

СТАТИСТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ЭКСПЛУАТАЦИОННОЙ НАГРУЗКИ НА ЦЕНТРОБЕЖНЫЙ КОМПРЕССОР

И. В. Юрко, аспирант,

Сумский государственный университет, г. Сумы

В статье приведены результаты статистического анализа работы воздушных центробежных компрессоров на одном из химических предприятий. Показано, что нагрузка на компрессорную станцию может быть описана нормальным законом распределения.

Ключевые слова: *центробежный компрессор, регулирование, статистический анализ, нормальное распределение.*

У статті наведені результати статистичного аналізу роботи повітряних відцентрових компресорів на одному з хімічних підприємств. Показано, що навантаження на компресорну станцію може бути описане нормальним законом розподілу.

Ключові слова: *відцентровий компресор, регулювання, статистичний аналіз, нормальний розподіл.*

ВВЕДЕНИЕ

Общей характерной особенностью компрессоров технологических линий, например, химических и нефтехимических производств, является их сравнительно невысокая неравномерность нагрузки во времени при «плавающем» среднем уровне нагрузки. Плавающий средний уровень нагрузки зависит от ряда внешних условий: качества перерабатываемого сырья, технологического регламента, количества и качества вырабатываемой продукции и др. По сложившейся практике производительность компрессоров выбирается с учетом возможных максимальных нагрузок, т.е. существенно выше средней проектной величины. Для компрессоров нерегулируемых или регулируемых недостаточно эффективно это приводит к существенному снижению энергоэффективности технологической линии, повышению стоимости компримирования единицы объема газа. А поскольку центробежные технологические компрессоры являются стационарными, с потребляемой мощностью в несколько тысяч кВт, то потери в общем энергетическом балансе предприятия весьма значительны.

Все сказанное выше относится к воздушным технологическим компрессорам, используемым в линиях производства окиси титана, гранулированного суперфосфата, фосфорной кислоты и других продуктов на химических предприятиях. Наиболее распространенными здесь являются центробежные компрессорные установки типа К-250 и К-500 различных модификаций. Несмотря на появление на рынке современных центробежных многовальных регулируемых компрессоров, количество находящихся в эксплуатации компрессоров указанного выше типа достигает многих десятков единиц и они будут эксплуатироваться ближайшие 10-15 лет, т.к. их замена требует больших капитальных вложений.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Ниже приведен анализ нагрузки воздушных компрессоров одного из химических предприятий Украины, имеющего две компрессорные станции, оснащенные электроприводными центробежными

компрессорами К-250 и К-500 с номинальными характеристиками, приведенными в табл.1, а паспортные характеристики - на рис. 1, а.

Таблица 1 – Основные технические данные компрессоров

Тип компрессора	К-250	К-500
Производительность, $\text{м}^3/\text{мин}$	145-255	300-525
Конечное абсолютное давление, $\text{кгс}/\text{см}^2$	9	9
Мощность электродвигателя, кВт	1600	3150
Потребляемая мощность, кВт	1000-1445	2400-3000

На рис. 1, б построены зависимости удельной потребляемой мощности N/V как меры стоимости сжатого воздуха.

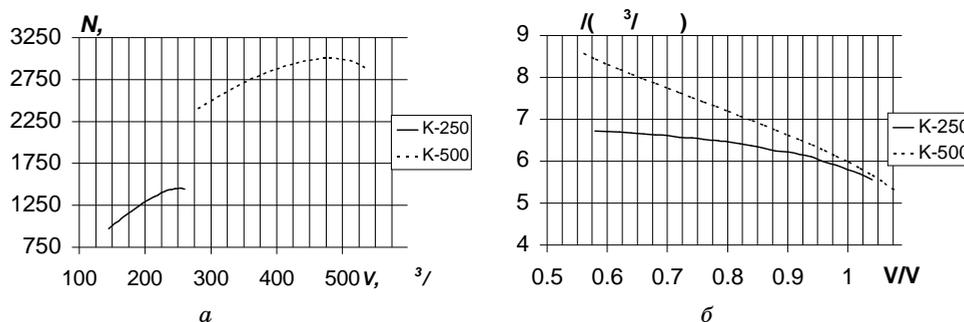


Рисунок 1 – Затраты мощности (а) и изменение удельной потребляемой мощности (б) на выработку сжатого воздуха для центробежных компрессоров К-250 и К-500

