

ЭНЕРГЕТИКА МЕТАЛЛУРГИИ, ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЕ И ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ КОМПЛЕКСЫ

УДК 621.333

<https://doi.org/10.18503/1995-2732-2018-16-3-145-159>

ПОВЫШЕНИЕ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ И РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ ПРИ КАПИТАЛЬНОМ РЕМОНТЕ, МОДЕРНИЗАЦИИ И УТИЛИЗАЦИИ ДВИГАТЕЛЕЙ АСИНХРОННЫХ ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ

Мугалимов Р.Г., Закирова Р.А., Мугалимова А.Р., Одинцов К.Э.

Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия

Аннотация

Описано состояние проблемы повышения энергоэффективности и ресурсосбережение при капитальном ремонте асинхронных двигателей. Решаются задачи по совершенствованию технологии традиционного капитального ремонта и модернизации существующих асинхронных двигателей. Решение достигается путем разработки методики и аппаратного средства для экспресс-инструментальной оценки реального состояния электротехнической стали статора электрической машины, а также разработкой математической модели для программного средства, позволяющего оценивать экономическую целесообразность принятия решения о капитальном ремонте, модернизации или утилизации асинхронных двигателей. Приведено научное обоснование методики оценки магнитных свойств электротехнической стали статоров ремонтируемых двигателей. В статье приводятся методика и электрическая схема определения величины намагничивающего тока и намагничивающего напряжения для экспериментальной оценки магнитных свойств сердечника статора. Даны критерии для оценки качества электротехнической стали статора ремонтируемого двигателя. В качестве критерии приняты ток и напряжение намагничивания сердечника статора, потери активной мощности в сердечнике статора, сдвиг начальных фаз тока и напряжения намагничивания, несинусоидальность тока намагничивания. Приведены математические модели для определения проектных величин тока намагничивания, магнитной индукции, магнитного напряжения, магнитного потока и числа эффективных витков обмотки статора ремонтируемого двигателя. Путем сравнения проектных величин и реальных показателей состояния магнитной системы двигателя предлагается осуществлять пересчет обмоточных данных статора с целью сохранения или повышения энергоэффективности электрической машины. В статье показано, что при несоответствии главных показателей качества магнитной системы электрической машины приведенным критериям, полученным в результате экспериментальных исследований, электрическая машина подлежит утилизации. Приведены математические модели для экономической оценки утилизации асинхронных двигателей с разборкой и сортировкой его элементов. Результаты исследований рекомендуются специалистам электроремонтных предприятий.

Ключевые слова: энергоэффективность, ресурсосбережение, асинхронный двигатель, сердечник статора, ремонт и модернизация асинхронных двигателей, утилизация, ресурсы материальные, экономическая эффективность.

Введение

Состояние проблемы. В реальном секторе экономики РФ эксплуатируется не менее 180 млн единиц общепромышленных асинхронных двигателей (АД), из них около 90% мощностью от 5 до 100 кВт, номинальным напряжением до 1000 В [1]. Асинхронный электропривод промышленных предприятий потребляет не менее

65% вырабатываемой в РФ электроэнергии [2]. При среднегодовом объеме производства электроэнергии 1,1 трлн кВт·ч промышленный асинхронный электропривод потребляет в год около 715 млрд кВт·ч электроэнергии, W_{AD} . То есть при среднем коэффициенте использования технологического оборудования $K_u = 0,6$ и среднем коэффициенте загрузки электроприводов $K_3 = 0,8$ установленная эквивалентная мощность $P_{\text{Э}}$ асинхронных двигателей составляет не менее

© Мугалимов Р.Г., Закирова Р.А., Мугалимова А.Р.,
Одинцов К.Э., 2018

$$P_3 = \frac{W_{AD}}{K_u \cdot K_3 \cdot T} = \\ = \frac{715 \cdot 10^9}{0,6 \cdot 0,8 \cdot 8,76 \cdot 10^3} = 170 \text{ млн кВт},$$

где Т = 8760 – количество часов в году.

Анализ каталогов, справочных данных по АД, с учетом номинальной частоты вращения ротора и номинального напряжения, показывает [3, 4]:

- электрический коэффициент полезного действия, η находится в диапазоне 75 ÷ 90%, в среднем $\eta_{cp} = 0,825$ о.е.;
- коэффициент мощности $\cos\phi$ составляет 0,8 ÷ 0,9, в среднем $\cos\phi_{cp} = 0,85$ о.е.;
- вес одного кВт установленной мощности АД находится в диапазоне 7,5 ÷ 9,0 кг/кВт, в среднем $G_{cp} = 8,25$ кг/кВт.

Потери активной мощности в эквивалентном асинхронном двигателе составляют

$$\Delta P_3 = P_3 (1 - \eta_{cp}) = \\ = 170 \cdot 10^6 \cdot (1 - 0,825) = 29,75 \text{ млн кВт},$$

а потери электрической энергии в силовой части электроприводов определяются величиной

$$\Delta W_3 = \Delta P_3 \cdot T \cdot K_u \cdot K_3 = 125 \text{ млрд кВт}\cdot\text{ч},$$

в том числе из-за сравнительно низкого $\cos\phi_{cp}$, то есть из-за потребления реактивной мощности (тока), потери энергии оцениваются величиной

$$\Delta W_{3Q} = \Delta W_3 \sqrt{1 - \cos\phi_{cp}^2} = 65,85 \text{ млрд кВт}\cdot\text{ч}.$$

Стоимость потерянной электроэнергии ΔC , только в АД, без учета потерь в системе электроснабжения, при средней цене $\Pi = 4,0$ руб./кВт·ч оценивается значением

$$\Delta C = \Delta W_3 \cdot \Pi = 125 \cdot 10^9 \cdot 4,0 = 500 \text{ млрд руб.}$$

Вес эквивалентной мощности установленных асинхронных двигателей G промышленных предприятий РФ определяется величиной

$$G = P_3 \cdot G_{cp} = \\ = 170 \cdot 10^6 \cdot 8,25 \cdot 10^{-3} = 1,40 \text{ млн т.}$$

Исследования и экспертные оценки специалистов показывают, что ежегодно от 4 до 7%

парка АД обновляется, проходит капитальный ремонт и модернизируется, а не менее 0,5–0,7% утилизируются из-за разрушения или ухудшения конструкционных элементов и магнитных свойств электротехнической стали статора (рис. 1) [5].



Рис. 1. Свалка асинхронных двигателей

При существующей технологии капитального ремонта АД, предусматривающего извлечение неисправной обмотки статора из его пазов после отжига статора при температуре 360–380°C, ухудшаются магнитные свойства электротехнической стали. Кроме того, при коротких замыканиях в обмотке, находящейся в пазу, возможны локальные оплавления паза, извлечение обмотки из пазов статора часто сопровождается нарушением их геометрии. Устранение оплавленных мест, правка пазов требуют затраты трудовых ресурсов.

В большинстве случаев, при капитальном ремонте АД, новая обмотка статора изготавливается по обмоточным данным исходного двигателя или данным завода-изготовителя без учета реальных, как правило, ухудшенных свойств магнитопровода статора, обусловленного его нагревом (отжигом) перед извлечением из пазов статора прежней обмотки, а также локальных оплавление пазов из-за витковых коротких замыканий обмотки. Поэтому после ремонта двигателя его рабочие и механические характеристики всегда получаются хуже характеристик исходного двигателя, т.е. увеличивается потребляемая мощность, уменьшаются полезная мощность, врачающий момент и КПД, и АД становится энергорасточительным. За средний срок службы АД (22 ÷ 25 лет) он проходит от 3 до 7 капитальных ремонтов [6]. Каждый капитальный

ремонт АД ведет к снижению КПД от 0,5 до 1,5%, что через 3–4 ремонта уменьшает его КПД на 3,5–6%. Из-за снижения КПД и увеличения потерь мощности в двигателе от ремонта к ремонту снижается ресурс, срок службы и энергоэффективность асинхронного электропривода. Например, специалисты США отмечают, что даже небольшое уменьшение КПД АД вызывает значительное увеличение расходов предприятия [7].

Снижение КПД после капитального ремонта асинхронного двигателя, выполненного без учета реального состояния магнитной системы машины, приводит к дополнительному увеличению потерь:

- активной мощности в эквивалентном АД

$$\Delta P_{\text{эдоп}} = P_3 \cdot D_{\text{cp}} \cdot \Delta \eta_{\text{cp}} = \\ = 170 \cdot 10^6 \cdot 0,055 \cdot 0,01 = 93500 \text{ кВт},$$

где $D_{\text{cp}} = (0,04 + 0,07) / 2 = 0,055$ о.е. – доля ремонтируемых АД; $\Delta \eta_{\text{cp}} = (0,005 + 0,015) / 2 = 0,01$ о.е. – среднее снижение КПД после капитального ремонта;

- ежегодно увеличиваются потери электроэнергии

$$\Delta W_{\text{эдоп}} = \Delta P_{\text{эдоп}} \cdot T \cdot K_u \cdot K_s = \\ = 93500 \cdot 87600 \cdot 0,6 \cdot 0,8 = 393 \text{ млн кВт} \cdot \text{ч}.$$

Стоимость потерянной электроэнергии в год оценивается величиной

$$\Delta C_{\text{эдоп}} = \Delta W_{\text{эдоп}} \cdot \bar{\Gamma} = \\ = 393 \cdot 10^6 \cdot 4,0 = 1,57 \text{ млрд руб.}$$

Иногда капитальный ремонт АД сопровождается его модернизацией, например изменением или частоты вращения ротора, или номинального напряжения питания, или изменением одновременно частоты вращения и напряжения питания по методике, рекомендованной в [8]. Эта упрощенная методика модернизации предусматривает пересчет числа витков и диаметра обмоточного провода с учетом изменения числа пар полюсов и изменения номинального напряжения обмотки статора и не предусматривает пересчета обмоточных данных статора с учетом изменения (ухудшения) характеристик магнитной системы электрической машины. В результате такой модернизации рабочие и механические характеристики АД получаются хуже характеристик исходного двигателя, что технически и экономически неэффективно. Кроме того, в указанной методике отсутствуют рекоменда-

ции и технические решения по повышению энергоэффективности ремонтируемого или модернизируемого АД, в частности, по повышению электрического КПД (η) и коэффициента мощности ($\cos\varphi$), которые у асинхронных двигателей не превышают величины 0,8–0,85 о.е. [9,10]. Известно, что коэффициент мощности АД определяет величину энергетического КПД, $\eta_{\text{ЭН}}$, равного произведению [11]:

$$\eta_{\text{ЭН}} = \eta \cdot \cos\varphi = \frac{P_2}{P_1} \cdot \frac{P_1}{S_1} = \frac{P_2}{S_1},$$

где P_1, P_2, S_1 – соответственно потребляемая активная мощность, полезная мощность, потребляемая полная мощность электродвигателя.

От величины энергетического КПД зависит значение тока I_1 , потребляемого обмоткой статора из электросети, определяемого известным выражением

$$I_1 = \frac{P_2 \cdot 10^3}{m \cdot U_H \cdot \eta \cdot \cos\varphi} = \frac{P_2 \cdot 10^3}{m \cdot U_H \cdot \eta_{\text{ЭН}}},$$

где m – число фаз двигателя; U_H – номинальное фазное напряжение.

Например, для трехфазного асинхронного двигателя типа 4А160М8УЗ с номинальными данными [3]: $P_{2H} = 15 \text{ кВт}$, $U_H = 220 \text{ В}$, $\eta_H = 0,87$, $\cos\varphi_H = 0,82$, номинальный ток равен

$$I_{1H} = \frac{15 \cdot 10^3}{3 \cdot 220 \cdot 0,87 \cdot 0,82} = 31,85 \text{ А.}$$

Для этого же двигателя, модернизированного с повышением коэффициента мощности до $\cos\varphi = 1,0$, по методике [12] номинальный ток I_{1HM} равен

$$I_{1HM} = \frac{15 \cdot 10^3}{3 \cdot 220 \cdot 0,87 \cdot 1,0} = 26,12 \text{ А.}$$

То есть потребляемый ток из электросети обмоткой статора модернизированного двигателя с повышением $\cos\varphi$ до 1,0 уменьшается на величину

$$\Delta I_1 = \frac{I_{1H} - I_{1HM}}{I_{1H}} \cdot 100\% = 17,9\%.$$

При этом потеря активной мощности ΔP_M в силовой цепи модернизированного асинхронного электропривода и элементах системы электроснабжения, при прочих равных условиях,

уменьшаются на величину

$$\Delta P_M = \frac{I_{1H}^2 - I_{1HM}^2}{I_{1H}^2} \cdot 100\% = 32,7\%.$$

То есть повышение *cosφ* эквивалентного асинхронного электропривода путем компенсации реактивной мощности позволит уменьшить потери электрической энергии на величину

$$\Delta W_{QM} = \frac{\Delta W_Q \cdot \Delta P_M}{100\%} = 65,85 \cdot 10^9 \cdot 0,327 = \\ = 21,5 \text{ млрд кВт}\cdot\text{ч.}$$

Уменьшение потребляемого тока и потеря активной мощности в электротехническом комплексе, содержащем асинхронные электроприводы, объясняется компенсацией (уменьшением) реактивного тока (мощности) индуктивного характера реактивным током (мощности) емкостного характера, вносимого в магнитную систему компенсированного асинхронного двигателя.

Следует также отметить, что в случаях экономической нецелесообразности или невозможности капитального ремонта и модернизации АД, из-за физического состояния его конструктивных элементов или существенного снижения свойств главного активного элемента – магнитной системы, собственнику электрической машины рекомендуют ее списание и подготовку к утилизации. Однако собственник АД осуществляет утилизацию, как правило, путем сдачи двигателя в металлолом без его разборки, сортировки конструктивных и активных элементов и без экономической оценки принятого решения. Это обусловлено, преимущественно, отсутствием у него необходимого технологического оборудования для разборки элементов двигателя, специалистов, а также методики и современных программных средств для оценки затраченных трудовых, энергетических, финансовых и других ресурсов, т.е. отсутствием средств оценки экономической эффективности утилизации с разборкой и сортировкой элементов электрической машины. Вместе с тем утилизация АД без разборки и сортировки его элементов ведет к утрате дорогостоящих материальных ресурсов – электротехнической стали, меди, алюминия, латуни, бронзы, специальных марок стали подшипников и валов, созданных значительными затратами энергетических, трудовых, финансовых и других ресурсов не одного поколения людей. Кроме того, сдача АД в металлический лом без разборки и выемки цветных металлов для переплавки в металлургических агрегатах, как показывает

практика, загрязняет плавку и затрудняет получение запланированной марки стали.

С учетом изложенного, в данной работе сформулированы следующие главные технико-экономические проблемы существующей практики капитального ремонта, модернизации и утилизации АД:

1. Традиционная технология капитального ремонта АД, основанная на использовании исходных обмоточных данных двигателя или обмоточных данных завода-изготовителя, а также его модернизации по существующей методике, без инструментального исследования фактического состояния магнитопровода статора и пересчета обмоточных данных по реальным характеристикам электротехнической стали, а также без учета современных технологий модернизации, всегда ведет к снижению класса энергоэффективности электрической машины. Это ухудшает ее механические и рабочие характеристики, уменьшает КПД, и асинхронный электропривод от ремонта к ремонту двигателя становится все более энергорасточительным. Кроме того, затраты трудовых и материальных ресурсов на капитальный ремонт и модернизацию АД оцениваются достаточно приблизительно, без учета многих факторов, параметров и особенностей конкретного двигателя, т.е. по принципу – «от достигнутого», что не всегда является экономически обоснованным.

2. Подготовка к утилизации собственником АД осуществляется без технологической подготовки и достаточного экономического обоснования из-за отсутствия у него технических средств, методики и специальных компьютерных программ для экономической оценки принятого решения.

Целью данной работы является повышение энергоэффективности АД при традиционном капитальном ремонте и ремонте с модернизацией, а также сбережение материальных ресурсов в случае его утилизации.

Постановка задачи. Сформулированная цель достигается решением двух главных задач:

1. Совершенствование технологии традиционного капитального ремонта и модернизации существующих АД путем разработки методики и аппаратного средства для экспресс-инструментальной оценки реального состояния электротехнической стали статора электрической машины.

2. Разработка программного средства для оценки экономической целесообразности принятия решения о капитальном ремонте, модернизации и утилизации АД.

Критериями решения задачи являются:

1. Научное обоснование, инженерная методика и аппаратно-программное средство для инструментальной оценки реального состояния электротехнической стали статора, эксплуатируемого АД.

2. Программный комплекс для ЭВМ, позволяющий количественно оценивать экономическую целесообразность принятия решения о традиционном капитальном ремонте или о ремонте с модернизацией и повышением класса энергoeffективности АД, или его утилизации.

Решение первой задачи. Сущность технологии экспериментальной оценки магнитных свойств сердечника (активной стали) статора при капитальном ремонте и модернизации АД заключается в следующем:

1. После разборки двигателя, перед отжигом обмотки статора, отрезается и удаляется ее лобовая часть.

2. После отжига, до извлечения обмотки из пазов статора, определяются и регистрируются: число пазов статора Z_1 ; число пазов, приходящихся на полюс и одну фазу статора, q_1 ; тип и шаг обмотки u_1 .

3. Разбирается электрическая схема обмотки статора, при этом определяются и регистрируются: схема соединения фаз Δ / Y ; число параллельных ветвей a_1 ; число эффективных проводников в пазу $N_{1\text{ЭФ}}$; число элементарных проводников в одном эффективном проводнике n_1 ; число эффективных витков в фазе обмотки $W_{1\text{ЭФ}}$; диаметр голого обмоточного провода d_1 , мм.

4. После извлечения обмотки из пазов, чистки, правки и продувки сжатым воздухом сердечника статора измеряются и регистрируются его геометрические размеры, мм: диаметр наружный D_{1H} ; диаметр внутренний D_{1B} ; высота спинки h_{C1} и длина сердечника l_1 ; определяется форма паза и измеряются его базовые геометрические размеры; измеряется наружный диаметр ротора D_{2H} ; определяется величина воздушного зазора $\delta = (D_{1B} - D_{2H}) / 2$.

Если у АД сохранилась шильда-бирка завода-изготовителя, с указанными типом и номинальными данными, то по справочникам на АД сравниваются и уточняются ранее измеренные величины с соответствующими проектными величинами. Определяются проектные значения магнитной индукции в воздушном зазоре B_δ , Т, и обмоточные данные, а также плотность тока в обмотке статора j_1 , А/мм². Если у АД шильда-бирка завода-изготовителя не сохранилась или «не читается», то тип двигателя и его главные

номинальные параметры идентифицируются методом сравнения измеренных обмоточных данных и геометрических размеров магнитной системы с данными, приведенными в справочниках.

Следует отметить, что в настоящее время отечественные производители электрических машин, так же как и зарубежные производители, с целью сохранения интеллектуальной собственности на свои разработки не публикуют в открытой печати, справочниках и каталогах технические данные по параметрам активных элементов электрических машин. Однако их определение не является проблемой при капитальном ремонте или модернизации АД, так как проектирование новых двигателей, как правило, основано на опыте создания аналогичных электрических машин, электромагнитные параметры которых уже опубликованы в ранее изданных справочниках, например [3, 4]. Поэтому главные электромагнитные параметры «новых» АД могут отличаться незначительно от параметров ранее изготовленных двигателей таких же габаритов.

Исследования и опыт создания общепромышленных АД напряжением до 1000 В показывает, что среднее значение магнитной индукции, например в воздушном зазоре B_δ и в спинке статора B_{C1} , определяется величинами, приведенными на **рис. 2 и в таблице** [13,14].

5. После чистки и продувки сердечника статора сжатым воздухом визуально исследуется его техническое состояние, при этом обращается внимание на качество прессовки стальных листов и наличие оплавленных участков. Активная сталь должна быть спрессована так плотно, чтобы сила трения между ее отдельными листами исключала возможность даже незначительного перемещения листов относительно друг друга. Ослабленная прессовка выявляется наличием ржавых пятен на образующей расточки статора, являющихся результатом так называемой контактной коррозии. Ослабление прессовки при работе двигателя вызывает специфический шум, а сильное ослабление может вызывать вибрацию станины. При недостаточной плотности прессовки вибрация отдельных листов стали приводит к разрушению межлистовой изоляции – лакового покрытия, оксидной пленки. Значительная вибрация в зубцовой зоне сердечника статора представляет опасность для изоляции обмотки.

Повреждение обмотки статора сопровождается возникновением электрической дуги, которая может вызвать местное оплавление активной стали. Работа электрической машины с оплавлением стали недопустима из-за чрезмерного

нагрева этих мест и неизбежного повреждения обмотки, прилегающей к такому участку.

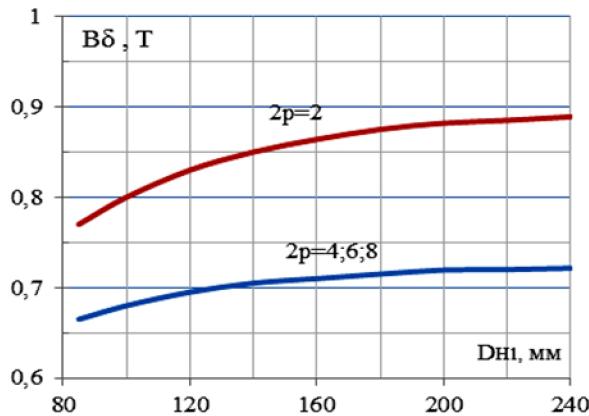


Рис. 2. Зависимость магнитной индукции от высоты оси вращения, номинального напряжения и числа пар полюсов электродвигателя

Значение магнитной индукции спинки статора от высоты оси вращения, номинального напряжения и числа пар полюсов электродвигателя

Высота оси вращения h , мм	Номинальное напряжение U , В	Число пар полюсов $2p$	Магнитная индукция спинки статора B_{c1} , Т, для общепромышленных двигателей
50–132	≤ 660	2,4	1,50 – 1,65
		6	1,45 – 1,60
		8	1,20 – 1,35
160 – 250	≤ 660	2,4	1,45 – 1,60
		6	1,35 – 1,50
		8	1,10 – 1,20
280 – 355	≤ 660	2, 4, 6	1,35 – 1,50
		8, 10	1,30 – 1,45
		12	1,15 – 1,30

Выявленные видимые неисправности устраняются известными способами: ослабление прессовки – подтяжкой нажимных шайб, прессующих листы стали или забивкой между листами изоляционных уплотняющих клиньев; оплавленные участки стали вырубаются и обрабатываются, листы стали раздвигаются и между ними закладывается изоляционный материал, после чего покрываются электротехническим лаком. Если устранение видимых неисправностей сердечника статора невозможно или экономически нецелесообразно, электрическую машину рекомендуют к утилизации.

6. После визуального исследования и ремонта проблемных участков проводят экспериментальное испытание активной стали статора. Це-

лью испытания является: проверка отсутствия замыкания между листами сердечника и вызванных ими локальных перегревов; определение фактических потерь активной мощности в сердечнике статора; определение реальной величины магнитной индукции в спинке сердечника и фактической величины магнитного потока двигателя при номинальном токе намагничивания обмотки статора; выработка рекомендаций по пересчету обмоточных данных для капремонта и(или) модернизации АД; принятие решения о ремонте, модернизации или утилизации электрической машины.

Испытание ферромагнитного сердечника статора производится индукционным методом на двигателе с вынутым (извлеченным из расточки статора) ротором по схеме на рис. 3. На рисунке: С – статор АД; W_1 – намагничивающая обмотка; W_2 – измерительная обмотка; QF – автоматический выключатель; T_1 – автотрансформатор; T_2 – трансформатор намагничивающий; V_1 , V_2 – вольтметры; А – амперметр; W – ваттметр; T_3 – трансформатор тока измерительный; Ш – шунт измерительный; D – данные электромагнитной системы АД; МЕ – измеренные электрические сигналы, пропорциональные напряжению, току намагничивания и магнитной индукции сердечника статора АД; 1 – аналого-цифровой преобразователь; 2 – ноутбук; 3 – осциллограф.

