

ШУМОВАЯ ДИАГНОСТИКА ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ

Н.В. Силин, Д.Г. Шевердин

В статье показано, что контроль технического состояния электротехнического оборудования возможно осуществлять по данным измерения спектров собственного электромагнитного излучения в широком диапазоне частот, не ограничиваясь гармониками промышленной частоты. Такие методы контроля основаны на применении принципов шумовой диагностики. Приведено описание шумов, сопровождающих работу электротехнического оборудования, а также описаны их спектральные характеристики.

Ключевые слова: диагностика, методы контроля технического состояния, электротехническое оборудование, электромагнитное излучение, шумовая диагностика.

Развитие и модернизация агропромышленного комплекса (АПК) в значительной мере определяет состояние всего потенциала государства, уровень продовольственной безопасности страны в целом и отдельно взятого региона в частности. В Российской Федерации одним из приоритетных национальных проектов является проект «Развитие агропромышленного комплекса». АПК относится к числу основных народнохозяйственных комплексов, определяющих условия поддержания жизнедеятельности общества, обеспечения потребностей людей в продуктах питания и существенно влияющих на трудовую занятость населения. Качество выпускаемой агропромышленным комплексом продукции, экономия энергоресурсов, безаварийная работа электротехнического оборудования тесно взаимосвязаны. Добиться высокого значения этих показателей можно путем совершенствования технической эксплуатации оборудования и внедрением методов его эффективной диагностики.

В связи с этим повышение эксплуатационной эффективности оборудования в агропромышленном секторе является одной из первоочередных задач, определяющих конечные результаты работы предприятия. Специфика сельскохозяйственных предприятий связана с процессом непрерывного жизнеобеспечения биологических объектов, при этом срыв технологических операций из-за отказа электротехнического оборудования может привести к катастрофическим последствиям. Ущерб такого рода может значительно превышать прямые затраты на замену и ремонт электротехнического оборудования, так как в этот ущерб входит также брак и недовыпуск сельхозпродукции. Например, средний ущерб от отказа одного электродви-

гателя в растениеводстве достигает 3500 руб., а в животноводстве с поточным производством – до 10000 руб. [1].

В настоящее время, оборудование большинства объектов системы энергообеспечения предприятий агропромышленного комплекса имеет чрезвычайно большой износ. На большинстве предприятий агропромышленного комплекса система планово-предупредительных ремонтов действует неудовлетворительно, зачастую отсутствует системный подход к учету количественных и качественных показателей выхода из строя электротехнического оборудования.

Разработке методов контроля технического состояния электротехнического оборудования в последнее время уделяется все больше внимания [1; 2; 3]. В [3] предложена система обслуживания оборудования, альтернативная системе планово-предупредительного ремонта. Такая система учитывает фактическое состояние электротехнического оборудования. Решение о необходимости периодической оценки его состояния и выполнения восстановительных мероприятий принимается только в том случае, когда контролируемые диагностические параметры выходят за заданный предел допустимого изменения.

Нормативные документы электроэнергетических компаний указывают на необходимость интенсивной разработки методов, обеспечивающих контроль технического состояния оборудования без вывода его из эксплуатации. Так в соответствии с «Положением о технической политике ОАО «ФСК ЕЭС» одной из стратегических целей компании является повышение эффективности и развитие системы диагностики объектов Единой Национальной Электрической Сети Россий-

ШУМОВАЯ ДИАГНОСТИКА ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ

ской Федерации. Кроме того, к числу приоритетов ОАО «ФСК ЕЭС» относятся внедрение и развитие современных систем контроля технического состояния, автоматической диагностики и мониторинга технологического оборудования, систем релейной защиты и противоаварийной автоматики и другого электротехнического оборудования.

Теоретические и экспериментальные исследования показали, что собственные внешние электрические, магнитные и электромагнитные поля электротехнического оборудования можно рассматривать как информационные, позволяющие решать задачи диагностики.

