

**СПОСОБ НЕПРЕРЫВНОГО МОНИТОРИНГА
МЕХАНИЧЕСКОГО УСИЛИЯ В ПРОВОДАХ
И ТРОСАХ КОНТАКТНОЙ ПОДВЕСКИ**

**ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ МОРСКИХ
ПОРТОВЫХ УГОЛЬНЫХ
ТЕРМИНАЛОВ РОССИИ**

**ВЛИЯНИЕ ПОКАЗАТЕЛЕЙ
ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ЛОКОМОТИВОВ
НА РАСХОД ЭНЕРГОРЕСУРСОВ
В ГРУЗОВОМ ДВИЖЕНИИ**

**ОЦЕНКА ГОТОВНОСТИ
УСТРОЙСТВ АВТОМАТИКИ
К ПРОПУСКУ ТЯЖЕЛОВЕСНЫХ ПОЕЗДОВ**

**ТЕРМОМЕХАНИЧЕСКИЕ ИСПЫТАНИЯ
ПОЛИМЕРНОГО КРОНШТЕЙНА**

**МОДЕЛИРОВАНИЕ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ
ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ ВПУСКА И ВЫПУСКА
В АВТОМОБИЛЬНЫХ ДВИГАТЕЛЯХ
ВНУТРЕННЕГО СГОРАНИЯ**



УДК 681.518.54:621.313.13

Адам Пантелеевич Разгонов, доктор технических наук, профессор кафедры «Автоматика, телемеханика и связь» Днепропетровского национального университета железнодорожного транспорта (ДНУЖТ), Днепропетровск, Александр Юрьевич Лебедев, аспирант кафедры «Автоматика, телемеханика и связь» Днепропетровского национального университета железнодорожного транспорта (ДНУЖТ), Днепропетровск, Антон Юрьевич Журавлев, ассистент кафедры «Автоматика, телемеханика и связь» Днепропетровского национального университета железнодорожного транспорта (ДНУЖТ), Днепропетровск, Сергей Александрович Шиголов, кандидат технических наук, председатель совета директоров ВНТЦ «Уралжелдоравтоматизация», Екатеринбург

ДИАГНОСТИКА ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ БЕСПРОВОДНЫХ КАНАЛОВ ПЕРЕДАЧИ ИНФОРМАЦИИ

Adam Panteleevich Razgonov, DSc in Engineering, Professor, Department of Automatics, Telemechanics and Communication, Dnipropetrovsk National University of Railway Transport (DNURT), Dnepropetrovsk, Alexander Yurievich Lebedev, graduate student, Department of Automatics, Telemechanics and Communication, Dnipropetrovsk National University of Railway Transport (DNURT), Dnepropetrovsk, Anton Yurievich Zhuravlyov, Assistant Lecturer, Department of Automatics, Telemechanics and Communication, Dnipropetrovsk National University of Railway Transport (DNURT), Dnepropetrovsk, Sergey Alexandrovich Shchigolev, PhD in Engineering, Chairman of the Board of Directors, Uralzheldoravtomatizatsiya, Ekaterinburg

Diagnosis of electric machines using wireless data transmission channels

Аннотация

В статье предложен частотный метод для диагностики параметров обмоток, представлена электрическая схема для оценки амплитудно-частотных характеристик обмоток в режимах холостого хода и короткого замыкания. Для тягового двигателя и электродвигателя стрелочного привода сняты характеристики, определены волновые параметры линии. Рассчитаны первичные параметры обмоток. На основе сравнения полученных аналитических параметров с параметрами предыдущих измерений сделано заключение (с учетом технических допусков) о запасе работоспособности объекта диагностики. Предложено для передачи информации использовать беспроводные каналы на базе технологии ZigBee, которая дает возможность упростить разработку проекта, снизить затраты на его реализацию и существенно сократить сроки внедрения системы в эксплуатацию. Дана краткая характеристика основных модулей технологии ZigBee: координатора, оформляющего путь дерева сети, маршрутизатора, играющего роль передающего звена с других устройств, и конечного устройства, позволяющего обмениваться информацией с родительским узлом либо с координатором или маршрутизатором.

Ключевые слова: электрическая машина, цепь с распределенными параметрами, амплитудно-частотная характеристика, волновые и первичные параметры обмоток, беспроводной канал связи.

