ЭНЕРГЕТИКА МЕТАЛЛУРГИИ, ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЕ И ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ КОМПЛЕКСЫ

УДК 621.333 https://doi.org/10.18503/1995-2732-2017-15-2-101-109

ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ ЦЕЛЕСООБРАЗНОСТИ КАПИТАЛЬНОГО РЕМОНТА АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ С ПОВЫШЕНИЕМ ИХ КЛАССА ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ

Мугалимов Р.Г.[1], Баранкова И.И.[1], Закирова Р.А.[1], Мугалимова А.Р.[1], Михайлова У.В.[1], Никифоров Г.В.[2]

[1] Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия
[2] Земмеринг, Австрия

Аннотация
В работе излагаются технология капитального ремонта асинхронных двигателей с повышением их класса энергоэффективности и методика расчета затрат на ее реализацию. Описаны технологические схемы традиционного капитального ремонта и ремонта с повышением класса энергоэффективности асинхронных двигателей. Приведены математические зависимости расчета трудовых и материальных затрат на выполнение технологических операций ремонта и модернизации асинхронных двигателей. Дано обоснование технической и экономической целесообразности капитального ремонта асинхронных двигателей с повышением их класса энергоэффективности. В работе используется алгоритм и программа для ЭВМ, рассчитывающая затраты трудовых и материальных ресурсов на капитальный ремонт и ремонт с повышением класса энергоэффективности. Показано, что капитальный ремонт с повышением класса энергоэффективности асинхронных двигателей позволяет повысить КПД и уменьшить потери активной мощности на 3–7% в системе электропривода и в системе электроснабжения технологического участка. Моделированием и практикой показано, что дополнительные затраты на модернизацию асинхронных двигателей составляют 23–30% от затрат на традиционный капитальный ремонт. Дополнительные затраты на модернизацию с повышением класса энергоэффективности окупаются за 0,25–0,8 года экономией электрической энергии. Результаты разработки и исследований рекомендуются энергетикам предприятий, специалистам по ремонту электрических машин, а также центров энергосбережения.

Ключевые слова: асинхронный двигатель, технология, ремонт, модернизация, технологические операции, ресурсы трудовые, ресурсы материальные, моделирование, алгоритм, программа для ЭВМ, энергоэффективность, экономическая эффективность, срок окупаемости

Введение

При эксплуатации трехфазных асинхронных двигателей возникает необходимость в их капитальном ремонте. Капитальный ремонт, как правило, предусматривает замену обмотки статора. В настоящее время при ремонте замену обмотки статора осуществляют по заводским обмоточным данным, т.е. сохраняя число витков, диаметр обмоточного провода, тип и схему укладки обмотки в пазы статора. Технологическая схема капитального ремонта традиционного асинхронного двигателя (ТАД) предусматривает выполнение следующих технологических операций: разборка ТАД; отжиг или химическое размягчение обмотки статора; извлечение обмотки из пазов статора; визуальная или инструментальная оценка состояния электротехнической стали статора; принятие решения или о ремонте по заводской технологии и схеме ТАД, или ремонте со снижением номинальной мощности двигателя, или его утилизации. Если принято решение о ремонте ТАД с прежними обмоточными данными, то осуществляется: изготовление и укладка обмотки статора по заводским данным и схемам; испытание непропитанной обмотки статора; пропитка и сушка обмотки статора; сборка ТАД; испытание ТАД на контрольно-испытательном

© Мугалимов Р.Г., Баранкова И.И., Закирова Р.А., Мугалимова А.Р., Михайлова У.В., Никифоров Г.В., 2017

стенде. Изготовленный двигатель передают Заказчику. Если принято решение о ремонте со снижением номинальной мощности двигателя, то осуществляется пересчет обмоточных параметров – числа витков и диаметра обмоточного провода. Если двигатель подлежит утилизации, то Заказчику передают протокол с рекомендацией на его списание.

Капитальный ремонт асинхронных двигателей требует определенных трудовых и материальных затрат. В настоящее время большинство электроремонтных предприятий определяют эти затраты из опыта предыдущих ремонтов с учетом номинальных мощности, напряжения, частоты вращения двигателя, также применением различных коэффициентов, учитывающих страну производителя, срочность ремонта, вариант исполнения двигателя и др. Такой подход к оценке затрат на капитальный ремонт обусловлен отсутствием эффективных математических моделей, алгоритмов и программ для ЭВМ, позволяющих детально рассчитывать все виды затрат с учетом квалификации специалистов, осуществляющих ремонт, цены и объемы материальных ресурсов, необходимых для ремонта конкретного двигателя, срочности ремонта и др.

Асинхронный двигатель после традиционного капитального ремонта по обмоточным данным завода-изготовителя, как правило, снижает свои энергетические показатели, например, уменьшается КПД, увеличивается потребляемый ток. Это объясняется следующими главными факторами: снижение качества магнитной системы и повышение потерь в электротехнической стали статора; снижение коэффициента заполнения паза статора активной медью. То есть, капитальный ремонт по традиционной технологии всегда ведет к снижению энергоэффективности асинхронного двигателя, что экономически невыгодно. Эксплуатация такого двигателя увеличивает расход электроэнергии и себестоимость выпускаемой продукции, снижает ее конкурентную способность.