Электромагнитные поля [4] описываются при помощи векторных функций координат и времени. Векторные функции напряженности электрического поля $E=E(r, t)$ и магнитной индукции $B=B(r, t)$ вполне определяют электромагнитное поле в вакууме. В случае произвольной среды этих двух функций недостаточно, поэтому для описания электромагнитного поля в реальной среде добавляются еще две дополнительные функции: напряженность магнитного поля $H=H(r, t)$ и электрическая индукция $D=D(r, t)$.

При этом перечисленные выше векторные величины связаны между собой следующими соотношениями:

$$D=\varepsilon\varepsilon_0E, B=\mu\mu_0H,$$

где ε_0 и μ_0 – электрическая и магнитная постоянные, ε – относительная диэлектрическая проницаемость среды, μ – относительная магнитная проницаемость среды.

Электромагнитное поле представляет собой совокупность электрического поля (векторы E, D) и магнитного поля (векторы B, H). Физическое содержание векторных функций E, B, H, D определяется уравнениями теории электромагнетизма (система уравнений Максвелла):

$$\left. \begin{aligned} \operatorname{rot} H &= \partial D / \partial t + j \\ \operatorname{div} D &= \rho \\ \operatorname{rot} E &= -\partial B / \partial t \\ \operatorname{div} B &= 0, \end{aligned} \right\}$$

где ρ – плотность заряда. Вектор $j = \sigma E$ определяет плотность тока проводимости, где σ – удельная электропроводность.

Сама по себе система уравнений Максвелла не имеет определенных решений. Определенное решение, т. е. совокупность E, H, B, D, j и ρ как конкретных функций координат и времени, существует только при наложении некоторых дополнительных условий,

характеризующих ту или иную рассматриваемую задачу (например задачу об электромагнитном поле исследуемого электротехнического оборудования). Иными словами, после того как задача об исследуемом электромагнитном процессе правильно сформулирована, она становится математической задачей, включающей систему уравнений Максвелла и дополнительные условия, при которых существует решение, описывающее данный процесс.

В качестве диагностических параметров можно использовать ряд характеристик электромагнитного поля. Например, это могут быть модуль вектора или составляющие векторов напряженности электрического (E) и магнитного полей (H), интегральные параметры, связанные с электромагнитным полем. В низкочастотном диапазоне наиболее просто измерять напряженность магнитного поля. В высокочастотной области в качестве носителя информации о работоспособности устройства иногда используются значения касательных составляющих напряженности электрического и магнитного полей к поверхности, максимально приближенной к контролируемому объекту.

В [5] разработаны теоретические основы диагностики электродвигателей по зависимости гармонического состава их внешнего магнитного поля от степени развития дефектов, экспериментально доказана зависимость изменений параметров внешнего магнитного поля от степени развития дефектов электродвигателя, а также представлены результаты диагностики по интенсивности гармонических составляющих напряженности внешнего магнитного поля на частотах до 1000 Гц.

Практика показывает, что работа любого электротехнического оборудования обычно сопровождается процессами, являющимися источниками электромагнитных излучений. При этом внешнее электромагнитное поле оборудования, работающего в нормальном режиме, отличается от поля оборудования, в котором появились дефекты или изменились условия эксплуатации.

В данной работе показано, что контроль технического состояния электротехнического оборудования возможно осуществлять по данным измерения спектров собственного электромагнитного излучения в широком диапазоне частот, не ограничиваясь гармониками промышленной частоты. Новые возможности в области электромагнитного контроля появляются при анализе спектрального состава электромагнитного излучения [6].

Связь между величинами источников электромагнитных излучений и измеряемых напряжений можно представить в матричной форме:

$$U(j\omega) = K(j\omega) E(j\omega),$$

где $U(j\omega)$ и $E(j\omega)$ – векторы спектров напряжений и источников соответственно, $K(j\omega)$ – матрица комплексных коэффициентов передачи соответствующих размеров. Если матрица коэффициентов передачи $K(j\omega)$ квадратная, то решение имеет вид:

$$E(j\omega) = K^{-1}(j\omega) U(j\omega).$$

Методы спектрального контроля основаны на применении принципов шумовой диагностики электротехнического оборудования. В общем случае шум – это беспорядочные, или флуктуационные, колебания различной физической природы, характеризующиеся сложностью временной и спектральной структуры. Первоначально слово «шум» относилось исключительно к звуковым колебаниям, однако в современной науке оно было распространено и на другие виды колебаний. Так, шумы в радиоэлектронных устройствах представляют собой случайные колебания токов и напряжений и возникают в результате неравномерной эмиссии электронов в электровакуумных приборах, неравномерности процессов генерации и рекомбинации носителей заряда в полупроводниковых приборах, теплового движения носителей тока в проводниках [7, 8].

