

МЕТОДИКА БАЗОВОЙ КОРРЕКЦИИ ИЗМЕРЕНИЙ ПРОФИЛЕЙ КОЛЛЕКТОРОВ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН

Ю.С. Боровиков, С.И. Качин, В.Ю. Саблуков

Томский политехнический университет

E-mail: borovikov@tpu.ru

Показана возможность минимизации погрешностей, возникающих в результате бесконтактного измерения расстояния между вихретоковым преобразователем и коллектором электрической машины. Задача решена путем коррекции коэффициента передачи измерительного тракта прибора в процессе измерения расстояния до произвольно взятой коллекторной пластины в соответствии с предлагаемой методикой.

Введение

В ряде работ показано, что внедрение средств диагностики и прогнозирования качества функционирования скользящего контакта (СК) электрических машин (ЭМ) позволяет существенно повышать их эксплуатационную надежность, снижать затраты на обслуживание и ремонт, практически исключать потери от аварийных и внеплановых простоев, увеличивать срок службы [1–4]. Наиболее распространены в системах динамического диагностирования СК ЭМ комплексы, построенные на основе бесконтактных измерительных преобразователей (ИП) вихретокового типа [5–7]. Основными источниками погрешностей на выходе аналоговых частей диагностических комплексов, возникающих при использовании такого рода преобразователей, являются неодинаковые удельные электрические сопротивления отдельных коллекторных пластин (КП) (особенно их поверхностного слоя, свойства которого могут зависеть от технологии обработки), разность температур нагрева пластин, линейная скорость перемещения контролируемой поверхности относительно ИП, а также неточность ориентации ИП относительно контролируемой поверхности в процессе тарирования и при измерении на реальном объекте [8–10].

Задача устранения влияния указанных погрешностей является актуальной и может быть решена путем коррекции параметра градуировочной характеристики (коэффициента передачи измерительного тракта прибора) в процессе измерения расстояния до произвольно взятой КП в соответствии с методом базовой коррекции результатов измерений, предложенным на кафедре электропривода и электрооборудования Томского политехнического университета [11].

Основная часть

При использовании бесконтактного измерительного устройства (рис. 1) зависимость выходного параметра y_i от измеряемой величины зазора x между ИП и контролируемой областью записывается как

$$y_i = a_{1i} + a_{2i}x, \quad (1)$$

где i – порядковый номер измерения; a_{1i} , a_{2i} – параметры градуировочной характеристики.

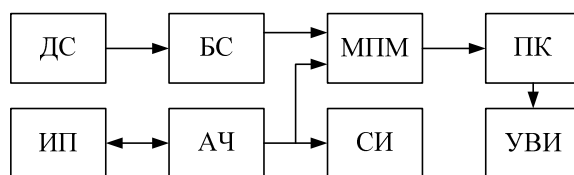


Рис. 1. Функциональная схема бесконтактного профилометра с вихретоковым измерительным преобразователем: ИП – измерительный преобразователь вихретокового типа; АЧ – аналоговая часть; МПМ – микропроцессорный модуль; СИ – стрелочный индикатор; ПК – персональный компьютер; УВИ – устройство выдачи информации; ДС – датчик синхронизации; БС – блок синхронизации

При надлежащей установке ИП и настройке измерительного устройства можно принять $a_{1i}=0$. Тогда (1) преобразуется к виду:

$$y_i = a_{2i}x.$$

Отсюда следует, что выходной параметр измерительного устройства пропорционален не только измеряемому зазору x , но и коэффициенту градуировочной характеристики a_{2i} , который зависит от многих факторов, в том числе от внешних воздействий на объект измерения и элементы измерительного устройства.

Поэтому целесообразно осуществлять коррекцию параметра a_{2i} в процессе измерений, что позволяет повышать их точность [12]. Это может быть выполнено путем проведения опорного измерения и дополнительного измерения при увеличенном на образцовую величину зазоре. Получим систему двух уравнений с одинаковыми коэффициентами $a_{21}=a_{22}$, поскольку измерения проводятся на одном объекте при идентичных возмущающих воздействиях

$$y_1 = a_{21}x;$$

$$y_2 = a_{21}(x + \delta_0), \quad (2)$$

где δ_0 – образцовая величина изменения зазора.

Решение системы (2) имеет следующий вид:

$$a_{2i} = \frac{y_2 - y_1}{\delta_0}, \quad x = \frac{y_1 \delta_0}{y_2 - y_1}. \quad (3)$$

Из выражений (3) следует, что расчетное значение зазора не зависит от указанной выше нестабильности параметра a_{2i} , что обеспечивает повыше-

ние точности измерений. В случае уменьшения зазора на образцовую величину система исходных уравнений записывается аналогично системе (2)

$$\begin{aligned} y_1 &= a_{21}x; \\ y_2 &= a_{21}(x - \delta_0). \end{aligned}$$

Решение данной системы имеет вид:

$$a_{2i} = \frac{y_1 - y_2}{\delta_0}, \quad x = \frac{y_1 \delta_0}{y_1 - y_2}. \quad (4)$$

Таким образом, выражения (3, 4) обеспечивают корректировку параметра a_{2i} линейной градуировочной характеристики измерительного устройства при любом направлении изменения зазора, что позволяет существенно снизить отрицательное влияние ряда факторов на результат измерения и повысить его точность.

Поскольку изменение зазора на образцовую величину выполняется с определенной погрешностью (которая может быть обусловлена неточностью измерения данного перемещения, то это влияет на точность определения параметра градуировочной характеристики a_{2i} и, соответственно, измеряемого зазора. Погрешность измерения зазора от неточности перемещения ИП на образцовую величину не должна превышать, как правило, 1 %. С этой целью необходимо изменять зазор до тех пор, пока не будут выполняться условия:

- при увеличении зазора $y_2 \geq y_1 \left(1 + \frac{\Delta}{\Delta x}\right)$;
- при уменьшении зазора $y_2 \leq y_1 \left(1 - \frac{\Delta}{\Delta x}\right)$,

где Δ — максимальная погрешность изменения зазора на образцовую величину; Δx — допустимая погрешность измерений зазора, обусловленная неточностью изменения зазора на образцовую величину.

Достигнутая при этом величина образцового изменения зазора δ_0 измеряется с помощью вспомогательной измерительной системы и используется для определения параметра a_{2i} и корректировки результатов измерений в соответствии с выражениями (3, 4).

Установка ИП относительно коллектора электрической машины может быть осуществлена, например, с помощью устройства с микрометрическим винтом, рис. 2.

Сущность методики можно пояснить на следующем примере, рис. 3.

Пусть параметр градуировочной характеристики определен при измерении зазора между ИП и КП № 1. Тогда градуировочная характеристика прибора $y=f(x)$ представляет собой прямую, проходящую через ноль под углом 45° к оси абсцисс (характеристика 1, рис. 3). При этом значения на выходе прибора соответствуют истинному расстоянию от ИП до контролируемой поверхности КП № 1, а прямая 1 является эталонной градуировоч-

ной характеристикой (выходной характеристикой профилометра). Если расстояние между ИП и КП № 1 равно базовому (рекомендуемое исходное расстояние от ИП до измеряемого профиля коллектора), то на выходе прибора фиксируется значение y_a , соответствующее точке a на его градуировочной характеристике ($y_a = x_{\text{баз}}$).

В случае, если КП № 2 с тем же уровнем профиля, что и КП № 1, имеет иное электрическое сопротивление, то градуировочная характеристика прибора при контроле КП № 2 пойдет под другим углом к оси абсцисс (прямая 2 на рис. 3). Тогда уровень профиля КП № 2 (y_c) будут интерпретированы как расстояние x_2 , соответствующее точке c' на градуировочной характеристике 1. Измеренное значение x_2 здесь отличается от истинного значения $x_{\text{баз}}$.

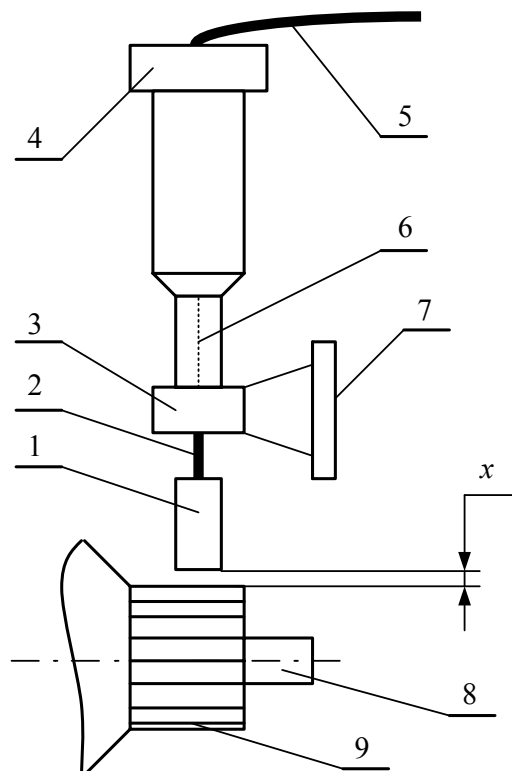


Рис. 2. Пример установки измерительного преобразователя относительно объекта измерения: 1) ИП; 2) подвижный (в направлении, перпендикулярном цилиндрической поверхности коллектора) элемент, на котором крепится ИП; 3) корпус; 4) вращающийся элемент; 5) электрический кабель; 6) нониусная шкала отсчета; 7) станина; 8) вал; 9) коллектор; x — измеряемый зазор

По аналогии измеренному значению y_b на КП № 3 (характеристика 3), западающей на величину x_{03} относительно ламелей № 1, 2, будет присваиваться ложное значение x_3 , соответствующее точке b' на эталонной характеристике 1. Для выступающей ламели № 4 (на величину x_{04} относительно ламелей 1, 2) ложное измеренное значение будет равно x_4 , соответствующее точке d' на характеристике 1 и т. д.

Для ликвидации расхождений между измеренными значениями и истинными величинами зазо-

ров необходимо наклоны характеристик 2, 3, 4 привести к эталонному значению, которым является наклон характеристики 1. Углы наклона характеристик 2, 3, 4 в общем случае неизвестны и их требуется определить каким-либо образом.

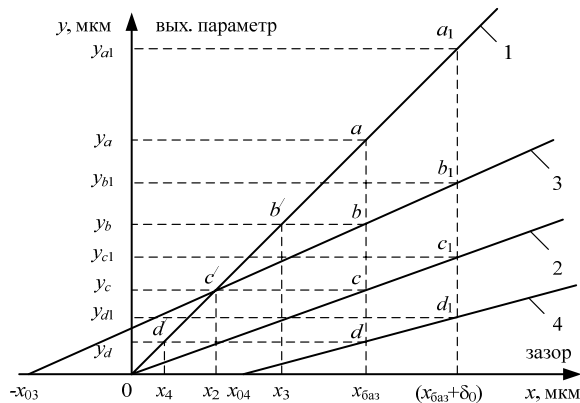


Рис. 3. Градуировочная характеристика профилометра

С этой целью в процессе измерения может осуществляться образцовое перемещение (δ_0) ИП относительно измеряемого объекта в сторону увеличения зазора, которое фиксируется с помощью шкалы отсчета микрометрического винта (либо измерительных головок и т. п.). При этом фактическая величина зазора между ИП и КП № 1, 2 станет равной $(x_{баз} + \delta_0)$. Показание прибора для точки a_1 характеристики 1 будет равно y_{a1} ($y_{a1} = x_{баз} + \delta_0$). Показания прибора для ламелей 2, 3, 4 будут при этом равны y_{c1} , y_{b1} , y_{d1} .

В результате тангенсы углов наклона характеристик 2, 3, 4, ..., i находятся по выражению

$$\operatorname{tg} \alpha_i = \frac{\Delta y_i}{\delta_0},$$

где α_i — угол наклона i -ой характеристики; Δ — приращение показаний прибора на i -ой характеристике при перемещении преобразователя на величину δ_0 .

Это позволяет определять параметры откорректированных градуировочных характеристик 2, 3, 4, ..., i :

$$a_i = \operatorname{tg} \alpha_i = \frac{\Delta y_i}{\delta_0}.$$

Соответственно откорректированные показания прибора на i -ой характеристике равны:

$$y_{i0} = y_i / a_i.$$

Откорректированные в соответствии с предложенным способом градуировочные характеристики прибора для ламелей № 2, 3, 4 будут выглядеть так, как это показано на рис. 4.

Откорректированная градуировочная характеристика для ламели № 2 здесь совпадает с эталонной прямой 1. Соответственно показания прибора для ламелей 1, 2 в базовой точке равны $y_{a,c0}$, что соответствует истинным значениям зазоров между ИП и ламелями № 1, 2 ($y_{a,c0} = x_{баз}$). Показание прибора на характеристике 3 равно y_{b0} , что соответствует ординате точки b'_0 на прямой 1 и зазору x_3 ($x_3 = x_{баз} + x_{03}$). Аналогично

показание прибора на характеристике 4 равно y_{d0} , что соответствует ординате точки d'_0 на эталонной прямой 1 и зазору x_4 ($x_4 = x_{баз} - x_{04}$).

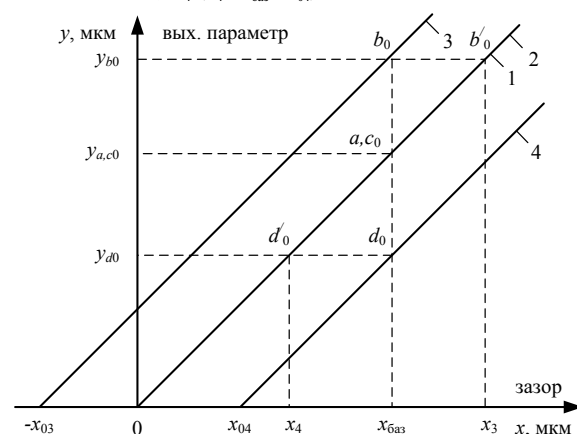


Рис. 4. Откорректированные расчетным путем градуировочные характеристики профилометра

Следовательно, откорректированные показания прибора соответствуют фактическим значениям зазоров между измерительным преобразователем и контролируемыми коллекторными пластинами.

Аналогично может быть выполнена корректировка параметра градуировочной характеристики в случае уменьшения зазора на образцовую величину δ_0 .

Другим примером применения методики базовой коррекции может служить использование измерительного устройства для регистрации линейных микроперемещений какого-либо объекта, например, щетки ЭМ в колодце щеткодержателя в процессе эксплуатации. С этой целью на наружную торцевую поверхность щетки может быть наклеена медная фольга, относительно которой базируется вихревой ИП. После этого при неработающей ЭМ проводятся операции опорного и дополнительного измерений, аналогичные описанным выше, что позволяет определить параметр градуировочной характеристики:

$$a_{2i} = \frac{y_d - y_0}{\pm \delta_0},$$

где y_d и y_0 — значения дополнительного и опорного измерений. Знак (+/-) соответствует увеличению/уменьшению зазора на δ_0 .

Предложенная методика реализована в среде графического программирования LabVIEW 5.0. На рис. 5 приведен пример вывода результатов измерений профиля коллектора на монитор компьютера.

Проведенные экспериментальные исследования показали, что при применении методики поламельной базовой коррекции в динамических режимах работы происходит корректировка уровня профиля в среднем на 25 % [13, 14].

Выводы

1. Разработанная и апробированная методика измерения профиля коллекторов электрических машин позволяет повысить точность контроля

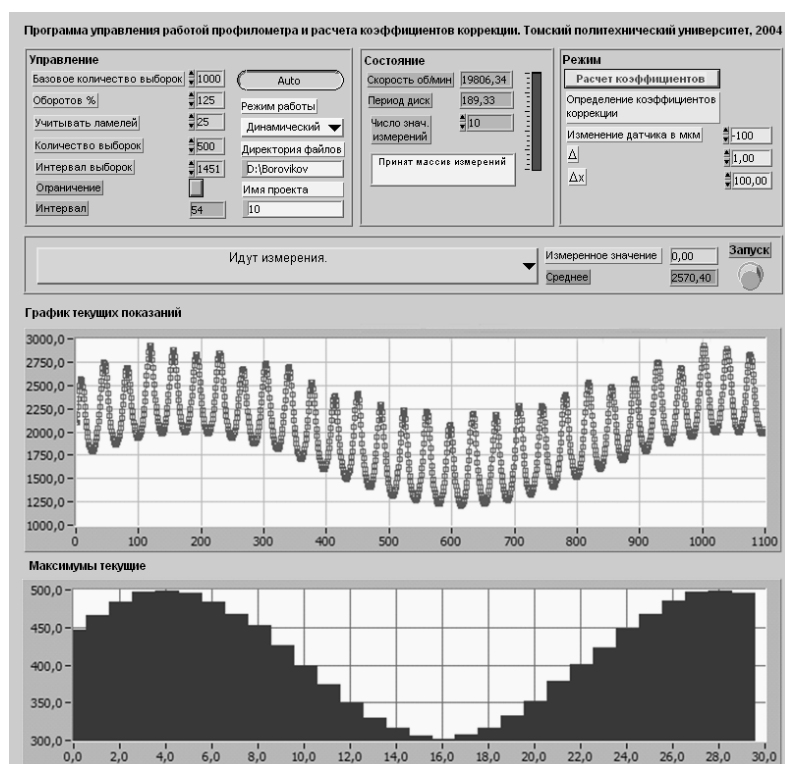


Рис. 5. Пример вывода результатов измерений профиля коллектора

при варьировании температуры нагрева коллекторных пластин, изменениях удельных сопротивлений поверхностного слоя ламелей, линейной скорости перемещения коллектора относительно измерительного преобразователя и не точности его ориентации относительно контролируемой поверхности.

2. Тестирование высокоскоростных электрических машин малой мощности в динамических режимах показало, что корректировка уровня профиля коллектора достигает 25 %. Это позволяет проводить отработку конструкций и технологии изготовления коллекторов на всех стадиях производственного процесса.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Плохов И.В. Комплексная диагностика и прогнозирование технического состояния узлов скользящего токосъема турбогенераторов: Автореф. дис. ... докт. техн. наук. — СПб., 2001. — 36 с.
2. Singh R., Onwubolu G., Singh K., Ram R. DC Motor Control Predictive Models // American Journal of Applied Sciences. — 2006. — V. 3. — № 11. — P. 2096–2102.
3. Харламов В.В. Совершенствование методов и средств диагностирования технического состояния коллекторно-щеточного узла тяговых электродвигателей подвижного состава: Дис. ... докт. техн. наук. — Омск, 2003. — 376 с.
4. Качин С.И., Боровиков Ю.С., Нечаев М.А. Программно-аппаратный комплекс для оценки механического состояния скользящих контактов коллекторных машин электроприводов // Известия Томского политехнического университета. — 2004. — Т. 307. — № 1. — С. 140–144.
5. Харламов В.В. Методы и средства диагностирования технического состояния коллекторно-щеточного узла тяговых электродвигателей и других коллекторных машин постоянного тока. — Омск: ОмГУПС, 2002. — 233 с.
6. Родионов Ю.А., Плохов И.В., Егоров В.Е., Савраев И.Е. Оценка качества работы щеточного аппарата электрических машин приборами диагностического комплекса ДИАКОР // Электротехника. — 1995. — № 3. — С. 16–19.
7. Денисов В.А., Шатерников В.Е. Устройства для контроля механических факторов коммутации коллекторных электрических машин // