

трального редуктора автомобиля. В первую очередь это шестерни главной пары, рис. 12.

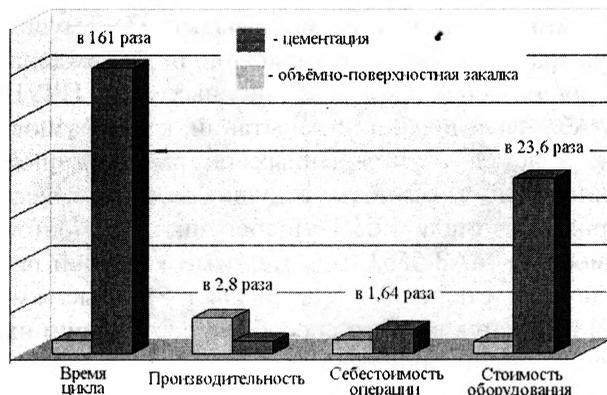


Рис. 11. Диаграмма экономической эффективности внедренной технологии упрочнения шестерен

Также имеются наработки в применении сталей ПП для деталей межколесного дифференциала.

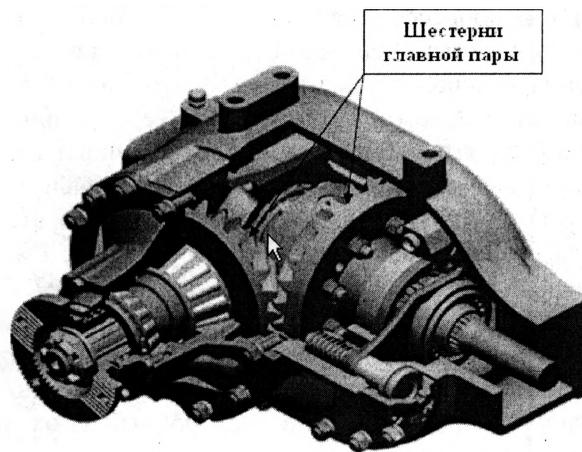


Рис. 12. Внешний вид центрального редуктора заднего моста автомобиля МАЗ

На 2008 год запланировано освоение изготовления шестерен главной пары автомобиля МА35551 из стали 60 ПП. Ориентировочно экономический эффект составит более 300 млн. рублей.

ДИАГНОСТИКА ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ

*Брановицкий И.И., Размыслович Г.И., Мацкевич П.Д.
Институт прикладной физики НАН Беларуси*

Весьма важную роль в обеспечении рационального использования электрической энергии, реализации потенциала энергосбережения играет качество систем ее трансформации и преобразования, т.е. качество соответствующего электроэнергетического оборудования (ЭО). Качество ЭО (как и оборудования вообще) характеризуется уровнем его технических характеристик и эксплуатационной надежностью, которые обусловлены в свою очередь соответствующим качеством составляющих компонентов и алгоритма их взаимодействия в том или ином изделии. При этом весьма важны обе связанные между собой стороны проблемы качества изделий — как повышение уровня технических характеристик оборудования, так и обеспечение его надежной и долговременной работы в «штатном» режиме. Последнее особенно актуально в условиях, когда ресурс электрооборудования, эксплуатируемого в народном хозяйстве Республики в значительной степени (на 60–70%) исчерпан. Нарушение нормального режима работы, обусловленного, на-

пример появлением дефектов в магнитопроводах или обмотках изделия, приводит к ухудшению его технических характеристик. В том числе, как правило, в нем растут, и весьма значительно, ваттные потери. При неконтролируемом развитии событий оборудование может выйти из строя с весьма серьезными последствиями. Для обеспечения его надежной работы необходимо проведение систематических работ по диагностике его технического состояния.