DOI: 10.20291/1815-9400-2016-1-66-71

Summary

This paper proposes a frequency method for the diagnosis of winding parameters, and presents a circuit diagram for evaluating frequency response function of windings in idling and short circuit mode. Characteristics of a traction motor and switch gear motor have been obtained, and line wave parameters defined. Primary winding parameters have been calculated. Based on the comparison of analytical parameters with the previous measurements, a conclusion is made (taking into account technical tolerances) on operation capability of the item under diagnosis. It is proposed to use wireless channels based on ZigBee technology to transfer information, which makes it possible to simplify project development, reduce the costs of its implementation and significantly reduce the time of implementation of the system. A brief description of the main ZigBee modules is given: a coordinator that draws tree network path, a router acting as a transmission link for other devices and an end device enabling communication with the parent unit or coordinator or router.

Keywords: electric machine, chain with distributed parameters, frequency response function, wave and primary parameters of winding, wireless communication channel.

DOI: 10.20291/1815-9400-2016-1-66-71

С каждым годом к железнодорожному транспорту предъявляются все более серьезные требования по обеспечению безопасности и надежности функционирования. Вводятся в эксплуатацию скоростные и высокоскоростные поезда (Москва — Санкт-Петербург, Киев — Харьков и др.) с использованием трехфазных электрических машин, и каждая задержка такого поезда приводит к значительному изменению графика движения, снижению суточной пропускной способности дороги и существенным экономическим издержкам.

Обнаружение и устранение неисправностей в системах железнодорожной автоматики и электрооборудования локомотивов — довольно длительный процесс, поэтому очевидна необходимость в создании таких комплексов автоматизированной диагностики и контроля, которые ускорят поиск отказов и позволят прогнозировать их возникновение.

Известно, что обмотки электрических машин относятся к двухпроводным длинным линиям. Первичные параметры пассивных схем замещения линии (R , L , C и G), отнесенные к единице длины обмоток, используются при выборе структуры Т- и П-образных схем замещения. Для бесконечно малого элемента линии схемы замещения, включающей первичные параметры, составляются выражения в дифференциальной форме для распределения вдоль линии напряжений $\underline{U}(x) = \underline{U}$ и токов $\underline{I}(x) = \underline{I}$ источника гармонического сигнала. На основе этих выражений получают уравнения типа Гельмгольца [1]:

$$\begin{aligned} d^2 \underline{U} / dx^2 - \underline{\gamma}^2 \underline{U} &= 0; \\ d^2 \underline{I} / dx^2 - \underline{\gamma}^2 \underline{I} &= 0, \end{aligned} \quad (1)$$

где $\underline{\gamma}$ — коэффициент распространения линии.

Общие и частные решения выражений (1) после преобразований для стационарного режима процессов, которые протекают в линии, можно привести к уравнениям передачи четырехполюсника:

$$\begin{aligned} \underline{U}_1 &= \underline{U}_2 \operatorname{ch} \underline{\gamma} l + \underline{Z}_c \underline{I}_2 \operatorname{sh} \underline{\gamma} l; \\ \underline{I}_1 &= \frac{\underline{U}_2}{\underline{Z}_c} \operatorname{sh} \underline{\gamma} l + \underline{I}_2 \operatorname{ch} \underline{\gamma} l, \end{aligned} \quad (2)$$

где $\underline{U}_1, \underline{I}_1$ — напряжение и ток в начале линии;
 \underline{Z}_c — характеристическое сопротивление линии.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

На основе опыта эксплуатации электрических машин (электрогенераторов, электродвигателей) установлено, что срок их службы существенно зависит от состояния диэлектрика электроизоляционной конструкции обмоток. В свою очередь, качество изоляции со временем ухудшается за счет изменения макронеоднородности диэлектрика (растрескивание, насыщение влагой и др.). Поэтому по степени ухудшения макронеоднородности можно судить о динамике изменения электрической изоляции обмоток.

Результаты, полученные в работе [2], показали, что критерием степени изменения неоднородности изоляции диэлектрика может служить величина его суммарной емкости, обусловленная геометрией, абсорбционной емкостью и сопротивлением, связанными, в свою очередь, с явлением абсорбции неоднородностей. Причем величины этих параметров напрямую зависят от состояния изоляции диэлектрика. Однако нужно отметить, что рассматриваемый в работе [2] импульсный метод определения суммарной емкости не лишен недостатков. К ним прежде всего следует отнести технические трудности, требующие специальной и сложной аппаратуры, отсутствие которой приводит к снижению достоверности оценки малых емкостей (нФ, пФ) диэлектриков и сопротивлений обмоток.

