



*А.Е. Немировский, Г.А. Кичигина,
И.Ю. Сергеевская, А.В. Иванов
Вологодский государственный
университет
А.И. Кашин
Мурманский государственный
технический университет*

АНАЛИЗ ПРОМЫШЛЕННЫХ МЕТОДОВ ДЕМОНТАЖА «СГОРЕВШИХ» ОБМОТОК ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ ПРИ РЕМОНТАХ

В данной статье представлен анализ методов демонтажа неисправных обмоток ЭД. Нами предложен инновационный способ удаления обмотки ЭД, который имеет явные преимущества перед существующими аналогами. Также рассмотрен анализ затрат на эксплуатацию каждого метода демонтажа обмоток. В результате анализа можно сделать вывод, что ультразвуковой метод наиболее эффективен.

Электродвигатель, ремонт, демонтаж обмоток, ультразвук, кавитация, изоляция.

Ремонт электродвигателей (ЭД) является одной из наиболее серьезных проблем из-за тяжелых условий их эксплуатации на промышленных предприятиях и в сельском хозяйстве. Так, в сельскохозяйственном производстве ежегодный выход ЭД из строя достигает 20%. Исходя из этого, значительная часть ЭД подвергается ремонту и перемотке. Важно, чтобы отремонтированный ЭД соответствовал требованиям надежности и эффективности в работе подобно новому. Вместе с тем, как показывает практика, эксплуатационный срок службы ЭД, подвергшегося перемотке, значительно ниже срока службы нового. Связано это в основном с качеством ремонта и применяемых материалов.

При ремонте большое влияние на качество отремонтированного ЭД оказывает ремонт статора, а именно способ демонтажа «сгоревшей» обмотки.

Известные методы демонтажа обмоток ЭД [1, 5]:

1. Механический демонтаж. В процессе удаления обмоток статоров отрезают одну лобовую часть на токарных станках или на специальных станках модели СО-3М (для ЭД высотой оси вращения 50–100 мм), или СЦО-2 (для ЭД высотой оси вращения 100–280 мм). При работе на станках, когда идет процесс отрезания, используют ножевые резцы или фрезы, чтобы не появлялась медная стружка и не происходила зажатка провода.

В небольших ЭД обмотку извлекают вручную, используя крючки, которыми захватывают ее за необрезанную лобовую часть. Если статор большого размера, то обмотку извлекают с помощью специальных станков. Далее происходит очистка пазов от остатков изоляции. Для этого используют напильники. Очищенные сердечники отправляют на мойку.

При использовании механического демонтажа на стали пакета статора ЭД возникают заусеницы, царапины, задиры, которые негативно влияют на дальнейшую укладку пазовой изоляции и витковую изоляцию всыпной обмотки. В дальнейшем это может привести к междувитковым коротким замыканиям, а также замыканием обмотки на корпус ЭД через поврежденную пазовую коробочку. В итоге страдает

качество ремонта и продолжительность работы ЭД в послеремонтный период.

2. Демонтаж за счет высокочастотного нагревания сердечника. Через лак пазовая изоляция получает тепло, исходящее от сердечника, а проводники через лак получают тепло от пазовой изоляции. При интенсивном нагреве температура лака между сердечником и пазовой изоляцией будет выше, чем между пазовой изоляцией и проводниками, а цементирующая способность лака – ниже. Когда извлекают обмотку из нагретого сердечника, она снимается вместе с пазовыми коробочками. Паз остается чистым. Дополнительные работы по очистке паза практически не требуются.

Использовать данный метод в качестве экономии времени по очистке паза целесообразно, но в плане экономии по электропотреблению и негатива из-за перегрева сердечника данный метод неэффективен.

3. Обжиг на костре. Данный способ состоит в нагреве статора и корпуса ЭД над открытым пламенем. Приспособления для снятия обмотки здесь не требуются. Пропиточный состав, в том числе лак, выгорают с поверхности и толщину обмоток, тем самым высвобождая их. Из-за невозможности контролировать уровень температуры имеет место неравномерный нагрев, который приводит к деформации статора и корпуса ЭД. Перегрев стали статора ухудшает магнитные свойства стали.

4. Обжиг в печи. При термомеханическом методе удаления старой обмотки ЭД со срезанной лобовой частью обмотки помещают в обжиговую печь при температуре 300–350°C на 8 часов. Далее оставшаяся часть обмотки легко удаляется. Иногда ЭД помещают в печь, не срезая ни одной из лобовых частей обмотки, но в этом случае после обжига обмотку из пазов удаляют только вручную.