Надежность и долговечность электроэнергетического оборудования в значительной степени определяется, как сказано выше, состоянием его обмоток, в том числе вероятностью образования в них дефектов, например, в виде витковых замыканий. Появление последних связано обычно с разрушением изоляции благодаря воздействию вибраций, температуры и других факторов, вызванных условиями эксплуатации. Наличие короткозамкнутых контуров (КЗК), сцепленных с основным магнитным потоком в сердечнике, существенно ухудшает технические характеристики

электрооборудования и надежность его работы. Отсюда вытекает практическая необходимость и важность проведения работ по изучению влияния КЗК на магнитные и электрические процессы в электрооборудовании, разработке и развитию методов и средств их диагностирования

Магнитное поле \overline{H}_k короткозамкнутого контура с током, противодействуя магнитному полю \overline{H}_o обмоток, приводит к изменению поля намагничивания \overline{H}_H , которое может рассматриваться как сумма полей \overline{H}_o и \overline{H}_k . Таким образом, появление КЗК, сцепленного с магнитным потоком магнитопровода, непосредственно влияет благодаря собственному магнитному полю \overline{H}_k на процессы перемагничивания в указанном магнитопроводе и, соответственно, на его магнитные характеристики.

На рис. 1 представлены полученные авторами основные кривые намагничивания материала магнитопровода из электротехнической стали в отсутствие и при наличии КЗК при различных значениях сечения провода в контуре. Сравнение этих кривых дает наглядное представление о влиянии магнитного поля \overline{H}_k как размагничивающего фактора, противодействующего магнитному полю обмотки \overline{H}_o . Действительно, из рисунка 1 видно, что для достижения требуемого значения магнитной индукции B_m в материале магнитопровода напряженность магнитного поля \overline{H}_{mo} обмотки при наличии КЗК и увеличении сечения провода должна быть существенно больше, чем в отсутствие КЗК, чтобы обеспечить необходимое эффективное поле намагничивания \overline{H}_H .

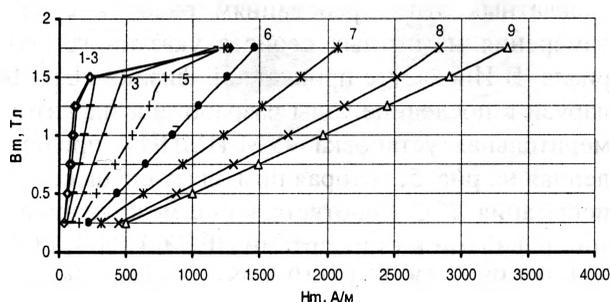


Рис. 1. Кривые намагничивания материала магнитопровода из электротехнической стали при различных значениях сечения S провода в КЗК: 1 — без КЗК; 2 — $S=0,03 \text{ мм}^2$; 3 — $S=0,11 \text{ мм}^2$; 4 — $S=0,25 \text{ мм}^2$; 5 — $S=0,53 \text{ мм}^2$; 6 — $S=0,78 \text{ мм}^2$; 7 — $S=1,19 \text{ мм}^2$; 8 — $S=1,79 \text{ мм}^2$; 9 — $S=2,06 \text{ мм}^2$

На рис. 2 представлена зависимость удельных магнитных потерь в материале магнитопровода трансформатора от амплитуды магнитной индукции в нем при различных значениях сечения провода в КЗК. Из рисунка видно, что наличие КЗК и увеличение сечения провода в нем (что по своему влиянию аналогично увеличению числа короткозамкнутых витков в обмотке) приводит к росту потерь энергии на перемагничивание магнитопровода, уменьшая таким образом к.п.д. изделия.

