

ВВЕДЕНИЕ В ДЕМАГНЕТИЗАЦИЮ ТЕХНИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ

Розов В.Ю., д.т.н., Пилогина О.Ю., к.т.н., Добродеев П.Н., к.т.н., Гетьман А.В., к.т.н., Волохов С.А., к.т.н.
Отделение магнетизма Института электродинамики НАН Украины,
ул. Индустриальная, 19, Харьков, Украина, 61106
тел/факс 99-21-62

Лупиков В.С., д.т.н.
Национальный технический университет "Харьковский политехнический институт"
61002, Украина, Харьков, ул. Фрунзе, 21, кафедра "Электрические аппараты"
тел. 707-68-64, e-mail: lupikov@kpi.kharkov.ua

Проведено аналіз методів цілеспрямованої дії на магнітне поле технічних об'єктів і виробів, які використовують для забезпеченням вимог при вирішенні різноманітних технічних проблем таких, як електромагнітна сумісність технічних засобів, магнітний захист кораблів, магнітна екологія і санітарія, захист технологічних процесів від шкідливого впливу магнетизму.

Проведен анализ методов целенаправленного воздействия на магнитное поле технических объектов и изделий, применяемых для обеспечения требований при решении разнообразных технических проблем таких, как электромагнитная совместимость технических средств, магнитная защита кораблей, магнитная экология и санитария, защита технологических процессов от вредного влияния магнетизма.

ВВЕДЕНИЕ

Филипп Блекели из Кембриджа пишет [1], что некоторые производители в сварочной индустрии, годами работая без каких-либо серьезных трудностей, становились в тупик, сталкиваясь с проблемой магнитного дутья. Были выполнены дорогостоящие работы, направленные на решение проблемы, опробован даже такой оригинальный метод, как увольнение всей бригады сварщиков и замена новыми рабочими. Это не единственный и, возможно, не самый убедительный пример вредного влияния магнетизма на социальные и экономические процессы. Ныне на повестке дня стоит четыре проблемы, связанные с вредным влиянием магнетизма технических объектов и изделий: магнитная совместимость технических средств, магнитная защита технических объектов, магнитная защита технологических процессов, магнитная экология и промсанитария.

Проблема магнитной совместимости технических средств связана с воздействием магнитно-активных изделий на магнитно-восприимчивые в составе одного объекта, приводящим к опасным отклонениям в его функционировании. Например, на протяжении 1980-1985 годов на нескольких однотипных подводных лодках во время походов были случаи срабатывания автоматической системы пожаротушения. Система объявляла пожар в определенном отсеке, команда срочно покидала отсек, автоматически задраивались отсечные люки, отсек заполнялся противопожарной пеной для ликвидации пожара. По прибытии в порт оказывалось, что срабатывание системы пожаротушения было ложное. А последствия требовали немалых усилий по очистке отсека от пены и замене испорченного имущества. Поиски причин привели к обнаружению непредвиденного сигнала, наводимого в системе пожаротушения через сложные индуктивные связи при совместной работе определенного набора электрооборудования и пуске одного из них. Получалось, как в сказке о репке: пока работает пять из шести единиц электрооборудования - все

нормально. Как только включается шестое, причем любое из них, даже самое маленькое, как мышка в сказке, - сигнал непреднамеренной помехи переходит пороговый уровень электромагнитной восприимчивости, что и приводит к ложному срабатыванию системы. Вспомнились другие случаи странного поведения систем управления, контроля и мониторинга. Проведенное обобщение привело к пониманию существования на Флоте проблемы магнитной совместимости и принятию мер по ее решению.

Второй яркий пример наличия проблемы магнитной совместимости можно увидеть на предприятиях по производству алюминия. Электролиз алюминия сопровождается сверхсильными токами и столь же сверхсильными магнитными полями, которые способны привести к ложному срабатыванию даже сильноточного электрооборудования, например, кранового. Поэтому ко всему оборудованию цехов электролиза алюминия предъявляются требования по магнитной совместимости, то есть требование по нормальному функционированию оборудования в магнитном поле соответствующей напряженности.

