

МЕТОДЫ ПОВЫШЕНИЯ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ РАБОТЫ КОМПРЕССОРНЫХ УСТАНОВОК

Хошимов У.Х.

доц.

Фозилов А.

магистрант

Ташкентский государственный технический университет имени Ислама Каримова
Ташкент, Алмазарский район, Университетская ул., 2Б.

Hoshimovu83@gmail.com

<https://doi.org/10.5281/zenodo.14532892>

Аннотация. компрессорные установки являются ключевыми элементами многих промышленных процессов, однако их работа сопровождается значительным потреблением энергии, особенно в момент пуска. Высокий пусковой ток не только увеличивает нагрузку на электрические сети, но и способствует преждевременному износу оборудования. В данной статье рассматриваются различные методы снижения пусковых токов компрессорных установок, с целью повышения их энергоэффективности, надежности и продления срока службы. Мы проанализируем как традиционные, так и современные подходы, позволяющие минимизировать негативные последствия, связанные с высокими пусковыми токами.

Ключевые слова: компрессорные установки, частотный преобразователь, сжатого воздуха, станция, асинхронного двигателя.

METHODS OF INCREASING THE ENERGY EFFICIENCY OF COMPRESSOR UNITS

Abstract. compressor units are key elements of many industrial processes, but their operation is accompanied by significant energy consumption, especially at the time of start-up. High inrush current not only increases the load on electrical networks, but also contributes to premature wear of equipment. This article discusses various methods of reducing the starting currents of compressor units in order to increase their energy efficiency, reliability and extend their service life. We will analyze both traditional and modern approaches to minimize the negative consequences associated with high inrush currents.

Keywords: compressor units, frequency converter, compressed air, station, asynchronous motor.

ВВЕДЕНИЕ

Проблема повышения энергоэффективности использования электрической энергии в отраслях промышленности связана с весьма значительным кругом задач, взаимосвязь которых создает сложную систему, которая требует такой координации, которая может обеспечить наиболее эффективный результат в направлении снижения энергозатрат. Сжатый воздух является одним из основных энергоресурсов и применяется как рабочая среда в технологических процессах и как энергоноситель практически на всех предприятиях. Потенциальная энергия сообщается воздуху в процессе его сжатия и используется затем в пневматических приводах для совершения механической работы.

Потенциальная энергия преобразуется в кинетическую энергию струи расширяющегося сжатого воздуха. Подбор оптимальной схемы распределения и рациональных режимов производства и потребления сжатого воздуха ведет к экономии, что не может не оказать значительного влияния на энергобаланс предприятия в целом. Поскольку на производство сжатого воздуха расходуется электроэнергия, его экономия влечет за собой снижение затрат на покупку энергоресурсов. Особенностью выработки сжатого воздуха является то, что производительность компрессорного оборудования зависит от сезонного изменения плотности атмосферного воздуха и давления нагнетания. Увеличение давления с 5,0 до 6,0 кгс/см² влечет снижение производительности компрессора на 4–7 %, а затраты энергии на компремирование при этом возрастают на 7–10 %. Существенным фактором, негативно влияющим на работу компрессорного оборудования, является неритмичное потребление сжатого воздуха, объемы которого доходят на некоторых компрессорных станциях до 40 %. Для обеспечения стабильной работы потребителей, при наличии значительных объемов неритмичного потребления, персонал компрессорных станций вынужден поддерживать повышенное давление сжатого воздуха на источниках[6].

Давление сжатого воздуха в сети воздухопроводов зависит от расхода воздуха и производительности компрессорной установки. Если производительность меньше расхода воздуха, то давление в сети снижается до тех пор, пока производительность не будет равняться расходу воздуха; если же производительность больше расхода воздуха, то в сети воздухопроводов будет расти давление сверх допустимого. Поэтому при избыточной производительности компрессорной станции необходимо регулировать подачу воздуха в сеть с тем, чтобы, изменой производительность компрессора, сохранить в ней постоянное давление[1]. При работе компрессоров в общую сеть следует установить порядок, при котором все компрессоры работают на полную мощность, кроме одного, производительность которого регулятором давления поддерживается в пределах, обеспечивающих нормальное рабочее давление в сети воздухопроводов.

Охлаждение воздуха на входе в компрессорной установки широко применяется для повышения КПД и мощности таких энергоблоков. Однако большое количество ранее созданных КУ не оснащались системами охлаждения воздуха на входе, что снижало затраты на их установку и монтаж. Кроме того, вырабатываемой в то время мощности энергоустановки было достаточно. Используя преимущества систем охлаждения воздуха в условиях роста электропотребления, мощность энергоблока такого типа можно повысить на 10–26 %, исключая собственные затраты мощности в системе, особенно в летний период.