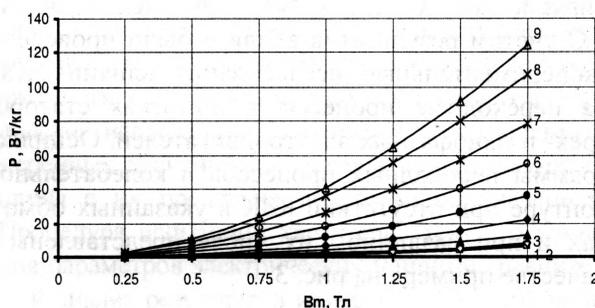


Рис. 2. Зависимость удельных магнитных потерь от амплитуды магнитной индукции в материале магнитопровода из электротехнической стали при различных значениях сечения S провода в КЗК: 1 — без КЗК; 2 — $S=0,03 \text{ мм}^2$; 3 — $S=0,11 \text{ мм}^2$; 4 — $S=0,25 \text{ мм}^2$; 5 — $S=0,53 \text{ мм}^2$; 6 — $S=0,78 \text{ мм}^2$; 7 — $S=1,19 \text{ мм}^2$; 8 — $S=1,79 \text{ мм}^2$; 9 — $S=2,06 \text{ мм}^2$

Известен ряд методов и средств выявления КЗК, см., например, [1–5]. Однако эти и другие используемые методы, а также реализующие их средства диагностики обмоток электрооборудования являются, как правило, системами индикаторного типа и требуют повышения информативности и чувствительности к выявляемому дефекту. Авторами проведены исследования влияния КЗК на переходные электрические процессы в колебательном контуре, одним из элементов которого являлась статорная обмотка L_2 электродвигателя [6]. В результате анализа получены выражения для тока переходного процесса, когда в обмотке L_2 присутствует КЗК и при его отсутствии, соответственно, (1) и (2):

$$i(t) = e^{-\frac{R}{2(L_2 - \Delta L)}t} \left(i_0 \cos \frac{t}{\sqrt{C(L_2 - \Delta L)}} - \left(\frac{CRi_0}{2\sqrt{C(L_2 - \Delta L)}} + \frac{U_{c2}C}{\sqrt{C(L_2 - \Delta L)}} \right) \sin \frac{t}{\sqrt{C(L_2 - \Delta L)}} \right) \quad (1)$$

$$i(t) = e^{-\frac{R}{2L_2}t} \left(i_0 \cos \frac{t}{\sqrt{\frac{C}{L_2}}} - \left(\frac{C}{L_2} \frac{R}{2} i_0 + \sqrt{\frac{C}{L_2}} U_{c2} \right) \sin \frac{t}{\sqrt{\frac{C}{L_2}}} \right) \quad (2)$$

где R , C — соответственно, омическое и емкостное сопротивление контура, L_2 — индуктивность испытуемой обмотки в отсутствие КЗК, $(L_2 - \Delta L)$ — индуктивность испытуемой обмотки при на-

личии в ней КЗК. Сравнение (1) и (2) показывает, что КЗК уменьшает характеристическое сопротивление ($\rho = \sqrt{\frac{L}{C}}$) и добротность ($Q = \frac{\rho}{R}$) всего колебательного контура. Частота свободных колебаний контура $\omega = \frac{1}{\sqrt{CL}}$, как и декремент затухания $\delta = \frac{R}{2L}$, увеличиваются. В результате скорость затухания переходного процесса в рассматриваемом колебательном контуре в целом растет.

С учетом результатов анализа были проведены экспериментальные исследования влияния КЗК на переходные процессы в обмотках статоров трех- и однофазных электродвигателей. Осциллограммы переходных процессов в колебательном контуре при отсутствии КЗК в указанных обмотках и при различном их числе представлены в качестве примера на рис. 3.

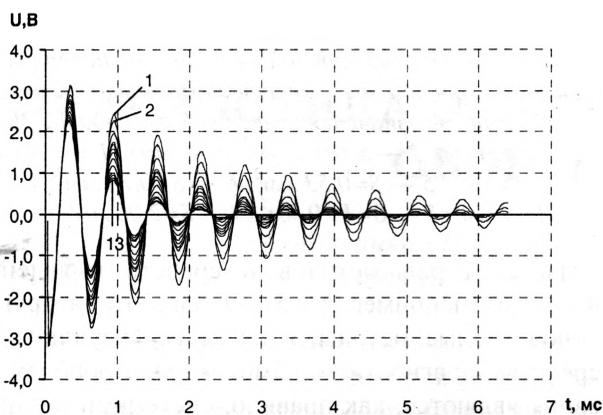


Рис. 3. Затухающие колебания в обмотках при: 1 — без КЗК; 2 — 1 КЗК; ...; 13 — 12 КЗК

