

В. Кучеренко, П. Гоголев ОАО «Дальэнергомаш» А. Куликов «ТокСофт»

# ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ЭКСПЛУАТАЦИИ КОМПРЕССОРОВ К-250 И К-500

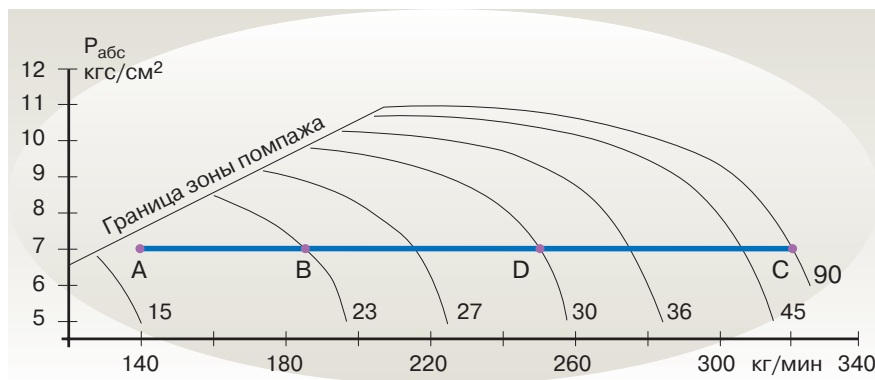


Рис. 1. Типовая газодинамическая характеристика компрессора К-250

На многих крупных предприятиях с большим потреблением сжатого воздуха его производство осуществляется при помощи центробежных компрессоров типа К-250 и К-500 различных модификаций. Эти компрессоры производятся ОАО «Невский завод» и ОАО «Дальэнергомаш» в течение многих лет. Они достаточно просты и надежны, а эффективность их эксплуатации последовательно повышалась за счет неоднократных модернизаций. Доля компрессорных станций в балансе энергопотребления предприятий достигает 20—30%, в эксплуатации находится несколько тысяч компрессоров указанных типов. С учетом этого

представляется целесообразным широкое внедрение некоторых новых технических решений, позволяющих существенно снизить непроизводительные затраты при производстве сжатого воздуха.

Одним из таких решений может стать автоматизированная система управления процессом производства сжатого воздуха, предлагаемая компанией «ТокСофт» и заводом Дальэнергомаш. АСУТП «Воздух» ориентирована на центробежные компрессоры К-500 и К-250 и позволяет получить экономию электроэнергии от 10 до 15% на один агрегат. Внедрение АСУТП «Воздух» включает в себя не только установку современной

автоматики, но и модернизацию механических узлов компрессоров. Установка АСУТП «Воздух» осуществляется по принципу «под ключ» и включает в себя следующий комплекс услуг:

- обследование компрессорной станции, разработка Технико-коммерческого предложения с перечнем предлагаемых мероприятий, стоимостью и указанием возможного экономического эффекта;
- разработка проекта привязки системы;
- поставка оборудования;
- шеф-монтаж оборудования;
- пуско-наладка оборудования и сдача системы в эксплуатацию.

## СЛАГАЕМЫЕ ЭКОНОМИИ

Снижение энергетических затрат при внедрении АСУТП «Воздух» достигается за счет следующих составляющих.

1. Уменьшение нагрузки на компрессор в режиме холостого хода за счет перевода его в глубокое дросселирование; экономия составляет около 60% на один компрессор (для режима холостого хода).