МЕТОДОЛОГИЯ

Прямой пуск асинхронного двигателя – это метод запуска двигателя, при котором он подключается напрямую к источнику питания без использования дополнительных устройств. В этом режиме двигатель получает полную номинальную мощность, но может испытывать высокий пусковой ток, что может привести к перегрузке электрической сети. При пуске ток электродвигателя возрастает от 5 до 7 раз[7].

Смоделируем прямой пуск асинхронного электродвигателя с короткозамкнутым ротором согласно данным из таблицы 1.

Таблица 1. Технические характеристики электродвигателя

Наименование параметров	Значения
Мощность	13 кВт
Номинальное напряжение, В	380
Частота, Гц	50
Активное сопротивление статора, Ом	0.352471
Индуктивное сопротивление статора, Гн	6.15878e-04
Активное сопротивление ротора, Ом	0.32859
Индуктивное сопротивление ротора, Гн	6.15878e-04
Взаимоиндукция, Гн	2.93973e-02
Момент инерции, кг·м ²	1.25
Коэффициент трения	1e-05
Число пар полюсов	4

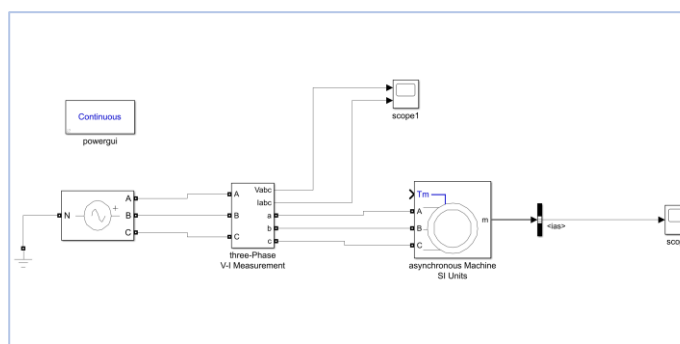


Рис 1. Схема прямого пуска электродвигателя.

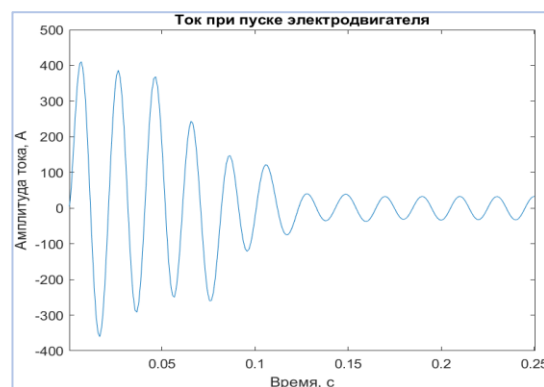


Рис 2. График тока при пуске электродвигателя

Из графика видно что при прямом пуске электродвигателя ток выходит на свои номинальные значение в течении 0,1157 с, а Максимальный ток доходит до 406,5 А, что в 12 раз выше номинального значение.

Пусковой ток асинхронного электродвигателя, будучи значительно выше номинального, может нанести вред как самому двигателю, так и электросети и подключенному к ней оборудованию. Вот основные негативные последствия[2]:

1. Нагрев обмоток двигателя:
2. Просадки напряжения в сети:
3. Срабатывание защитных устройств.
4. Износ механических элементов.
5. Повышенный расход электроэнергии.
6. Негативное воздействие на другие электрические компоненты.

Способ 1. Переключение обмоток (статора) электродвигателя с соединения “звезда” на соединение “треугольник”.

Одним из методов оптимизации работы компрессорных установок, который может привести к повышению энергоэффективности, является изменение схемы соединения обмоток статора электродвигателя. Традиционно, трехфазные асинхронные электродвигатели, используемые в компрессорах, могут работать в двух основных конфигурациях: “звезда” (Y) и “треугольник” (Δ). Выбор той или иной схемы соединения влияет на характеристики двигателя, такие как пусковой момент, рабочий момент, ток и скорость вращения[3].