Для намагничивания сердечника статора ее спинка охватывается экспериментальной намагничивающей катушкой с небольшим числом витков $W_1 = 3 \div 5$, изолированным гибким проводом. Эффективная площадь сечения F провода выбирается из условия

$$F \geq (1.2 \div 1.5) \cdot I_{\text{нн}} / j_{\text{доп}},$$

где $I_{\text{нн}}$ – номинальный ток двигателя; $j_{\text{доп}}$ – допустимая плотность тока, $\text{А}/\text{мм}^2$; для медного провода $j_{\text{доп}} = 2 \div 3 \text{ А}/\text{мм}^2$; для алюминиевого провода $j_{\text{доп}} = (2 \div 3) / 1,6 \text{ А}/\text{мм}^2$.

Для измерения магнитной индукции в стали сердечника спинку статора охватывают измерительной катушкой с числом витков W_2 , концы которой подключаются к вольтметру V_2 электромагнитной системы и напряженческой обмотке ваттметра. Циферблат вольтметра градуируется в индукции магнитного поля, Т.

Рассмотрим сущность методики и приведем научное обоснование экспериментального испытания активной стали статора АД.

Одними из главных параметров, характери-

зующими состояниями электромагнитной системы, а следовательно, рабочие и механические характеристики АД, являются:

- номинальный ток намагничивания I_{Hm} обмотки статора;
- номинальное фазное напряжение $U_{1\text{H}}$;
- потери активной мощности в магнитной системе P_{Cl} ;
- статические и динамические вольт-амперные характеристики стали;
- сдвиг фазы между напряжением и током намагничивания, определяемый по соответствующим осциллограммам;
- несинусоидальность тока.

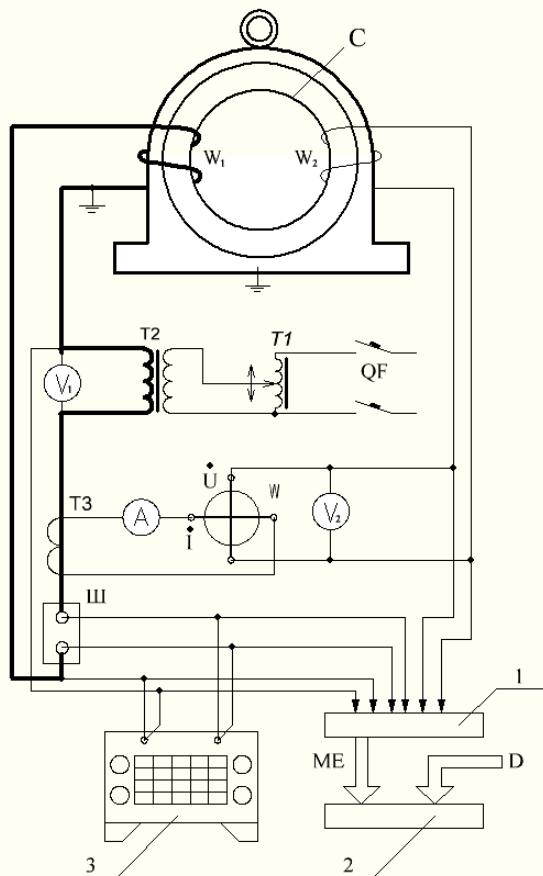


Рис. 3. Электрическая схема испытания сердечника статора АД

Для нового или заведомо исправленного АД определение тока намагничивания не является проблемой. На практике номинальный ток намагничивания принимают равным току холостого хода двигателя при номинальном фазном напряжении, то есть $I_{\text{Hm}} = I_{1\text{XX}}$. При проектировании АД номинальный ток намагничивания определяется, как правило, на один полюс по известной формуле [13]

$$I_{\text{Hm}} = \frac{2.22 \cdot F \cdot p}{m_1 \cdot W_{1\phi}}, \quad (1)$$

где $F = F_\delta + F_{31} + F_{32} + F_{c1} + F_{c2}$ – магнитное напряжение контура одного полюса; $F_\delta, F_{31}, F_{32}, F_{c1}, F_{c2}$ – магнитные напряжения, вызванные магнитным потоком на участках магнитного контура соответственно в воздушном зазоре, зубце статора, зубце ротора, спинке статора, спинке ротора; p – число пар полюсов двигателя; m_1 – число фаз; $W_{1\phi}$ – число эффективных витков фазы обмотки статора.

Проектную величину тока намагничивания производитель АД, как правило, в номинальных данных не указывает. Для двигателя, поступившего на капремонт с неисправной обмоткой статора, измерить величину тока холостого хода, равного току намагничивания, не представляется возможным. Поэтому определение величины тока намагничивания по уравнению (1), характеризующего состояние электромагнитной системы АД, является проблематичным, так как в уравнение (1) неизвестна величина магнитного напряжения контура F .

В предлагаемой методике инструментальной оценки реального состояния электротехнической стали статора величину тока намагничивания определяют через номинальные (катализные) данные с использованием Т-образной схемы замещения АД. В соответствии со схемой замещения и первым законом Кирхгофа комплекс номинального тока намагничивания определяется равенством

$$\vec{I}_{\text{Hm}} = \vec{I}_{1\text{H}} + \vec{I}_{2\text{H}}, \quad (2)$$

где $\vec{I}_{1\text{H}}$ – комплекс номинального тока статора АД; $\vec{I}_{2\text{H}}$ – комплекс номинального тока ротора, приведенного к обмотке статора.

Модуль номинального тока намагничивания можно определить уравнением

$$I_{\text{Hm}} = \sqrt{A^2 - B^2}, \quad (3)$$

где $A = I_{1\text{H}} \cdot \sin\phi_H + I_{2\text{H}} \cdot \sin\phi'_H$;

$$B = I_{1\text{H}} \cdot \cos\phi_H + I_{2\text{H}} \cdot \cos\phi'_H;$$

$$I_{1\text{H}} = P_{2\text{H}} / m_1 \cdot U_1 \cdot \eta_H \cos\phi_H;$$

$\eta_H, \cos\phi_H$ – номинальные КПД, коэффициент мощности АД.

Выразим модуль тока ротора

I_{2H} , а также величины $\sin\phi_H$, $\cos\phi_H$ по формулам академика Сыромятникова И.А., полученных им через кратность критического (максимального) момента M_K , $k_m = M_K / M_H$, приводимого в справочниках и каталогах по АД. Обозначенные выше параметры определяются формулами [15]:

$$I_{2H} = I_{IH} \cdot \cos\phi_H \cdot \sqrt{\frac{2k_m}{k_m + \sqrt{k_m^2 - 1}}}; \quad (4)$$

$$\sin\phi_H = 1 / \sqrt{2k_m(k_m + \sqrt{k_m^2 - 1})}; \quad (5)$$

$$\cos\phi_H = \sqrt{(k_m + \sqrt{k_m^2 - 1}) / 2k_m}. \quad (6)$$

Тогда номинальный ток намагничивания с учетом формул (4)–(6) и алгебраических преобразований вычисляется через номинальные (каталожные) данные АД по выражению

$$I_{Hm} = I_{IH} \left(\sqrt{1 - \cos\phi_H^2} - \frac{\cos\phi_H}{k_m + \sqrt{k_m^2 - 1}} \right). \quad (7)$$

Следовательно, зная величину тока намагничивания и число эффективных витков фазы обмотки статора $W_{1\Theta\Phi}$, зарегистрированных при ее разборке, представляется возможным определить проектную величину МДС обмотки статора, $F = I_{Hm} \cdot W_{1\Theta\Phi}$ и проектную величину магнитного потока, а следовательно магнитные характеристики сердечника статора. Из выражения (1) проектная величина суммы магнитных напряжений участков магнитного контура одного полюса АД определяется уравнением

$$F = F_\delta + F_{31} + F_{32} + F_{c1} + F_{c2} = \\ = I_{Hm} \cdot W_{1\Theta\Phi} \cdot m_1 / 2.22p. \quad (8)$$

Для ремонтируемого АД с извлеченным из статора ротором уравнением (8) можно воспользоваться, если для инструментального исследования магнитных характеристик сердечника статора использовать один из участков магнитного контура, например спинку статора, как наиболее массивную и доступную для исследования. Для этого спинку статора охватывают экспериментальной намагничающей катушкой с числом витков $W_1 = 3 \div 5$ в по схеме **рис. 3**. По намагничающей катушке W_1 пропускают такой экспериментальный намагничающий номинальный ток $W_1 = 3 \div 5$, который в спинке статора создаст

такое же магнитное напряжение, что и проектный номинальный ток намагничивания I_{Hm} . При этом магнитный поток, созданный экспериментальной катушкой, замкнется по всей длине спинке сердечника статора, а магнитные напряжения других участков цепи ($F_\delta, F_{31}, F_{32}, F_{c1}, F_{c2}$) будут равны нулю, так как ротор извлечен из статора.