Шум может быть обусловлен как самим механизмом протекания электрического тока, так и хаотическими изменениями других неэлектрических параметров оборудования, которые преобразуются в изменения величин токов и напряжений. На практике шумом можно считать любое нерегулярное или хаотическое изменение параметра, обусловленное большим числом случайных событий. Шумы присутствуют в любых системах и средах.

Шумы в электронных схемах обычно рассматриваются как вредный фактор, и, действительно, они часто накладывают ограничения на работу устройств. Это справедливо, например, в случае маломощного усилителя звуковой частоты, в котором минимальная обнаруживаемая мощность входного сигнала зависит главным образом от уровня шумов входного каскада. Однако шум может быть использован для целей диагностики электронного и электротехнического оборудования.

Собственные электромагнитные излучения электротехнического оборудования тесно

связаны с физико-химическими процессами, протекающими в изоляции, узлах и конструктивных элементах. Тепловое и электрическое разрушение изоляции, нарушение взаимосвязей между молекулами за счет химических процессов сопровождается движением и взаимодействием носителей зарядов, возбуждением и излучением электромагнитных колебаний.

В электротехнических установках источниками шумов являются электрические пробои, частичные и ползущие разряды, повышенный нагрев локальных зон, перегрев контактов и т.д. В общем случае вышеперечисленные процессы являются причиной появления так называемых токов полевой и тепловой ионизации, возникающих в дефектных областях наружных и внутренних частей электротехнического оборудования, а, следовательно, и лавинных шумов, которые увеличиваются с ростом дефектов.

Установлено, что в процессе деградации динамических систем интенсивности шумов в них возрастают на 60-80 dB при изменениях средних параметров систем на 20-30 %. Поэтому шумовая методика диагностирования дефектов электротехнического оборудования может обладать высокой чувствительностью и эффективностью. Наиболее распространенные источники шума имеют такой характер, что их средние значения и средние квадраты не зависят от времени. В этом случае шумы являются стационарными. Шумовые процессы, действующие в слабодефектном электротехническом оборудовании, в большинстве случаев являются стационарными. Шумовые токи и напряжения являются случайными переменными, поэтому для их описания используют аппарат статистики.

Характерными шумами, сопровождающими работу электротехнического оборудования, является тепловой, барьерный, диффузионный, генерационно-рекомбинационный и фликкер шум.

Тепловой шум существует в любой термодинамически равновесной системе. На микроскопическом уровне причиной появления шумового напряжения и тока в проводнике является хаотическое движение носителей заряда. Например, если в качестве проводника выбрать резистивный элемент, то тепловой шум в нем возникает вследствие случайных флуктуаций скорости носителей заряда. Этот механизм иногда относят к броуновскому движению носителей заряда, обусловленному тепловой энергией в материале. Тепловой шум присутствует в системе, когда рези-

ШУМОВАЯ ДИАГНОСТИКА ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ

тивный элемент находится в тепловом равновесии с окружающей средой. Флуктуации теплового характера можно рассматривать как механизм, с помощью которого сохраняется тепловое равновесие: за случайным (микроскопическим) отклонением от этого состояния следует, в среднем, возвращение к нему, и очень большое число таких микроскопических «событий» ведет к резкому изменению тока или флуктуациям напряжения.

Барьерный (дробовой) шум возникает тогда, когда носители заряда случайно пересекают некоторый потенциальный барьер. При этом каждый носитель генерирует в цепи импульс тока и суперпозиция этих импульсов образует шумовой ток. Впервые он был рассмотрен Вальтером Шотки, который использовал аналогию мелкой дроби, сыплющейся в контейнер.