Цель наших исследований заключается в разработке и внедрении частотных методов диагностики состояния электрических машин для построения компьютерного комплекса. Предлагаемый метод оценки времени старения изоляции обмоток электрических машин по емкости диэлектрика с использованием современной измерительной техники (цифровых амперметров, вольтметров, аналого-цифровых преобразователей и др.) позволяет упростить методику определения и повысить достоверность оценки. Метод может стать основой для построения системы технической диагностики (ТД) электрических, а также тяговых машин, а в последующем привести к изменению стратегии профилактики этих объектов с планово-профилактической на стратегию «по состоянию объекта».

Частотные характеристики (ЧХ) цепей с распределенными параметрами (ЦРП), как правило, определяют по зависимости входных сопротивлений от частоты:

$$\underline{Z}_{\text{вх}} = \underline{Z}_{\text{вх}} \cdot e^{j\varphi_{\text{вх}}} = Z(j\omega). \quad (3)$$

Уравнения для сопротивления расписываются по двум составляющим — амплитудно-частотной (АЧХ) и фазочастотной (ФЧХ) характеристикам:

$$\begin{aligned} \underline{Z}_{\text{вх}} &= \operatorname{mod} \underline{Z}_{\text{вх}} = Z(\omega); \\ \varphi_{\text{вх}} &= \arg \underline{Z}_{\text{вх}} = \varphi(\omega). \end{aligned} \quad (4)$$

Обычно ЧХ ЦРП исследуют в граничных режимах — холостого хода (ХХ) и короткого замыкания (КЗ) [3]:

$$\begin{aligned} \underline{Z}_x &= \underline{Z}_x(\omega); \varphi_x = \varphi_x(\omega); \\ \underline{Z}_k &= \underline{Z}_k(\omega); \varphi_k = \varphi_k(\omega). \end{aligned} \quad (5)$$

АЧХ — носитель важной информации о свойствах и параметрах цепей, которые она отображает [4]. Установлено, что $\underline{Z}_{\text{вх}}$ обмоток электрических машин, как правило, имеет емкостный характер в режиме холостого хода и индуктивный — в режиме короткого замыкания, если в цепи еще не возникли резонансные явления. Экстремумы $\underline{Z}_{\text{вх}}$ соответствуют резонансу тока (РТ), а минимумы — резонансу напряжения (РН). Число резонансов может быть 3, поскольку с ростом частоты схема переходит из колебательного режима в апериодический — наблюдается возрастание активного сопротивления $r_{\text{акт}}$, что объясняется свойствами собственных чисел. Частотную характеристику можно использовать для вычисления первичных и вторичных параметров ЦРП. Эти параметры можно определять и по одной точке на АЧХ, но лучше брать ряд точек.

Построение АЧХ предполагает измерение комплексных сопротивлений $Z(\omega)$. Отметим, что длинные линии обмоток электродвигателя с П- и Т-звеньями относятся к так называемым минимально фазовым звеньям [5]. Их признаком служит размещение всех нулей передаточной функции в левой полуплоскости $p = -\delta + j\omega$.

Для таких цепей существует взаимное и однозначное комплексное соответствие между АЧХ и ФЧХ. Например, комплексная передаточная функция однородной цепной схемы (ОЦС) определяется по отношению напряжения K_u и тока K_i :

$$\frac{K_u}{K_i} = \frac{U_2 I_1}{U_1 I_2} = \frac{Z_2}{Z_{\text{вх}}},$$

откуда

$$\underline{Z}_{\text{вх}} = \frac{K_i}{K_u} Z_2. \quad (6)$$

Сложная комплексная функция частоты:

$$\underline{Z}_{\text{вх}} = \underline{Z}_{\text{вх}} \cdot e^{j\varphi_{\text{вх}}} = r(\omega) + jx(\omega), \quad (7)$$

где $\operatorname{Re}[Z_{\text{ВХ}}] = r(\omega) = Z_{\text{ВХ}} \cdot \cos \varphi_{\text{ВХ}}$;

$$\operatorname{Im}[Z_{\text{ВХ}}] = x(\omega) = Z_{\text{ВХ}} \cdot \sin \varphi_{\text{ВХ}}.$$

