

Мараховский Даниил Алексеевич, бакалавр
Уфимский университет науки и технологий
Marakhovskiy Daniil Alekseevich
Ufa University of Science and Technology

ПОВЫШЕНИЕ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ АСИНХРОННЫХ ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ СРЕДСТВАМИ ЧАСТОТНОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ IMPROVING THE ENERGY EFFICIENCY OF INDUCTION MOTOR DRIVES BY VARIABLE-FREQUENCY CONTROL

Аннотация. Рассмотрены способы повышения энергоэффективности асинхронных электроприводов при применении преобразователей частоты. Показана связь энергопотребления с характером нагрузки, режимом регулирования скорости и потерями элементов привода. Проанализированы преимущества частотного управления для насосных и вентиляционных механизмов, а также ограничения, связанные с работой двигателя и преобразователя вне номинального режима.

Abstract. Methods for improving the energy efficiency of induction motor drives using frequency converters are considered. The relationship between energy consumption, load characteristics, speed control mode and drive-system losses is shown. The advantages of variable-frequency control for pump and fan mechanisms, as well as limitations associated with off-nominal operation of the motor and converter, are analyzed.

Ключевые слова: Асинхронный двигатель, электропривод, преобразователь частоты, энергоэффективность, регулирование скорости, потери энергии.

Keywords: Induction motor, electric drive, frequency converter, energy efficiency, speed control, energy losses.

Введение

Асинхронные двигатели используются в насосах, вентиляторах, компрессорах, конвейерах и другом промышленном оборудовании благодаря простой конструкции, надежности и удобству эксплуатации. При этом энергетическая эффективность определяется не только паспортным коэффициентом полезного действия самого двигателя. На фактическое потребление влияют нагрузка, число часов работы, способ регулирования производительности, потери преобразователя, механическая передача и режим технологического механизма. Поэтому современный подход рассматривает электропривод как систему, а не как изолированную электрическую машину.

Международная классификация эффективности двигателей задается серией ИЕС 60034. Актуальная ИЕС 60034-30-1:2025 устанавливает классы эффективности для линейно питаемых двигателей в заданном диапазоне мощностей и условий [1]. Для регулируемых приводов существенна также эффективность всей системы «преобразователь – двигатель – нагрузка», что отражено в ИЕС 61800-9-2:2023 [2]. Цель статьи – рассмотреть основные механизмы экономии энергии при частотном регулировании асинхронного электропривода и определить условия, при которых установка преобразователя действительно снижает суммарное энергопотребление.

Потери в двигателе и влияние режима нагрузки

Коэффициент полезного действия двигателя можно представить как отношение полезной механической мощности на валу к электрической мощности, потребляемой из сети. Разность образуют потери в обмотках статора и ротора, магнитные потери, механические потери на вентиляцию и трение, а также добавочные составляющие. Часть потерь меняется с током и нагрузкой, часть остается относительно слабо зависимой от момента. Из этого следует, что эксплуатация существенно недогруженного двигателя не всегда энергетически рациональна: при малой полезной мощности постоянные составляющие потерь занимают большую долю баланса.



Высокий номинальный класс эффективности двигателя важен, но сам по себе не гарантирует минимальных затрат энергии. Исследования высокоэффективных электрических машин показывают, что повышение класса требует оптимизации электромагнитной системы, материалов и конструкции, однако системный эффект зависит от режима работы [3, 4]. При выборе двигателя необходимо учитывать реальный профиль нагрузки: постоянную работу около номинальной точки, длительное частичное нагружение, повторно-кратковременные режимы и требуемый диапазон скоростей.

Для механизма с практически постоянным требуемым моментом снижение скорости уменьшает полезную мощность приблизительно пропорционально скорости. Для центробежных насосов и вентиляторов зависимость более выражена: при геометрически подобных режимах расход примерно пропорционален частоте вращения, напор – квадрату частоты, а требуемая мощность – ее кубу. Поэтому попытка регулировать расход дросселированием при постоянной высокой скорости может приводить к расходованию энергии на создание избыточного давления, которое затем теряется на регулирующем элементе.

Принцип частотного регулирования

Скорость вращения магнитного поля асинхронной машины определяется частотой питающего напряжения и числом пар полюсов. Преобразователь частоты формирует питание с регулируемой частотой и напряжением, позволяя изменять скорость без механического редуцирования и без грубого ограничения потока задвижкой или заслонкой. В простейшем скалярном управлении поддерживается заданное соотношение напряжения и частоты, что позволяет сохранять магнитный поток в рабочем диапазоне. Для более требовательных механизмов применяются векторные алгоритмы, разделяющие управление составляющими тока, связанными с потоком и моментом.