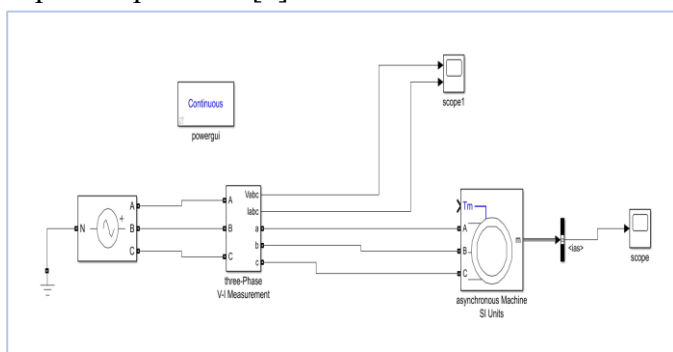


Рис 3. Подключение электродвигателя по схеме соединения треугольник

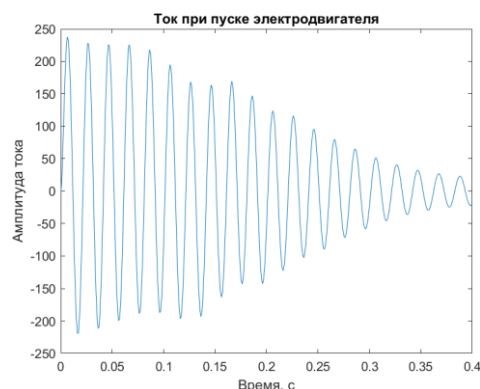


Рис 4. Ток электродвигателя при соединении по схеме треугольник для сравнения возьмем два графика

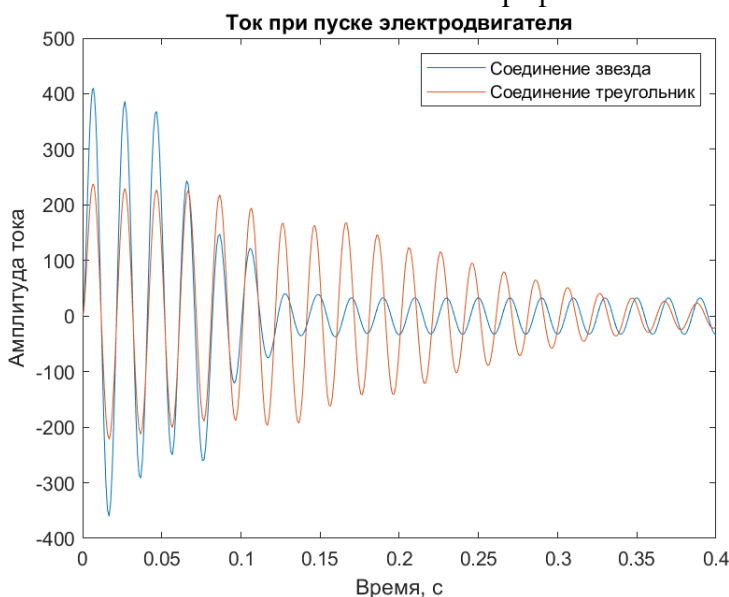


Рис 5. Сравнение токов при соединении звезда и треугольник

Как мы видим из графика пиковый ток при соединении треугольник составляет 237,6 А, что на $\sqrt{3}$ раз меньше чем при соединении звезда.

Основное различие между этими двумя схемами заключается в распределении напряжения по обмоткам и, как следствие, в их характеристиках. При подключении по схеме “звезда”, на каждую обмотку подается фазное напряжение, деленное на корень из трех ($U_{\phi}/\sqrt{3}$)[1]. Это приводит к:

Сниженному пусковому току: Обмотки получают меньшее напряжение, что снижает пусковой ток. Это полезно для защиты двигателя и электросети от перегрузок.

Сниженному пусковому моменту: Меньший пусковой ток также приводит к меньшему пусковому моменту, что может быть проблемой для двигателей, работающих под нагрузкой.

Меньшей скорости вращения: Скорость вращения двигателя при соединении “звезда” также может быть ниже.

При подключении по схеме “треугольник”, на каждую обмотку подается полное фазное напряжение (U_{ϕ}). Это приводит к:

Увеличенному пусковому току: Обмотки получают полное напряжение, что повышает пусковой ток.

Увеличенному пусковому моменту: Более высокий ток обеспечивает более высокий пусковой момент, позволяя двигателю быстрее разгоняться до номинальной скорости.

Номинальной скорости вращения: При соединении “треугольник” двигатель работает с номинальной скоростью.

Способ 2. Замена мощного двигателя на несколько одинаково маломощных двигателей

Для минимизации негативных последствий пусковых токов и оптимизации энергопотребления предлагается заменить один мощный двигатель на несколько маломощных двигателей, объединенных в общую систему привода. В качестве примера, двигатель мощностью 55 кВт можно заменить на пять двигателей мощностью 11 кВт каждый. При этом обеспечивается эквивалентная суммарная мощность привода, но достигаются значительные преимущества:

Снижение пусковых токов: При последовательном включении двигателей с заданными временными задержками пусковой ток каждого отдельного двигателя будет значительно ниже, чем пусковой ток одного двигателя мощностью 55 кВт. Это связано с тем, что меньшие двигатели обладают меньшей индуктивностью и инерцией.