Международный стандарт IEG60034-30 определяет энергоэффективность асинхронных двигателей тремя классами энергоэффективности: IE1 – низкий класс; IE2 – средний класс; IE3 – высокий класс. Этот стандарт, в странах Европейского союза, запрещает применение асинхронных двигателей низкого класса энергоэффективности IE1. Европейские производители асинхронных двигателей повышают их класс энергоэффективности путем увеличения массы активных материалов – электротехнической стали, обмоточной меди, алюминия в среднем на 20–25%, что дает повышение КПД на 1,5–3,5%. При этом существенно увеличивается стоимость энергоэффективной электрической машины.

В Российской Федерации большинство общепромышленных асинхронных двигателей, напряжением до 1000 В, мощностью до 100 кВт, изготовленных до 2010 года, имеют низкий класс энергоэффективности IE1. После традиционного капитального ремонта энергоэффективность асинхронных двигателей, как показывает опыт эксплуатации, становится еще ниже. Закон Российской Федерации «Об энергосбережении и повышении энергетической эффективности» № 197-ФЗ от 11.07.2011, № 200-ФЗ от 18.07.2011 № 242-ФЗ с 2017г. запрещает изготовление и использование асинхронных двигателей низкого класса энергоэффективности [1]. Однако в настоящее время отечественные производители изготавливают не более 5–7% от требуемого количества энергоэффективных асинхронных двигателей. Поэтому российские потребители вынуждены покупать дорогостоящие импортные асинхронные двигатели или эксплуатировать существующие низкоэффективные.

В связи с изложенным существует проблема совершенствования технологий изготовления новых энергоэффективных и капитального ремонта существующих асинхронных двигателей с повышением их класса энергоэффективности, а также количественной оценки трудовых и материальных затрат и технико-экономической эффективности их реализации.

Методы исследования

В данной работе предлагается новая технологическая схема капитального ремонта асинхронных двигателей, позволяющая повысить класс энергоэффективности путем модернизации электромагнитной схемы статора [2–6]. Сущность модернизации заключается в совершенствовании электромагнитной схемы статора. Совершенствование электромагнитной схемы предполагает замену одной трехфазной обмотки статора на две трехфазные обмотки при сохранении прежнего объема активных материалов - веса меди и магнитной системы машины. Одна из трехфазных обмоток называется рабочей. Она включается по обычным схемам («звезда» или «треугольник») на трехфазный источник пита-

ния. Другая трехфазная обмотка называется компенсационной. Эта обмотка включается на трехфазный конденсатор определенной емкости, соединенный в схему «звезда» или «треугольник». Параметры обмоток и конденсатора определяются с учетом реального состояния магнитной системы двигателя и достижения его коэффициента мощности единице (cosφ=1) при сохранении или некотором повышении прежнего значения КПД. Конструкция ротора, его параметры остаются прежними, не изменяются. При модернизации асинхронного двигателя рабочая и компенсационная обмотки статора изготавливаются и укладываются в пазы магнитной системы статора по известной технологии. Оптимальные электрические схемы соединения обмоток друг с другом и компенсирующим конденсатором уточняются при инструментальном испытании модернизированного двигателя. Назовем модернизированный двигатель энергоэффективным асинхронным двигателем (ЭАД) с индивидуальной компенсацией реактивной мощности.

При модернизации двигателя технологическая схема традиционного капитального ремонта с повышением его класса энергоэффективности дополняется новыми технологическими операциями, в частности: в обязательном порядке осуществляется инструментальный контроль реального состояния магнитопровода статора; делается новый электромагнитный расчет двигателя с учетом имеющихся геометрических размеров и реального состояния магнитопровода статора, при условиях повышения cosφ до 1,0 и сохранения или некоторого повышения КПД [7–8]. В результате расчета определяются числа витков рабочей и компенсационной обмоток, диаметры обмоточных проводов, число параллельных ветвей, емкость компенсирующего конденсатора, схемы электрических соединений обмоток друг с другом и компенсирующим конденсатором. До изготовления и укладки обмоток осуществляется моделирование ожидаемых рабочих, механических и энергетических характеристик ЭАД. Если результаты моделирования показывают повышение класса энергоэффективности асинхронного двигателя, осуществляют его модернизацию.

Изготовление и укладка обмоток в пазы статора проходит по известной технологии. После изготовления и укладки обмоток в пазы статора осуществляют испытание непропитанной обмотки, затем – пропитку в электротехнических лаках и сушку. После сборки двигателя делают экспресс экспериментальное снятие рабочих и механических характеристик по осциллограммам пуска, реверса и торможения без нагрузки с применением разработанной методики и специального аппаратно-программного комплекса [9].