Потребителями сжатого воздуха являются свыше 30 основных и вспомогательных цехов, среди которых наиболее крупным потребителем является цех производства диоксида титана. Здесь сжатый воздух используется для систем пневмотранспорта молотого ильменита, для его разложения серной кислотой, для прокаливания, помола продукта, сушки и упаковки готовой продукции. На разных стадиях технологического процесса воздух используется в разных количествах и с разной периодичностью. Поэтому, несмотря на непрерывность технологического процесса, потребление сжатого воздуха, а следовательно и нагрузка на компрессорную станцию, весьма неравномерны во времени (рис. 2).

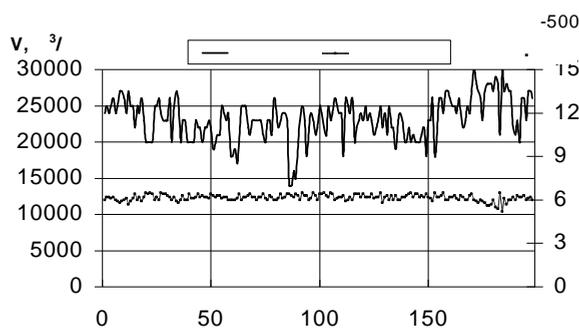


Рисунок 2 – График нагрузки на компрессорную станцию с компрессором К-500

При обработке диаграмм самописца или записей в вахтенном журнале за действительную производительность принимается среднее значение $V_{cp} = (V_{max} + V_{min}) / 2$, при этом в качестве V_{max} и V_{min} принимаются «сглаженные» (без значительных пиков) значения, что вносит субъективную ошибку. Из графиков следует, что нерегулярная неравномерность нагрузки имеет двоякое проявление: средняя неравномерность нагрузки $a = (V_{max} - V_{min}) / 2V_{cp}$ равная 10% и флуктуационная, равная 20% и более. Применение только детерминированной оценки, которой является величина V_{cp} для анализа работы системы, является некорректным.

Важной характеристикой является коэффициент загрузки компрессорной станции $K_{загр} = V_{cp} / V_{ном}$, где $V_{ном}$ – номинальная производительность компрессорной станции. Этот коэффициент характеризует степень отклонения рабочей точки от номинального режима. Зная изменение коэффициента загрузки $K_{загр}$ во времени и используя кривые рис. 1, б, можно с достаточной степенью точности определить удельную потребляемую мощность в любой момент времени, а интегрируя по времени, определить суммарное потребление энергии за интересующий период. Однако в аспекте длительной (например годовой) эксплуатации компрессоров неизбежно становится вопрос об определении средневзвешенной нагрузки на компрессорную станцию. Такую нагрузку можно определить как максимально длительную, имея в виду ее значение на режимах с суммарной максимальной длительностью.

