ISSN 2223–5620 (Print), ISSN 2411–1554 (Online)
Електромагнітна сумісність та
безпека на залізничному транспорті, 2013, № 5

УДК 681.518.54 : 621.313.13

А. Ю. ЛЕБЕДЕВ, аспирант, Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, Lebedev_A.Y@ua.fm

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ЧАСТОТНЫХ МЕТОДОВ ДЛЯ ОЦЕНКИ ДИНАМИКИ ИЗМЕНЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ ОБМОТОК ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН

Статью представил д. т. н., проф. А. П. Разгонов

Введение

В связи с возрастающими скоростями и объемами железнодорожных перевозок, с каждым годом к железнодорожным устройствам ставятся все более высокие требования по безопасности и надежности функционирования. Увеличивается разнообразие устройств, которые построены на различной элементной базе, но продолжают одновременно эксплуатироваться на сети железных дорог. В сложившейся ситуации поиск и устранение неисправностей в устройствах железнодорожной автоматики, приводящих к задержке поездов и снижению пропускной способности дороги, становится весьма важной проблемой.

Поиск и устранение неисправностей в системах ЖАТ и электрооборудовании локомотивов – достаточно длительный и сложный процесс. С учетом изложенного раннее, становится очевидной необходимость создания систем автоматизированного диагностирования и контроля названных объектов. Использование технических средств не только ускорит поиск и устранение отказов, но и поможет заранее прогнозировать возможные отказы.

Постановка задачи

Срок службы электродвигателей существенно зависит от условия их эксплуатации (перегрузки, нагрев обмоток и т.д.). В свою очередь, неправильная эксплуатация приводит к значительному ухудшению параметров диэлектрического материала обмоток. Установлено, что качество изоляции со временем ухудшается за счет изменения макронеоднородности диэлектрика (растрескивание, насыщение влагой и др.). Зная динамику ухудшения макронеоднородности, можно судить о состоянии электрической изоляции обмоток, а, следовательно, и о предполагаемом остаточном сроке службы электродвигателя.

Полученные в работе [1] результаты оценки параметров элементов эквивалентной схемы замещения диэлектрика электрических машин показали, что критерием степени изменения изоляции диэлектрика может служить величина его суммарной емкости, обусловленная геометрией диэлектрика и сопротивлением, связанным с явлением абсорбции неоднородностей. Оказалось, что величины этих параметров напрямую влияют на состояние изоляции диэлектрика.

Основными недостатками предложенного импульсного метода, по моему мнению, являются технические трудности оценки малых значений емкостей (нФ, пФ), заключающиеся в необходимости использования сравнительно сложной измерительной техники. Это, в свою очередь, приводит к относительно высоким погрешностям измерения и оценки состояния изоляции обмоток машин.

Целью работы является разработка более универсального частотного метода для диагностирования состояния электродвигателей, который будет положен в основу построения автоматизированного диагностического компьютерного комплекса.

© А. Ю. Лебедев, 2013

Предлагаемый частотный метод оценки времени старения изоляции электродвигателей по емкости диэлектрика более эффективный, чем упомянутый выше импульсный метод, поскольку оценка параметров обмоток основана на применении высокоточной измерительной техники (цифровых амперметров, вольтметров, АЦП и др.).

Известно, что обмотки электрических машин относятся к двухпроводным длинным линиям. В таком случае первичные параметры пассивных схем замещения линии (R, L, C и G), отнесенные к единице длины обмоток, используют при выборе структуры Т- и П-образных схем замещения. Для бесконечно малого элемента схемы замещения линии можно получить уравнения типа Гельмгольца [2]:

$$d^2\underline{U}/dx^2 - \underline{\gamma}^2\underline{U} = 0;$$
$$d^2\underline{I}/dx^2 - \underline{\gamma}^2\underline{I} = 0, \qquad (1)$$

где γ – коэффициент распространения линии.

Для стационарного режима процессов и гармонического сигнала на входе линии уравнения (1), после преобразований сводятся к уравнениям передачи четырехполюсника вида [3]:

$$\underline{U}_1 = \underline{U}_2 ch\underline{\gamma}l + \underline{Z}_c\underline{I}_2 sh\underline{\gamma}l;$$
$$\underline{I}_1 = \frac{\underline{U}_2}{\underline{Z}_c} sh\underline{\gamma}l + \underline{I}_2 ch\underline{\gamma}l, \qquad (2)$$

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

Для определения частотных характеристик (ЧХ) цепей с распределенными параметрами (ЦРП) обычно используют зависимости входных сопротивлений от частоты:

$$\underline{Z_{вх}} = Z_{вх} \cdot e^{j\varphi_{вх}} = Z(j\omega). \qquad (3)$$

Уравнения для определения входного сопротивления расписываются по двум составляющим АЧХ и ФЧХ:

$$\underline{Z_{вх}} = \operatorname{mod} \underline{Z_{вх}} = Z(\omega);$$
$$\varphi_{вх} = \arg \underline{Z_{вх}} = \varphi(\omega). \qquad (4)$$

Амплитудно-частотная характеристика является носителем важной информации о свойствах и параметрах цепей. По ее виду можно определить характер входного сопротивления цепи (емкостной или индуктивный).

Обычно частотные характеристики цепей с распределенными параметрами исследуют в граничных режимах – короткого замыкания (КЗ) и холостого хода (ХХ) [4]:

$$Z_x = Z_x(\omega);\ \varphi_x = \varphi_x(\omega);$$
$$Z_к = Z_к(\omega);\ \varphi_к = \varphi_к(\omega). \qquad (5)$$

Опытами установлено, что если в цепи еще не возникли резонансные явления, то $\underline{Z_{вх}}$ обмотки электродвигателя в режиме КЗ, как правило, имеет индуктивный характер, а в режиме ХХ – емкостной. Минимумы $\underline{Z_{вх}}$ на АЧХ соответствуют резонансу напряжения (РН), а экстремумы – резонансу тока (РС). Если с ростом частоты схема переходит из колебательного режима в апериодический, то число резонансов может быть 2–3. При этом наблюдается рост активного сопротивления $r_{акт}$, что объясняется свойством собственных чисел.

Зная частотную характеристику обмоток электродвигателя, можно вычислить первичные и вторичных параметры ЦРП. Эти параметры можно найти, используя одну точку на АЧХ. Но, поскольку параметры обмоток электродвигателей зависят от частоты, лучше брать ряд точек.

Для построения АЧХ необходимо провести измерение комплексных сопротивлений $Z(\omega)$, учитывая, что длинные линии обмоток электродвигателя П- и Т-звеньями относятся к так называемым минимально-фазовым звеньям [5]. Их основным признаком является расположение всех нулей передаточной функции в левой полуплоскости $p = -\delta + j\omega$.

Для таких цепей существует однозначное и взаимное комплексное соответствие между их АЧХ и ФЧХ. Например, комплексная передаточная функция однород-

© А. Ю. Лебедев, 2013

ной цепной схемы (ОЦС) определяется по отношению напряжения K_u или тока K_i:

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

откуда

$$Z_{вх} = \frac{K_i}{\underline{K_u}} Z_2, \qquad (6)$$

или

$$\underline{Z_{вх}} = Z_{вх} \cdot e^{j\varphi_{вх}} = r(\omega) + jx(\omega), \qquad (7)$$

где

$$r(\omega) = Z_{вх} \cdot \cos\varphi_{вх};$$

$$x(\omega) = Z_{вх} \cdot \sin\varphi_{вх}.$$

Свойства ЧХ ЦРП электродвигателей изучены мало: иногда наблюдаются различные скорости изменения фазы при переходе через резонансные точки; не известна, в частности, связь экстремумов ФЧХ с общими свойствами цепи и др. [2].

Вычисление вторичных параметров

Предлагаемый метод предполагает знание в некотором диапазоне частот АЧХ и ФЧХ исследуемого электродвигателя. Исходя из чего, определяется модуль и аргумент характеристического сопротивления:

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

где

$$-\frac{\pi}{2} \le \varphi_c \le \frac{\pi}{2}. \qquad (8)$$

Коэффициент распространения отыскивается:

$$th\gamma l = Te^{j\theta}, \ T = \sqrt{\frac{Z_k}{Z_x}},$$

$$\theta = \frac{1}{2}(\varphi_к - \varphi_x). \qquad (9)$$

Установлено, что для обмоток электродвигателей обычно $T \le 1$, для $\arg\theta$ ограничений нет. Известно:

$$th2\alpha l = \frac{2T\cos\theta}{1+T^2}, \ th2\beta l = \frac{2T\sin\theta}{1-T^2}. \qquad (10)$$

Полученное из (10) значение $2\beta l$ в силу периодичности функции тангенса, должно соответствовать условию $2\beta l = 2\frac{\omega}{c} l$ (Нп/км), где $c = \frac{\omega}{\beta}$ – фазовая скорость, l – длина провода фазовой обмотки статора. Угол β можно приблизительно оценить по формуле $\beta \approx \omega\sqrt{LC}$.

Таким образом, по модулям и аргументам входных сопротивлений $\underline{Z_x}$ и $\underline{Z_к}$ можно определить вторичные параметры обмоток.

На рис. 1 приведена электрическая схема для измерения сопротивлений $\underline{Z_x}$ и $\underline{Z_к}$ и определения вторичных параметров обмоток статора электродвигателя электровоза постоянного тока, который был исследован в лабораторных условиях.

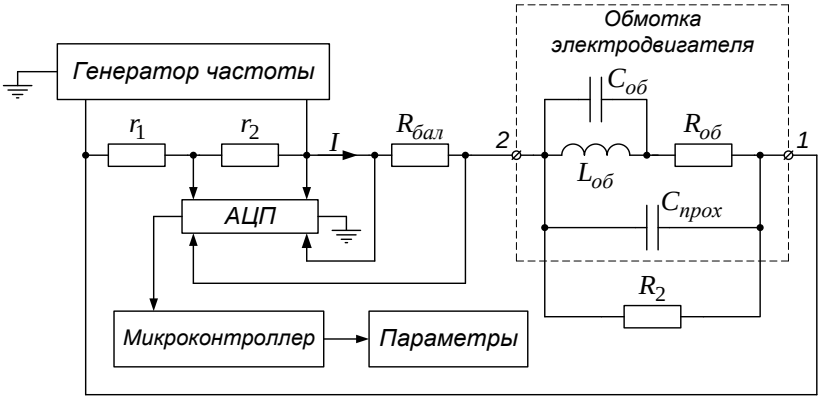

Рис. 1. Электрическая схема для измерения параметров $\underline{Z_x}$ и $\underline{Z_к}$ и определения вторичных параметров обмоток электродвигателя

© А. Ю. Лебедев, 2013

Параметры исследуемого двигателя локомотива следующие: мощность 305 кВт, напряжение на статоре 463 В, скорость вращения ротора 2290 об/мин, длина обмотки 210 м. Частота питания схемы испытаний 0,05...200 кГц. Электрическая схема, используемая для построения АЧХ и ФЧХ, а так же для измерения параметров электродвигателя содержит измерительные приборы – АЦП и фазометр на базе МК типа Е20-10, а также генератор частоты типа ГЗ-103.

Полученные экспериментально частотные характеристики исследуемого двигателя для режимов КЗ и ХХ изображены на рис. 2.

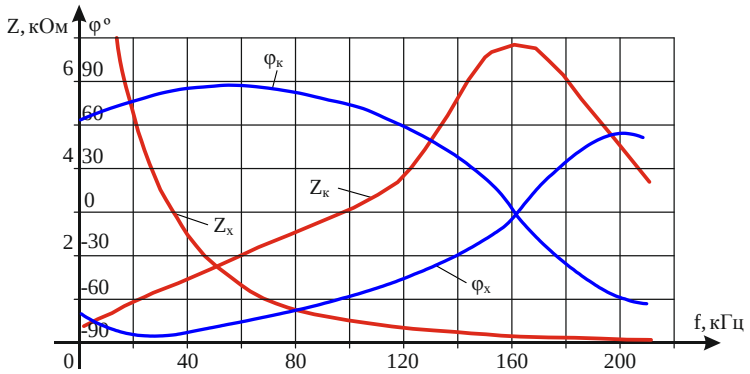

Рис. 2. Частотные характеристики обмоток электродвигателя в режимах ХХ и КЗ

Параметры электродвигателя, измеренные в режимах ХХ и КЗ, для частоты измерений 150 кГц, были следующими: $Z_x = 210$ Ом и его аргумент $\varphi_x = -15°$ – для режима ХХ и $Z_к = 6809$ Ом и его аргумент $\varphi_к = 21°$– для режима КЗ.

Используя эти данные опыта, по формуле (8) получим следующее значение характеристического сопротивления линии:

$$Z_c = 1194{,}141 + j62{,}582 .$$

Тогда из (9) гиперболический тангенс постоянной передачи и постоянная передачи линии будут иметь такие значения:

$$th\gamma l = 5{,}415 + j1{,}76 ;$$

$$\gamma l = 0{,}168 + j3{,}03 .$$

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

$$\alpha = 0{,}0008 ,$$

$$\beta = 0{,}0144 .$$

Используя полученные результаты волновых параметров линии можно вычислить также ее первичные параметры. Для этого необходимо приравнять действительную и мнимую части равенств $\gamma Z_c = R + j\omega L$ и $\frac{\gamma}{Z_c} = G + j\omega C$, откуда и находятся параметры [6]. Так для обмоток исследуемого электродвигателя рассчитанные первичные параметры оказались следующими:

$$R = 52{,}7 \text{ мОм}; \; L = 1{,}72 \text{ мкГн};$$

$$G = 1{,}3 \text{ мкСм}; \; C = 11{,}95 \text{ пФ}.$$

Полученные таким способом значения первичных параметров при последующих профилактических измерениях через $\tau_{пр}$ могут сравниваться с вновь измеренными величинами, что позволит оценивать динамику их изменения и прогнозировать периодичность проведения профилактик, в значительной степени повышая эксплуатационную надежность электрических машин.

По значениям АЧХ и ФЧХ обмоток профилактики методом синтеза строятся электрические схемы замещения однородной цепной схемы (ОЦС) с Т- или П-звеньями. Это позволит подробнее исследовать другие параметры схем ОЦС (вход-

© А. Ю. Лебедев, 2013

ное сопротивление при других, кроме канонических, формах записи выражений, уточнить рациональную связь между параметрами звеньев схемы замещения, резонансные свойства и др.) и оценить погрешность устройств диагностики электрических машин.

Выводы

В работе проведен анализ существующих методов оценки параметров обмоток электродвигателей. В результате анализа и особенностей предлагаемого частотного метода была разработана электрическая схема для измерения параметров сопротивлений холостого хода и короткого замыкания. В ходе лабораторных исследований были измерены АЧХ и ФЧХ для электродвигателя в режимах холостого хода и короткого замыкания. Согласно результатам измерений и известной методике были определены волновые параметры обмоток электрического двигателя, и рассчитаны первичные параметры, характеризующие состояние изоляции этих обмоток. В дальнейшем зная эти параметры, можно судить о динамике изменения электрической изоляции обмоток, а следовательно, и о вероятном времени отказа двигателя [7]. Это позволяет планировать и проводить своевременно профилактические работы двигателей.

Проводятся исследования по разработке мобильного автоматизированного цифрового диагностического устройства для измерения параметров обмоток электродвигателей в условиях эксплуатации и проведении ремонтно-профилактических работ, что позволит определить параметры новой стратегии обслуживания этих объектов.

Библиографический список

1. Боднар, Б. Є. Сучасні методи контролю потокового стану ізоляції тягових електричних машин локомотивів [Текст] / Б. Є. Боднар, М. І. Капіца // Залізничний транспорт України. – 2006. – № 2. – С. 22-26.
2. Каганов, З. Г. Электрические цепи с распределенными параметрами и цепные схемы [Текст] / З. Г. Каганов // М.: Энергоатомиздат, 1990. – 248 с.
3. Каллер, М. Я. Теория линейных электрических цепей железнодорожной автоматики, телемеханики и связи [Текст]: учебник для вузов ж.-д. трансп. / М. Я. Каллер, Ю. В. Соболев, А. Г. Богданов. – М.: Транспорт, 1987. – 335 с.
4. Полехин, С. И. Теория связи по проводам [Текст] / С. И. Полехин // М.: Связьиздат, 1960. – 464 с.
5. Инкин, А. И. Электромагнитные поля и параметры электрических машин. [Текст]: учеб. пособие / А. И. Инкин. – Новосибирск: ООО «Издательство ЮКЭА», 2002. – 464 с.
6. Белецкий, А. Ф. Основы теории линейных электрических цепей [Текст] / А. Ф. Белецкий // М.: Связь, 1967. – 608 с.
7. Діагностування електричних машин частотним методом [Текст] / А. П. Разгонов та ін. // Матеріали IV Міжнародної науково – практичної конференції «Електромагнітна сумісність та безпека на залізничному транспорті». – Д.: Вид-во Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна, 2011. – С. 67-68.

Ключові слова: електродвигун, коло з розподіленими параметрами, частотні характеристики, хвильові та первинні параметри обмоток.

Ключевые слова: электродвигатель, цепь с распределенными параметрами, частотные характеристики, волновые и первичные параметры обмоток.

Keywords: engine, line with distributed characteristics, amplitude-frequency characteristic, wave and primary winding characteristics.

Надійшла до редколегії 05.03.2013

© А. Ю. Лебедев, 2013