

УДК 621.793.16

Дин Кай Цзянь

МЕТОД ПОВЫШЕНИЯ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ ТЕХНОЛОГИЙ ВАКУУМНО-ПЛАЗМЕННОГО НАНЕСЕНИЯ ПОКРЫТИЙ

Аннотация: в статье рассмотрены вопросы повышения энергоэффективности технологических процессов вакуумно-плазменного напыления покрытий путем оптимизации параметров питающего напряжения асинхронного электропривода форвакуумного насоса. Автором предложена методика автоматической системы управления параметрами питающего напряжения асинхронного электродвигателя насоса.

Ключевые слова: автоматическая система, энергоэффективность, вакуумно-плазменное нанесение покрытий, асинхронный электродвигатель, питающее напряжение.

Ding Kai Jian

METHOD OF ENERGY EFFICIENCY TECHNOLOGY OF VACUUM-PLASMA COATING

Abstract: the issues of increasing of the energy efficiency of technological processes of vacuum plasma spraying coating by optimizing the parameters of the supply voltage of the asynchronous electric drive of the forevacuum pump are considered in this article. The author puts forward methodology of a technique for an automatic control system for the parameters of the supply voltage of an asynchronous pump motor.

Keywords: *energy efficiency, automatic system, asynchronous electric motor, vacuum-plasma coating, supply voltage.*

Введение.

На сегодняшний день одним из наиболее важных экономических показателей производственных процессов является их эффективность. В структуре промышленного энергопотребления асинхронный электропривод составляет 50 – 70% общего потребления и является основным источником электрических потерь. Вместе с тем, КПД такого привода невелико и составляет 0,7–0,85 в номинальном режиме работы, а при недогрузках в значительной степени снижается и достигает значений 0,1–0,2. Такая ситуация приводит к резкому росту энергопотребления, загрязнению электросетей реактивными токами, снижению срока службы и надежности электродвигателей и другим сопутствующим проблемам.

В качестве объекта для исследований в работе бы выбран технологический процесс вакуумного нанесения упрочняющих покрытий на инструмент. Основные узлы и системы установок для вакуумного напыления представляют собой самостоятельные устройства, выполняющие заданные функции:

- 1) создание вакуума;
- 2) испарение или распыление материала пленок;
- 3) транспортировку деталей;
- 4) контроль режимов вакуумного напыления и свойства пленок;
- 5) электропитание.

Технология вакуумно-плазменного нанесения покрытий.

Вакуумное напыление основано на создании направленного потока частиц (атомов, молекул или кластеров) наносимого материала на поверхность изделий и их конденсации. Процесс включает несколько стадий: переход напыляемого вещества или материала из конденсированной фазы в газовую, перенос молекул газовой фазы к поверхности изделия, конденсацию их на поверхность, образование и рост зародышей, формирование пленки.

Обычно установка для вакуумного напыления включает следующие узлы:

- 1) рабочую камеру, в которой осуществляется напыление пленок;
- 2) источники испаряемых или распыляемых материалов с системами их энергопитания и устройствами управления;
- 3) откачную и газораспределительную системы, обеспечивающие получение необходимого вакуума и организацию газовых потоков (состоит из насосов, натекателей, клапанов, ловушек, фланцев и крышек, средств измерения вакуума и скоростей газовых потоков);
- 4) систему электропитания и блокировки всех устройств и рабочих узлов установки;
- 5) систему контроля и управления установкой вакуумного напыления, обеспечивающую заданные скорость напыления, толщину пленок, температуру поверхности деталей, температуру отжига, физические свойства пленок (содержит набор датчиков, связанных через управляющую микропроцессорную ЭВМ с исполнительными механизмами и устройствами вывода информации);

6) транспортирующие устройства, обеспечивающие ввод и вывод деталей в рабочую камеру, точное размещение их на постах напыления и перевод из одной позиции напыления на другую при создании многослойной системы пленой;

7) систему вспомогательных устройств и технологическую оснастку (состоит из внутрикамерных экранов, заслонок, манипуляторов, гидро- и пневмоприводов, устройств очистки газов).