ВЫЧИСЛЕНИЕ ВТОРИЧНЫХ ПАРАМЕТРОВ

Если в некотором диапазоне частот известны АЧХ и ФЧХ, тогда модуль и аргумент [3] характеристического сопротивления:

$$Z_c = \sqrt{Z_x Z_k}; \quad \varphi_c = \frac{1}{2}(\varphi_x + \varphi_k),$$

где

$$-\frac{\pi}{2} \leq \varphi_c \leq \frac{\pi}{2}. \quad (8)$$

Зная коэффициент распространения, можем записать:

$$\operatorname{th} \gamma l = T e^{j\theta}; \quad T = \sqrt{\frac{Z_k}{Z_x}};$$

$$\theta = \frac{1}{2}(\varphi_k - \varphi_x). \quad (9)$$

Для обмоток электрических машин, электродвигателей обычно $T \leq 1$, для $\arg \theta$ ограничений нет. Из уравнений получаем значение параметра $2\beta l$, который в силу периодичности функции тангенса должен отвечать условию $2\beta l = 2 \frac{\omega}{c}$ (Нп/км), где $c = \frac{\omega}{\beta}$ — фазовая скорость, l — длина провода фазовой обмотки статора. Угол β можно приблизительно оценить по формуле $\beta \approx \omega \sqrt{LC}$.

Отсюда

$$\operatorname{th} 2\alpha l = \frac{2T \cos \theta}{1 + T^2}; \quad \operatorname{th} 2\beta l = \frac{2T \sin \theta}{1 - T^2}. \quad (10)$$

Таким образом, по модулям и аргументам входных сопротивлений Z_x и Z_k можно определить вторичные параметры обмоток.

Электрическая схема, позволяющая в лабораторных условиях построить АЧХ, ФЧХ обмоток статоров электрических машин (электрических двигателей стрелочных электроприводов и тяговых электродвигателей локомотивов) и измерить их параметры Z_x , Z_k , представлена на рис. 1. Она содержит измерительные приборы — амперметр, вольтметр и фазометр на базе МК типа Е20-10, генератор частоты типа ГЗ-103 и аналого-цифровой преобразователь.

Пример 1. Заданы параметры двигателя: мощность $P = 305$ кВт, напряжение на статоре 463 В, скорость вращения ротора 2290 об/мин, частота питания схемы испытаний 50–200 000 Гц и длина обмотки 210 м.

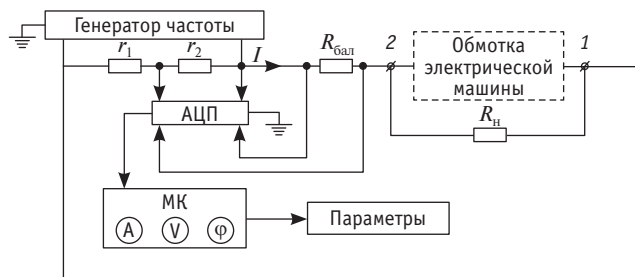


Рис. 1. Структурная электрическая схема для измерения параметров Z_x и Z_k и построения АЧХ и ФЧХ электрических машин

Экспериментально полученные АЧХ для режимов КЗ и ХХ опытного двигателя приведены на рис. 2¹.

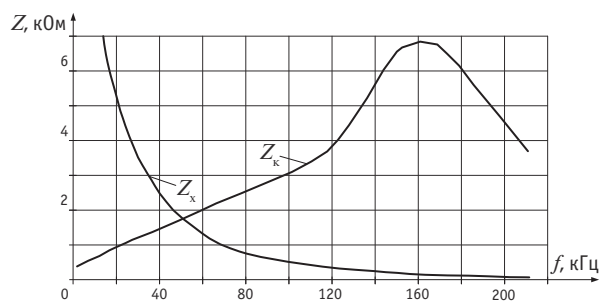


Рис. 2. АЧХ обмоток электродвигателя постоянного тока в режимах холостого хода и короткого замыкания

В режиме холостого хода найденное сопротивление $Z_x = 210$ Ом, его аргумент $\varphi_x = -15^\circ$; в режиме короткого замыкания сопротивление $Z_k = 6809$ Ом, его аргумент $\varphi_k = 21^\circ$.

Используя эти данные, получим характеристическое сопротивление линии:

$$Z_c = \sqrt{Z_x Z_k} = 1194,141 + j62,582 \text{ Ом.}$$

Тогда гиперболический тангенс постоянной передачи будет иметь значение

$$\operatorname{th} \gamma l = \sqrt{\frac{Z_k}{Z_x}} = 5,415 + j1,76.$$

Теперь имеется возможность определить постоянную передачи линии:

$$\gamma l = \frac{1}{2} \ln \left(\frac{1 + \operatorname{th} \gamma l}{1 - \operatorname{th} \gamma l} \right) + j \frac{1}{2} \left(\arg \left(\frac{1 + \operatorname{th} \gamma l}{1 - \operatorname{th} \gamma l} \right) \right) = 0,168 + j3,03.$$