Равномерное тепловое поле в печи создать трудно. Иногда в печи происходит возгорание изоляции обмоток, приводящее к резкому увеличению температуры в некоторых зонах печи. Когда увеличиваем температуру выше допустимой, то возможно коробление и термиче-

ская деформация корпуса машины. В большой мере это относится к алюминиевым корпусам.

При обжиге в печи происходит перегрев листов стали статора, что в дальнейшем увеличивает удельные потери в стали и КПД ЭД уменьшается. При этом происходит выгорание лаковых пленок между отдельными листами стали, между корпусом и самим пакетом стали. Выгорание приводит к тому, что после двух-трех обжигов происходит нарушение тугой посадки между пакетом и корпусом. Он начинает проворачиваться в корпусе машины, при этом ослабляется прессовка пакета, увеличивается ток холостого хода ЭД.

5. Химический демонтаж. ЭД с обмоткой помещают в емкость с моющей жидкостью. Она летучая и токсичная. При работе с ней необходимо соблюдать правила техники безопасности. Вначале загружаем ремонтируемые ЭД в емкость и герметизируем их, заливаем емкость жидкостью. Затем идет реакция, обычно длительностью в ночное нерабочее время, а далее жидкость удаляется и емкость продувается чистым воздухом. Затем происходит разгерметизация и открытие емкости. Потом вынимаем ЭД и удаляем обмотку из пазов статора. В этом методе существует риск нарушения изоляции пластин пакета статора. Химический демонтаж негативно влияет на внешнюю экологию и на рабочий персонал в связи с использованием химически активных веществ.

6. Выщелачивание является частным случаем химического демонтажа. Используется 10% раствор едкого натра, рабочая температура $70 \pm 10^\circ\text{C}$.

Этот способ не требует сложного технологического оборудования. Высокая химическая активность едкого натра весьма вредна и требует соблюдения мер предосторожности рабочего персонала. Алюминиевый корпус станины ЭД в этом случае может деформироваться. Поэтому для ЭД с алюминиевыми корпусами данный метод неприемлем.

Описанные методы демонтажа обмоток ЭД при ремонтных работах приводят к механическим повреждениям пластин пакета статора, ухудшению магнитных свойств стали, росту тока холостого хода, повышенному потреблению электроэнергии, снижению КПД, локальным перегревам стали, уменьшению ресурса эксплуатации ЭД, вредному влиянию на эксплуатационный персонал и на окружающую среду. Эти методы не экологичны и связаны с большими энергозатратами.

Впервые для «легкого» эффективного извлечения «сгоревшей» обмотки ЭД при ремонтах применено ультразвуковое излучение (УЗИ) с его положительными эффектами и физическими явлениями [2, 3, 4]. Для заявленного способа строятся математические модели процесса демонтажа обмотки ЭД, из которых получаются оптимальные параметры воздействующих факторов на технологию демонтажа обмотки с помощью УЗИ. Эти параметры заложены в аппаратный комплекс, с помощью которого реализуется новая технология демонтажа обмоток ЭД при ремонтах.

Уникальность предлагаемого нами метода демонтажа сгоревшей обмотки статора ЭД основана на применении ультразвука [3, 4]. Эффективное удаление сгоревших обмоток статора ЭД производится при помощи воздействия ультразвука в водном растворе

NaOH. В основе метода лежит кавитационное воздействие ультразвука. В отличие от известных, предлагаемый метод наиболее эффективен, поскольку не вызывает разрушающего воздействия на полезные элементы конструкции ЭД. Согласно проведенным экспериментам, предлагаемый метод в 2–5 раз менее энергозатратен и более экологичен, и в 3 раза более производительен по сравнению с существующими методами демонтажа обмоток ЭД.

Статор, подвергаемый ремонту, помещается в ультразвуковую ванну с рабочим раствором. Ультразвуковая ванна – это резервуар со встроенными в его днище пьезокерамическими излучателями. Рабочий раствор представляет собой водный раствор NaOH. Действие ультразвука в водном растворе сопровождается возникновением парогазовых пузырьков, которые нелинейно пульсируют и схлопываются у обрабатываемой поверхности с образованием ударных волн и кумулятивных струй высокого давления. Рабочий раствор проникает в самые труднодоступные места в толще изоляции «сгоревшей» обмотки ЭД. Это значительно сокращает время демонтажа неисправной обмотки статора ремонтируемого ЭД.