Для создания вакуума в рабочей камере используются специальные насосы различной конструкции. Анализ конструкций насосов, создающих вакуум, показывает, что почти все вакуумные насосы работают по принципу вытеснения, аналогичного объёмным насосам (за исключением паромасляных и пароэжекторных насосов, в которых используется принцип эжекций). Полученный вакуум, то есть его величина зависит от герметичности рабочего пространства, создаваемого рабочими органами насоса (золотниками, пластинами, колесами совместно с жидкостью). Насос, в конечном счете, должен обеспечить за два важнейших условия: понизить давление в замкнутом пространстве до определённой величины путём забора газовой среды из замкнутого пространства (объёма) и осуществить это за определённое время.

Энергопотребление при реализации технологических процессов вакуумного нанесения покрытий.

В качестве электропривода в вакуумных насосах рассматриваемых установок обычно используются трехфазные асинхронные электродвигатели переменного тока с короткозамкнутым ротором. Зависимость скорости всасывания q_n (л/мин)

или нагрузки на выходном валу асинхронного электропривода от вакуума p (бар) показана на рис. 1.

Из графиков видно, что при увеличении вакуума, то есть при снижении давления воздуха в камере, нагрузка на выходном валу электропривода или в данном случае скорость всасывания значительно снижается вплоть до режима холостого хода. При этом, с электротехнической точки зрения, скорость вращения магнитного поля статора асинхронного электродвигателя n_0 становится равной скорости вращения ротора n , скольжение S становится меньше номинального значения и стремится к нулю. Все это приводит к резкому возрастанию реактивной составляющей мощности электродвигателя и резкому снижению его энергоэффективности (рис. 2) [6].

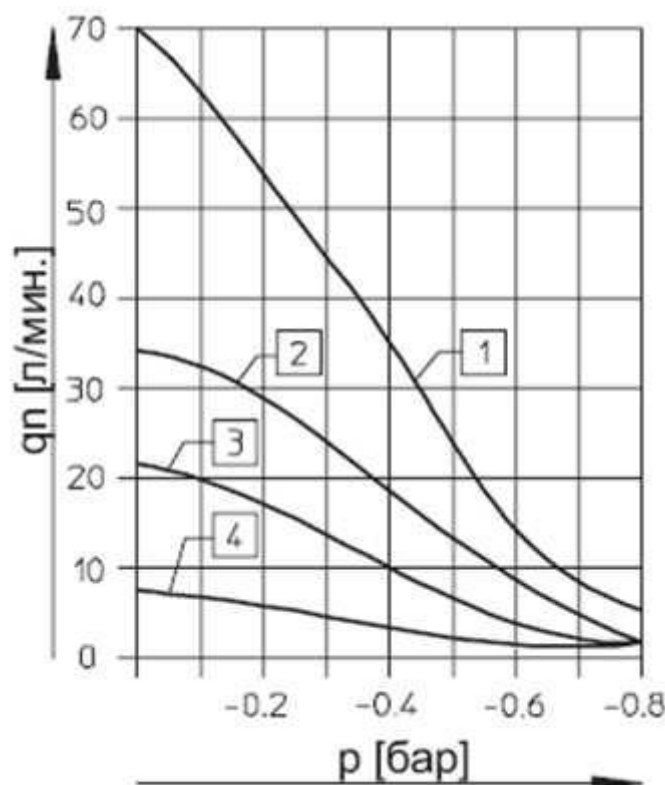


Рис. 1. Зависимость скорости всасывания от вакуума для 4-х типов вакуумных насосов (VAD – 3/8, VAD – 1/4, VAD – 1/8, VAD – MS)