На основе проведенных исследований и анализа их результатов была разработана методика диагностирования обмоток одно- и трехфазных электродвигателей, применимая и для диагностирования электрооборудования более широкой номенклатуры. Указанная методика диагностирования реализована на аппаратном и программном уровнях в приборе ДО-1, представленном на рис. 4. Прибор позволяет осуществлять диагностирование обмоток (наличие замыканий межвитковых, на корпус, обрывов, испытание изоляции) в одно- и трехфазных электродвигателях, генераторах и другом электрооборудовании. Он обладает более высокой чувствительностью и информативностью по сравнению с аналогами, позволяет количественно анализировать сигнал, непосред-

ственно обусловленный короткозамкнутым контуром в области максимальной чувствительности. Результаты диагностирования отображаются на дисплее прибора, который имеет встроенную клавиатуру для управления, связь с ПЭВМ через интерфейс RS232.

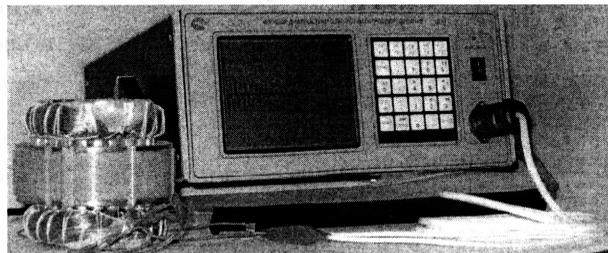


Рис. 4. Прибор для диагностики обмоток электрооборудования ДО-1

Наиболее востребованным материалом для изготовления магнитопроводов электроэнергетического оборудования уже много десятилетий является электротехническая сталь (ЭТС). Качество этого материала, в первую очередь его магнитные свойства, практически определяют уровень магнитных характеристик магнитопроводов. А это, как известно, к.п.д. изделия, его удельная мощность (мощность, отнесенная к единице массы изделия) и т.д. К настоящему времени, выработаны правила и процедуры, закрепленные в межгосударственных стандартах, которые определяют методы испытания ЭТС при определении их магнитных свойств как при входном, так и выходном контроле. Однако предприятия Беларуси — потребители ЭТС (впрочем, как и аналогичные предприятия других стран СНГ) практически не в состоянии осуществлять эффективный контроль качества ЭТС в соответствии с установленными требованиями из-за отсутствия современных, адекватных этим требованиям рабочих средств измерения магнитных свойств указанного материала. В Институте прикладной физики НАН Беларуси в последние годы разработана магнитоизмерительная установка «УМ-ИМПИ», представленная на рис. 5, которая позволяет осуществлять испытания ЭТС в соответствии с международными правилами и стандартами (IEC 60404-4, ГОСТ 12119.4-98, ГОСТ 12119.5-98). Указанная установка внесена в Государственный реестр средств измерений Российской Федерации.

Ранее говорилось о том, что качество ЭО, в том числе уровень его технических характеристик зависит от качества составляющих компонентов, например, от состояния обмоток или магнитопр-

водов. Было показано, что, например, при появлении в обмотках КЗК, существенно ухудшаются магнитные характеристики магнитопровода, а соответственно, и технические характеристики изделия в целом. Похожая ситуация складывается, когда магнитные характеристики материала магнитопровода ухудшаются в процессе эксплуатации (старение) или благодаря появлению электрического контакта между пластинами из-за нарушения их изоляционного слоя. Все это также приводит к ухудшению технических характеристик ЭО. В этой связи представляется перспективным проводить диагностирование ЭО через анализ информации, получаемой при измерении его основных характеристик, которые являются «отражением» технического состояния изделия. Исходя из этого в Институте прикладной физики на основе проведенных исследований была разработана и реализована в приборе ДСТ-1М соответствующая методология диагностирования силовых трансформаторов. Указанный прибор представлен на рис. 6.