Зная, что $\gamma l = \alpha l + j\beta l$, дальше легко определим коэффициенты затухания и фазы:

¹ На рисунке представлены АЧХ только для модулей сопротивлений Z_x и Z_k , для построения ФЧХ значения аргументов определяются по результатам измерений.

$$\alpha = \frac{1}{2l} \ln \left| \frac{1 + \text{th} \gamma l}{1 - \text{th} \gamma l} \right| = 0,0008 \text{ Нп/м};$$

$$\beta = \frac{1}{2l} \left(\arg \left(\frac{1 + \text{th} \gamma l}{1 - \text{th} \gamma l} \right) \right) = 0,0144 \text{ рад/м}.$$

По результатам измерений волновых параметров линии можно вычислить также значения ее первичных параметров. Для этого следует приравнять действительную и мнимую ча-

сти уравнений $R + j\omega L = \gamma Z_c$ и $G + j\omega C = \frac{\gamma}{Z_c}$ и далее най-

ти параметры R, L, C и G [6]. Для обмоток электродвигателя рассчитаны следующие значения первичных параметров: $R = 52,7 \text{ Ом}$, $L = 1,72 \text{ мкГн}$, $G = 1,3 \text{ мкСм}$, $C = 11,95 \text{ пФ}$.

Пример 2. Для асинхронного стрелочного электродвигателя типа МСТ-0,25 (0,25 кВА, 220/127 В, 1250 об/мин) сняты АЧХ и ФЧХ одной фазы обмотки статора (рис. 3). Частота первого резонанса токов в режиме короткого замыкания $f_1 \approx 47 \text{ кГц}$. По обмоточной схеме число звеньев в ОЦС, заменившей фазную обмотку, $N = 4$. В соответствии с этим первое собственное число $|v_1| = 0,152$.

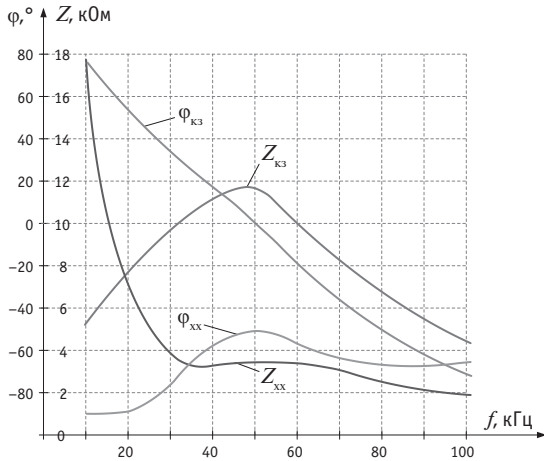


Рис. 3. Амплитудно-частотная и фазочастотная характеристики одной фазы обмотки статора асинхронного стрелочного двигателя в режимах короткого замыкания и холостого хода

По АЧХ и ФЧХ входные сопротивления в режимах КЗ и ХХ равны:

$$\underline{Z}_k = 11,7 \cdot 10^3 \cdot e^{j0,0698} \text{ Ом};$$

$$\underline{Z}_x = 3,4 \cdot 10^3 \cdot e^{-j0,890} \text{ Ом}.$$

Используя эти данные, находим дополнительные параметры:

$$\underline{Z}_c = \sqrt{\underline{Z}_x \underline{Z}_k} = 6,307 \cdot 10^3 \cdot e^{-j0,410} \text{ Ом};$$

$$A = \frac{1}{2N} \text{arth} \left(\frac{2z_c \cos \theta}{z_x + z_k} \right) = 0,119 \text{ Нп};$$

$$B = \frac{1}{2N} \text{arctg} \left(\frac{2z_c \sin \theta}{z_x - z_k} \right) = 0,0765 \text{ рад}.$$

Функция гиперболического тангенса от комплексного аргумента при $T \neq 1$ определяется следующим образом:

$$\text{th} \Gamma N = \frac{\text{sh} 2AN \pm j \sin 2BN}{\text{ch} 2AN + \cos 2BN} = 0,539 \cdot e^{-j0,4799}.$$

Далее вычисляем t, τ, S, g [1]:

$$t = \sqrt{\frac{\text{ch} A - \cos B}{\text{ch} A + \cos B}} = 0,071;$$

$$\tau = \text{arctg} \left(\pm \frac{\sin B}{\text{sh} A} \right) = 0,569 \text{ рад};$$

$$S = \sqrt{\text{sh}^2 A + \sin^2 B} = 0,142;$$

$$g = \text{arctg} \left(\frac{\text{tg} B}{\text{th} A} \right) = 0,574 \text{ рад}.$$

