

*Егоров Алексей Васильевич, доктор технических наук, профессор кафедры транспортно-технологических машин, Поволжский государственный технологический университет, РФ, г. Йошкар-Ола,  
e-mail: [aleg.egorov@gmail.com](mailto:aleg.egorov@gmail.com)*

*Клейменов Сергей Владиславович, аспирант, кафедра транспортно-технологических машин, Поволжский Государственный Технологический Университет, РФ, г. Йошкар-Ола,  
e-mail: [sergeykleimenov96@mail.ru](mailto:sergeykleimenov96@mail.ru)*

*Белоусов Кирилл Сергеевич, аспирант, кафедра транспортно-технологических машин, Поволжский Государственный Технологический Университет, РФ, г. Йошкар-Ола,  
e-mail: [Kirillbelousov1@yandex.ru](mailto:Kirillbelousov1@yandex.ru)*

## **ОЦЕНКА МЕТОДОВ ИЗМЕРЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ДВИГАТЕЛЯ В РЕЖИМЕ РЕАЛЬНОГО ВРЕМЕНИ**

**Аннотация:** Управление системами электродвигателей является одним из наиболее важных аспектов повышения надежности и энергоэффективности в промышленной среде. К сожалению, неизвестные данные о производительности существующих электродвигателей часто срывают хорошие намерения по управлению системами электродвигателей. Главным аспектом управления системами электродвигателей является понимание того, когда следует заменить существующий двигатель на более эффективный. Программное обеспечение и информация, предоставляемые программой Motor Challenge Program, позволяют легко произвести экономический расчет, только если известны определенные факты о системе электродвигателей. Наиболее трудноуловимыми фактами являются КПД существующего двигателя и мощность вала, требуемая нагрузкой.

**Ключевые слова:** управление, системы, электродвигатель, надежность, энергоэффективность, производительность.

**Annotation:** Management of electric motor systems is one of the most important aspects of increasing reliability and energy efficiency in industrial settings. Unfortunately, unknown data about the performance of existing electric motors often undermines good intentions for managing electric motor systems. The main aspect of managing electric motor systems is understanding when to replace an existing motor with a more efficient one. The software and information provided by the Motor Challenge Program make it easy to perform an economic calculation, but only if certain facts about the electric motor system are known. The most elusive facts are the efficiency of the existing motor and the shaft power required by the load.

**Keywords:** management, systems, electric motor, reliability, energy efficiency, performance.

Растущий спрос на энергию в сочетании с ростом стоимости энергии привел к стремлению повысить эффективность использования энергии. Асинхронные двигатели (АД) являются наиболее часто используемыми двигателями в промышленности. Они являются важнейшими компонентами в цепях приводных систем. Стратегии оценки эффективности всех асинхронных двигателей требуют хорошего знания параметров машины для обеспечения точной оценки. Проблема оценки параметров асинхронных двигателей и их эффективности считается самой важной и сложной в промышленности, в ситуациях на производстве. Однако высокая точность определения параметров АД имеет огромное значение во всех промышленных процессах, поскольку напрямую влияет на работу систем управления [1, с. 4547].

Для оценки энергоэффективности и повышения общей производительности промышленных процессов важно определить потери энергии и контролировать энергоэффективность в режиме реального времени [2, с. 43].

Некоторые эксперты утверждают, что точное измерение КПД двигателя и мощности вала в реальном времени не представляется возможным, в то время как другие не согласны с этим и продвигают определенные устройства и методы для такого определения [3, с. 242]. Одновременные испытания проводились с использованием всех исследуемых устройств и методов измерения эффективности. Три испытательных двигателя не имели измеряемых дефектов. Четвертый двигатель имел задокументированный дефект, типичный для поврежденных или неправильно отремонтированных двигателей, находящихся в эксплуатации, - несимметричный воздушный зазор. Один из исправных двигателей, более старая машина мощностью 100 л.с., был перемотан с выпавшим тумом. Это позволило нам повторно запустить его с отключенным тумом для имитации пятого (и неисправного) двигателя. Каждый двигатель был испытан при номинальных условиях, а также при превышении/занижении и дисбалансе напряжения, характерных для реальной промышленной среды [4-5].