В данной работе поставлена цель научного обоснования методики выбора варианта капитального ремонта ТАД класса энергоэффективности IE1 путем сравнения технико-экономических показателей модернизируемого двигателя с аналогичными показателями исходных и энергоэффективных двигателей более высокого класса – IE2, IE3.

Поставленная цель достигается решением следующих главных задач:

1. Обоснование технической целесообразности модернизации асинхронного двигателя с повышением его класса энергоэффективности.

2. Разработка программного комплекса для оценки затрат на традиционный капитальный ремонт и ремонт асинхронного двигателя с повышением его класса энергоэффективности.

Обоснование экономической целесообразности модернизации асинхронного двигателя с повышением его класса энергоэффективности.

Задача 1. Обоснование технической целесообразности модернизации асинхронного двигателя с повышением его класса энергоэффективности.

Повышение класса энергоэффективности асинхронного двигателя осуществляется путем компенсации реактивной мощности (тока), потребляемой от источника питания. В отличие от ТАД компенсация реактивной мощности в ЭАД происходит непосредственно в самой электрической машине при сохранении прежней полезной мощности. В результате ЭАД потребляет меньший ток. Токи ТАД и ЭАД определяются известными отношениями:

$$I_{1ТАД} = \frac{K_З P_{2Н}}{m \cdot U_{1Н} \cdot \eta_{ТАД} \cdot \cos\varphi_{ТАД}}; \quad (1)$$

$$I_{1ЭАД} = \frac{K_З P_{2Н}}{m \cdot U_{1Н} \cdot \eta_{ЭАД} \cdot \cos\varphi_{ЭАД}}, \quad (2)$$

где $I_{1ТАД}$, $I_{1ЭАД}$ – токи, потребляемые соответственно традиционным и энергоэффективным асинхронным двигателем; $K_З$ – коэффициент загрузки электродвигателя; $P_{2Н}$ – номинальная мощность электродвигателя; m – число фаз элек-

тродвигателя; $U_{1Н}$ – номинальное фазное напряжение электродвигателя; $\eta_{ТАД}$, $\eta_{ЭАД}$ – КПД электродвигателей для соответствующих коэффициентов загрузки; $\cos\varphi_{ТАД}$, $\cos\varphi_{ЭАД}$ – коэффициенты мощности электродвигателей для заданного коэффициента загрузки.

Например, для нефтяной качалки с электроприводом на основе ТАД типа 5А200L8У3 с номинальными данными $P_{2Н}$=22 кВт, $n_{2Н}$=725 об/мин, $U_{1Н}$=220 В, $\eta_{ТАД}$=0,885, $\cos\varphi_{ТАД}$=0,84, при $К_З$=1,0 номинальный ток двигателя равен

$$I_{1НТАД} = \frac{1{,}0 \cdot 22 \cdot 10^3}{3 \cdot 220 \cdot 0{,}885 \cdot 0{,}84} = 44{,}8 \text{ А}.$$

Этот же электродвигатель, ТАД типа 5А200L8У3, модернизированный в ЭАД, обладающий при $К_З$=1,0, $\cos\varphi_{ЭАД}$=1,0 и $\eta_{ЭАД}$=0,905, потребляет номинальный ток

$$I_{1НЭАД} = \frac{1{,}0 \cdot 22 \cdot 10^3}{3 \cdot 220 \cdot 0{,}905 \cdot 1{,}0} = 37{,}6 \text{ А}.$$

То есть модернизированный двигатель потребляет номинальный ток на 15,9 % меньше, чем ТАД. Уменьшение потребляемого тока позволяет снизить потери активной мощности в силовой цепи асинхронного электропривода, системе электроснабжения и тем самым повысить КПД электротехнического комплекса (ЭТК).

Известно, что потери активной мощности пропорциональны квадрату тока двигателя

$$\Delta P = m \cdot I_1^2 \cdot R_Э, \qquad (3)$$

где $R_Э$ – эквивалентное сопротивление фазы силовой цепи электропривода и системы электроснабжения.

Снижение потерь активной мощности в силовой цепи электроприводов на основе ТАД и ЭАД и системе электроснабжения определяется выражением

$$\Delta P, \% = \left(\frac{\Delta P_{ТАД} - \Delta P_{ЭАД}}{\Delta P_{ТАД}} \right) \cdot 100\%, \qquad (4)$$

или с учетом выражения (3)

$$\Delta P, \% = \left(\frac{I_{ТАД}^2 - I_{ЭАД}^2}{I_{ТАД}^2} \right) \cdot 100\%. \qquad (5)$$

Для ТАД и ЭАД 5А200L8У3 снижение потерь активной мощности в силовой цепи электропривода и системе электроснабжения при номинальных токах составляет

$$\Delta P, \% = \left(\frac{44{,}8^2 - 37{,}6^2}{44{,}8^2} \right) \cdot 100\% = 29{,}5\%.$$