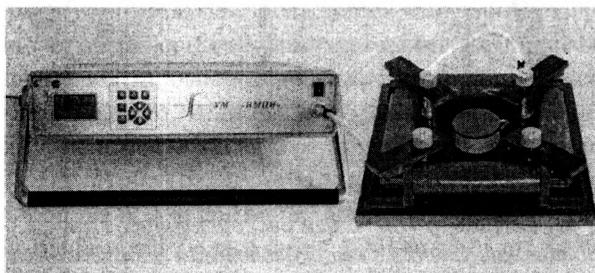


Рис. 5. Общий вид установки «УМ-ИМП» для испытания электротехнических сталей

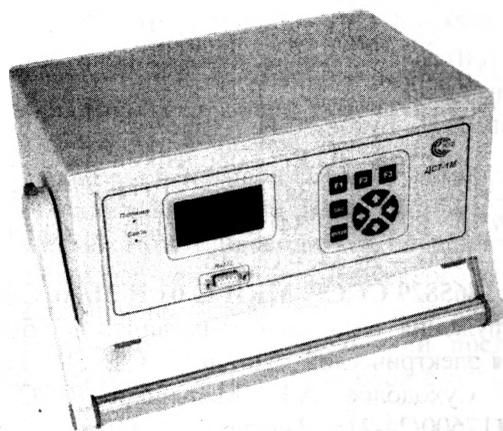


Рис. 6. Прибор ДСТ-1М для диагностики силовых трансформаторов

Прибор ДСТ-1М предназначен для измерения, расчета и анализа параметров силовых трансформаторов в режиме холостого хода, совокупность значений которых содержит объективную информацию,

на основе анализа которой можно судить о техническом состоянии изделия. Позволяет проводить оперативные испытания силовых трансформаторов в условиях их эксплуатации, например, в линиях электрооборудования железной дороги. Может быть использован на электростанциях, подстанциях, в цехах предприятий с энергонасыщенным производством (например, литейных, гальванических), а также при приемо-сдаточных испытаниях силовых трансформаторов и т.д. Внесен в Государственный реестр измерительных приборов Республики Беларусь.

Принципиально такие же подходы были использованы и при разработке методов и средств диагностирования электрических машин постоянного тока, в частности, при их испытаниях после ремонта. Методология испытаний основывается на сравнении измеренных значений параметров испытываемой машины с их предельно допустимыми значениями. Процедура испытаний характерна тем, что измерения параметров электрических машин и сравнительный анализ результатов измерения осуществляются при различных режимах работы этих машин. При каждом режиме работы машины измеряется и анализируется комплекс ее параметров, совокупность измеренных значений которых в сопоставлении с соответствующей совокупностью их предельных значений дает объективную информацию, на основе анализа которой можно судить о техническом состоянии испытываемой машины. Все это требует использования современных технических средств, которые позволяют осуществлять в полном объеме программно реализуемую процедуру измерения и анализа параметров электрической машины при ее испытаниях в различных режимах работы. Использование указанных средств создает объективные возможности для автоматизации процесса испытания электрических машин, повышения надежности и информативности получаемых результатов.

В Институте прикладной физики разработан и метрологически аттестован диагностический комплекс ИПЭМ, представленный на рис. 7, который позволяет осуществлять управление и реализовать испытания электрических машин постоянного тока различной мощности по описанной выше методике.

Одной из распространенных причин возможного выхода из рабочего режима или отказа высоковольтного оборудования является, как показывает опыт, и об этом говорилось выше, неудовлетворительное состояние его изоляции. Ухудшение эксплуатационных характеристик изоляции может быть обусловлено ее старением, наличием

развивающихся дефектов. Достаточно информативным параметром, по которому можно судить о состоянии изоляционного покрытия является величина токов утечки, находящаяся обычно в области очень малых значений. Однако имеющиеся в настоящее время приборы для измерения малых токов, в том числе токов утечки, как правило, основаны на применении контактных методов и их использование в условиях эксплуатации оборудования весьма затруднительно. Более эффективными являются непрерывные или оперативные периодические измерения токов утечки при бесконтактном методе съема сигналов в рабочих условиях и режимах работы оборудования, позволяющие отслеживать их динамику изменения во времени. Это обеспечивает более полную информацию о техническом состоянии изоляции, создавая предпосылки для оценки ее ресурса и повышая тем самым, как сказано выше, вероятность безаварийной работы оборудования.