Магнитная защита технических объектов связана с необходимостью их защиты от повреждения устройством или процессом, действие которого обусловлено магнетизмом объекта. В качестве примера снова обратимся к Флоту, который практически на протяжении всего прошлого столетия активно инициировал исследования, воспринимал и использовал передовые научно-технические идеи и решения. Одной из проблем, исследование и решение которой инициировано Флотом, была проблема магнитной защиты кораблей. Возникла она в связи с разработкой и применением мин с неконтактными магнитными и индукционными взрывателями [2, 3]. Работы были начаты в Ленинградском физико-техническом институте в 1936 г. под руководством А.П. Александрова, будущего президента АН СССР. Задача первоначально формулировалась так: "Разработка метода, позволяющего свести искажения Земного поля вблизи корабля к возможно

меньшим значениям". Работа велась в двух направлениях: изучение характера намагничивания моделей и кораблей и изучение действия размагничивающих соленоидов различных систем на моделях и кораблях. Размагничиванием кораблей занимались ныне известные всем академики Александров А.П. и Курчатов И.В., ученые-физики Тамм И.Е., Кондорский Е.И. Были разработаны и внедрены в практику два основных метода размагничивания, названные обмоточным и безобмоточным. Обмоточное размагничивание основано на создании с помощью обмоток размагничивающего устройства (РУ) магнитного поля, противоположенного магнитному полю Земли (МПЗ) и следящего за курсом корабля, то есть за изменением МПЗ в координатах корабля. Безобмоточное размагничивание основано на создании размагниченного состояния ферромагнитных масс корабля и такой остаточной намагниченности его корпуса, которая компенсирует индуцированную намагниченность от МПЗ в вертикальном направлении для определенного района плавания.

Рост чувствительности магнитных мин и их неконтролируемый сброс в различных районах мирового океана во время локальных войн привели к необходимости магнитной защиты крупных кораблей и нефтеналивных судов. На практике такая защита осуществляется путем их сопровождения минными тральщиками, что в свою очередь привело к необходимости существенно повысить магнитную защиту последних. Достичь необходимого уровня магнитной защиты тральщиков оказалось возможным только при изготовлении корпуса из немагнитных (дерево, пластик) или слабомагнитных (маломагнитная сталь) материалов. При этом в связи с резким снижением экранирующих свойств корпуса возникла проблема создания комплектующего оборудование в так называемом маломагнитном исполнении, то есть с требованиями по ограничению его внешнего магнитного поля.

Магнитная защита целесообразна и в других приложениях. Известно вредное влияние магнетизма на работу подшипниковых узлов турбоагрегатов. Продольная намагниченность вала вызывает намагниченность подшипника и, как следствие, магнитоэрикссионное разрыхление его поверхностей и удержание на дорожках металлических частиц, которые разрушают поверхности дорожек. Известно также разрушающее действие постоянного и переменного тока через подшипники. Возникновение таких токов связано с появлением униполярных магнитных потоков. Эти потоки вызваны различного рода асимметриями в электрической схеме и магнитной системе генератора, такими как геометрическая и электрическая асимметрия обмотки статора, динамический и статический эксцентриситет, анизотропия стали. Он может быть связан также с наличием касательно намагниченных элементов на роторе и статоре агрегата. Изменение их взаимного положения при вращении ротора вызывает ток через подшипники, спектральный состав которого зависит от параметров намагниченных элементов и скорости вращения агрегата. На турбоагрегатах осуществляется электрическая защита от статического электричества. Требуется также и защита магнитная

от намагниченности. Вне сомнения, что использование на турбоагрегатах большой мощности магнитной защиты, в том числе размагничивания, как ее основного элемента, позволит повысить надежность эксплуатации и увеличить ресурс подшипниковых узлов.

Проблема защиты технологических процессов от вредного влияния магнетизма связана с силовым действием магнитного поля на электрические токи и ферромагнитные тела. Так, например, при сварке намагниченных деталей под действием магнитной силы происходит отклонение сварочной дуги, в результате чего нарушается качество сварного шва. Механическая обработка намагниченных деталей затруднена из-за прилипания стружки и окалины.