Снижение нагрузки на электрическую сеть: Поскольку двигатели включаются не одновременно, а с временным интервалом, общая нагрузка на электрическую сеть распределяется во времени, снижая пиковые токи и уменьшая вероятность просадок напряжения.

Более плавный набор оборотов: Последовательное включение двигателей обеспечивает более плавный набор оборотов компрессора, что уменьшает механические нагрузки на элементы системы.

Повышение надежности: При выходе из строя одного из двигателей, компрессорная установка может продолжать работать с пониженной производительностью, обеспечивая некоторую резервность.

Для достижения поставленной цели были использованы программные средства численного моделирования, позволяющие исследовать переходные процессы при пуске асинхронных двигателей. Моделирование включало два основных сценария:

Сценарий 1: Прямой пуск одного асинхронного двигателя мощностью 55 кВт.

Сценарий 2: Последовательный пуск пяти асинхронных двигателей мощностью 11 кВт, с определенной временной задержкой между включением каждого последующего двигателя, что обеспечивает достижение двигателем номинального режима работы до включения следующего.

В ходе моделирования регистрировались значения токов в обмотках статора, а также динамика их изменения во времени.

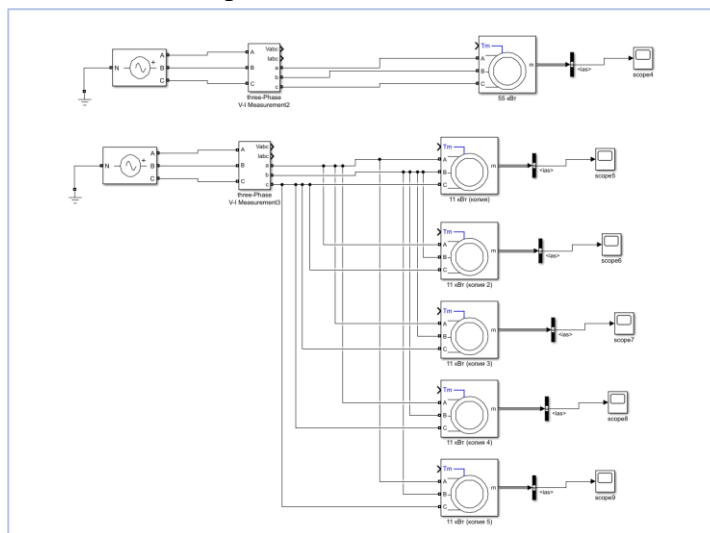


Рис 6. Схема пуска двигателей мощностью 55 кВт и 11 кВт

Код Matlab

```
warning off;
SimNew = sim('Asynchronous_machine.slx', 'ReturnWorkspaceOutputs', 'on');
warning on;
t = SimNew.ik(:,1);
value_ik = SimNew.ik(:,2);
plot (t, value_ik);
title ('Ток при пуске электродвигателя');
ylabel ('Амплитуда тока');
xlabel ('Время, с');
hold on
t2 = SimNew.ik2(:,1);
value_ik2 = SimNew.ik2(:,2);
plot (t, value_ik2);
legend ('Соединение звезда', 'Соединение треугольник')
hold off
t3 = SimNew.ik3_1(:,1);
value_ik3 = SimNew.ik3_1(:,2);
plot (t3, value_ik3);
title ('Ток при пуске электродвигателя');
```