Для определения величины тока $I_{\Theta Hm}$ прием величину экспериментальной МДС равной проектной величине МДС, то есть

$$I_{\Theta Hm} \cdot W_1 = I_{Hm} \cdot W_{1\Theta\Phi}. \quad (9)$$

При заданном числе витков W_1 экспериментальной намагничающей катушки величина экспериментального намагничающего тока определяется из уравнение (9) отношением:

$$I_{\Theta Hm} = I_{Hm} \cdot W_{1\Theta\Phi} / W_1. \quad (10)$$

Тогда при принятых условиях и в соответствии с уравнением (8) магнитное напряжение F_{c1} в спинке сердечника статора

$$F_{c1} = F_{\Theta c1} = I_{\Theta Hm} \cdot W_{1\Theta\Phi} \cdot m_1 / 2.22p. \quad (11)$$

С другой стороны, магнитное напряжение в спинке статора выразим по закону Ома для магнитной цепи уравнением

$$F_{c1} = H_{c1} \cdot L_{c1}, \quad (12)$$

где $L_{c1} = \pi(D_{H1} - h_{c1})$ – средняя длина магнитной силовой линии спинки сердечника статора, мм.

Приравняем уравнения (11) и (12).

$$I_{\Theta Hm} \cdot W_{1\Theta\Phi} \cdot m_1 / 2.22p = H_{c1} \cdot L_{c1}. \quad (13)$$

Из уравнения (13) выразим напряженность магнитного поля в спинке сердечника статора отношением

$$H_{c1} = \frac{I_{\Theta Hm} \cdot W_{1\Theta\Phi} \cdot m_1}{2.22p \cdot \pi(D_{H1} - h_{c1})}. \quad (14)$$

Проектная величина магнитной индукции в спинке сердечника статора B_{c1} ремонтируемого двигателя определяется для вычисленного значения H_{c1} по кривой намагничивания $B = f(H)$ той марки стали, из которой выполнена магнитная система АД. Значительная доля парка АД изготавливается из электротехнической стали марки 2013, кривая намагничивания которой, для спинки статора, представлена графиком **рис. 4** [13].

Магнитную индукцию в спинке сердечника

статора определяют по графику (см. рис. 4), за- давшись вычисленной по уравнению (14) величиной напряженности H_{C1} .

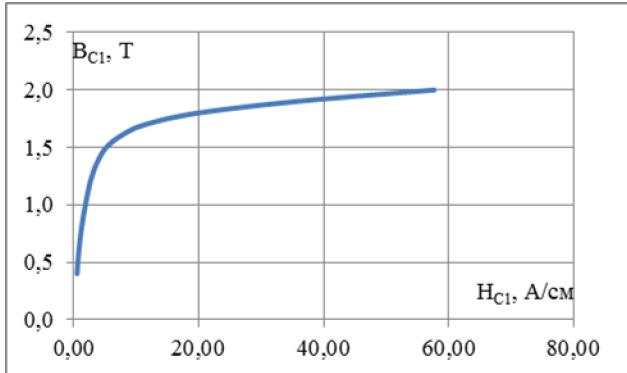


Рис. 4. Кривая намагничивания для спинки статора из электротехнической стали марки 2013

Магнитный поток в спинке статора Φ_{C1} , ремонтируемого двигателя вычисляют с учетом магнитной индукции B_{C1} и геометрических размеров сердечника статора произведением

$$\Phi_{C1} = B_{C1} \cdot S_{C1} = B_{C1} \cdot k_{C1} \cdot l_1 \cdot h_{C1}, \quad (15)$$

где S_{C1} — площадь поперечного сечения сердечника; $k_{C1} = 0,95 - 0,97$ — коэффициент заполнения сердечника статора сталью.

По закону электротехники магнитный поток одинаков на всех участках рассматриваемого неоднородного магнитного контура, поэтому принимаем равенство

$$\Phi_{C1} = \Phi_{\delta} = \Phi_{z1} = \Phi_{z2} = \Phi_{c2}. \quad (16)$$

Тогда проектное число эффективных витков в обмотке фазы ремонтируемого двигателя с учетом магнитного потока Φ_{C1} определяется выражением

$$W_{1\Theta\phi} = k_e \cdot U_{1H} / 222 \cdot k_{ob1} (f_1 / 50) \Phi_{C1}, \quad (17)$$

где k_e — коэффициент по ЭДС обмотки, определяют по графику на рис. 5; k_{ob1} — коэффициент обмотки, определяемый по таблице 1, [13].

Полученное число витков $W_{1\Theta\phi}$ округляют до ближайшего целого. Число эффективных проводников в пазу сердечника статора ремонтируемого АД определяется отношением

$$N_1 = W_{1\Theta\phi} \cdot a_1 / p \cdot q_1, \quad (18)$$

где $q_1 = Z_1 / 2p \cdot m_1$.

Полученные проектные значения $W_{1\Theta\phi}$, N_1

сравнивают с аналогичными параметрами, полученными при разборке электрической схемы обмотки статора АД. Полученные разности используются при пересчете обмоточных данных ремонтируемых или модернизируемых АД с учетом фактического состояния магнитной системы.

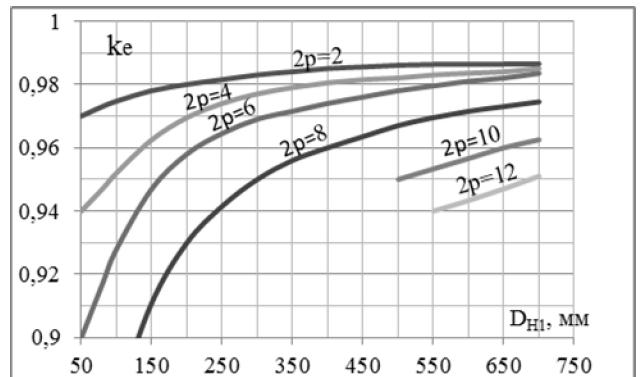


Рис. 5. Зависимость коэффициента k_e в функции наружного диаметра сердечника статора и числа пар полюсов двигателя

Величине экспериментального намагничающего номинального тока $I_{\Theta Hm}$ соответствует эталонное напряжение намагничивания $U_{1\Theta T}$, пропорциональное номинальному фазному напряжению U_{1H} . Величина эталонного напряжения намагничивания определяется выражением

$$U_{1\Theta T} = \frac{U_{1H} W_1}{W_{1\Theta\phi}}. \quad (19)$$

При испытании сердечника статора регистрируется величина напряжения U_1 , измеряемая вольтметром V_1 . Для исправного сердечника статора должно выполняться условие

$$U_1 \geq 0,7 U_{1\Theta T}. \quad (20)$$

Другим параметром, характеризующим магнитную систему АД, являются потери активной мощности в электротехнической стали. Значительная доля потерь активной мощности выделяется в сердечнике статора. Потерями активной мощности в стали сердечника ротора АД, работающего в диапазоне номинального скольжения, при котором частота тока ротора не превышает 2–4 Гц, можно пренебречь. Величину потерь активной мощности в стали сердечника статора производитель АД в номинальных данных не приводит. Однако для ремонтируемого двигателя, с извлеченным из статора ротором, потери мощности в сердечнике имеют место в его спин-