В разных методах ремонта ЭД используется различное оборудование и расходные материалы, от стоимости которых зависят полные затраты на ремонт [1, 6]. Рассмотрим основные методы демонтажа обмоток и проанализируем их целесообразность. Сравнение методов будем производить по величине начальных инвестиций и по дополнительным ежемесячным затратам.

При термомеханическом методе удаления старой обмотки электрическую машину со срезанной лобовой частью обмотки помещают в обжиговую печь при температуре $300\text{--}350^\circ\text{C}$ и выдерживают порядка 8 часов. Для этого метода используются токарный станок, термическая печь для сушки и обжига ЭД. Например, печь «Сикрон»: максимальная температура нагрева 400°C , максимальная мощность 32 кВт и токарный станок CS6140 мощностью $7,5\text{ кВт}$. Цена печи в среднем составляет 500 тысяч рублей, цена токарного станка – 1 миллион рублей. Сумма первоначальных инвестиций равна затратам на приобретение основного оборудования. Дополнительные затраты складываются из затрат на электроэнергию и затрат на утилизацию химических отходов:

$$Z_{\text{доп.}} = Z_{\text{номп.ээ.}} + Z_{\text{утил.}}, \quad (1)$$

где $Z_{\text{номп.ээ.}}$ – затраты на электроэнергию, руб.;
 $Z_{\text{утил.}}$ – затраты на утилизацию моющих растворов, опасных для человека и окружающей среды, руб.

Затраты на электроэнергию, употребленную за месяц работы печи, находятся по:

$$Z_{\text{номп.ээ.}} = C_{\text{ээ.}} \times T \times P_{\text{уст.}}, \quad (2)$$

где $C_{\text{ээ.}}$ – цена электроэнергии, руб/кВт·ч (на 01.01.2016 г. $C_{\text{ээ.}} = 3,83\text{ руб./кВт·ч}$);

T – время работы установки за месяц, ч.;

$P_{\text{уст.}}$ – полная мощность установки, кВт.

$$T = t \times n, \quad (3)$$

где t – продолжительность рабочей смены, ч.;

n – количество смен за месяц.

$$T = 8 \times 23 = 184 \text{ ч,}$$

$$Z_{\text{номп.ээ.}} = 3,83 \times 184 \times 39,5 = 27836,44 \text{ руб.}$$

Используемое оборудование и затраты по всем методам удаления поврежденной обмотки ЭД

Метод	Используемое оборудование	$P_{уст}$, кВт	Цена, руб.	Стоимость потребляемой эл. энергии, руб.	Затраты на утилизацию реагентов, руб.	Доп. затраты, руб.	Суммарные затраты
Термический	Печь «Сикрон»	32	500000	27836,44	-	27836,44	527836,44
	CS6140	7,2	1000000				1027836,44
Механический	CS6140	7,2	1000000	6694,84	-	6694,84	1006694,84
	УПО-1	2,3	1000000				1006694,84
Высокочастотный	ВЧИ-63/0.44	63	500000	44397,36	-	44397,36	544397,36
Выщелачивание	МКС-100	10	350000	7047,2	52900	59947,2	409947,2
Химический	МКС-100	10	350000	7047,2	52900	59947,2	409947,2
Ультразвуковой	Град200-2x1100	7,2	300000	5074	52900	57900	357900

Затраты на утилизацию находятся по формуле:

$$Z_{утил.} = C_{утил.} \times k \times b, \quad (4)$$

где $C_{утил.}$ – цена за утилизацию 1 л моющего растворителя, руб./л;

k – объем моющего средства за один цикл, л;

b – количество циклов за месяц (исходя из условий использования моющего раствора в химическом, гальваническом и ультразвуковом методах, принимаемым равным 11,5 циклов).

Таким образом, сумма инвестиций, необходимая для реализации термического метода, составляет 2 миллиона рублей. Ежемесячные затраты состоят только из затрат на электроэнергию и составляют 28 тысяч рублей.

Значительная химическая активность используемого раствора в химическом методе и выщелачивании весьма вредна и требует соблюдения мер предосторожности. В этих методах используются растворы щелочей и кислот, поэтому встает вопрос об их утилизации.