Проблема магнитной экологии и промсанитарии связана с тем, что естественное магнитное поле Земли претерпевает изменения техногенного происхождения, вредно влияющие на человека. Наблюдается два уровня вредного влияния: уровень сильного поля, когда происходят необратимые изменения в клетках организма, и уровень слабого поля, когда изменения в функционировании организма происходят вследствие "информационного" воздействия поля на нервную систему.

Цель работы – обобщение известных методов, обеспечивающих целенаправленное воздействие на магнитное поле технических объектов для обеспечения требований, связанных с обеспечением проблем электромагнитной совместимости в части магнитных полей технических средств, магнитной защиты кораблей, магнитной экологии и санитарии, защиты технологических процессов от вредного влияния магнетизма.

МАГНИЗМ ТЕХНИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ

На базе значительного количества научных исследований и разработок по решению перечисленных проблем возникло новое направление в электротехнике, связанное с изучением магнетизма технических объектов и их демагнетизацией. Под магнетизмом технического объекта понимается совокупность магнитных свойств технических объектов и явлений, связанных с взаимодействием технических объектов и внешней среды посредством магнитного поля.

Магнитные свойства технических объектов зависят от наличия ферромагнитных и проводящих масс, их объемов, расположения, вращения, перемещения и т.п. Магнитное поле в свою очередь рассматривается как материальное продолжение объекта за его молекулярную структуру, обеспечивающее его связь с окружающим материальным миром наряду с полями электрическим, гравитационным и излучений.

Магнитное поле технического объекта в общем случае определяется как зависимость индукции \vec{B} от электрических токов с плотностью \vec{j} в проводящих массах объекта и намагниченностей \vec{j} в его ферромагнитных массах. Эта зависимость имеет вид [5]:

$$\vec{B} = \mu_0 \left[\operatorname{rot} \frac{1}{4\pi} \int_{V_i} \frac{\vec{\delta}}{|\vec{r}|} dV_i - \operatorname{grad} \frac{1}{4\pi} \int_{V_m} \left(\vec{j}, \operatorname{grad}' \frac{1}{|\vec{r}|} \right) \cdot dV_m \right]$$

где V_i – области технического объекта, занятые прово-

дьящими массами с электрические токи соответствующей величины, частоты и фазы; V_m – области технического объекта, занятые ферромагнитными массами с индуцированной и остаточной намагниченностью; \vec{r} – вектор, проведенный от соответствующего элемента тока или намагниченности в точку определения внешнего магнитного поля технического объекта.

Подавляющее большинство технических объектов на 70÷90% состоят из железа, которое одновременно представляет ферромагнитную и проводящую массу. Широко используются и другие металлы, например, алюминий, медь, которые представляют проводящие массы. Наблюдается непрерывный рост энергопотребления, постоянное увеличение насыщенности технических объектов изделиями электроэнергетики, в которых протекают постоянные и переменные токи. Все это привело к обострению проблемы вредного влияния магнетизма технических объектов и изделий на сами объекты, их элементы и окружающую среду.

Для исключения вредного влияния магнетизма осуществляют демагнетизацию технических объектов и комплектующих изделий [5-10]. Объекты и изделия, прошедшие демагнетизацию, называют маломангнитными. Классификация методов демагнетизации технических объектов и изделий приведена на рисунке. Основным принципом проектирования маломангнитных объектов и изделий является последовательное использование приведенных методов от простых к сложным с контролем достигнутого результата на каждом этапе демагнетизации. Степень простоты или сложности метода определяет проектант изделия, исходя из технологических возможностей производства. Например, опыт показал, что при проектировании электрических машин средней мощности самым простым методом демагнетизации является возможная замена ферромагнитных материалов немагнитными или слабомагнитными. А наиболее сложным – применение устройств компенсации.

КЛАССИФИКАЦИЯ МЕТОДОВ ДЕМАГНЕТИЗАЦИИ

На рис. 1 приведена обобщенная блок-схема известных методов целенаправленного воздействия на магнитное поле технических объектов.

Рассмотрим в общих чертах приведенные на рисунке методы демагнетизации.