Испытания на дисбаланс проводились при дисбалансе 1% и 2,5%, за исключением двигателя мощностью 100 л.с., где испытания проводились при дисбалансе 2% и 5%. Сводные данные по двигателям приведены в Таблице 1.

Таблица 1. Описание испытанных двигателей

№	Л.с.	Поля	Конструкция	Условие
1	300	4	T	Новые; Энергоэффективный инверторный режим
2	50	2	T	Старые; Никогда не перематывались
3	100	4	U	Старые; Многократная перемотка
4	100	4	U	Тот же двигатель, что и выше, но с одним пропущенным оборотом
5	150	4	T	Старый; деформированные торцевые колокола, вызывающие плохую концентричность ротора

Методы, которые могут быть выполнены без остановки двигателя, считались малоинвазивными. Действия, требующие длительного простоя или вмешательства в электрические или механические соединения двигателя,

считались инвазивными. Методы, требующие отсоединения двигателя и работы без нагрузки, считались наиболее инвазивными. Несколько методов, требующих отключения двигателя, но не отсоединяющих его, считались промежуточными по степени инвазивности.

В данной работе методы классифицируются по способам расчета. Три из оцененных методов предполагают использование "специализированных приборов". Они требуют специального аппаратного устройства, которое используется как для регистрации электрических характеристик, так и для выполнения соответствующих расчетов. Другой класс методов - "программные", поскольку специальное программное обеспечение используется для расчета эффективности на основе данных, полученных с помощью общих приборов, например, вольтметра, амперметра, тахометра и т.д. Последний класс расчетов - "ручной расчет". Специальное оборудование или программное обеспечение не требуется, но общие приборы все равно необходимы для получения входных данных для ручного расчета.

### **СПЕЦИАЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ**

Лабораторные испытания показали, что более инвазивные методы, как правило, имеют наилучшую точность. Три специализированных прибора были более инвазивными, и они показали лучшие результаты, чем другие методы.

Прибор ECNZ Vectron дал некоторые проблемы с его внутренней схемой защиты от перегрузки по току, и это, как полагают, нарушило его работу на двигателе мощностью 50 л.с. MAS-1000 работал хорошо, за исключением того, что при низкой нагрузке на двигателе 300 л.с. показания были довольно высокими. Наибольшее отклонение для всех методов было отмечено для старого двигателя 100 л.с. с перемоткой, где эффективность при низкой нагрузке была занижена на 2-5% для большинства методов и условий напряжения. Однако последующее строгое повторное испытание этого двигателя по стандарту IEEE 112В дало несколько более низкий КПД, ближе к результатам, полученным с помощью специальных устройств. Разница между более ранними и более поздними лабораторными результатами (с использованием одного и того же

оборудования) не была объяснена. Наиболее вероятно, что в первоначальном испытании IEEE 112A имела место ошибка калибровки датчика крутящего момента.

Прибор ECNZ имеет программную функцию, позволяющую прогнозировать эффективность при 100% нагрузке и номинальном напряжении на основе результатов испытаний, полученных при частичной нагрузке и не номинальном напряжении. Это представляется важной функцией для сравнения существующих двигателей с двигателями по каталогу, которые, конечно же, рассчитаны на номинальные условия.

Удобство для пользователя включает в себя эргономику, удобство, автоматические функции, а также предотвращение, обнаружение и оповещение об ошибках человека.

## **ПРОГРАММНЫЕ МЕТОДЫ**

Все три метода MotorMaster+ являются малоинвазивными [4, с. 30]. Все три метода работают путем вычисления нагрузки, затем ищут КПД по таблицам, основанным на корпусе, полюсах и наличии или отсутствии маркировки энергоэффективности двигателя.