С учетом выражений (1)–(5), физического смысла КПД и некоторых алгебраических преобразований величина КПД электротехнического комплекса, содержащего асинхронные двигатели, в относительных единицах, количественно оценивается соотношением вида [10]

$$\eta_{ЭТК} = \frac{k_З}{(k_З + k_П + k_{ПП})} + \\ + \frac{k_З}{k_З^2 \left(\frac{\eta_Н \cos\varphi_Н}{\cos\varphi} \right)^2 \left(\frac{1}{\eta_Н} - 1 - k_П + k_{СЦ} \right)}, \qquad (6)$$

где $k_П$ – коэффициент постоянных потерь мощности в ТАД или ЭАД; $k_{ПП}$ – коэффициент потерь мощности в полупроводниковых преобразователях (преобразователях частоты, тиристорных преобразователях напряжения); $k_{СЦ}$ – коэффициент потерь мощности в силовой цепи электропривода и системе электроснабжения.

Например, для сравниваемых электродвигателей при $k_З$ =1,0, $k_п$ = 0,05; $k_{пп}$ = 0,03; $k_{сц}$ = 0,14 коэффициент полезного действия ЭТК составляет:

– для традиционного двигателя $\eta_{ЭТКТАД}$ =0,769;

– для энергосберегающего двигателя $\eta_{ЭТКЭАД}$ =0,814.

Повышение КПД электротехнического комплекса на основе ЭАД по сравнению с аналогичным КПД на основе ТАД определяется разностью

$$\Delta\eta_{ЭТК} = \eta_{ЭТКЭАД} - \eta_{ЭТКТАД}, \qquad (7)$$

или для сравниваемых двигателей повышение КПД ЭТК составляет:

$$\Delta\eta_{ЭТК} = 0{,}814 - 0{,}769 = 0{,}045,$$

то есть КПД ЭТК на основе применения ЭАД повышается на 4,5 %.

Экономия электрической энергии ΔW, кВт·ч, от повышения КПД электротехнического комплекса на основе применения ЭАД определяется уравнением

$$\Delta W = \Delta\eta_{ЭТК} \cdot P_{2Н} \cdot T \cdot k_И \cdot N, \qquad (8)$$

где $P_{2Н}$ – номинальная мощность электродвигателя, кВт; T – количество часов в году; $k_И$ – коэффициент использования электропривода, о.е.;

N – число электродвигателей.

Для сравниваемых двигателей экономия электрической энергии при $k_И$=0,85, N=1 составляет

$$W = 0{,}045 \cdot 22 \cdot 8760 \cdot 0{,}85 \cdot 1{,}0 = 7372 \text{ кВт} \cdot \text{ч}.$$

Таким образом, по уравнениям (6)–(8) можно оценивать техническую эффективность модернизации ТАД в ЭАД.

Задача 2. Разработка программного комплекса для оценки затрат на капитальный ремонт и модернизацию асинхронного двигателя с повышением его класса энергоэффективности.

На основе описанных технологических операций традиционного ремонта и ремонта с повышением класса энергоэффективности разработан программный комплекс [11–12]. Программный комплекс позволяет рассчитывать и оптимизировать затраты трудовых и материальных ресурсов на капитальный ремонта ТАД и модернизацию ТАД в ЭАД с повышением его класса энергоэффективности. В основу программного комплекса положены модели стоимости трудовых и материальных ресурсов в виде уравнений:

$$C_{Tij} = T_{ij} \cdot Ц_j \cdot k_g; \quad (9)$$

$$C_{mi} = P_{mi} \cdot Ц_j \cdot k_j, \quad (10)$$

где C_{Tij} – стоимость трудозатрат на выполнение i-й операции j-м специалистом, руб.; T_{ij} – время выполнения i-й технологической операции j-м специалистом, час; $Ц_j$ – цена рабочего времени j-го специалиста, руб./ч; k_g –коэффициент трудоемкости, зависящий от веса двигателя; C_{mi} – стоимость материальной затраты на выполнение i-й операции; P_{mi} –материальный ресурс (м^2, м, кг); $Ц_j$ – средняя цена материального ресурса; k_j – расходный коэффициент материального ресурса.

Полная стоимость затрат C (руб.) на капитальный ремонт или модернизацию ТАД в ЭАД определяется суммой стоимостей трудовых и материальных затрат

$$C = \sum C_{Tij} + \sum C_{Mi}. \quad (11)$$

Задача 3. Обоснование экономической целесообразности модернизации асинхронного двигателя с повышением его класса энергоэффективности.

Модернизация асинхронного двигателя с повышением класса его энергоэффективности целесообразна, если дополнительные затраты на модернизацию окупаются стоимостью сэкономленной электрической энергии. Срок окупаемости $С_О$ дополнительных затрат на модернизацию ТАД в ЭАД определяется известным отношением

$$С_О = \frac{С_{ЭАД} - С_{ТАД}}{Э}, \quad (12)$$

где $С_{ЭАД}$ – полные затраты на модернизацию ТАД в ЭАД; $С_{ТАД}$ – полные затраты на капитальный ремонт ТАД, руб.; Э=ΔW·Ц – стоимость сэкономленной электрической энергии, руб.; Ц – цена электроэнергии руб/кВт·ч.