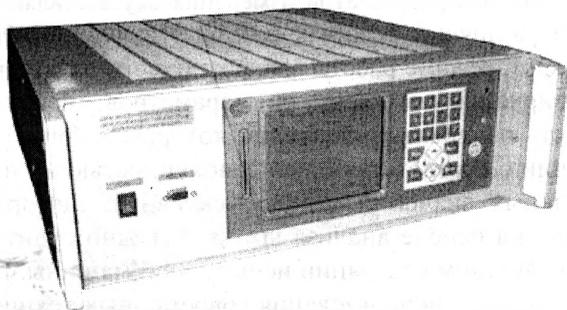


Рис. 7. Диагностический комплекс ИПЭМ для испытания электрических машин постоянного тока

Литература

1. А. с. 1404986 СССР, МКИ G 01R 31/06. Способ контроля качества изоляции обмоток / В.К. Горбунов, С.И. Крюков, Н.И. Суворов и В.Г. Тихобаев (СССР). – № 4152227/24-21; Заявлено 26.11.86; Опубл. 23.06.88, Бюл. № 23 // Открытия. Изобретения. – 1988. – № 23. – С. 203.
2. Пат. № 2054687 РФ, МКИ G 01 R 31/06. Устройство для контроля фазных обмоток электрических машин / А.М. Марков, В.Ф. Лучук, И.С. Шукин (СССР). – № 5033990/07; Заявлено 25.03.92; Опубл. 20.02.96, Бюл. № 5 // Открытия. Изобретения. – 1996. – № 5. – С. 202
3. А. с. 1797082 СССР, МКИ G 01 R 31/06. Способ контроля изоляции обмоток статоров трехфазных электрических двигателей и устройство для его осуществления / О.А. Алекперов, Д.О. Оруджев, Н.Х. Худиев (СССР). – № 4833070/21; Заявлено 24.07.91; Опубл. 12.04.92, Бюл. № 12 // Откры-

В Институте прикладной физики разработан представленный на рис. 8 прибор ИМТБ для бесконтактного измерения малых токов, в том числе токов утечки в высоковольтном оборудовании через измерение их магнитных полей. Указанный прибор может использоваться для оперативной оценки состояния изоляции электроэнергетического оборудования в условиях его эксплуатации.



Рис. 8. Прибор ИМТБ для бесконтактного измерения токов утечки в высоковольтном оборудовании

- тия. Изобретения. – 1993. – С. 199.
4. А. с. 1592809 СССР, МКИ G 01 R 31/06. Способ контроля витковых замыканий в обмотках электрических машин / В.Г. Тихобаев, Ю.К. Горбунов, В.И. Гуков, С.И. Крюков, Б.К. Левин, Я.Я. Соколов, Ю.Е. Городецкий (СССР). – № 4296629/24-21; Заявлено 19.08.87; Опубл. 15.09.90, Бюл. № 34 // Открытия. Изобретения. – 1990. – № 34. – С. 216.
5. А. с. 1465829 СССР, МКИ G 01 R 31/06. Способ обнаружения виткового замыкания в обмотке якоря электрической машины / В.Д. Шевеленко, Ю.В. Суходолов, А.И. Мельников (СССР). – № 4117600/24-21; Заявлено 16.09.86; Опубл. 15.03.89, Бюл.
6. Брановицкий И.И., Размыслович Г.И., Мацкевич П.Д. Диагностика обмоток электрооборудования // «ЭНЕРГЕТИКА». Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ, с. 5 – 11.