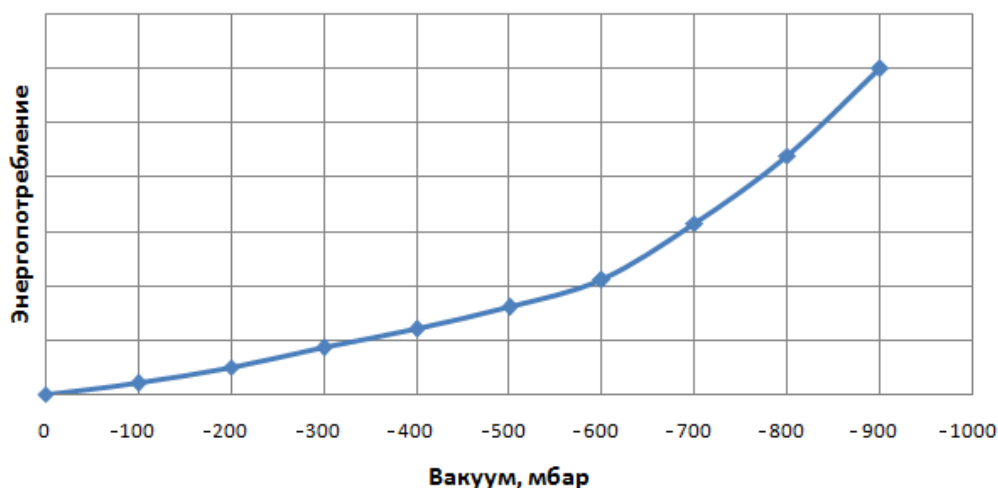


Рис. 2. Зависимость потребляемой электродвигателем электроэнергии от уровня вакуума

В асинхронном электрическом двигателе частота вращения ротора n на установившемся режиме отличается от частоты вращения статора n_0 на величину скольжения S .

Частота вращения магнитного поля n_0 зависит от частоты напряжения питания f . При питании обмотки статора электрического двигателя трехфазным напряжением с частотой f создается вращающееся магнитное поле. Скорость вращения этого поля определяется по известной формуле:

$$\omega_1 = \frac{2\pi f}{p},$$

где p – число пар полюсов статора.

Переход от скорости вращения n_0 поля ω_1 , измеряемой в радианах, к частоте вращения, выраженной в оборотах в минуту, осуществляется по следующей формуле:

$$n_0 = \frac{60}{2\pi} \cdot \omega_1,$$

где 60 – коэффициент пересчета размерности.

Подставив в это уравнение скорости вращения поля, ω_1 получим, что

$$n_0 = \frac{60f}{p}.$$

Таким образом, частота вращения ротора асинхронного двигателя зависит от частоты напряжения питания.

На этой зависимости и основан метод частотного регулирования.

Изменяя с помощью преобразователя частоту f на входе двигателя, мы регулируем частоту вращения ротора.

Таким образом, повышения энергоэффективности асинхронных электродвигателей установок вакуумного нанесения покрытий необходимо производить подбор частоты питающего напряжения.

Методика снижения энергопотребления при вакуумно-плазменном нанесении покрытий.

Изменение частоты питающего напряжения приводит к отклонению от расчетных значений максимального и пускового моментов двигателя, КПД, коэффициента мощности. Поэтому для поддержания требуемых рабочих характеристик двигателя необходимо с изменением частоты одновременно соответствен-

но изменять и амплитуду напряжения. Для этого целесообразно применять метод скалярного управления.

При скалярном управлении по определенному закону изменяют амплитуду и частоту приложенного к двигателю напряжения, а отношение максимального момента двигателя к моменту сопротивления на валу поддерживается постоянным. То есть при изменении частоты амплитуда напряжения изменяется таким образом, что отношение максимального момента двигателя к текущему моменту нагрузки остается неизменным. Это соотношение называется перегрузочная способность двигателя.

При постоянстве перегрузочной способности номинальные коэффициент мощности и КПД двигателя на всем диапазоне регулирования частоты вращения практически не изменяются.

При постоянстве перегрузочной способности номинальные коэффициент мощности и КПД двигателя на всем диапазоне регулирования частоты вращения практически не изменяются.

Максимальный момент, развиваемый двигателем, определяется следующей зависимостью.

$$M_{\text{макс.}} = k \frac{U^2}{f^2},$$

где k – постоянный коэффициент.

Поэтому зависимость напряжения питания от частоты определяется характером нагрузки на валу электрического двигателя.

Для постоянного момента питания от частоты определяется характером нагрузки на валу электрического двигателя.

Для постоянного момента нагрузки поддерживается отношение $U/f = \text{const}$, и, по сути, обеспечивается постоянство максимального момента двигателя. Характер зависимости напряжения питания от частоты для случая с постоянным моментом нагрузки изображен на рис. 3. Угол наклона прямой на графике зависит от величин момента сопротивления и максимального крутящего момента двигателя.