Если срок окупаемости дополнительных затрат получается меньше нормативного срока окупаемости, принимается решение о модернизации ТАД в ЭАД.

Рассмотрим практическое применение разработанной методики технико-экономического обоснования на конкретном примере.

Пример. Планируется капитальный ремонт традиционного асинхронного двигателя типа 5A200L8Y3 с классом энергоэффективности IE1 и его модернизацию в ЭАД. Исходные данные: электродвигатель нефтяной качалки $P_{2Н}$=22 кВт, $n_Н$ = 725 об/мин, $U_{1Н}$=220/380, $\eta_{ЭНТАД}$=0,885, $\cos\varphi_{НТАД}$=0,84 модернизируется в ЭАД $P_{2Н}$=22 кВт, $n_Н$=725 об/мин, $U_{1Н}$=220/380, $\eta_{НЭАД}$=0,905, $\cos\varphi_{НЭАД}$=1,0.

Требуется определить:

- дополнительные затраты на модернизацию ТАД в ЭАД;
- экономию электрической энергии ΔW;
- стоимость сэкономленной электрической энергии в год в электротехническом комплексе (ЭТК) «куста» из N=4 нефтяных качалок при цене электрической энергии Ц = 3 руб./кВт·ч, коэффициентах загрузки электропривода в диапазоне $k_З$=0,25–1,25 с шагом 0,25, коэффициенте использования технологического оборудования $k_И$=0,85;
- срок окупаемости дополнительных затрат на модернизацию ТАД в ЭАД.

Дополнительные исходные данные. Расчеты выполнить для значений коэффициентов, характеризующих силовую цепь электропривода и системы электроснабжения: $k_п$ = 0,05; $k_{пп}$ = 0,03; $k_{сц}$ = 0,14. Полученные результаты сравнить с эффективностью электропривода на основе применения ТАД с классом энергоэффективности IE2. Величины КПД и коэффициентов мощности, соответствующие коэффициентам загрузки электродвигателей ТАД, ЭАД класса IE1 и ТАД класса IE2, представлены в **табл. 1**.

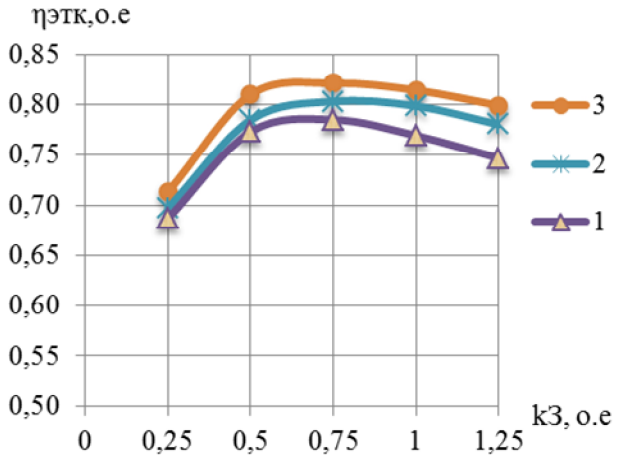
Таблица 1

Зависимости КПД и коэффициента мощности электродвигателей от коэффициента загрузки

Параметр, о.е.	Вариант электровигателя														
	ТАД IE1					ТАД IE2					ЭАД IE1				
kз	1,25	1	0,75	0,5	0,25	1,25	1	0,75	0,50	0,25	1,25	1	0,75	0,5	0,25
η	0,885	0,885	0,9	0,9	0,875	0,905	0,91	0,91	0,905	0,90	0,90	0,905	0,905	0,9	0,87
Cosφ	0,84	0,84	0,82	0,75	0,54	0,87	0,87	0,84	0,76	0,54	1	1	1	1	0,7

Решение задачи. С учетом выражений (6)–(8) и исходных данных вычислены КПД ЭТК «куста» нефтяных качалок с учетом потерь мощности в силовой части электропривода, частотных преобразователях и системе электроснабжения участка нефтепромысла на основе применения ТАД и ЭАД класса IE1 и ТАД класса IE2. Графики КПД ЭТК вариантов электропривода нефтяной качалки представлены на **рисунке**.

Из анализа приведенных графиков $\eta_{ЭТК}(к_З)$ следует, что при реальных коэффициентах загрузки от 0,5 до 1,0 повышение КПД ЭТК на основе ЭАД класса IE1 по сравнению с электроприводом на основе ТАД IE1 составляет не менее 4,5 %, а по сравнению с электроприводом на основе ТАД класса IE2 повышение КПД составляет в среднем 1,8 %.