Малоинвазивный базовый метод ORMEL 96, разработанный ORNL, представляет собой компьютерную программу, использующую данные заводской таблички и только одно измеренное значение. Измеряемой величиной является число оборотов в минуту, которое должно быть получено с высокой точностью.

Программные методы также представляют проблемы с удобством использования. Метод Esterline Angus MET — это довольно старая (1986) программа для DOS [5, с. 328]. Возможно, она "опередила свое время", потому что управление двигательными системами не было столь заметной проблемой, когда она была создана. При перепрограммировании в виде приложения для Windows и соответствующем ценообразовании и маркетинге, MET мог бы составить хорошую конкуренцию другим методам. ORMEL 96 требовал много манипуляций с настраиваемыми параметрами, чтобы убрать запутанные

сообщения об ошибках и получить достоверный результат. Большинство методов нуждаются в лучшей документации или автоматических настройках по умолчанию для работы с недоступными входными данными.

## **МЕТОДЫ РУЧНОГО РАСЧЕТА**

Стандартный метод скольжения был ужасен. Ошибки в 10-15% были обычным явлением, а эффективность варьировалась от 56% до 169%. Метод компенсированного скольжения компании Ontario Hydro был ненамного лучше. Он корректировал эффективность стандартного скольжения в нужном направлении, чтобы компенсировать расхождения в напряжении, но стандартный метод скольжения был чрезвычайно неточным даже при номинальном напряжении.

Метод определения верхнего предела проскальзывания гораздо точнее, чем стандартный метод, поскольку он использует проскальзывание по-другому. Он просто рассматривает измеренное процентное проскальзывание как частичную меру потери входной мощности, что теоретически обосновано. Хотя метод верхнего предела скольжения был лучше стандартного, он систематически ошибался в большую сторону, поскольку скольжение отражает только электрические потери ротора. Небольшая модификация, предложенная ORNL, заключалась в том, чтобы включить потери в обмотке статора, определенные на основе измеренного тока и сопротивления обмотки. Это можно охарактеризовать как метод верхней границы скольжения и потерь в меди.

Даже с учетом потерь в меди метод верхней границы систематически ошибался в большую сторону. Эта ошибка составляла менее трех процентов при полной нагрузке при всех условиях напряжения. Однако при более низкой нагрузке, когда потери в роторе и меди уменьшаются, а потери в сердечнике, трении и обмотке преобладают, эта ошибка была значительно больше.

Включение мощности холостого хода учитывает потери на трение, износ и потери в сердечнике и значительно повышает точность при более низких нагрузках. Действительно, точность метода приближается к точности специализированных приборов. За это повышение точности приходится платить.

Испытание без нагрузки требует отсоединения, что относит метод к категории более инвазивных. Стоимость специального прибора исключается, но требуются тахометр, миллиомметр и ваттметр.

#### **Библиографический список:**

1. Gajjar, C.S.; Kinyua, J.M.; Khan, M.A.; Barendse, P.S. Analysis of a Nonintrusive Efficiency Estimation Technique for Induction Machines Compared to the IEEE 112B and IEC 34-2-1 Standards. // IEEE Trans. Ind. Appl. 2015,51, 4541–4553.
2. P. Waide and C. Brunner Energy-Efficiency Policy Opportunities for Electric Motor-Driven Systems, Paris, France: Int. Energy Agency (IEA) // 2011. 9-125.
3. Santos, V.S.; Eras, J.J.C.; Gutierrez, A.S.; Ulloa, M.J.C. Assessment of the energy efficiency estimation methods on induction motors considering real-time monitoring. Energy Convers. // Manag. 2019,136, 237–247.
4. G.A. McCoy, J.A. Rooks, V.C. Tutterow MotorMaster+: an energy-efficient motor selection and energy management tool for the pulp and paper industry // 1997 29-35.
5. P. Pillay, V. Levin, P. Otaduy and J. Kueck, "In-situ induction motor efficiency determination using the genetic algorithm," in IEEE Transactions on Energy Conversion // vol. 13, no. 4, pp. 326-333, Dec. 1998.