ке. Проектную величину этих потерь вычисляют по известной формуле

$$P_{c1} = k_T \cdot p_{1.0/50} \cdot B_{c1}^2 \cdot G_{c1}, \quad (21)$$

где $k_T = 1,7$ – коэффициент, учитывающий влияние технологического процесса изготовления сердечника; $p_{1.0/50}$ – удельные потери в стали при частоте перемагничивания 50 Гц и магнитной индукции, равной 1 Т; G_{c1} – расчетная масса стали спинки сердечника статора, определяемая выражением, кг:

$$G_{c1} = 7,8 \cdot \pi (D_{H1} - h_{c1}) \cdot h_{c1} \cdot k_{c1} \cdot l_1 \cdot 10^{-6}. \quad (22)$$

В предлагаемой методике оценки качества сердечника статора потери активной мощности в нем определяют при магнитной индукции B_{c1} и частоте тока $f=50$ Гц. Для создания такой магнитной индукции намагничающая катушка с числом витков W_1 подключается к регулируемому источнику питания с напряжением U_1 . Для контроля величины магнитной индукции спинку сердечника статора охватывают измерительной обмоткой с числом витков W_2 , к концам которой подключают вольтметр переменного тока V_2 . Число витков W_2 определяют по формуле

$$W_2 = W_1 \cdot \frac{U_2}{U_1}. \quad (23)$$

Величина контролируемой магнитной индукции определяется произведением

$$B = k_B \cdot U_2, \quad (24)$$

где k_B – коэффициент пропорциональности,

$$k_B = 45 \cdot 10^6 / h_{c1} \cdot k_{c1} \cdot l_1 \cdot W_2. \quad (25)$$

Для оценки качества сердечника статора потери активной мощности $P_{c1\vartheta}$ определяют по показанию ваттметра P_w с учетом коэффициента трансформации k_{T3} измерительного трансформатора тока Т3 по выражению

$$P_{c1\vartheta} = k_{T3} \frac{I_{HW} U_{HW}}{n_w} n, \quad (26)$$

где I_{HW} , U_{HW} , n_w – номинальный ток, напряжение ваттметра, номинальное число делений ваттметра; n – число делений ваттметра измеренное.

При оценке состояния сердечника статора без станины или с алюминиевой станиной удельные потери в стали p_{c1} не должны превышать значений

$$p_{c1} \leq 4,5 \div 5,0 \text{ Вт} / \text{кг}.$$

Удельные потери с учетом стальной или чугунной станины:

$$p_{c1} \leq (1,07 \div 1,1) \cdot 5 \text{ Вт} / \text{кг}.$$

Удельные потери в стали определяются отношением

$$p_{c1} = P_{c1\vartheta} / G_{c1},$$

где G_{c1} – масса стали, вычисляемая по формуле, кг:

$$G_{c1} = 7,8 k_{c1} l_1 \left[\frac{\pi}{4} (D_{1H}^2 - D_{1e}^2) - Z_1 \cdot Q_{H1} \right] \cdot 10^{-6},$$

где Q_{H1} – площадь паза статора, определяемая по его геометрическим размерам, мм^2 .

В качестве дополнительного признака, определяющего состояние сердечника статора, используется величина экспериментального коэффициента мощности $\cos\varphi_\vartheta$, намагничающей цепи, определяемая отношением

$$\cos\varphi_\vartheta = P_{c1\vartheta} / U_1 \cdot I_{\vartheta Hm}.$$

Максимальный коэффициент мощности намагничающей цепи исправного сердечника статора, с учетом ферромагнитной станины, должен удовлетворять условию:

$$\cos\varphi_{\vartheta max} \leq 0,75.$$

При использовании осцилограмм намагничающего тока и напряжения (рис. 6) для оценки $\cos\varphi_\vartheta$ определяют сдвиг фаз, φ_ϑ по вершинам кривых напряжения и тока

$$\varphi_\vartheta = \Phi_{u max} - \Phi_{i1 max}.$$

Кроме угла φ_ϑ определяют значение тока при $\varphi_u = 90^\circ$ и вычисляется разность

$$\Delta i = i_{max} - i_{\varphi u=90^\circ}.$$

Многочисленные исследования сердечников статоров различных АД мощностью до 100 кВт, напряжением до 600 В, позволяют утверждать:

- для исправного сердечника статора с ферромагнитной станиной (рис. 6, а), должны выполняться условия:

$$\varphi_\vartheta = \Phi_{\vartheta min} > 50^\circ; \Delta i_{min} \geq 0,25 i_{max};$$

- для сердечника статора, заведомо неисправного, с высокими потерями активной мощности (рис. 6, б), должны выполняться условия:

$$\varphi_{\exists} = \varphi_{\exists min} < 50^\circ; \Delta i_{min} < 0,25i_{max};$$

- для сердечников с алюминиевой станиной или без станины должны выполняться условия:

$$\varphi_{\exists} = \varphi_{\exists min} > 60^\circ; \Delta i_{min} > 0,25i_{max}.$$

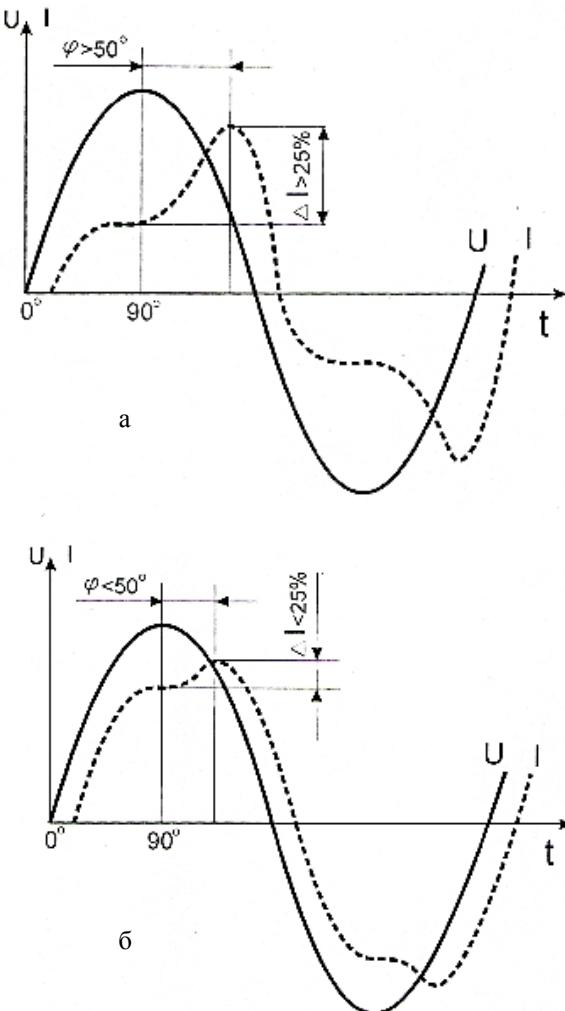


Рис. 6. Осциллограммы намагничивающего тока и напряжения: а – для исправного сердечника статора; б – для сердечника статора, заведомо неисправного

Таким образом, по результатам экспериментального исследования качества сердечника статора, принимают решение:

1. Если напряжение намагничивающей обмотки $U_1 \leq 0,7U_{1\text{ЭТ}}$, где $U_{1\text{ЭТ}}$ – эталонное напряжение намагничивания, то сердечник непригоден для дальнейшего использования, т.е. для ремонта или модернизации, независимо от значения или величины угла φ_{\exists} ; в этом случае АД рекомендуется к утилизации.

2. Если напряжение намагничивающей об-

мотки $U_1 \geq U_{1\text{ЭТ}}$, $\varphi_{\exists} \geq \varphi_{min}$, то сердечник статора считается исправным и пригодным для ремонта АД по прежним обмоточным данным или модернизации без снижения его мощности.

3. Сердечник статора пригоден для ремонта и модернизации с уменьшением номинальной мощности АД по пересчитанным обмоточным данным, если выполняются условия:

$$a) U_{1\text{ЭТ}} > U_1 > 0,7U_{1\text{ЭТ}}; \varphi_{\exists} \geq \varphi_{min};$$

$$b) U_1 \geq 0,7U_{1\text{ЭТ}}; \varphi_{\exists} \geq \varphi_{min}.$$

Если принято решение об утилизации или ремонте АД без снижения мощности по исходным обмоточным данным, то они реализуются. Однако если принято решение о ремонте или модернизации с уменьшением номинальной мощности АД, всегда возникает проблема определения новых обмоточных данных статора. Эта проблема может быть решена с использованием результатов (данных) экспериментального испытания сердечника статора.