Графики КПД ЭТК вариантов электропривода нефтяной качалки: 1 – КПД ЭТК на основе ТАД класса IE1; 2 – КПД ЭТК на основе ТАД класса IE2; 3 – КПД ЭТК на основе ЭАД, модернизированного из ТАД класса IE1

Сравнительный анализ графиков КПД ЭТК показывает, что электропривод на основе ЭАД класса IE1 превосходит по энергоэффективности электропривод на основе ТАД класса IE2. Электропривод на основе ЭАД класса IE1 по энергоэффективности практически эквивалентен электроприводу на основе ТАД класса IE3, выполненнму с увеличенной массой активных материалов – электротехнической стали и меди.

Главный технический эффект от модернизации ТАД в ЭАД проявляется в экономии электрической энергии. Например, для куста из 4 нефтяных качалок экономия электрической энергии составляет:

$$\Delta W = \Delta\eta_{ЭП} \cdot P_{2H} \cdot T \cdot k_И \cdot N =$$
$$= 0{,}045 \cdot 22 \cdot 8760 \cdot 0{,}85 \cdot 4 = 29488 \text{ кВт} \cdot \text{ч}.$$

То есть каждый киловатт установленной мощности ЭАД позволяет в год экономить электрическую энергию

$$w = \frac{\Delta W}{P_{2H} \cdot N} = \frac{29488}{22 \cdot 4} = 335 \text{ кВт} \cdot \text{ч}.$$

Экономический эффект от модернизации ТАД в ЭАД:

$$Э = \Delta W \cdot Ц = 29488 \cdot 3{,}0 = 88464 \text{ руб}.$$

Результаты расчета полной стоимости затрат на капитальный ремонт ТАД класса IE1 и модернизацию его в ЭАД представлены в **табл. 2**.

Таблица 2

Расчет затрат на капитальный ремонт ТАД и модернизацию ТАД в ЭАД

Тип двигателя	Вид ремонта	Стоимость затрат, руб.	Доп. затраты, руб.
5A200L8Y3 (ТАД)	Традиционный капитальный	24398	нет
5A200L8Y3 (ЭАД)	Капитальный с модернизацией	31782	7394

Анализ **табл. 2** показывает, что дополнительные затраты ΔС на модернизацию одного ТАД в ЭАД составляют

$$\Delta C = C_{ЭАД} - C_{ТАД} = 31782 - 24398 = 7384 \text{ руб}.$$

Дополнительные затраты обусловлены выполнением следующих новых технологических операций, а также приобретением дополнитель-

ных комплектующих и материалов:

• инструментальная оценка состояния магнитопровода статора;

• выполнение электромагнитного расчета с целью определения новых обмоточных данных ЭАД и емкости компенсирующего конденсатора, моделирование ожидаемых механических, рабочих и энергетических характеристик ЭАД;

• изготовление и укладка в пазы статора компенсационной обмотки, расход дополнительных изоляционных материалов;

• приобретение конденсаторов и изготовление блока компенсирующих конденсаторов;

• инструментальное исследование механических, рабочих и энергетических характеристик ЭАД.

Срок окупаемости дополнительных затрат на модернизацию одного ТАД в ЭАД с повышением класса энергоэффективности составляет

$$C_O = \frac{\left(C_{ЭАД} - C_{ТАД}\right) \cdot N}{Э} = \frac{7384 \cdot 4}{88464} = 0{,}34 \text{ года.}$$

Заключение

1. Разработана методика обоснования технической целесообразности модернизации традиционного асинхронного двигателя с повышением его класса энергоэффективности при капитальном ремонте.

2. Разработан программный комплекс для оценки затрат на традиционный капитальный ремонт и ремонт асинхронного двигателя с повышением его класса энергоэффективности.

3. Выполнено обоснование экономической целесообразности модернизации традиционного асинхронного двигателя с повышением его класса энергоэффективности. Исследования и практика показали, что дополнительные затраты на модернизацию ТАД в ЭАД окупаются экономией электрической энергии за 0,25–0,8 года в зависимости от номинальной мощности и режимов работы электропривода.

4. Создание, внедрение и исследование опытно-промышленных образцов ЭАД мощностью 0,25–55 кВт, напряжением до 1000 В на электроприводах вентиляторов, насосов, нефтяных качалок, волочильных станов показало, что каждый киловатт установленной мощности модернизированного асинхронного двигателя позволяет экономить в год от 350 до 700 кВт·ч электроэнергии.

5. Результаты разработки и исследований рекомендуются главным энергетикам, специалистам электромашиностроительных и электроремонтных предприятий, а также службам энергоаудита.