Оптимизация конструкции и технологии – это использование ряда технических решений при проектировании изделия, направленных на обоснованный выбор немагнитных и непроводящих материалов, электромагнитных нагрузок, электрических схем и магнитных систем, технологических допусков и др. Их также называют конструктивно-технологическими мероприятиями и представляют в виде правил, которыми необходимо руководствоваться при проектировании и изготовлении изделия. Например, для электрооборудования [5]:

- все элементы конструкции, за исключением магнитопроводов, предпочтительно выполнять из немагнитных или маломангнитных материалов;

- площади всех контуров с током и обмоток должны быть минимально возможными; выводы и соединения обмоток следует бифилировать путем плотной укладки рядом проводов с обратным направлением тока;

- предпочтение следует отдавать тому варианту конструкции изделия, у которого выше полнота полей рассеяния;

- для электрических машин лучше применять стали повышенной точности проката и с малой коэрцитивной силой; магнитную индукцию в спинке статора электрической машины выбирать из условия обеспечения максимальной магнитной проницаемости, т.е. на уровне 1 Тл;

- вал электрической машины или оба его свободные конца (за исключением части под магнитопроводом) изготавливать из немагнитной стали (например, марки 43Г17ЮЗ);

- допуски на геометрические размеры обмоток, элементов магнитопровода и основного воздушного зазора электрических машин должны быть минимально возможными.

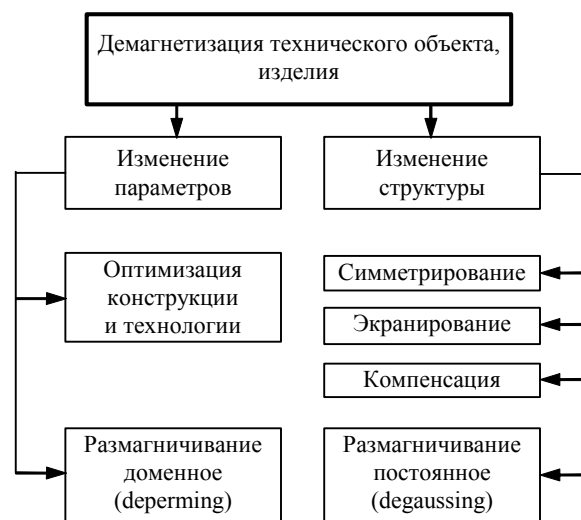


Рис. 1. Классификация методов демагнетизации

Оптимизация конструкции и технологии воплощаются в технические решения в процессе проектирования конкретного оборудования с учетом его индивидуальных особенностей. Иногда достаточно оригинальным образом. Например, чтобы исключить сварной шов из станины электрической машины типа ММГ-6, ее сделали витой из стали марки 3411 на каркасе из немагнитной стали.

В случае, когда магнетизм оказывает вредное влияние на технологический процесс, необходимо проводить оптимизацию технологии, то есть использовать ряд технических решений, направленных на снижение вредного влияния магнетизма на технологический процесс за счет целенаправленного использования выявленных закономерностей. Например, было установлено, что допустимый уровень индукции в зоне сварки, при котором отсутствует явление "магнитного дутья" и обеспечивается высокое качество шва, тем выше, чем больше ток сварки и меньше длина дуги. Использование этой закономерности и есть пример оптимизации технологии.

Размагничивание доменное (deperming) – это воздействие магнитным полем на ферромагнитные элементы изделия, в результате которого они переходят в размагниченное состояние (динамическое и статическое по ГОСТ 19693-74). Динамическое размагниченное состояние получают воздействием на ферромагнетик внешним знакопеременным периодическим магнитным полем, амплитуда напряженности которого уменьшается от значения, соответствующего намагниченности насыщения, до нуля при отсутствии других внешних магнитных полей. Статическое размагниченное состояние получают при помощи внешнего магнитного поля, которое приводит намагниченность магнитного материала к такому значению, что при удалении поля она становится равной нулю. В соответствии с этими определениями принято два метода размагничивания: статическое и динамическое. В них используется принципиальная возможность воздействовать на доменную структуру ферромагнетика: уменьшить размеры доменов и придать им разную ориентацию, чтобы результирующая намагниченность была равна нулю. Эти два метода размагничивания объединены под общим названием "доменное" размагничивание. Статическое и динамическое размагничивание производят либо на стендах со стационарными обмотками в виде соленоидов, либо временно наматываемыми на изделие обмотками. Иногда это могут быть собственные обмотки электрооборудования.