Модули и аргументы двухполюсников \underline{Z} и \underline{Y} для П-схемы замещения звена находим следующим образом:

$$z = S \sqrt{z_x z_k} = 893,9 \text{ Ом};$$

$$\xi = g + \varphi_c = 0,164 \text{ рад};$$

$$y = \frac{2t}{\sqrt{z_x z_k}} = 2,24 \cdot 10^{-5} \text{ См};$$

$$\zeta = \tau - \varphi_c = 0,979 \text{ рад}.$$

Затем вычисляем первичные параметры катушки для П-схемы замещения звена:

$$r = z \cdot \cos \xi = 906 \text{ Ом};$$

$$G = y \cdot \cos \zeta = 1,25 \cdot 10^{-5} \text{ См};$$

$$C = \frac{1}{\omega} \cdot y \cdot \sin \zeta = 6,31 \cdot 10^{-11} \text{ Ф}.$$

Следует отметить, что значения r и G справедливы только при частоте 47 кГц, а значение C — при всех частотах.

Далее находим K :

$$K = \frac{(Gr + |v_1|)^2}{4|v_1|\omega_1 r (|v_1| \text{tg} \zeta - r\omega_1 C)} - \frac{C}{|v_1|} = 1,94 \cdot 10^{-8} \text{ Ф}.$$

Это значение тоже справедливо при всех частотах.

Величину L определяем из выражения

$$L = \frac{z}{\omega_1 \sin \xi + \omega_1 Kz} = 3,03 \cdot 10^{-3} \text{ Гн,}$$

которое справедливо только при данной частоте.

Полученные таким образом значения первичных параметров при дальнейших профилактических измерениях через $\tau_{пр}$ могут сравниваться с вновь измеренными величинами. Это позволит оценить динамику их изменений, прогнозировать периодичность проведения профилактик и, как следствие, в значительной мере повысить эксплуатационную надежность электрических машин.

По значениям АЧХ и ФЧХ объектов профилактики методом синтеза можно построить электрические схемы замещения однородной цепной схемы с Т- или П-звеньями. Это позволит подробнее изучить другие параметры ОЦС (входное сопротивление при иных, кроме канонических, формах записи выражений, резонансные свойства и т. д.) и оценить погрешность.

Таким образом, исследования показали, что существует реальная возможность разработать мобильное автоматизированное цифровое диагностическое устройство, которое будет измерять параметры обмоток электрических машин в условиях локомотивных депо или ремонтно-технологических участков дистанций СЦБ.

ОРГАНИЗАЦИЯ КАНАЛА ПЕРЕДАЧИ ДАННЫХ ОТ ОБЪЕКТА ТЕХНИЧЕСКОЙ ДИАГНОСТИКИ

Сегодня с использованием беспроводных технологий решается достаточно широкий круг задач. Например, при помощи технологии ZigBee можно в короткие сроки организовать каналы связи в системе технической диагностики [7].

ZigBee — это спецификация сетевых протоколов верхнего уровня, которые используют сервисы нижних уровней: уровня управления доступом к среде MAC и физического РНУ, регламентированных стандартом IEEE 802.15.4. Спецификация ZigBee ориентирована на приложения, которые требуют гарантированной безопасной передачи данных при относительно небольших скоростях и длительной работе сетевых устройств.

Способность к самоорганизации и самовоспроизведению, mesh-топология, защищенность, высокая помехоустойчивость, низкое энергопотребление и отсутствие необходимости получения частотного разрешения делают сеть ZigBee основой для беспроводной инфраструктуры систем позиционирования в режиме реального времени (RTLS).

Так как ZigBee способна активироваться за 15 мс или меньше, задержка отзыва устройства может быть очень низкой [8, 9]. Основное время ZigBee находится в спящем режиме, поэтому уровень потребляемой энергии от батарей также очень низкий. Возможен выбор оптимальных сетевых параметров и конфигурации радиопередатчиков для работы в качестве конечных спящих узлов ТД железнодорожной автоматики.

Технология ZigBee поддерживает не только простые топологии сети («точка — точка», «дерево» и «звезда»), но и самоорганизующивает и самовосстанавливает ячеистую топологию с ретрансляцией и маршрутизацией сообщений. Исполь-

зование сети ZigBee в частотном диапазоне 2,405–2,485 ГГц не требует частотных разрешений [8, 9].

Стандарт определяет работу на частотах 2,4 ГГц, на них существует 16 каналов ZigBee, каждый из которых требует ширины диапазона в 5 МГц. Основная частота для каждого канала может быть рассчитана как

$$FC = (2405 + 5 \cdot (ch - 1)) \text{ МГц,}$$

где $ch = 11, 12, \dots, 26$.

Существуют три различных типа модулей ZigBee:

координатор ZigBee (ZC) — наиболее ответственное устройство, которое формирует путь дерева сети и может связываться с другими сетями. Он запускает сеть, может сохранять информацию о сетях, включая хранилище секретных паролей производства компании Trust Centre;

маршрутизатор ZigBee (ZR) может выступать в качестве вспомогательного маршрутизатора, передавая данные с других устройств. Он также может запустить функцию приложения;

конечное устройство ZigBee (ZED) — его функциональная загрузка позволяет обмениваться информацией с родительским узлом, но не может передавать данные с других устройств. ZED требует минимального количества памяти и поэтому может быть дешевле, чем ZR или ZC.

Модули ZigBee не требуют для работы дополнительных внешних компонентов, выпускаются с уже загруженным стекком ZigBee Pro и управляются при помощи AT-команд или API-интерфейсов (COM, USB, SPI или UART). Алгоритм работы модулей задается установкой конфигурации (например, автоматическое измерение аналогового сигнала и периодическая отправка с заданным интервалом этих значений на один или несколько узлов ZigBee-сети).

Правильный выбор параметров модулей требует построения наиболее оптимальной конфигурации беспроводной сети (расположение конечных устройств и число поддерживающих роутеров).

Таким образом, преимущества сети ZigBee делают целесообразным ее применение в дистанционной диагностике устройств железнодорожной автоматики. В качестве примера рассмотрим устройство диагностики стрелочных электродвигателей, удаленных от поста централизации (рис. 4).

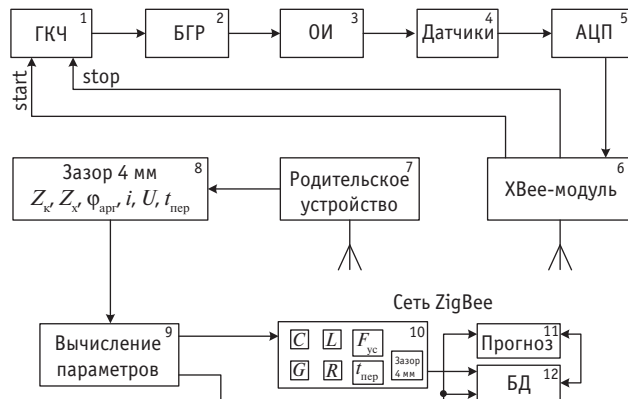


Рис. 4. Структурная схема устройства ТД стрелочных электродвигателей

Работа такого устройства состоит в следующем. Каждый раз в момент перевода стрелки родительское устройство 7 подает команду на XВее-модуль 6. В результате последний выходит из состояния сна и включает генератор качающей частоты (ГКЧ) 1, который через блок гальванической развязки (БГР) 2 подает на объект исследования (ОИ) 3 (двигатель) электрический ток различной частоты в указанном диапазоне с заданным шагом. При помощи датчиков 4 АЦП 5 измеряет сигналы на выходе электродвигателя, а также величину зазора между остряком и рамным рельсом и время перевода стрелки. После этого все измеренные данные посредством сети ZigBee передаются на родительское устройство 7 от XВее-модуля 6, который после передачи данных отключает ГКЧ 1. Данные, полученные с родительского устройства, декодируются блоком 8, определяющим экстремумы функции зависимости входного сопротивления от частоты, а также время, напряжение и ток перевода стрелки, усилие на валу электродвигателя и зазор между прижатым остряком и рамным рельсом. Эти данные передаются в блок вычисления параметров 9. После вычисления все необходимые параметры отображаются на экране монитора 10 АРМа электромеханика СЦБ вместе с прогнозируемым временем безотказной работы 11 соответствующего стрелочного электродвигателя и записываются в базу данных 12. Таким образом, устройство технической диагностики дает возможность планировать время проведения профилактики, исключать задержки поездов, а значит, минимизировать финансовые затраты.

ВЫВОДЫ

1. На основе использования частотного метода разработаны электрическая схема и алгоритм для построения АЧХ и ФЧХ обмоток электрических машин и измерения сопротивлений холостого хода и короткого замыкания. По результатам измерений и известной методике определены волновые параметры, позволяющие рассчитать первичные параметры обмоток (R , L , C и G). Причем, как показано на примерах, такой метод справедлив для электрических машин с мощностями, отличающимися на 3 порядка. Данные о динамике изменения электрических параметров позволяют своевременно планировать сроки проведения профилактических мероприятий, не допускать отказов в работе двигателей и нарушения графика движения поездов [10].

