленко И.В., Саенко Ю.Л., Степанов В.П. Методы вероятностного проектирования в расчетах характеристик электрических нагрузок потребителей. М.: Энергоатомиздат, 1990.

References:

1. Menchov B.G., Dobrozhanov V.I., Yershov M.S. Teoreticheskie osnovy upravleniya jelektropotrebleniem promyshlennyh predpriyatij [Theoretical Foundations of energy management industry]. Moscow, Oil and Gas, 1995.
2. Spravochnik po jenergosnabzheniju i jelektrooborudovaniyu promyshlennyh predpriyatij i obshhestvennyh zdaniy [Handbook of energy supply and electrical industries and public buildings]. Ed. by Professors of MEI (TU) Gamazina S.I., Kudrin B.I., Tsyruka S.A. Moscow, MEI Publishing House, 2010.
3. Yershov M.S., Yegorov A.V., Sorokotyagin D.P., Ivanovsky I.V. Veroyatnostnye algoritmy jelektricheskikh nagruzok [Probabilistic algorithms of electrical loads]. Promyshlennaja jenergetika = Industrial Energy, 1998, No. 2. P. 16–17.
4. Zhezhelenko I.V., Saenko U.L., Stepanov V.P. Metody veroyatnostnogo proektirovaniya v raschetah harakteristik jelektricheskikh nagruzok potrebitelej [Methods of probabilistic design into account the characteristics of electrical loads consumers]. Moscow, Energoatomizdat, 1990.



Бюро переводов

- ▶ Система контроля качества
- ▶ Гибкая система скидок
- ▶ Гарантия конфиденциальности
- ▶ Гарантия исполнения заказа
- ▶ Опытный менеджмент
- ▶ Индивидуальный менеджер под проект

+7 (495) 974-46-90

www.a-b-e.ru office@a-b-e.ru

 **ABE**
Translation