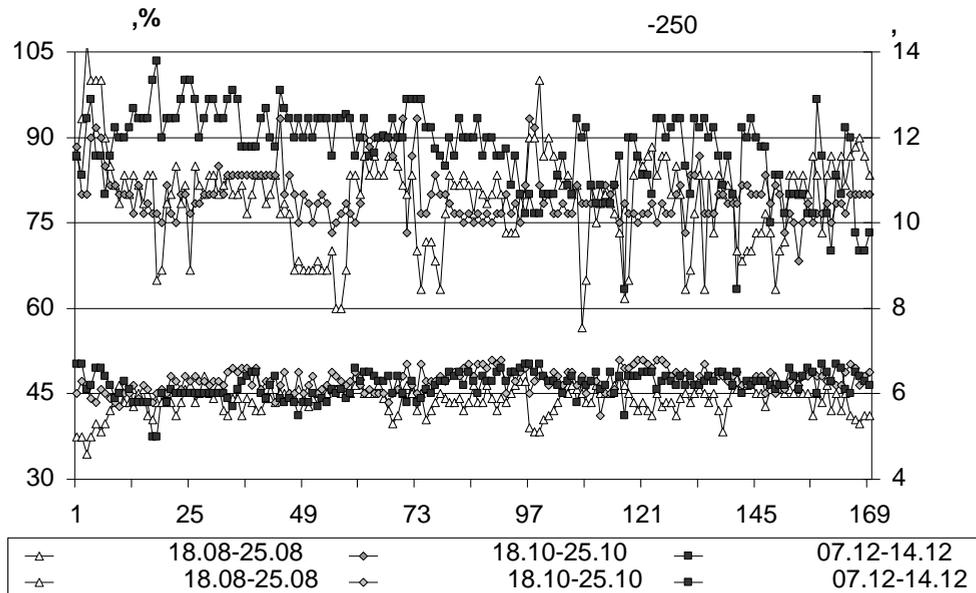


Рисунок 3 – График загрузки компрессорной станции с компрессором К-250 за определенные промежутки времени

На рис. 3 нанесены результаты измерения производительности компрессорной станции за типичные недельные промежутки в летний, осенний и зимний периоды одного года. В силу разных причин эти реализации отличаются друг от друга. В таких условиях задача определения максимально длительной нагрузки приобретает вероятностный характер.

Определение максимально-длительной нагрузки на компрессорную станцию крайне важно, т.к. она:

- характеризует степень энергетической эффективности использования компрессоров;
- служит критерием для принятия решения о перенастройке компрессоров на данный режим;
- определяет закон регулирования в случае оснащения компрессоров системой регулирования;
- служит надежным параметром для выполнения расчетов стоимости сжатого воздуха.

График потребления сжатого воздуха представляет собой случайный, протекающий во времени процесс, формирующийся в результате совместного действия ряда случайных факторов: загрузка предприятия заказами, наличие сырья для производства продукции, режим работы предприятия, погодные, климатические условия и др. Согласно центральной предельной теореме сумма достаточно большого количества слабозависимых случайных величин, имеющих примерно одинаковые масштабы (все величины имеют конечные математические ожидания и дисперсии; ни одно из слагаемых не доминирует, не вносит в сумму определяющего вклада), имеет распределение, близкое к нормальному [1]. Статистический метод дает возможность охарактеризовать суммарное воздействие всех перечисленных факторов и их изменчивости двумя интегральными показателями: математическим ожиданием и дисперсией.

При большом количестве опытов (значений) математическое ожидание можно заменить среднеарифметической оценкой наблюдаемых значений:

$$M[x] = \bar{x} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i .$$

Здесь в качестве x_i рассматриваются конкретные значения (нагрузки), полученные в результате N измерений. Стандартное отклонение можно заменить оценкой среднеквадратического отклонения:

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2} .$$

Для обоснования применения статистических (вероятностных) оценок необходимо с помощью соответствующих критериев установить, подчиняется ли случайная величина потребления сжатого воздуха нормальному закону распределения, который характеризуется функцией плотности вероятности распределения, имеющей следующий вид:

$$f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \cdot e^{-\frac{(x-\bar{x})^2}{2\sigma^2}} ,$$

где σ – стандартное отклонение, \bar{x} – математическое ожидание.

Был проведен анализ работы компрессорной станции за 2007 год, когда предприятие работало «на полную мощность». Обработаны вахтенные журналы за период с июля по декабрь 2007 года, в которых каждый час машинистами регистрировались основные параметры (показатели) работы компрессоров. Объем выборки составил около 3300 значений производительности и конечного давления для каждого компрессора. Методами статистического анализа была проведена обработка этих значений с целью определения максимально длительного режима для каждого из компрессоров.

Обработка результатов наблюдений выполнялась в следующей последовательности согласно [2]:

- запись показателей компрессора в Excel-файл за исследуемый период;
- определение математического ожидания, дисперсии, среднеквадратического отклонения и др;
- исключение грубых погрешностей (промахов);
- повторный (уточненный) расчет статистических параметров выборки;
- построение гистограммы случайной величины и функции распределения нормального закона;
- проверка гипотезы о нормальном законе распределения по статистическим критериям согласия.