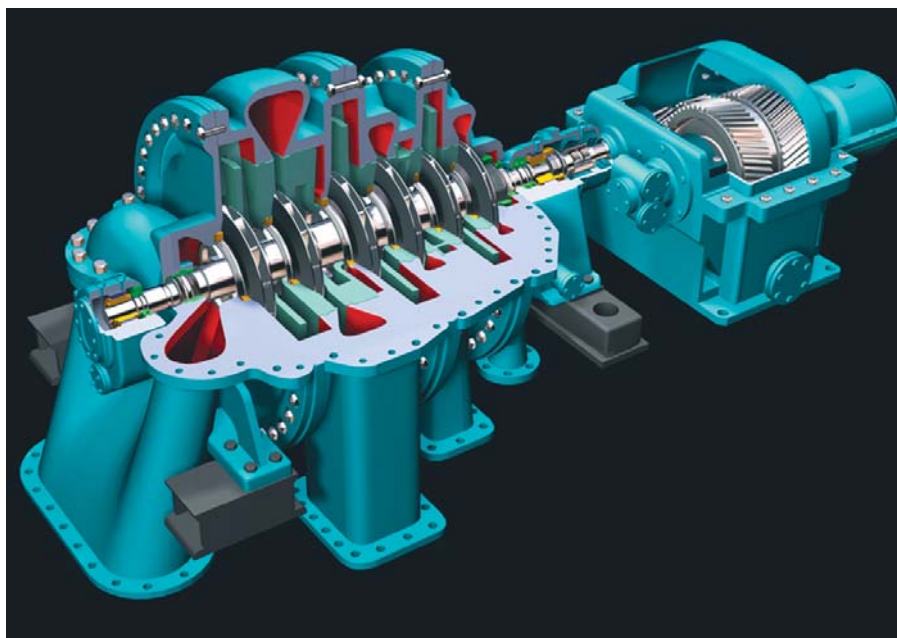


Рис. 2. Компрессор K250-61-5

этом состоянии, когда количество воздуха, перекачиваемого компрессором, минимально, а помпаж еще не наступает, нагрузка на компрессор существенно снижается по сравнению со штатным режимом холостого хода, рекомендуемым заводом-изготовителем.

Как известно, при штатном холостом ходе дроссельная заслонка должна быть открыта на 15 градусов, задвижка нагнетания закрыта, помпажный клапан открыт. В этом состоянии компрессор K-250 потребляет 800 кВт, K-500 — 1600 кВт. В режиме глубокого дросселирования энергопотребление для компрессоров K-250 и K-500 составляет 300 и 650 кВт соответственно.

Глубокое дросселирование также существенно облегчает пуск компрессора, при котором нагрузки на элементы конструкции компрессора максимальны. Несмотря на малую продолжительность (около 30 с), пуск оказывает существенное влияние на ресурс агрегата. Связано это прежде всего с высокими пусковыми

2. Расширение рабочей зоны компрессора за счет снятия ограничения на открытие дроссельной заслонки в рабочем режиме (менее чем 22 градуса) и снижение непроизводительных выбросов воздуха в атмосферу через помпажный клапан; экономия составляет ориентировочно 10% на один компрессор.

3. Увеличение суммарного КПД станции за счет внедрения группового регулирования давления и производительности; экономия составляет около 6% на один компрессор.

4. Прочие составляющие, к которым относятся: снижение потребления охлаждающей воды, выявление резервов за счет анализа протекания процесса, уменьшение потерь от простоев за счет развитых средств диагностики и т. п.; экономия составляет около 2% на один компрессор.

#### Глубокое дросселирование

Режимом глубокого дросселирования называется такое состояние турбокомпрессора, при котором задвижка нагнетания закрыта, помпажный клапан полностью открыт, дроссельная заслонка закрыта. Всос воздуха производится через зазоры дроссельной заслонки. В