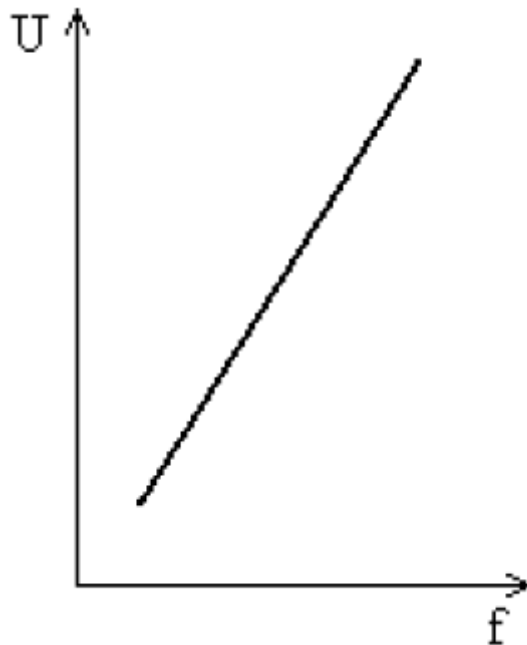


Рис. 3. Зависимость напряжения питания от частоты
для случая с постоянным моментом нагрузки

Вместе с тем, на малых частотах, начиная с некоторого значения частоты, максимальный момент двигателя начинает падать. Для компенсации этого и для

увеличения пускового момента используется повышение уровня напряжения питания.

В случае вентиляторной нагрузки (а в нашем случае эксплуатация двигателя в качестве привода насоса как раз и является вентиляторной нагрузкой) реализуется зависимость $U/f^2 = \text{const}$. Характер зависимости напряжения питания от частоты для этого случая показан на рис. 4. При регулировании в области малых частот максимальный момент также уменьшается, но для данного типа нагрузки это не критично.



Рис. 4. Зависимость напряжения питания от частоты
для вентиляторной нагрузки

Используя зависимость максимального крутящего момента от напряжения и частоты, можно построить график U от f для любого типа нагрузки.

Автоматическая система управления параметрами питающего напряжения для асинхронных электроприводов.

Преобразовывать частоты позволяет экономить на непроизводительных затратах энергии, кроме того, он имеет функция позволяет при повышении той же работы экономить дополнительно от 5 до 60% электроэнергии путем поддержания электродвигателя в режиме оптимального КПД. В режиме энергосбережения преобразователь частоты автоматически отслеживает потребление тока, рассчитывает нагрузку и снижает выходное напряжение. Таким образом, снижаются потери на обмотках двигателя и увеличивается его КПД.

В нашем случае необходимо создать автоматическую систему управления параметрами питающего напряжения для обеспечения постоянства нагрузки на выходном валу электродвигателя, то есть поддерживать номинальные значения скольжения $S_{ном}$ и скорости вращения выходного вала $n_{ном}$. Для этих целей автоматическую систему управления предлагается оснастить встроенным ПИД-регулятором (пропорциональная интегральная дифференциальная составляющая). Преобразователь изменяет скорость вращения двигателя таким образом, чтобы поддерживать на заданном уровне определенный параметр системы (в нашем случае давление рабочей среды или уровень вакуума) благодаря поступлению аналогового сигнала 0 – 10 В или 4 – 20 Ма с датчика. Наличие встроенного ПИД-регулятора позволяет упростить систему управления и не использовать внешних регуляторов.

Схема автоматической системы управления параметрами питающего напряжения асинхронного электродвигателя представлена на рис. 5 [6]. В качестве

управляемого параметра, как уже говорилось, выбрано давление в вакуумной камере p (мбар). Для реализации схемы управления в камере устанавливается датчик давления D_d , аналоговый сигнал с которого поступает в преобразователь системы управления. Принцип действия датчика основан на упругой деформации чувствительного элемента (сенсора), принцип действия датчика основан на упругой деформации чувствительного элемента (сенсора), на который нанесены полупроводниковые тензорезисторы, включенные по схеме моста Уинстона.

В нижней части рисунка изображены графики напряжений и токов на выходе каждого элемента преобразователя.

Переменное напряжение питающей сети ($u_{вх.}$), с постоянной амплитудой и частотой ($U_{вх} = \text{const}$, $f_{вх} = \text{const}$) поступает на управляемый выпрямитель (1), где изменение амплитуды напряжения u и может достигаться регулированием величины постоянного напряжения u_d .

Для сглаживания пульсаций выпрямленного напряжения ($U_{выпр}$) используется фильтр (2). Выпрямитель и емкостный фильтр (2) образуют звено постоянного тока.