Производительность компрессоров указывалась в м³/час, а затем переводилась в % от номинальной производительности (15000 м³/час для К250 и 30000 м³/час для К500). Номинальная производительность соответствует 100 % загрузке компрессора. Значения производительности в журналах записывались с шагом в 1000 м³/час для К500 и 250 м³/час для К-250, что составляет 3,33 % и 1,67 % от номинальной производительности соответственно.

Для исключения промахов было применено правило 3σ [3], согласно которому случайная величина исключается, если абсолютная величина ее отклонения от математического ожидания превосходит утроенное среднеквадратическое отклонение, т. е. $M[x]-x > 3\sigma$.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Основные статистические характеристики после отбрасывания промахов приведены в табл. 2, а совмещенные графики теоретической и эмпирической частот, а также графики теоретической и эмпирической функции распределения величины представлены на рис. 3 и 4.

Таблица 2 – Основные статистические характеристики компрессоров, %

Тип компрессора	К-250	К-500
Количество измерений	3202	3282
Среднее значение загрузки компрессора, %	81,51	82,23
Медиана, %	81,67	83,33
Мода, %	83,33	83,33
Дисперсия выборки σ^2	110,25	88,42
Стандартное отклонение σ	10,5	9,4
Минимальное значение загрузки компрессора, %	48,33	50
Максимальное значение загрузки компрессора, %	111,67	110
Диапазон изменения загрузки компрессора, %	63,33	60
Асимметричность A	-0,06	-0,32
Эксцесс E	-0,104	0,117

Нормальность распределения проверялась путем сравнения показателей асимметрии A и эксцесса E с критическими значениями по методу М. Е. Пустыльника [4]: $|A| \leq A_{KP}$ и $|E| \leq E_{KP}$, где $A_{KP} = 0,129$ и $E_{KP} = 0,432$. Полученные значения асимметрии и эксцесса для нагрузки К-250 меньше критических значений, значит наблюдаемое распределение можно считать нормальным. Максимально-длительной нагрузкой является математическое ожидание $V_{м.д.} = M[x]$, определяемое доверительным интервалом и вероятностью по правилу «двух сигм»:

$$V_{м.д.} = x \pm 2\sigma, p = 0,95.$$

В этом случае можно считать допустимой упрощенную оценку как среднего значения нагрузки $V_{cp} = (V_{max} + V_{min}) / 2$. Для компрессора К-500 первое условие не выполняется, график экспериментальной и теоретической функции распределения не совпадают (рис. 4) и гипотеза о нормальности распределения ставится под сомнение. Значит, использование средней оценки V_{cp} может привести к значительным ошибкам. Значения производительности обоих компрессоров обладают отрицательной асимметрией. Это означает, что более широкий диапазон значений расположен левее относительно математического ожидания. Это вполне очевидно, так как чаще компрессоры работают в зоне меньших производительностей, т. е. левее от номинального значения производительности.

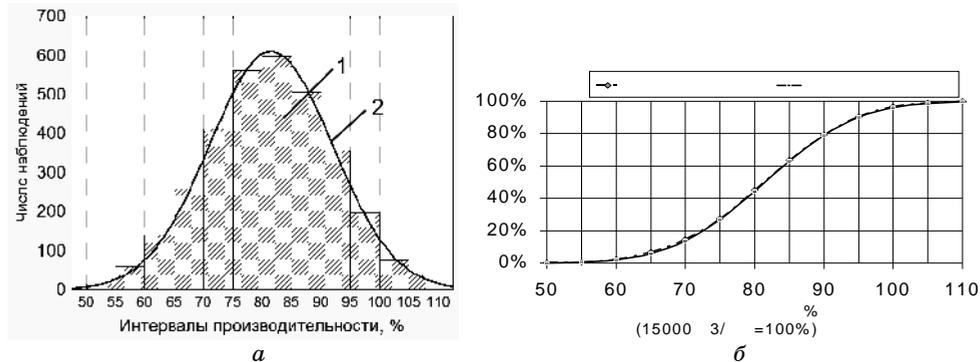


Рисунок 3 – Статистические графики нагрузки компрессора К-250:
 а – гистограмма (1) и плотность вероятности (2); б – функция распределения