Симметрирование – это метод снижения магнетизма электрооборудования путем внесения в электрическую схему (электрическое симметрирование) или магнитную систему (магнитное симметрирование) элементов, уменьшающих магнитный диполь и обеспечивающих поддержание многополюсной симметрии магнитного поля изделия во внешнем пространстве. Примером электрического симметрирования может служить применение шунтирующих сопротивлений для катушек главных полюсов многополюсных машин постоянного тока. Выбор полюсов, к катушкам которых подключаются шунтирующие сопротивления, и определение величин сопротивлений производится по результатам измерений магнитных моментов машины. Примером магнитного симметрирования может служить установка под полюсами машины постоянного тока ферромагнитных прокладок или ферромагнитных стержней между шинами транспонированных шинопроводов силовых щитов. Известно, что в результате технологических отклонений при изготовлении транспонированных шинопроводов геометрические размеры контуров, имеющих противоположные магнитные моменты, оказываются различными. В результате транспонированный шинопровод обладает определенным магнитным моментом. Выравнивание магнитных моментов контуров обеспечивается внесением в контур с меньшим магнитным моментом ферромагнитного стержня. Намагничиваясь в магнитном поле контура, стержень приобретает магнитный момент, пропорциональный его длине и намагничивающему полю. Варьируя длиной стержня и его положением относительно контура, можно добиться равенства нулю результирующего магнитного момента транспонированного шинопровода.

Экранирование – это метод локализации магнитного поля внутри области, ограниченной экранирующей оболочкой. По физической сущности различают магнитостатическое и электромагнитное экранирование. Магнитостатическое экранирование заключается в замыкании силовых линий экраном из ферромагнитного материала с высокой магнитной проницаемостью. Электромагнитное экранирование заключается в возникновении противоположно направленных вихревых токов в экране из материала с высокой электропроводностью. Метод экранирования хорошо зарекомендовал себя при демагнетизации электрических машин. Например, в рассмотренном ранее случае выполнения станины МПТ витой из электротехнической стали, сама станина является многослойным экраном. Благодаря наличию зазоров между слоями в каждом последующем от полюсов слое магнитное поле уменьшается и напряженность его в последнем слое существенно ниже напряженности в первом, что и определяет высокую эффективность экранирования. Оптимальными по эффективности и массогабаритным показателям являются экраны, в основу которых положен принцип многополюсных преобразований: *снижение уровня ВМП на далеких расстояниях от источника наиболее эффективно может быть достигнуто путем преобразования пространственных гармоник низких порядков, в первую очередь дипольной, в более высокие.* Для электрических машин переменного тока преобразование первой (дипольной) пространственной гармоники достигается применением экрана, состоящего из электропроводящего цилиндра (проводящий слой) и ферромагнитных кольцевых элементов (поясов), расположенных внутри цилиндра у его торцов (торцевые пояса) и снаружи цилиндра над спинкой статора (наружные пояса). Пояса выполняются из рулонной электротехнической стали путем навивки необходимого числа слоев. Дальнейшее совершенствование данного типа экрана применительно к крупным машинам переменного тока привело к созданию экрана с проводящим слоем в виде беличьей клетки. Такая конструкция экрана обладает удобством расположения проводящего слоя на корпусе электрической машины, а также возможностью корректировки его сечения на последующих машинах, так как в данном случае проводящий слой экрана не является конструктивной деталью, несущей механические нагрузки. Существенной является также возможность регулирования тока в проводящем слое экрана путем установки на стержнях клетки ферромагнитных кольцевых элементов, которые изменяют индуктивное сопротивление клетки.

Компенсация – это метод снижения магнитного поля в заданной области пространства с помощью компенсирующего магнитного поля, создаваемого специальными компенсационными устройствами (КУ) или системами компенсации [5].