Для определения новых обмоточных данных статора предлагаемая методика предусматривает количественные сравнения фактических потерь $P_{C1\delta}$ активной мощности в спинке сердечника с проектной величиной потерь мощности P_{C1} и определение их разности:

$$\Delta P_{c1} = P_{C1\delta} - P_{C1}. \quad (27)$$

Если $\Delta P_{c1} \geq (0,03 \div 0,05) * P_{C1}$, то при пересчете обмоточных данных проектную величину магнитной индукции в воздушном зазоре снижают на величину

$$\Delta B_{\delta} = \sqrt{\Delta P_{c1\delta} \cdot B_{\delta}^2 / P_{C1}}. \quad (28)$$

При этом уменьшается величина магнитного потока в воздушном зазоре и других участках магнитного контура на величину $\Delta\Phi_{\delta}$, Вб:

$$\Delta\Phi_{\delta} = \Delta B_{\delta} \cdot D_{1H} \cdot h_{C1} \cdot k_{C1} \cdot l_1 \cdot 10^{-6} / p. \quad (29)$$

Число витков в обмотке фазы, вычисленных по уравнению (17), и число эффективных проводников в пазу (18) повышают на величины:

$$\Delta W_{1\Theta\Phi} = k_e \cdot U_{1H} / 222 \cdot k_{o61}(f_1 / 50) \Delta\Phi_{\delta}; \quad (30)$$

$$\Delta N_1 = \Delta W_{1\Theta\Phi} \cdot \frac{a_1}{p} \cdot q_1. \quad (31)$$

Полученные величины округляют до ближайших целых.

Число элементарных проводников, диаметр

обмоточного провода определяют с учетом коррекции числа эффективных витков обмотки статора по известной методике [13,14].

При принятии решения о модернизации ремонтируемого АД с повышением его класса энергоэффективности, путем компенсации реактивной мощности и достижения $\cos\varphi = 1,0$, модернизацию осуществляют с учетом реального состояния магнитной системы статора по методике, изложенной в [9,10,12].

При принятии решения об утилизации АД выполняют технико-экономическое обоснование вариантов утилизации:

- без разборки и сортировки активных и конструктивных элементов АД;
- с разборкой и сортировкой активных и конструктивных элементов АД.

Утилизация без разборки и сортировки активных и конструктивных элементов АД предусматривает передачу двигателя в металлом по его массе. Экономический эффект от такой утилизации оценивается простой формулой

$$\mathcal{E}_{y1} = G_{AD} \cdot \Pi_{ML}, \quad (32)$$

где G_{AD} – масса двигателя, кг; Π_{ML} – цена металлома, руб./кг.

Утилизация с сортировкой активных и конструкционных элементов АД предусматривает извлечение цветных металлов (медь, алюминий, бронза), электротехнической стали – активных элементов электрической машины, а также станины, вала, подшипников, вводного устройства, метизов – конструкционных элементов. Этот вариант утилизации предусматривает наличие соответствующего набора технологических машин и оборудования, а также квалифицированных специалистов.

Для оценки экономического эффекта этого варианта утилизации определяют массу активных материалов двигателя: электротехнической стали, медного круглого провода обмоток статора и фазного ротора, массу алюминия (кг) короткозамкнутого ротора рассчитывают по выражениям:

- масса электротехнической стали

$$G_C = 7,8l_1k_{cl}\left[\frac{\pi \cdot D_{H1}^2}{4} - Z_1 \cdot F_{H1} - \frac{\pi \cdot D_{B2}^2}{4} - Z_2 F_{H2}\right] \cdot 10^{-6},$$

где F_{H1}, F_{H2} – площади паза статора, ротора, мм^2 ; D_{B2} – внутренний диаметр стали ротора, мм;

- масса медной обмотки статора

$$G_{M1} = 8,9 \cdot Z_1 \cdot F_{n1} \cdot l_{cp1} \cdot k_{3n} \cdot 10^{-6};$$

- масса медной обмотки фазного ротора

$$G_{M2} = 8,9 \cdot Z_2 \cdot F_{n2} \cdot l_{cp2} \cdot k_{3n} \cdot 10^{-6};$$

- масса алюминия короткозамкнутого ротора с литой или сварной клеткой

$$G_{Al2} = 2,7 \cdot [Z_2 \cdot F_{n2} \cdot l_{cp2} + 2\pi \cdot D_{kl2} \cdot F_{kl2} + 1,1 \cdot N_{l2} \cdot F_{l2} \cdot l_{l2}] \cdot 10^{-6},$$

где l_{cp1}, l_{cp2} – средняя длина витка статора, ротора; k_{3n} – коэффициент заполнения паза, $k_{3n} = (0,7 \div 0,72)$; F_{n1}, F_{n2} – площадь паза статора, ротора, мм^2 ; D_{kl2} , D_{kl2} – диаметр, мм, площадь сечения короткозамкнутого кольца, мм^2 ; N_{l2} , F_{l2} , l_{l2} – число вентиляционных лопаток, площадь сечения и длина лопатки.

Масса (кг) специальных марок стали (вал G_B , подшипники G_H) определяются по выражениям:

$$G_B = \frac{7,8l_B \pi d_{cp}^2}{4} \cdot 10^{-6};$$

$$G_H = n_H g_{ncp},$$

где l_B , d_{cp} – длина, средний диаметр вала, мм; n_H – число подшипников; g_{ncp} – средняя масса подшипника, кг;

- масса других конструкционных элементов определяется разностью

$$G_K = G_{AD} - G_{M1} - G_{M2} - G_{Al2} - G_C - G_B - G_H.$$

Экономический эффект от утилизации с разборкой и сортировкой активных и конструкционных элементов АД оценивается формулой

$$\mathcal{E}_{y2} = \sum \mathcal{E}_i, \quad (33)$$

где $\mathcal{E}_i = G_i \cdot \Pi_i$ – экономический эффект от утилизации i -го элемента АД; G_i , Π_i – масса, цена лома i -го элемента двигателя.

Если $(\mathcal{E}_{y2} - Z_{TP}) \cdot k_p > \mathcal{E}_{y1}$, то принимается решение о утилизации с разборкой и сортировкой активных и конструкционных элементов АД, где Z_{TP}, k_p – затраты трудовых ресурсов, коэффициент плановой рентабельности предприятия.

С учетом полученных результатов решения

поставленных задач разработан аппаратно-программный комплекс для оценки качества активной стали АД и принятия решений по ремонту, модернизации или утилизации асинхронных двигателей с учетом реальных параметров магнитной системы электрической машины [16].

Заключение

1. Обоснована необходимость ремонта и модернизации асинхронных двигателей с учетом реального состояния магнитной системы (активной стали) электрических машин.

2. Разработаны методика и технические средства оценки свойств электротехнической стали статора асинхронной машины. Методика и технические средства применимы и для других электрических машин переменного тока.

3. Предложенная методика оценки качества электротехнической стали ремонтируемых электрических машин позволяет выполнять пересчет обмоточных данных статора асинхронных двигателей, что повышает их энергетическую эффективность.

4. Разработан аппаратно-программный комплекс для принятия решений по ремонту, модернизации или утилизации асинхронных двигателей с учетом реальных параметров магнитной системы электрической машины.