С выхода фильтра постоянное напряжение u_d поступает на вход автономного импульсного инвертора, выполненного на основе силовых биполярных транзисторов с изолированным затвором (3).

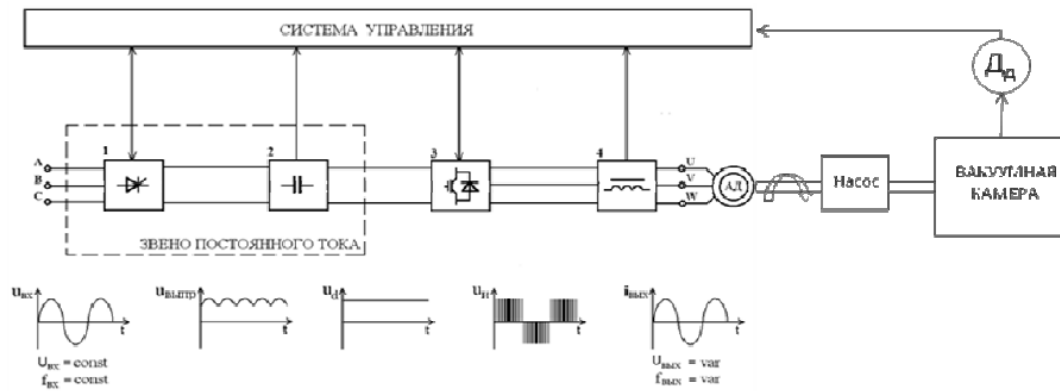


Рис. 5. Автоматическая система управления параметрами питающего напряжения для асинхронных электроприводов

В инверторе осуществляется преобразование постоянного напряжения u_d в трехфазное импульсное напряжение u и изменяемой амплитуды и частоты. По сигналам системы управления каждая обмотка электрического двигателя под-соединяется через соответствующие силовые транзисторы инвертора к положительному и отрицательному полюсам звена постоянного тока. Длительность подключения каждой обмотки в пределах периода следования импульсов моду-лируется по синусоидальному закону. Наибольшая ширина импульсов обеспе-чивается в середине полупериода, а к началу и концу полупериода уменьшается. Таким образом, система управления обеспечивает широтно-импульсную моду-ляцию (ШИМ) напряжения, прикладываемого к обмоткам двигателя. Амплиту-да и частота напряжения определяются параметрами модулирующей синусои-дальной функции.

При высокой несущей частоте ШИМ (2–15 КГц) обмотки двигателя вследствие их высокой индуктивности работают как фильтр. Поэтому в них протекают практически синусоидальные токи.

При необходимости на выходе частоты формируется трехфазное переменное напряжение изменяемой частоты и амплитуды ($U_{\text{ВЫХ}} = \text{var}$, $f_{\text{ВЫХ}} = \text{var}$).

Применение предлагаемой системы управления в установках вакуумного нанесения покрытий позволит в 2–3 раза снизить реактивную составляющую потребляемой мощности, за счет оптимизации системы электроснабжения двигателя, уменьшить энергопотребление на величину от 5–70%, повысить качество и эффективность использования электрической энергии.

Список литературы

1. Григорьев С.Н. Современное вакуумно-плазменное оборудование и технологии комбинированного упрочнения инструмента и деталей машин / С.Н. Григорьев // Технология машиностроения. – 2004. – №3. – С. 20.
2. Кудрин Б.И. Электроснабжение промышленных предприятий: учеб. для студ. высш. учеб. завед. / Б.И. Кудрин. – 2-е изд. – М: Интермет Инжиниринг, 2006. – 672 с.
3. Змиева К.А. Повышение энергоэффективности промышленных производств посредством создания автоматизированных программно-управляемых энергосберегающих систем / К.А. Змиева // Вопросы современной науки и практики. Университет им. В.И. Вернадского. – 2009. – №9. – С. 35–40.

4. Змиева К.А. Повышение эффективности управления процессом механо-обработки на основе автоматизированной системы энергосбережения / К.А. Змиева // Безопасность жизнедеятельности. – 2009. – №9. – С. 23–30.

Дин Кай Цзянь – канд. техн. наук, профессор Технологического университета Китая, Китайская Народная Республика.