Размагничивание постоянное (degaussing) – это метод компенсации, применяемый в судовом магнетизме для снижения остаточной и индуцированной намагниченности судна (корабля) в магнитном поле Земли (МПЗ), а также при местном размагничивании магистральных трубопроводов перед сваркой. Он

осуществляется с помощью так называемого размагничивающего устройства (РУ). Такое название связано с тем, что размагниченное состояние получают при постоянном воздействии на изделие внешним магнитным полем.

Сходство постоянного размагничивания и компенсации заключается в том, что реализуются они при помощи принципиально одинаковых устройств. Элемент РУ или КУ, создающий размагничивающее поле, называется магнитным компенсатором. В качестве магнитных компенсаторов могут выступать специально намотанные контурные обмотки, магниты или электромагниты. Компенсационные обмотки обычно охватывают изделие или группу изделий. Поле обмотки направлено полю изделия в подлежащей демагнетизации области. Оно также направлено намагнитности изделия и уменьшает её. Магниты и электромагниты называют локальными компенсаторами, их располагают вне изделий. Магнитное поле локального компенсатора, как и в предыдущем случае, направлено полю изделия в подлежащей демагнетизации области, но практически не воздействует на ферромагнитные массы изделия, а если и воздействует, то, в отличие от предыдущего случая, несколько их намагнитывает. Возможно и сочетание компенсационных обмоток и локальных компенсаторов. Тогда компенсатор называют комбинированным. Разработаны автоматические РУ и КУ, построенные по параметрическому принципу, когда в качестве управляющего воздействия на ток магнитного компенсатора используется один или группа параметров, определяющих магнитное поле изделия: сигнал от датчика МПЗ – на судах, ток и напряжение – на электрооборудовании.

ВЫВОДЫ

Приведенная классификация методов демагнетизации может служить основой комплексного и системного подхода к решению проблемы снижения вредного влияния магнетизма на технические объекты и технологии.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Blakeley P.J. Magnetic arc blow – causes and remedies. *Welding & Metal Fabrication*, Aug/Sept 1991.
- [2] Ткаченко Б.А. История размагничивания кораблей Советского Военно-Морского Флота. – Л.: Наука, 1981. – 223 с.
- [3] Панченко Б.Д. Размагничивание кораблей Черноморского Флота в годы Великой Отечественной войны. – М.: Наука, 1990. – 188 с.
- [4] Терехов И.Н. Будущему штурману о судовом магнетизме. – М.: ДОСААФ СССР, 1989. – 112 с.
- [5] Розов В.Ю. Системи автоматичної компенсації зовнішнього магнітного поля енергетичних об'єктів. Автореф. дис...д-ра техн. наук: 05.09.13 / Інститут електродинаміки НАН України. – Київ, 2002. – 37 с.
- [6] Лупіков В.С. Наукові основи технології компенсації магнітного поля поблизу низьковольтних комплектних пристроїв. Автореф. дис...д-ра техн. наук: 05.09.01 / Національний технічний університет "ХПІ". – Харків, 2004. – 36 с.
- [7] Пилігоїна О.Ю. Підвищення ефективності зниження зовнішнього магнітного поля електричних машин змінного струму. Автореф. дис...канд. техн. наук: 05.09.01 / Національний технічний університет "ХПІ". – Харків, 2001. – 24 с.
- [8] Добродеев П.М. Підвищення ефективності методів зниження зовнішнього магнітного поля електричних машин постійного струму. Автореф. дис...канд. техн. наук: 05.09.01 / Національний технічний університет "ХПІ". – Харків, 2005. – 24 с.
- [9] Гетьман А.В. Просторовий гармонічний аналіз магнітного поля технічних об'єктів. Автореф. дис...канд. техн. наук: 05.09.05 / Інститут електродинаміки НАН України. – Київ, 2004. – 24 с.
- [10] Розов В.Ю., Волохов С.А., Лупіков В.С., Кильдишев А.В., Ерисов А.В. Технология снижения внешних магнитных полей судового электрооборудования // Труды Второй международной конференции по судостроению "ISC'98". – Т. 2. – С.-Петербург: ЦНИИ им. акад. А.Н. Крылова. – 1998. – С. 22-27.

Поступила 24.01.2006