Физическая природа теплового и дробового шума различна, но структура шумовых сигналов обоих типов похожа: оба сигнала можно представить как последовательность случайных импульсов, похожих по форме и случайно распределенных во времени.

Термин «случайные» означает, что дискретные события, создающие импульсы, независимы и статистический закон, описывающий распределение этих событий во времени, – это функция плотности вероятности Пуассона [7, 8].

Если форма шумового сигнала описывается функцией $x(t)$, а форма отдельного импульса – функцией $f(t)$, то случайная последовательность импульсов есть линейная суперпозиция

$$x(t) = \sum_k a_k f(t - t_k), \quad (1)$$

где a_k – амплитуда k -то импульса в этой последовательности, а t_k – момент времени, в который происходит k -е событие. Распределение t_k подчиняется закону Пуассона.

Спектральную плотность можно представить в виде:

$$\overline{S_x(\omega)} = 2\nu \overline{a^2} |F(j\omega)|^2, \quad (2)$$

где ω – угловая частота, $F(j\omega)$ – преобразование Фурье функции $f(t)$ формы отдельного импульса, ν – средняя частота событий.

Необходимо отметить, что тепловой и дробовой шум используются в качестве шумовых эталонов и потому пригодны для количественной оценки шумов. Таковыми являются тепловой шум сопротивления R при температуре T и дробовой шум насыщенного

диода, через который протекает ток I_d . Первый может быть представлен шумовой э.д.с. $\sqrt{4kTR\Delta f}$, включенной последовательно с сопротивлением R , а второй – источником шумового тока $\sqrt{2qI_d\Delta f}$, включенным параллельно диоду (здесь k – постоянная Больцмана, q – абсолютная величина заряда электрона, Δf – малый частотный интервал вблизи центральной частоты f).

Диффузионный шум обусловлен столкновениями носителей тока с атомами и молекулами вещества. Диффузионный шум является более общим процессом, чем тепловой и при определенных условиях диффузионный шум сводится к тепловому.

Генерационно-рекомбинационный шум – это шум появления и исчезновения носителей заряда при взаимодействии электронов с нейтральными атомами вещества. Например, в почти беспримесном полупроводнике электроны и дырки появляются и исчезают случайным образом под влиянием процессов генерации и рекомбинации следующего вида: свободный электрон + свободная дырка ↔ связанный электрон в валентной зоне + энергия (→ означает рекомбинацию, ← означает генерацию).

Фликкер-шум, или $1/f$ – шум, наблюдается практически во всех неоднородных системах и средах и проявляет себя главным образом на низких частотах. Название $1/f$ связано с тем, что спектральная плотность энергии этого шума изменяется в зависимости от частоты как $f^{-\alpha}$, где значение α обычно колеблется в пределах 0,8—1,2. Эту зависимость наблюдают при понижении частоты до значений порядка 10^{-6} Гц. Верхний ее предел установить трудно, так как он, как правило, маскируется тепловым или каким-либо другим шумом. Фликкер-шум является универсальным типом флуктуации, он проявляется не только при измерениях в электронике, но и в целом ряде наблюдений в самых различных сферах.

Каждый из вышеперечисленных шумов обладает особыми спектральными свойствами. В особом случае, когда составляющие последовательности импульсов чрезвычайно малы, функция формы отдельного выброса представляется импульсом бесконечно малой ширины. Последовательность случайных импульсов в этом случае считается импульсным процессом. Поскольку Фурье-преобразование одного импульса равно единице, из уравнения (2) имеем спектральную плотность импульсного процесса:

$$\overline{S_x(\omega)} = 2\nu a^2 \quad (3)$$

Это результат показывает, что спектры импульсных процессов, связанных с шумами, постоянны для всех частот вплоть до неограниченно высоких и их можно представить в виде «белого шума», стационарные спектральные составляющие которого равномерно распределены по всему диапазону частот. В природе и технике белый шум не встречается ввиду того, что такой сигнал имел бы бесконечную мощность, однако под категорию белых шумов попадают любые шумы, спектральная плотность которых одинакова (или слабо отличается) в рассматриваемом диапазоне частот. Тепловой, барьерный и диффузионный шумы имеют спектры, близкие к спектру «белого шума» (рисунок 1).