2. В разработанном устройстве ТД стрелочных электроприборов для организации каналов передачи информации от объектов диагностики до потребителей предложено использовать беспроводную технологию ZigBee. Обладая рядом преимуществ (способностью к самоорганизации, защищенностью, высокой помехоустойчивостью и др.), эта технология служит основой беспроводной инфраструктуры систем автоматики в режиме реального времени (RTLS), обеспечивает эффективную оценку наиболее важных параметров и повышает тем самым надежность и безопасность важнейших железнодорожных объектов.

Литература

1. Каганов З. Г. Электрические цепи с распределенными параметрами и цепные схемы. М. : Энергоатомиздат, 1990. 248 с.
2. Боднар Б. Е., Капіца М. І. Сучасні методи контролю поточкового стану ізоляції тягових електричних машин локомотивів // Залізничний транспорт України. 2006. № 2. С. 22–26. ISSN 2309–821X.
3. Полехин С. И. Теория связи по проводам. М. : Связьиздат, 1960. 464 с.
4. Щиголов С. А., Сергеев Б. С. Анализ работы путевого датчика ДПЭП // Электротехника. 2000. № 7. С. 41–46. ISSN 0013–5860.
5. Инкин А. И. Электромагнитные поля и параметры электрических машин : учеб. пособие. Новосибирск : ООО «Издательство ЮКЭА», 2002. 464 с.
6. Белецкий А. Ф. Основы теории линейных электрических цепей. М. : Связь, 1967. 608 с.
7. Бараш Л. Многообразие стандартов беспроводных технологий // Компьютерное обозрение. 2003. № 10. С. 379–384.
8. ZigBee Alliance [Сайт]. URL: www.zigbee.org (дата обращения: 03.08.2015).
9. NXP [Сайт]. URL: www.freescale.com (дата обращения: 03.08.2015).
10. Діагностування електричних машин частотним методом / А. П. Разгонов та ін. : матер. IV Міжнар. наук.-практ. конф. «Електромагнітна сумісність та безпека на залізничному транспорті». Д. : Вид-во Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна, 2011. С. 67–68.

References

1. Kaganov Z. G. Elektricheskie tsepi s raspredelyonnymi parametrami i tsepyne skhemy [Electrical circuits with distributed parameters and ladder circuits]. M. : Energoatomizdat, 1990. 248 s.
2. Bodnar B. E, Kapitsa M. I. Suchasni metodi kontrolyu potokovogo stanu izolyatsiy tyagovikh elektrichnikh mashin lokomotiviv // Zaliznichnyi transport Ukraini. 2006. № 2. S. 22–26. ISSN 2309–821X.
3. Polekhin S. I. Teoriya svyazi po provodam [Wire communication theory]. M. : Svyazizdat, 1960. 464 s.
4. Shchigolev S. A., Sergeev B. S. Analiz raboty putevogo datchika DPEP [Analysis of DPEP track sensor operation] // Elektrotekhnika. 2000. № 7. S. 41–46. ISSN 0013–5860.
5. Inkin A. I. Elektromagnitnye polya i parametry elektricheskikh mashin : ucheb. posobie [Electromagnetic fields and parameters of electrical machinery : a textbook]. Novosibirsk : OOO «Izdatelstvo YuKEA», 2002. 464 s.
6. Beletskiy A. F. Osnovy teorii lineynykh elektricheskikh tsepey [Fundamentals of linear electric circuit theory]. M. : Svyaz, 1967. 608 s.
7. Barash L. Mnogoobrazie standartov besprovodnykh tekhnologiy [Diversity of wireless technology standards] // Kompyuternoe obozrenie. 2003. № 10. S. 379–384.
8. ZigBee Alliance [Site]. URL: www.zigbee.org (date accessed: 03.08.2015).
9. NXP [Site]. URL: www.freescale.com (date accessed: 03.08.2015).
10. Diagnostuvannya elektrichnikh mashin chastotnim metodom [Diagnosis of electric machinery using frequency method] / A. P. Razgonov ta in. : mater. IV Mizhnar. nauk.-prakt. konf. «Elektromagnitna sumisnist ta bezpeka na zaliznichnomu transporti». D. : Vid-vo Dnipropetr. nats. un-tu zalizn. transp. im. akad. V. Lazaryana, 2011. S. 67–68.