5. Результаты разработки и исследований рекомендуются специалистам

Список литературы

1. Электротехника: учеб. пособие для вузов / под ред. В.С. Панюшина. Изд. 2-е, перераб. и доп. М.: Высш. шк., 1976. 560 с.
2. Копылов И.П. Электрические машины. М.: Высш. шк., 2012. 675 с.
3. Асинхронные двигатели серии 4А. Справочник / А.Э. Кравчик, М.М. Шлаф, В. И. Афонин, Е. А. Соболенская. М.: Энергоиздат, 1982. 504 с., ил.
4. Справочник по электрическим машинам: в 2 т. / под общ. ред. И.П. Копылова, Б.К. Клокова. Т2. М.: Энергатомиздат, 1989. 688 с.
5. Электрический двигатель лома [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://german.alibaba.com/product-detail/electric-motor-scrap-108869276.htm> Заглавие с экрана (дата обращения: 27.07.2018).
6. Купцов В.В., Петушкин М.Ю., Сарваров А.С. Современные методы диагностирования асинхронных двигателей и их развитие: монография. Магнитогорск: ГОУ ВПО «МГТУ», 2010. 247 с.
7. Исследование потребления асинхронных двигателей [Электронный ресурс]. Режим доступа: http://www.motorsmat-ter.org/resources/motor_repair.html Заглавие с экрана (дата обращения: 27.07.2018).
8. Лихачев В.Л. Справочник обмотчика асинхронных электродвигателей. М.: СОЛООН-Прес, 2010. 240 с.: ил. (серия «Ремонт», выпуск 72)
9. 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.
10. 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.
11. Ильинский Н.Ф., Рожковский Ю.В., Горнов А.О. Энергосбережение в электроприводе // Энергосберегающая технология электроснабжения народного хозяйства / под ред. В.А. Веникова. М.: Высш. шк., 1989. 129 с.
12. Мугалимов Р.Г. Асинхронные двигатели с индивидуальной компенсацией реактивной мощности и электроприводы на их основе: монография. Магнитогорск: МГТУ им. Г.И. Носова, 2011. 250 с.
13. Гурин Я.С., Кузнецов Б.И. Проектирование серии электрических машин. М.: Энергия, 1978. 480 с.
14. Копылов И.П. Проектирование электрических машин. М.: Высш. шк., 2005. 767 с.
15. Сыромятников И.А. Режимы работы асинхронных и синхронных электродвигателей. 3-е изд., перераб. и под. М.; Л.: Госэнергоиздат, 1963. 528 с.
16. 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 12.08.18
Принята в печать 12.09.18

ENHANCED ENERGY EFFICIENCY AND RESOURCE SAVING IN THE OVERHAULING, RETROFITTING AND DISPOSAL OF INDUCTION MOTORS

Rif G. Mugalimov – DSc (Eng.), Professor

Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. E-mail: energosbereganie@rambler.ru

Regina A. Zakirova – Student

Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. E-mail: regina_174@mail.ru

Aliya R. Mugalimova – Student

Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. E-mail: energosbereganie@rambler.ru

Konstantin E. Odintsov – PhD (Eng.), Associate Professor

Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia

Abstract

This paper describes the problem of overhauling induction motors for enhanced energy efficiency and resource saving. The authors found how to optimise the conventional overhaul procedure and upgrade the current induction motors by retrofitting. The authors developed a technique and built a hardware tool for quick checks of an electric machine's stator steel. They also developed a mathematical model for a software tool that can analyse the feasibility of the final decision – if a motor should be overhauled, retrofitted or disposed of. The paper provides substantiation for the technique used to analyse the magnetic properties of the stator steel in the motors under repair. The paper also describes a technique and an electric diagram for defining the excitation current and voltage for an experimental analysis of the magnetic properties of the stator core. Stator steel quality assessment criteria are given. The criteria include stator core excitation current and voltage, active power losses in the stator core, excitation current and voltage initial phase shift, unsinusoidality of the excitation current. The paper describes mathematical models for determining the design values of the excitation current, magnetic induction, magnetic voltage, magnetic flux and the number of efficient stator winding turns on the motor under repair. The authors propose to compare the design and actual values characterising the magnetic status of the motor and recalculate the stator winding data in order to maintain or improve the energy efficiency of the electric machine. The paper shows that if the main quality indices characterising the magnetic system of an electrical machine fail to match the criteria obtained as a result of experimental studies, such electric machine is to be disposed of. The authors describe some mathematical models that help evaluate the cost of induction motor disposal through disassembly and sorting of the components. The results of this research could be useful for electrical maintenance personnel.

Keywords: Energy efficiency, resource saving, induction motor, stator core, overhauling and retrofitting of induction motors, disposal, resources, cost efficiency.

References

1. *Elektrotehnika: ucheb. posobie dlya vusov* [Electrical engineering: Learner's guide for university students]. Ed. by V.S. Pantyushin. 2nd revised edition. Moscow: Vysshaya shkola, 1976, 560 p. (In Russ.)
2. Kopylov I.P. *Elektricheskie mashiny* [Electric machines]. Moscow: Vysshaya shkola, 2012, 675 p. (In Russ.)
3. Kravchik A.E., Shlaf M.M., Afonin V.I., Sobolenskaya E.A. *Asinkronnye dvigateli serii 4A. Spravochnik* [4A series induction motors: Handbook]. Moscow: Energoizdat, 1982, 504 p. (In Russ.)
4. *Spravochnik po elektricheskim mashinam* [Handbook on electric machines]. In two volumes. Ed. by I.P. Kopylov, B.K. Klokov. Moscow: Energoatomizdat, 1989, 688 p. (In Russ.)
5. *Elektricheskiy dvigatel loma* [Electrical motor scrap]. Available at: <https://german.alibaba.com/product-detail/electric-motor-scrap-108869276.html> (Accessed July 27, 2018)
6. Kuptsov V.V., Petushkov M.Yu., Sarvarov A.S. *Sovremennye metody diagnostirovaniya asinkronnykh dvigateley i ikh razvitiye: monografiya* [Advanced testing techniques for induction motors and further development: Monograph]. Magnitogorsk: Nosov Magnitogorsk State Technical University, 2010, 247 p. (In Russ.)
7. *Issledovanie potrebleniya asinkronnykh dvigateley* [Studying the power draw of asynchronous motors]. Available at: http://www.motorsmat-ter.org/resources/motor_repair.html (Accessed July 27, 2018).
8. Likhachev V.L. *Spravochnik obmotchika asinkronnykh elektrodvigateley* [Handbook for induction motor winding specialists]. Moscow: SOLON-Pres, 2010, 240 p. (In Russ.)
9. Mugalimov R.G., Mugalimova A.R. The idea of achieving enhanced energy efficiency in induction motors 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.)
10. Mugalimov R.G., Mugalimova A.R. Simulating the energy efficiency parameters of various types of industrial drives built with 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.)
11. Ilyinsky N.F., Rozhankovsky Yu.V., Gomov A.O. Electric drives and energy efficiency. *Energosberegayushchaya tekhnologiya*

- elektrosnabzheniya narodnogo khozyaystva [Energy-saving technology for the national electric power industry]. Ed. by V.A. Venikov. Moscow: Vysshaya shkola, 1989, 129 p. (In Russ.)
12. Mugalimov R.G. Asinkhronnye dvigateli s individualnoy kompensatsiey reaktivnoy moshchnosti i elektroprivody na ikh osnove: monografiya [Induction motors with PFC and electric drives designed on their basis: Monograph]. Magnitogorsk: NMSTU, 2011, 250 p. (In Russ.)
 13. Gurin Ya.S., Kuznetsov B.I. Proektirovaniye serii elektricheskikh mashin [Design of an electrical machine series]. Moscow: Energiya, 1978, 480 p. (In Russ.)
 14. Kopylov I.P. Proektirovaniye elektricheskikh mashin [Design of electrical machines]. Moscow: Vysshaya shkola, 2005, 767 p. (In Russ.)
 15. Syromyatnikov I.A. Rezhimy raboty asinkhronnykh i sinkhronnykh elektrodvigateley [Operating modes of induction and synchronous motors]. 3rd revised edition. Moscow; Leningrad: Gosenergoizdat, 1963, 528 p. (In Russ.)
 16. 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 package for estimation and optimization of costs incurred by conventional overhauling of induction motors and by repair and refurbishment to make the motor more energy efficient]. Registration certificate no. 2016610278, 2016.

Received 12/08/18

Accepted 12/09/18

Образец для цитирования

Повышение энергоэффективности и ресурсосбережение при капитальном ремонте, модернизации и утилизации двигателей асинхронных электроприводов / Мугалимов Р.Г., Закирова Р.А., Мугалимова А.Р., Одинцов К.Э. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2018. Т.16. №3. С. 145–159. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2018-16-3-145-159>

For citation

Mugalimov R.G., Zakirova R.A., Mugalimova A.R., Odintsov K.E. Enhanced energy efficiency and resource saving in the overhauling, retrofitting and disposal of induction motors. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2018, vol. 16, no. 3, pp. 145–159. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2018-16-3-145-159>