Импульсы, возникающие в результате дискретных событий, вызывающих тепловой и дробовой шум, имеют постоянные (равномерные) спектральные плотности до очень высоких частот (причем «очень высокие» означают величины, сравнимые с величинами, обратными фактической ширине импульса).

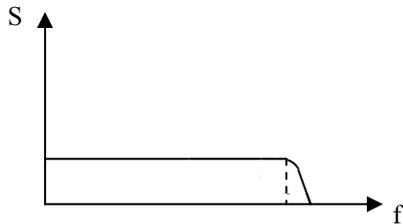


Рисунок 1 – Спектр теплового, барьерного и диффузионного шумов

Генерационно-рекомбинационный шум наблюдается в определенном частотном диапазоне, определяемом постоянной времени релаксации (рисунок 2). Спектр такого вида называется спектром Лоренца и характеризует шум в релаксационной системе, имеющей постоянную времени τ .

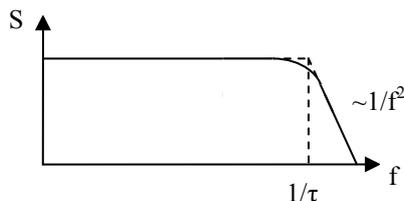


Рисунок 2 – Спектр генерационно-рекомбинационного шума

Фликкер-шум зависит от неоднородности систем, его спектр обратно пропорционален частоте и поэтому он проявляет себя на низких частотах (обычно до 1 МГц) [7].

На рисунке 3 качественно изображены энергетические спектры $S_i(f)$ вышеперечисленных шумов, нормированных на величину $I_{эф}$, где $I_{эф}$ – эффективное значение тока с частотой сети F_c . На рисунке присутствуют шумовые составляющие с равномерными, фликкерными и генерационно-рекомбинационными спектрами и детерминированные компоненты с частотой F_c и ее высшими гармониками, причем, интенсивности указанных детерминированных компонентов на частотах менее 1 МГц, как правило, ниже уровня лавинного шума с равномерным спектром.

Вышеперечисленные шумы с равномерными спектрами попадают в резонансные частотные полосы колебательных систем внутри оборудования. Затем эти шумы излучаются в окружающее пространство в виде электромагнитных помех с частотами, близкими к полосам пропускания антенн. Вводы и другие изолированные от земли части электротехнического оборудования выступают в роли излучающих антенн.

Известно, что излучающая антенна предназначена для преобразования энергии радиосигнала, имеющего форму связанных электромагнитных волн, в энергию радиосигнала, принимающего форму свободных электромагнитных волн, причем последние излучаются в направлениях, определяемых ее конструктивными параметрами. В приемной антенне наблюдается обратный процесс преобразования энергии радиосигнала в форму электромагнитных колебаний в приемных контурах регистрирующих приборов.

В качестве характеристик излучающих свойств антенн целесообразно использовать:

- сопротивление излучения $R_\Sigma = P_\Sigma / I^2$, где P_Σ – мощность излучения антенны, I – действующее значение тока в антенне;

- сопротивление потерь $R_n = P_n / I^2$, где P_n – мощность потерь;

- коэффициент полезного действия

(к.п.д.) антенны $\eta_A = P_\Sigma / P_A$;

- входное сопротивление антенны.

Одним из важнейших параметров антенны является характеристика направленности антенны – зависимость напряженности поля излучения от направления при условии измерения этого поля на одинаковом расстоянии от антенны. Напряженность поля в полной мере характеризуется амплитудой, фазой и

ШУМОВАЯ ДИАГНОСТИКА ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ

поляризацией. В связи с этим можно говорить об амплитудной, фазовой и поляризационной характеристиках направленности. Функция, выражающая эту характеристику, называется функцией направленности, а графически представленная функция направленности – диаграммой направленности. По определению ширина диаграммы направленности –

это угловой сектор, охватывающий часть главного лепестка диаграммы, в пределах которого напряженность поля изменяется до $1/\sqrt{2} = 0,707$ от напряженности поля в направлении максимального излучения.

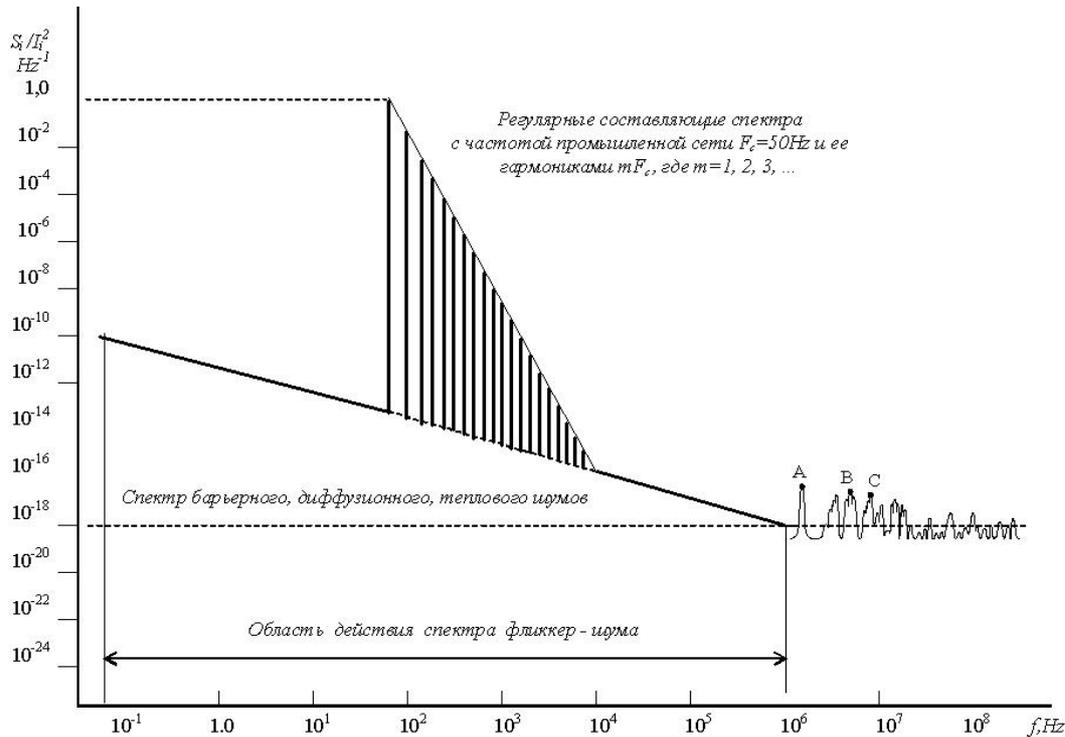


Рисунок 3 – Качественный вид спектров шумов

Излучающие свойства вводов и других изолированных от земли частей электротехнического оборудования целесообразно характеризовать такими параметрами как коэффициент направленного действия и коэффициент усиления. Коэффициент направленного действия D , определяемый отношением плотности потока мощности, излучаемой данной антенной в определенном направлении, к плотности потока мощности, которая излучалась бы абсолютно ненаправленной антенной в любом направлении, для типовых излучателей, например, для диполя Герца, полуволнового и волнового вибраторов, изменяется в пределах 2 - 6 dB. Данное определение предусматривает равенство полной мощности излучения обеих антенн и при условии, что измерения производятся на одинаковом удалении от них.

Коэффициент усиления антенны G , представляющий собой произведение коэф-

фициента направленного действия на к.п.д. антенны более полно, по сравнению с коэффициентом направленного действия, характеризует антенны и, поскольку их размеры, ориентация и взаимное расположение весьма разнообразны, то и к.п.д. изменяется в широких пределах и может составлять от 5 до 30 %.

Ориентация в пространстве вводов и других изолированных от земли частей электротехнического оборудования обуславливает появление вертикальной или горизонтальной поляризации излучаемых электромагнитных волн. Известно, что поляризация волн определяется направлением вектора напряженности электрического поля, который в общем случае может изменять свое направление и величину в течение периода колебаний. Излучающие антенны электротехнического оборудования обычно имеют вертикальную поляризацию. Соответственно и

приемные антенны, регистрирующие эти волны, должны иметь такую же поляризацию.

Традиционно электромагнитная обстановка (ЭМО) вблизи электротехнических устройств рассматривалась с точки зрения способности электромагнитных полей, а также наведенных электрических токов и напряжений влиять на работу радиоэлектронных устройств или оказывать нежелательные воздействия на биологические объекты. Подобные задачи относятся к разделам электромагнитной совместимости, в которых электромагнитные поля от электротехнического оборудования рассматриваются как непреднамеренные помехи. В этом случае ЭМО разделяют на внешнюю по отношению к системе или отдельному радиоэлектронному устройству и внутреннюю.

В том случае, когда электромагнитная обстановка рассматривается не как помехо-несущее поле, а как информационное пространство, анализ которого позволяет оценить техническое состояние объекта, ЭМО целесообразно подразделять на общую и диагностическую.

Под общей ЭМО понимается совокупность наведенных токов и напряжений, электромагнитных полей любой интенсивности от всех источников электромагнитных возмущений, действующих на территории и за пределами электротехнического объекта.

Диагностическая ЭМО имеет ряд особенностей и несет в себе тот объем информации, который необходим для оценки технического состояния конкретной единицы оборудования. Во-первых, диагностическая ЭМО формируется из общей электромагнитной обстановки путем резкого ограничения по частотному диапазону и имеет более жесткую привязку к единице электротехнического оборудования. Во-вторых, она несет данные о конкретных источниках электромагнитных излучений. В третьих, информация, заключенная в диагностической ЭМО, должна в максимальной степени отражать динамику процессов, происходящих в электротехническом оборудовании, указывая на изменение интенсивности электромагнитного поля, добавление новых источников и т. д. Кроме того, точки на местности, в которых будут располагаться аппаратура для регистрации диагностической ЭМО, необходимо выбирать таким образом, чтобы обеспечить достоверность и стабильность получаемой информации.

Для расчета распределения электромагнитного поля вблизи электротехнического

оборудования составляется излучающая модель, которая строится в предположении, что излучающие элементы оборудования представляются в виде различных антенн. В модели учитываются геометрические размеры излучающих элементов конструкции, их взаимное расположение, соединение с шинами и землей.

При решении вопроса о месте размещения информационно-измерительного комплекса (ИИК) необходимо оценить расстояние от электротехнического оборудования, на которое должна быть удалена приемная антенна для обеспечения эффективного контроля. Для этого также используется понятие ближней и дальней зоны.

Как известно, при построении математических моделей внешних электромагнитных полей принято различать квазистационарную, ближнюю и дальнюю зоны. При гармоническом характере изменения поля во времени и длине волны, значительно превышающей размеры излучателя, граница между ближней и дальней зонами определяется соотношением:

$$R_{гр} = \lambda/2\pi,$$

где λ – длина волны.

В том случае, когда размеры излучателя соизмеримы с длиной волны λ , границы между ближней и дальней зонами определяются следующим образом. Пусть D представляет собой наибольший размер источника поля с распределенным током. Соотношение $D/\lambda \ll 1$ определяет квазистационарную зону. На расстояниях, при которых $D/\lambda \gg 1$, справедливы соотношения для дальней зоны. Ближняя зона определяется из условия $D/\lambda \approx 1$. При экспериментальных исследованиях границу дальней зоны $R_{гр}$ при условии $D \geq \lambda/2$ можно определить по формуле:

$$R_{гр} = D^2/2\lambda$$

Приемную антенну ИИК следует размещать в дальней по отношению к излучателю зоне. Это объясняется тем, что незначительные перемещения антенны в ближней зоне существенно влияют на результаты измерений. В дальней зоне диаграммы направленности излучателя относительно стабильны и результатами измерения спектров ЭМИ можно воспользоваться для целей контроля.