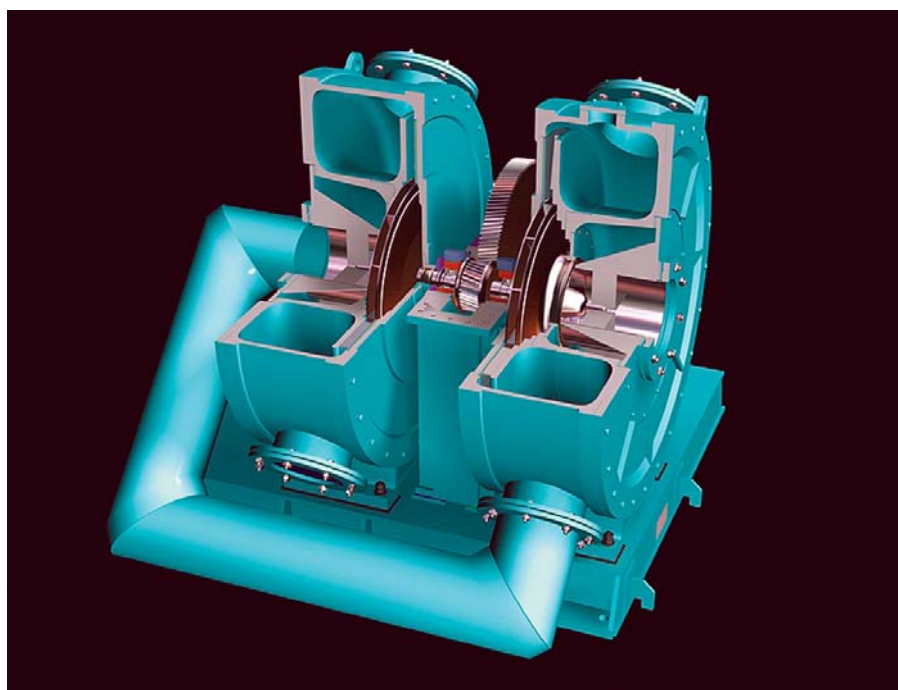


Рис. 3. Нагнетатель ЦНВ100/1,6

Таблица 1. Экономия энергии при использовании АСУТП «Воздух» на предприятии с непрерывным циклом

№ компрессора	Режим работы	Экономия, кВт	Время действия в сутки, ч	Экономия в сутки, кВт ч	Суммарная экономия в год, кВт ч
1	Регулирование (включая групповое)	240	24	5 760	2 102 400
2	Регулирование (включая групповое)	240	24	5 760	2 102 400
3	Регулирование (включая групповое)	240	20	4 800	1 752 200
3	Глубокое дросселирование	530	4	2 120	773 800
4	Регулирование (включая групповое)	240	13	3 120	1 138 800
4	Глубокое дросселирование	530	9	4 770	1 741 050
ИТОГО:					9 610 450

моментами, которые в два раза превышают номинальные, с прохождением компрессора через зону резонансных механических колебаний и прогревом агрегата. Глубокое дросселирование снижает нагрузки на рабочие колеса компрессора, благодаря чему потери ресурса на каждый цикл пуск-остановка уменьшаются с 50 до 15 часов. Внедрение глубокого дросселирования позволяет осуществлять ежедневные пуски и остановки компрессора практически без потерь ресурса.

В режиме глубокого дросселирования не требуется охлаждения воздуха. Подвод воды к воздухоохладителям может быть выключен на то время, пока компрессор