Список литературы

1. Об энергосбережении и о повышении энергетической эффективности и о внесении изменении в отдельные законодательные акты Российской Федерации. М.: ООО «Рид Групп», 2012. 80 с. (Новейшее законодательство).
2. Мугалимов Р.Г. Асинхронные двигатели с индивидуальной компенсацией реактивной мощности и электроприводы на их основе: монография. Магнитогорск: МГТУ, 2011. 250 с.
3. Мугалимов Р.Г. Моделирование энергоэффективности электроприводов насосных агрегатов на основе асинхронных двигателей с индивидуальной компенсацией реактивной мощности // Приводная техника. 2011. №1. С. 3–9.
4. Мугалимов Р.Г. Экспериментальные исследования энергоэффективности нерегулируемых электроприводов насосных агрегатов на основе асинхронных двигателей с индивидуальной компенсацией реактивной мощности // Приводная техника, 2011. №2. С. 2–8.
5. Мугалимов Р.Г., Мугалимова А.Р. Концепция повышения энергоэффективности асинхронных двигателей и электроприводов на их основе // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2011. №1. С. 59–63.
6. Мугалимов Р.Г., Мугалимова А.Р. Моделирование показателей энергоэффективности вариантов электроприводов промышленных установок на основе применения традиционных и компенсированных асинхронных двигателей // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2011. №2. С. 59–64.
7. Мугалимов Р.Г., Косматов В.И., Мугалимова А.Р. Метод и алгоритм проектирования компенсированного энергосберегающего асинхронного двигателя // Сб. материалов 5-й междунар. (16-й Всероссийской) науч. конф. СПб., 2007. С. 281–284.
8. Мугалимов Р.Г., Мугалимова А.Р. К проектированию энергосберегающего асинхронного двигателя с индивидуальной компенсацией реактивной мощности // Электромеханические и электромагнитные преобразователи энергии и управляемые энергомеханические системы: тр. 3 междунар. науч.-техн. конф. Екатеринбург: УГТУ-УПИ, 2007. С. 77–80.
9. Мугалимова А.Р., Боков А.И., Храмшин Р.Я. Аппаратно-программный комплекс для экспресс-оценки энергоэффективности асинхронных электроприводов// Приводы и компоненты машин. 2015. №2. С. 10–13.
10. Мугалимов Р.Г., Мугалимова А.Р. Сравнительная оценка класса энергоэффективности асинхронных двигателей и электротехнических комплексов с их применением // Электротехнические системы и комплексы. 2016. №4(33). С. 14–19.
11. Мугалимов Р.Г., Мугалимова А.Р., Закирова Р.А. Алгоритм оптимизации ремонта и модернизации асинхронных двигателей с повышением класса энергоэффективности // Машиностроение: сетевой электронный научный журнал 2016. Т.4. №2.С. 64–68. Режим доступа: http://www.indust-engineering.ru.
12. Мугалимов Р.Г., Закирова Р.А., Мугалимова А.Р. Программный комплекс для расчета и оптимизации себестоимости традиционного капитального ремонта и ремонта с повышением класса энергоэффективности асинхронных электродвигателей: свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2016610278. Зарегистрирован в Реестре программ для ЭВМ 11.01.2016 г.

Поступила 04.04.17.
Принята в печать 15.05.17.

INFORMATION ABOUT THE PAPER IN ENGLISH

https://doi.org/10.18503/1995-2732-2017-15-2-101-109

FEASIBILITY STUDY: OVERHAUL OF INDUCTION MOTORS WITH ENERGY EFFICIENCY ENHANCEMENT

Rif G. Mugalimov – D.Sc. (Eng.), Associate Professor
Nosov Magnitogorsk State Techical University, Magnitogorsk, Russia. E-mail: Energosberegenie@rambler.ru

Inna I. Barankova – D.Sc. (Eng.), Professor
Nosov Magnitogorsk State Techical University, Magnitogorsk, Russia.

Regina A. Zakirova – Undergraduate Student
Nosov Magnitogorsk State Techical University, Magnitogorsk, Russia. E-mail: Regina_174@mail.ru

Aliya R. Mugalimova – Ph.D. (Eng.), Undergraduate Student
Nosov Magnitogorsk State Techical University, Magnitogorsk, Russia. E-mail: Energosberegenie@rambler.ru

Ulyana V. Mikhaylova – Ph.D. (Eng.), Associate Professor
Nosov Magnitogorsk State Techical University, Magnitogorsk, Russia.

Gennadiy V. Nikiforov – D.Sc. (Eng.)
Semmering, Austria. E-mail: alexxnik@hotmail.com

Abstract
This article describes a procedure of overhauling an induction motor while making it more energy efficient, as well as a calculation method for estimating the costs incurred for such overhaul. The article describes both a conventional overhaul procedure and a repair procedure that also involves enhancing the motor energy efficiency. Mathematical formulas are given for calculating the labour and material costs necessary for repair and optimization of induction motors. The authors conducted a feasibility study demonstrating the cost-effectiveness of overhauling an induction motor while at the same time increasing its energy efficiency. The article relies on an algorithm and a computer program designed for labour and material costs estimation with regard to the conventional overhaul procedure and the one involving efficiency enhancement. It is shown that the latter can increase the efficiency factor and reduce the active power loss by 3-7% in the electric drive and the power supply system. Simulation data and the actual practice show that the additional optimization costs amount to 23-30% of the conventional overhaul costs. However, such additional upgrade costs can be justified within 0.25 to 0.8 years due to power savings. The results of this R&D project can be recommended for review by electrical departments of the running plants, electrical repair shops and energy efficiency centres.