Затраты на утилизацию использованного раствора за рабочий месяц по (4):

$$Z_{утил.} = 23 \times 200 \times 11,5 = 52900 \text{ руб.}$$

Используемое оборудование и затраты по всем методам удаления поврежденной обмотки ЭД сведены в таблицу. Расчет стоимости затрат выполняется по выражениям (1)÷(4).

Из таблицы видно, что наиболее экономически выгодными методами ремонта обмоток «сгоревших» ЭД являются методы выщелачивания, химический и ультразвуковой. Так эти методы на 40–50% дешевле, а по суммарным затратам ультразвуковой метод экономичнее на 13–14% методов выщелачивания и химического. Вместе с тем, химический метод и выщелачивание имеют существенный недостаток, заключающийся в использовании химически активных растворов, опасных для человека и окружающей среды. В ультразвуковом методе используется менее вредный двухпроцентный раствор едкого натра, в результате чего снижается уровень опасности для здоровья персонала и окружающей среды. Учитывая это и результаты расчетов в таблице, видим, что метод с использованием УЗИ наиболее выгоден по экономиче-

ским, экологическим и техническим показателям. При дальнейшей эксплуатации ЭД, отремонтированные с применением УЗИ, имеют больший ресурс и возможности к повторным ремонтам.

Литература

1. Оценка затрат на проведение ремонтов обмоток электродвигателей / Д. О. Аксенов, А. И. Кашин, Г. А. Кичигина, А. Е. Немировский, И. Ю. Сергиевская // Вузовская наука – региону : материалы XIV Всероссийской научной конференции / Министерство образования и науки РФ, Вологодский государственный университет ; Правительство Вологодской области. – Вологда : ВоГУ, 2016. – С. 5-7.

2. А. И. Кашин, А. Е. Эффективность методов ремонта обмоток электродвигателей / А. И. Кашин, А. Е. Немировский // Молодые исследователи – регионам : материалы Международной научной конференции (Вологда, 20–21 апреля 2016 г.): в 3 томах / Министерство образования и науки РФ, Вологодский государственный университет ; [ответственный редактор А. А. Сеницын]. – Вологда : ВоГУ, 2016. – Т. 1. – С. 98-99.

3. Ультразвуковая ванна для исследования демонстрация обмоток электродвигателей при ремонтах / Д. О. Аксенов, А. И. Кашин, А. Е. Немировский, И. Ю. Сергиевская / Энергетика, электромеханика и энергоэффективные технологии глазами молодежи : материалы IV российской молодежной научной школы-конференции. В 2 томах. Том 1/ Томский политехнический университет. – Томск : ЦРУ, 2016. – С. 46-49.

4. Исследование инновационного метода ремонта электродвигателей / Кашин А. И., Кичигина Г. А., Немировский А. Е., Никифорова О. М. / Автоматизация и энергосбережение машиностроительного и металлургического производств, технология и надежность машин, приборов и оборудования : материалы 12 Международной научно-технической конференции / Министерство образования и науки РФ ; Вологодский государственный университет. – Вологда : ВоГУ, 2017. – С.144-149.

5. Повышение эффективности демонтажа неисправных обмоток электродвигателей при ремонтах / А. Е. Немировский, А. И. Кашин, Г. А. Кичигина

[и др.]. // Промышленная энергетика. – 2017. – № 12. – С. 32-39.

6. Аксёнов, Д. О. Анализ целесообразности методов демонтажа обмоток электродвигателей / Д. О. Аксёнов, Г. А. Кичигина // Молодые исследователи –

регионам : материалы Международной научной конференции (Вологда, 20–21 апреля 2016 г.): в 3 томах / Министерство образования и науки РФ ; Вологодский государственный университет. – Вологда : ВГУ, 2016. – Т. 1. – С. 97-98.

**A.E. Nemirovsky, A.I. Kashin, G.A. Kichigina,
I.I. Sergievskaja, A.V. Ivanov**

**ANALYSIS OF INDUSTRIAL METHODS FOR DISMANTLING «BURNT» MOTOR WINDINGS
DURING REPAIRS**

This article presents an analysis of the methods for dismantling faulty windings of ED. We have proposed an innovative way to remove the ED winding, which has clear advantages over existing analogues. An analysis of the operating costs of each winding dismantling method is also considered. As a result of the analysis, we can conclude that the ultrasonic method is most effective.

Electric motor, repair, dismantling of windings, ultrasound, cavitation, insulation.