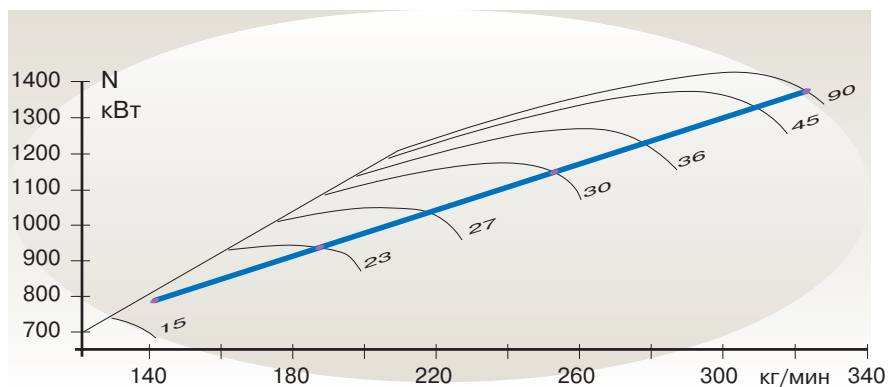


Рис. 4. Зависимость потребляемой мощности от нагрузки для компрессора K-250

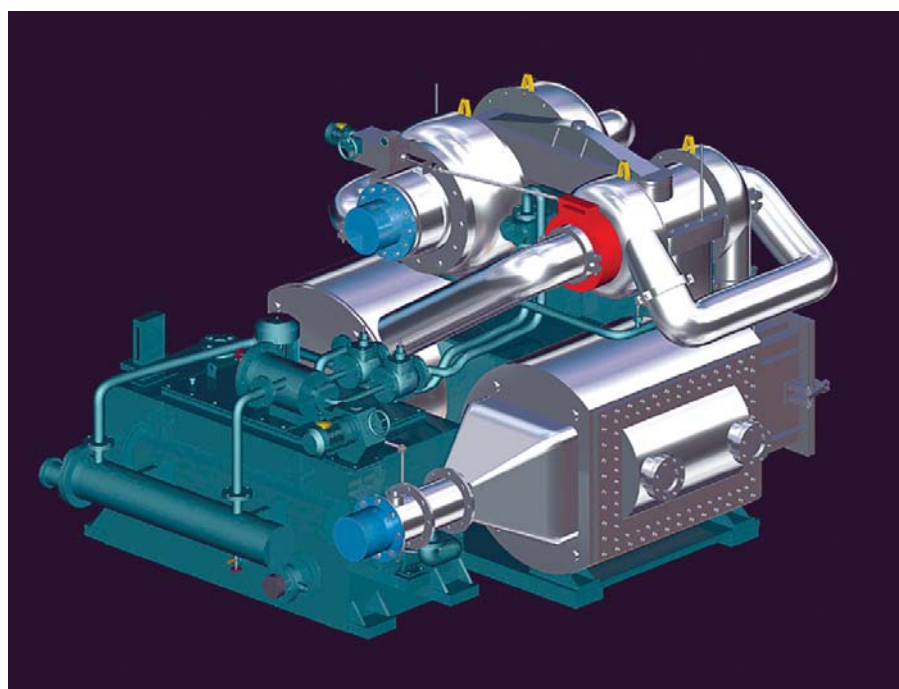


Рис. 5. Турбокомпрессор ТКА 130/9

находится в глубоком дросселировании, что также дает некоторую экономию.

Чтобы добиться минимума энергопотребления при полностью закрытой дроссельной заслонке, при внедрении АСУТП «Воздух» необходимо произвести некоторую модернизацию механических узлов компрессора: минимизировать зазоры дроссельной заслонки, усилить всасывающий патрубок, провести ревизию помпажного клапана. Необходимо также провести общее техническое обследование состояния компрессора на предмет выявления возможных источников потерь энергии за счет изношенности механических деталей. В качестве примера можно привести трубные пучки воздухоохладителей или уплотнения, изношенность которых существенно снижает технические характеристики компрессора, а потери энергии могут существенно превысить эффект, достигнутый от глубокого дросселирования.

Со стороны средств автоматизации для обеспечения глубокого дросселирования необходимы: алгоритм ввода компрессора в режим и вывода из него, надежная помпажная защита, срабатываю-

Таблица 2. Экономия энергии при использовании АСУТП «Воздух» на предприятии с двухсменным режимом работы

№ компрессора	Режим работы	Экономия, кВт	Время действия в сутки, ч	Экономия в сутки, кВт ч	Суммарная экономия в год, кВт ч
1	Регулирование (включая групповое)	240	16	3 840	1 401 600
1	Остановка в нерабочее время (ночные часы, выходные и праздничные дни, в пересчете на сутки)	800	14,58	11 664	4 257 360
2	Регулирование (включая групповое)	240	16	3 840	1 401 600
2	Остановка в нерабочее время (ночные часы, выходные и праздничные дни, в пересчете на сутки)	800	14,58	11 664	4 257 360
ИТОГО:					11 317 920