Keywords: Induction motor, procedure, repair, upgrade, operations, labour, materials, modeling, algorithm, computer program, energy efficiency, cost-effectiveness, payback period.

References

1. On energy saving and on improved energy efficiency and on amendments to certain laws of the Russian Federation. Moscow: Rid Grupp LLC, 2012, 80 p. (Recent legislation).
2. Mugalimov R.G. *Asinkhronnye dvigateli s individualnoy kompensatsiey reaktivnoy moshchnosti i elektroprivody na ikh osnove: Monografiya* [Inductions motors with PFC and electric drives designed on their basis: Monograph]. Magnitogorsk: NMSTU, 2011, 250 p. (In Russ.)
3. Mugalimov R.G. Modelling of energy efficiency of electric pump drives designed with inductions motors with PFC. *Privodnaya tekhnika* [Drives], 2011, no. 1, pp. 3–9. (In Russ.)
4. Mugalimov R.G. Experimental study of the energy efficiency of fixed speed pump drives designed with inductions motors with PFC. *Privodnaya tekhnika* [Drives], 2011, no. 2, pp. 2–8.
5. Mugalimov R.G., Mugalimova A.R. The concept of inductions motors with enhanced energy efficiency and electric drives designed on their basis. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University], 2011, no. 1, pp. 59–63. (In Russ.)
6. Mugalimov R.G., Mugalimova A.R. Simulating the energy efficiency parameters of various types of industrial drives using conventional and compensated induction motors. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University], 2011, no. 2, pp. 59–64. (In Russ.)
7. Mugalimov R.G., Kosmatov V.I., Mugalimova A.R. The method and the algorithm of designing compensated energy efficient induction motors. *Sb. materialov 5-y mezhdunar. (16-y Vserossiyskoy) nauch. konf.* [Proceedings of the 5th International (16th All-Russian) Scientific Conference]. St. Petersburg, 2007, pp. 281–284. (In Russ.)
8. Mugalimov R.G., Mugalimova A.R. On design of an energy efficient induction motor with PFC. *Elektromekhanicheskie i elektromagnitnye preobrazovateli energii i upravlyaemye energomekhanicheskie sistemy: tr. 3 mezhdunar. nauch.-tekhn. konf.* [Electromechanical and electromagnetic energy converters and controlled electromechanical systems: Proceedings of the 3rd International Scientific Conference]. Yekaterinburg: Ural State Technical University-Ural Polytechnic Institute, 2007, pp. 77–80. (In Russ.)
9. Mugalimova A.R., Bokov A.I., Khramshin R.Ya. Software and hardware package for express-testing the energy efficiency of

induction motors. *Privody i komponenty mashin* [Drives and machine components], 2015, no. 2, pp. 10–13. (In Russ.)

10. Mugalimov R.G., Mugalimova A.R. Comparison of induction motors and electrical equipment designed on their basis in terms of energy efficiency. *Elektrotekhnicheskie sistemy i kompleksy* [Electrical systems and plants], 2016, no. 4(33), pp. 14–19. (In Russ.)
11. Mugalimov R.G., Mugalimova A.R., Zakirova R.A. Optimization algorithm for overhauling and upgrading induction motors making them more energy efficient. *Mashinostroenie: setevoy elektronniy nauchnyi zhurnal* [Russian Internet Journal of Industrial Engineering]. 2016, vol. 4, no. 2, pp. 64-68. Available at: http://www.indust-engineering.ru.
12. Mugalimov R.G., Zakirova R.A, Mugalimova A.R. *Programmny kompleks dlya rascheta I optimizatsii sebestoimosti traditsionnogo kapitalnogo remonta I remonta s povysheniem klassa energoeffektivnosti asinkhronnykh elektrodvigateley* [A software programme for estimation and optimization of costs incurred by conventional induction motor overhaul and induction motor overhaul with efficiency upgrade]. Registration certificate no. 2016610278, 2016.

Received 04/04/17
Accepted 15/05/17

Образец для цитирования

Технико-экономическое обоснование целесообразности капитального ремонта асинхронных двигателей с повышением их класса энергоэффективности / Мугалимов Р.Г., Баранкова И.И., Закирова Р.А., Мугалимова А.Р., Михайлова У.В., Никифоров Г.В. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2017. Т.15. №2. С. 101–109. https://doi.org/10.18503/1995-2732-2017-15-2-101-109

For citation

Mugalimov R.G., Zakirova R.A., Mugalimova A.R., Barankova I.I., Mikhaylova U.V., Nikiforov G.V. Feasibility study: overhaul of induction motors with energy efficiency enhancement. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2017, vol. 15, no. 2, pp. 101–109. https://doi.org/10.18503/1995-2732-2017-15-2-101-109