Граница между ближней и дальней зонами $R_{гр}$ по существу является тем минимальным расстоянием $r_{мин}$, за пределом которого необходимо размещать приемную антенну. Величину $r_{мин}$ можно рассчитать по следующим формулам:

а) для частот, при которых длина волны

ШУМОВАЯ ДИАГНОСТИКА ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ

значительно превышает размеры излучателя

$$r_{\text{мин}} = \lambda/2\pi;$$

б) для частот, при которых длина волны сравнима с размерами излучателя

$$r_{\text{мин}} = D^2/2\lambda.$$

Попадая в резонансные частотные полосы колебательных систем, состоящих из внутренних элементов оборудования и антенн, представляющие собой внешние, изолированные от корпуса части, лавинные шумы с равномерными спектрами излучаются в окружающее пространство в виде высокочастотных и сверхвысокочастотных квазигармонических электромагнитных колебаний (см. рис.1 - пики А, В, С) с частотами, близкими к резонансным частотам колебательных систем оборудования, то есть лежащими внутри информативных (в плане диагностирования) частотных полос излучений антенн. С ростом дефектов в наружной и внутренней частях оборудования растет число колебательных систем. Помимо собственных, появляются новые дефектные колебательные системы, растут интенсивности лавинных шумов и, следовательно, увеличиваются интенсивности пиков квазигармонических колебаний в энергетических спектрах излучений и численность пиков в пределах каждой из информативных частотных полос.

Внешние высокочастотные электромагнитные поля электротехнического оборудования можно рассматривать как информационные и использовать их для решения задач контроля и технического диагностирования с помощью внешних информационно-измерительных комплексов.

Таким образом, регистрация внешних электромагнитных полей вблизи электротехнического оборудования в широком диапазоне частот, вплоть до сверхвысокочастотного диапазона и последующая обработка результатов измерений, дает возможность осуществ-

лять контроль технического состояния и диагностику электротехнического оборудования.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Хомутов, С.О. Оценка состояния электродвигателей по параметрам магнитного поля / С.О. Хомутов // Механизация и электрификация сельского хозяйства. – 2009. – № 5.
2. Хомутов, С.О. Электротехнологическая система повышения надежности электродвигателей, эксплуатирующихся в условиях сельскохозяйственного производства / С.О. Хомутов // Вестник КрасГАУ. – 2009. – №3.
3. Хомутов, О.И. и др. Обеспечение надежности асинхронных двигателей на отдаленных предприятиях / О.И. Хомутов // Механизация и электрификация сельского хозяйства. – 2009. – № 5.
4. Никольский, В.В. Электродинамика и распространение радиоволн / В.В. Никольский. – М.: Наука, 1973.
5. Хомутов, С.О. Система повышения надежности электродвигателей в сельском хозяйстве на основе комплексной диагностики и эффективной технологии восстановления изоляции: автореф. дис. ... д-ра тех. наук / С.О. Хомутов. – Барнаул, 2010. – 38 с.
6. Силин, Н.В. Оценка технического состояния электроэнергетического оборудования по спектральным характеристикам излучаемого им электромагнитного поля: автореф. дис. ... д-ра тех. наук / Н.В. Силин. – Санкт-Петербург, 2009. – 34 с.
7. Букингем, М. Шумы в электронных приборах и системах: Пер. с англ. / М. Букингем. – М.: Мир, 1986. – 399 с.
8. Ван дер Зил А. Шум (источники, описание, измерение). Пер. с англ., под ред. А.К. Нарышкина/ Ван дер Зил А. – М.: Сов. Радио, -1973

Силин Н.В., д.т.н., доц., Дальневосточный федеральный университет, тел. 8(4232) 45-02-02, E-mail: silin22@mail.ru;

Шевердин Д.Г., ст. преп., Дальневосточный институт коммуникаций, тел. 8(4232) 61-16-33, E-mail: dgsheverdin@mail.ru,