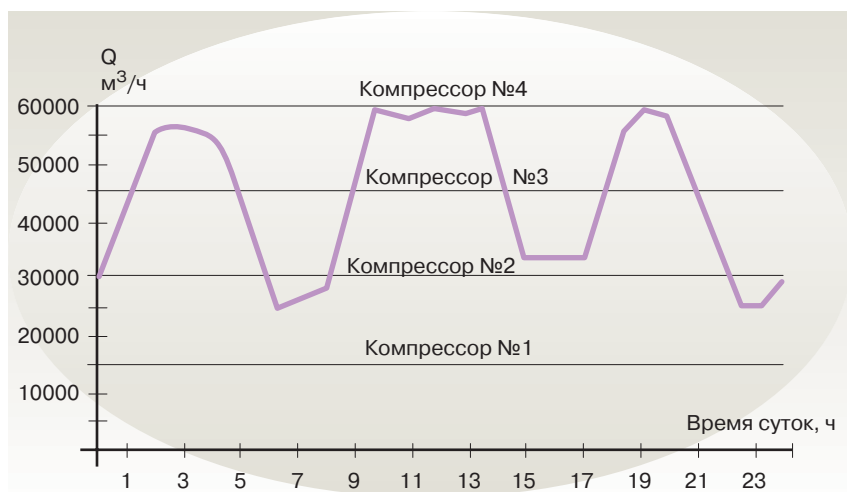


Рис. 6. График среднесуточного потребления сжатого воздуха

щая при появлении характерных колебаний нагрузки на двигатель главного привода, а также быстродействующие электроприводы дроссельной заслонки и помпажного клапана.

### Расширение диапазона регулирования

Согласно инструкции завода-изготовителя, дроссельная заслонка компрессора в рабочем режиме не может быть открыта менее чем на 22 градуса. На некоторых предприятиях минимальный угол устанавливают в 30 и более градусов. Такое ограничение диапазона регулирования в рабочем режиме связано с тем, что точно неизвестно, где находится в данный момент зона помпажа для данного компрессора, а помпажная защита, как правило, работает неудовлетворительно. Чтобы обезопасить машину от попадания в помпаж, особенно при быстро меняющихся колебаниях потребления сжатого воздуха, завод-изготовитель и эксплуатирующий персонал устанавливают ограничение, при котором возникновение помпажа на компрессоре невозможно ни при каких условиях. Если потребление сжатого воздуха падает ниже границы регулирования производительности, избыток воздуха стравливается в атмосферу через помпажный клапан. Сброс лишнего воздуха в атмосферу — это непроизводительные затраты электроэнергии.

Расширив диапазон регулирования производительности компрессора, можно исключить сброс воздуха в атмосферу при малых расходах и уменьшить энергетические потери. Область регулирования компрессора на малых расходах ограничивается границей зоны помпажа. Нельзя прикрывать дроссельную заслонку еще больше, задавая расход воздуха через компрессор (при заданном давлении нагнетания) ниже критического значения, при котором возника-

ет помпаж. Однако положение границы зоны помпажа может существенно меняться в зависимости от состояния атмосферного воздуха (давления, температуры, влажности) и технического состояния компрессора (степень сжатия). Зная текущее положение зоны помпажа и рабочей точки компрессора, можно регулировать производительность компрессора таким образом, чтобы при движении рабочей точки в зону малых расходов максимально приблизить рабочую точку к границе зоны помпажа, не открывая помпажный клапан. Запас по производительности относительно границы зоны помпажа определяет новую нижнюю границу регулирования и выбирается в зависимости от скорости движения рабочей точки в сторону уменьшения расхода. Критический угол открытия дроссельной заслонки при таком регулировании может быть значительно меньше 22 градусов.

На рис. 1 приведена типовая газодинамическая характеристика компрессора K-250. Как правило, компрессоры на компрессорных станциях работают в режиме поддержания постоянного давления при переменном расходе воздуха (в качестве примера взято давление 6 кгс/см<sup>2</sup>). Движение рабочей точки компрессора при прежнем способе регулирования ограничено отрезком ВС. Участок АВ — это дополнительная область движения рабочей точки, которая расширяет диапазон регулирования за счет точного определения положения границы зоны помпажа и поддержания минимального запаса производительности. Как видно из примера, дроссельная заслонка в этом случае может быть прикрыва до угла, близкого к 15 градусам.

На рис. 4 представлена зависимость потребляемой мощности от расхода воздуха через компрессор. Если при прежнем способе регулирования минималь-

ная потребляемая мощность составляла около 950 кВт, то при новом способе она снижается почти до 800 кВт. В среднем это дает дополнительную экономию электроэнергии в размере 10% от номинальной потребляемой мощности. Если на предприятии установлено ограничение на открытие дроссельной заслонки не менее чем 30 градусов (рис. 1, участок DC), рабочая зона при новом способе управления расширяется более чем в два раза, и примерно во столько же раз увеличивается экономия.

Для того чтобы обеспечить расширение рабочей зоны компрессора, необходимо:

- измерять параметры атмосферного воздуха, такие как давление, температура, влажность;

- измерять расход воздуха на всасе и давление воздуха в тракте нагнетания компрессора, определяя таким образом положение рабочей точки компрессора;

- периодически вычислять положение границы зоны помпажа, скорость и направление движения рабочей точки компрессора;

- регулировать производительность компрессора для поддержания заданного давления (или расхода) в пределах расширенной рабочей зоны путем изменения положения дроссельной заслонки; в случае выхода рабочей точки за нижнюю границу рабочей зоны регулирование следует производить за счет изменения положения помпажного клапана;

- иметь надежную помпажную защиту, срабатывающую независимо от основного режима регулирования при появлении характерных колебаний нагрузки на двигатель главного привода;

- иметь быстродействующие электроприводы дроссельной заслонки и помпажного клапана.

Автоматика системы «Воздух» обеспечивает все перечисленные выше функции. Дополнительные датчики и электроприводы устанавливаются при внедрении системы.

### Групповое регулирование

Существует два метода группового регулирования производительности компрессоров, работающих на один коллектор. Первый метод заключается в ступенчатом регулировании производительности, когда один компрессор находится в состоянии регулирования, а остальные либо полностью нагружены, либо полностью разгружены и отключены от магистрали. При втором методе все компрессоры находятся в состоянии регулирования.

Второй метод предпочтителен с точки зрения возможностей экономии энергии. Исследованиями доказано, что в этом случае суммарный КПД группы компрессоров выше, а значит, затраты электроэнергии при том же количестве производимого сжатого воздуха ниже. Групповое регулирование производи-



тельности позволяет достичь экономии от 3 до 6% на один компрессор.

Для того чтобы обеспечить групповое управление производительности, необходимо измерять расход воздуха в коллекторе, на который работает группа компрессоров, и приводить в действие алгоритм группового управления. Алгоритм, реализуемый автоматикой системы «Воздух», рассчитывает уставки производительности для каждого компрессора в группе, исходя из измеренного текущего потребления сжатого воздуха и обеспечивая максимальный групповой КПД. При этом используется существующий датчик расхода воздуха в коллекторе, или он устанавливается при внедрении АСУТП.

#### Прочие составляющие

Снижение нагрузки на компрессор при расширении его рабочей зоны, а особенно в режиме глубокого дросселирования, приводит к снижению расхода охлаждающей воды через воздухоохладители. Это, в свою очередь, приводит к снижению затрат электроэнергии на привод циркуляционных насосов.

Система «Воздух» ведет архив технологических параметров. Технологи имеют в своем распоряжении инструменты для всестороннего анализа накопленных данных. Исследуя графики изменения параметров в течение длительного времени, они имеют возможности делать выводы о техническом состоянии компрессоров и проводить своевременные мероприятия по восстановлению их технических характеристик. Экономия электроэнергии от прочих составляющих оценивается на уровне 2%.

#### ТИПОВОЙ РАСЧЕТ ЭКОНОМИИ

Примерный расчет экономии от внедрения АСУТП «Воздух» приведен для двух типовых случаев. В первом случае рассматривается предприятие с непрерывным производственным циклом, во втором — машиностроительное предприятие.

##### Предприятие с непрерывным циклом

В качестве примера взят один из алюминиевых заводов по производству первичного алюминия. Для предприятия характерны циклические колебания потребления сжатого воздуха в течение суток, при этом минимальное потребление составляет 25000 м<sup>3</sup>/ч, а максимальное — 60000 м<sup>3</sup>/ч (рис. 6). Компрессорная станция предприятия оборудована пятью компрессорами К-250 производства завода Дальэнергомаш, при этом четыре компрессора постоянно находятся в работе, а один — в резерве. Давление в заводской пневмосети поддерживается на уровне 6 кгс/см<sup>2</sup>.

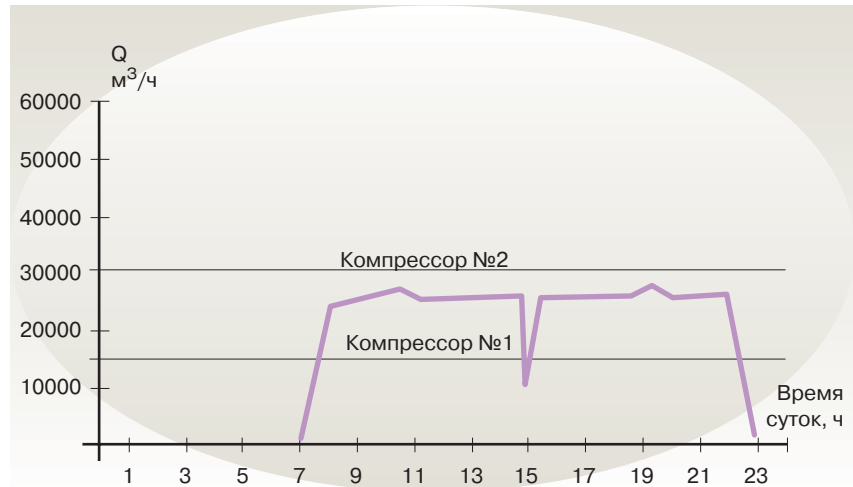


Рис. 7. График среднесуточного потребления сжатого воздуха для машиностроительного предприятия

На рис. 6 представлен график среднесуточного потребления сжатого воздуха для исследуемого предприятия. Рассмотрим его подробнее.

На графике можно выделить три пиковых участка максимальной нагрузки на компрессорную станцию: с 1.00 до 5.00, с 9.00 до 14.30 и с 17.30 до 21.00. В эти часы для производства необходимого объема сжатого воздуха требуются ресурсы всех четырех компрессоров, находящихся в работе. Экономия энергии в эти периоды возможна за счет расширения рабочей зоны компрессоров, за счет группового управления и за счет прочих составляющих.

В периоды времени с 5.00 до 9.00, с 14.30 до 17.30 и с 21.00 до 1.00 нагрузка на компрессорную станцию снижается настолько, что сначала один, а затем два компрессора становятся невостребованными и могут быть выведены в глубокое дросселирование (в нашем случае это компрессоры №3 и №4). Экономия энергии в этом случае возможна за счет режима глубокого дросселирования и за счет прочих составляющих.

Ориентировочный расчет экономии энергии, полученный в результате анализа графика на рис. 6, представлен в таблице 1. Из таблицы следует, что суммарная экономия электроэнергии от внедрения АСУТП «Воздух» для нашего примера составит почти 10 млн кВт·ч в год.

##### Машиностроительное предприятие

Машиностроительное предприятие работает, как правило, в две смены с двумя выходными днями в течение недели. Сжатый воздух используется для привода пневмоинструмента и различных исполнительных механизмов, в окрасочном, прессовом, штамповочном,

кузнечном и других производствах. Потребление сжатого воздуха в течение смены не претерпевает резких изменений и пребывает примерно на одном уровне. В нерабочее время сжатый воздух не потребляется, компрессоры могут быть остановлены.

В качестве примера рассмотрим машиностроительное предприятие, в составе компрессорной станции которого имеются три компрессора К-250 производства завода Дальэнергомаш. Постоянно работают два компрессора, один компрессор находится в резерве. Давление в пневмосети поддерживается на уровне 6 кг/см<sup>2</sup>. График среднесуточного потребления сжатого воздуха представлен на рис. 7.

Как видно из графика, основная экономия может быть получена в нерабочее время (ночные часы, а также выходные и праздничные дни). При существующем положении дел компрессоры в это время не выключаются, а переводятся в режим холостого хода, чтобы избежать излишних нагрузок на элементы конструкции компрессора в режиме пуска. Производитель компрессора допускает пуски и остановки компрессора максимум не чаще одного раза в неделю. Затраты ресурса на цикл пуск-остановка в глубоком дросселировании снижаются настолько, что становится возможным осуществлять ежедневные пуски и остановки компрессора.

Ориентировочный расчет экономии энергии приведен в таблице 2. Как видно из таблицы, основную долю экономии дает возможность остановки компрессоров в нерабочее время. Суммарная годовая экономия электроэнергии от внедрения АСУТП «Воздух» для данного примера составляет более 11 млн кВт·ч.