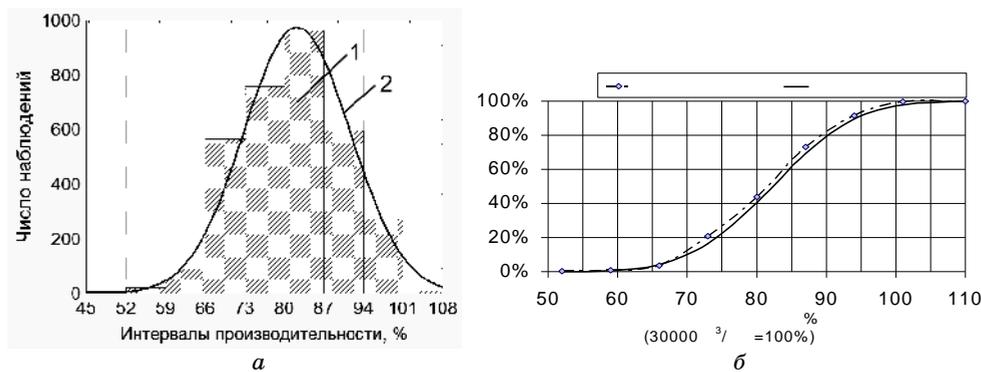


Рисунок 4 – Статистические графики нагрузки компрессора К-500:
 а – гистограмма (1) и плотность вероятности (2); б – функция распределения

В результате проделанного статистического анализа максимально-длительные нагрузки определяются следующим образом:

- для компрессора К-250 ($M[x]=81,51\%$; $\sigma=10,5\%$): $V_{m.d.}=81,51\pm 21\%$ или в натуральном выражении $V_{m.d.}=12250\pm 3150$ м³/час;
- для компрессора К-500 ($M[x]=82,23\%$; $\sigma=9,4\%$): $V_{m.d.}=82,23\pm 19\%$ или в натуральном выражении $V_{m.d.}=24650\pm 5700$ м³/час.

Во втором случае принятие в качестве оценки средней производительности повлечет ошибки в определении основных показателей работы компрессорной станции: понижение коммерческой

производительности и повышение удельной потребляемой мощности и стоимости сжатого воздуха.

В данной статье рассмотрены примеры достаточно равномерной работы компрессоров, что является скорее исключением, чем правилом для реальных воздушных компрессорных станций, для которых указанные выше расходы гораздо более существенны.

ВЫВОДЫ

Предложено применение методов математической статистики для анализа нагрузки на компрессорную станцию.

Показано, что нагрузка на компрессорную станцию может быть как нормально распределенной, так и близкой к нормальному закону распределения с незначительной левосторонней асимметрией.

Показано, что использование средней нагрузки вместо статистической максимально-длительной, может привести к существенным ошибкам при определении коммерческих показателей компрессорной станции.

SUMMARY

THE STATISTICAL ANALYSIS OF THE OPERATING LOAD ON CENTRIFUGAL COMPRESSOR

Yurko, I.V.,

Sumy State University, Sumy, Ukraine

The results of statistical analysis of the work of the air centrifugal compressors at one of the chemical factories are described in the article. It is shown that loading on a compressor station can be described by the normal law of distribution.

Key words: *centrifugal compressor, regulation, the statistical analysis, normal distribution.*

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Севастьянов Б. А. Курс теории вероятностей и математической статистики. – М.: Наука. Главная редакция физико-математической литературы, 1982. – 256 с.
2. Письменный Д. Т. Конспект лекций по теории вероятностей, математической статистике и случайным процессам. – 3-е изд. – М.: Айрис-пресс, 2008. – 288 с.
3. Вентцель Е. С. Теория вероятностей и ее инженерные приложения: учеб. пособие для вузов / Е. С. Вентцель, Л. А. Овчаров. – 2-е изд. – М.: Высшая школа, 2000. – 480 с.
4. Пустыльник Е. И. Статистические методы анализа и обработки наблюдений. – М.: Наука, 1968. – 288 с.

Поступила в редакцию 17 января 2012 г.