Энергетический эффект особенно заметен там, где технологическая потребность значительную часть времени ниже максимальной. Например, вентиляционная установка может не нуждаться в полной производительности ночью или в межсезонье. Снижение частоты вращения уменьшает аэродинамическую мощность, и экономия на нагрузке может многократно превышать собственные потери преобразователя. В установках с постоянным требуемым моментом эффект обычно скромнее и определяется прежде всего устранением неэффективных механических способов регулирования и возможностью оптимизировать режим двигателя.

Эффективность системы «преобразователь – двигатель – механизм»

Преобразователь частоты имеет собственные потери в силовых полупроводниковых элементах, фильтрах, системе охлаждения и цепях управления. Кроме того, несинусоидальная форма выходного напряжения создает дополнительные гармонические потери в двигателе. Поэтому эффективность системы нельзя получать простым использованием паспортного КПД двигателя, измеренного при синусоидальном питании. IEC 61800-9-2 рассматривает показатели для полного приводного модуля и системы электропривода, связывая оценку с рабочими точками и профилем скорость–момент [2].

При проектировании важно учитывать не одну номинальную точку, а распределение времени между режимами. Если установка работает 60 % года на половинной нагрузке, 30 % на средней и только 10 % на максимальной, выбор привода следует оптимизировать именно под такой профиль. В этом случае большой двигатель с низкой фактической загрузкой может уступать правильно выбранной машине меньшей мощности, даже если формально оба двигателя относятся к одному классу эффективности. Аналогично преобразователь следует выбирать без неоправданного завышения мощности, поскольку работа оборудования далеко от расчетной точки может ухудшать относительные показатели.



Для насосов и вентиляторов необходимо оценивать также гидравлическую или аэродинамическую часть. Слишком большое сопротивление сети, неправильный подбор рабочего колеса, загрязненные фильтры или постоянно закрытая арматура могут свести часть преимущества частотного регулирования к минимуму. Наиболее эффективный подход состоит в совместной оптимизации двигателя, преобразователя и технологического процесса.

Ограничения и практические рекомендации

Работа двигателя от преобразователя предъявляет дополнительные требования к электрической и тепловой части. При низкой скорости ухудшается собственное охлаждение, а импульсное напряжение повышает нагрузку на изоляцию; возможны также подшипниковые токи и электромагнитные помехи. Эти факторы учитываются выбором двигателя, кабеля, фильтров, заземления и при необходимости независимой вентиляции.

Рациональный проект можно строить в несколько этапов. Сначала измеряются или оцениваются фактические расход, давление, момент и время работы механизма. Затем определяется профиль нагрузки и проверяется, какая доля энергии теряется из-за дросселирования, байпаса или работы на избыточной скорости. После этого выбираются двигатель и преобразователь с учетом требуемого диапазона регулирования. На последнем этапе рассчитывается годовое потребление системы и срок окупаемости. Такой порядок предотвращает ситуацию, когда частотный преобразователь устанавливается формально, но технологический режим остается практически неизменным.

Не менее важна настройка после ввода в эксплуатацию. Ограничение минимальной и максимальной частоты, корректные времена разгона, применение «спящего» режима для насосов, настройка регулятора давления и контроль фактической мощности позволяют реализовать расчетный эффект. Систематический анализ показаний счетчика энергии и параметров преобразователя дает возможность обнаруживать отклонения, вызванные износом оборудования или изменением технологического процесса.

Заключение

Частотное регулирование эффективно снижает энергопотребление асинхронных приводов при переменной производительности, особенно в насосах и вентиляторах. Итог определяется не только КПД двигателя, но и потерями преобразователя, охлаждением, профилем нагрузки и характеристиками механизма. Энергоэффективный привод требует корректного выбора мощности и рабочих точек, а расчетный эффект должен подтверждаться измерением реального потребления после ввода в эксплуатацию.

Список литературы:

1. IEC 60034-30-1:2025. Rotating electrical machines – Part 30-1: Efficiency classes of line operated AC motors (IE code).
2. IEC 61800-9-2:2023. Adjustable speed electrical power drive systems (PDS) – Part 9-2: Ecodesign for motor systems – Energy efficiency determination and classification.
3. de Almeida A. T., Ferreira F. J. T. E., Fong J. A. C. Standards for Efficiency of Electric Motors // IEEE Industry Applications Magazine. 2011. Vol. 17, No. 1. P. 12–19.
4. de Almeida A. T., Ferreira F. J. T. E., Baoming G. Beyond Induction Motors – Technology Trends to Move Up Efficiency // IEEE Transactions on Industry Applications. 2014. Vol. 50, No. 3. P. 2103–2114.
5. Ferreira F. J. T. E., Baoming G., de Almeida A. T. Reliability and Operation of High-Efficiency Induction Motors // IEEE Transactions on Industry Applications. 2016. Vol. 52, No. 6. P. 4628–4637.
6. Bose B. K. Modern Power Electronics and AC Drives. 2002