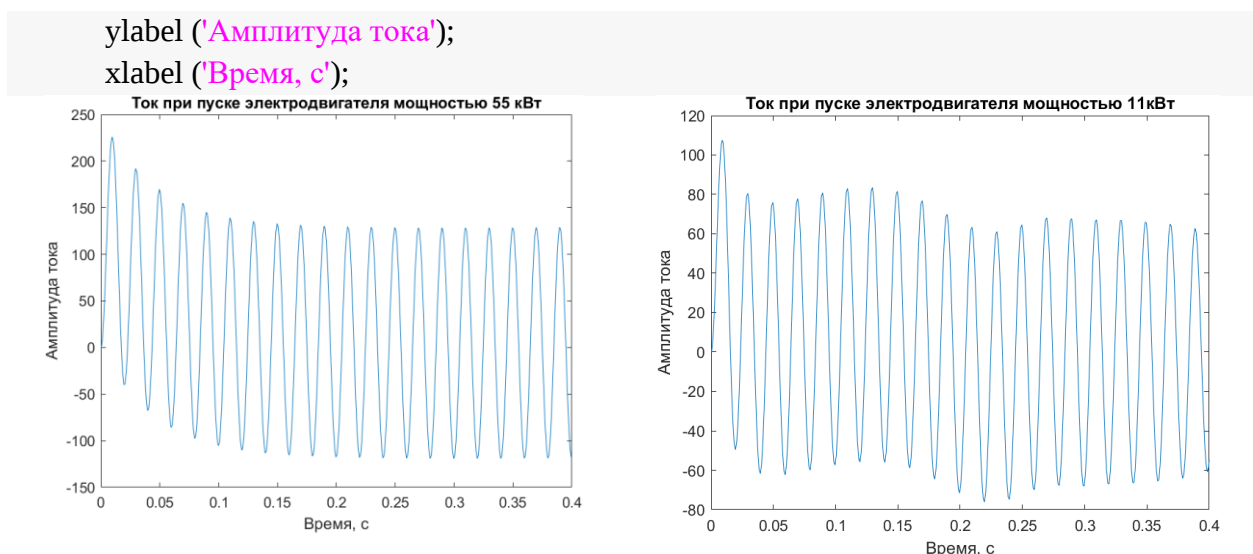


Рис 7. Ток при пуске синхронного электродвигателя мощностью 55 кВт и 11 кВт

При прямом пуске асинхронного двигателя мощностью 55 кВт было зафиксировано значительное превышение пускового тока над номинальным значением. Пиковое значение тока достигло 200 А, что более чем в 1.9 раза превышает номинальный ток. Данный высокий пусковой ток характерен для прямого пуска мощных асинхронных двигателей и является следствием переходных процессов, связанных с увеличением магнитного потока и разгоном ротора. После достижения пикового значения, пусковой ток начал снижаться и достиг номинального значения приблизительно за 0.1 секунды. Такой быстрый переход к номинальному режиму работы свидетельствует о значительной мощности двигателя и способности быстро преодолевать начальные инерционные нагрузки.

РЕЗУЛЬТАТЫ

При последовательном пуске пяти асинхронных двигателей мощностью 11 кВт наблюдалась принципиально иная картина изменения тока. Пиковое значение тока каждого двигателя достигало 100 А, что превышает номинальный ток примерно в 4.9 раза. Однако, благодаря последовательному запуску, общий пиковый ток системы не превышал 100 А незначительные колебания при включении каждого следующего двигателя, что является существенным снижением по сравнению с прямым пуском двигателя 55 кВт. После начального пикового значения, токи двигателей, после нескольких колебаний, начинали стремиться к номинальным значениям, достигая их приблизительно за 0.3 секунды. Увеличение времени выхода на номинальный режим работы обусловлено меньшей мощностью каждого отдельного двигателя и необходимостью преодоления инерционности системы, но этот фактор компенсируется снижением величины пусковых токов.

REFERENCES

1. Селянская Е.Л., Касьянов С.В., Карпин М.Ю., Голдобин А.С. Влияние системы СГУ на работу центробежного компрессора // Компрессорная техника и пневматика», 2013, №6, с.25-33.
2. Бельский И.О., Куприянов И.С., Лукьянов А.В. Способ диагностики асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором. Патент на изобретение №2716172 РФ. Опубликовано: 2020.03.06.
3. V.V. Kalekin //Development and research of reciprocating pneumatic motors and pneumatic motor-compressor units with self-acting valves the subject of the dissertation and abstract //Candidate of Technical Sciences / Specialty of the Higher Attestation Commission of the Russian Federation 05.04.06. 2005.
4. U.Kh. Khoshimov, S.M. Khushiev, and Sh.Yu. Karakulov //Study on energy consumption regulation of devices in industry enterprises// E3S Web of Conferences 434, 01042 (2023)<https://doi.org/10.1051/e3sconf/202343401042> 2023.
5. O.Kh. Ishnazarov, U.H. Hoshimov [Mathematical modeling of electric consumption of the gas cooling process](#) E3S Web of Conferences 264, 04088.
6. угли Наркулов, А. К. (2022). Патрулирование-основа обеспечения общественного порядка. Science and Education, 3(11), 1334-1339.
7. U.H. Hoshimov, O.Kh. Ishnazarov [Group control of air-cooled gas apparatuses](#) Journal of Physics: Conference Series 2094 (5), 052051.
8. Копылов И.П. Электрические машины: Учебник для вузов. -М.: Энергоатомиздат, 1986. -360 с.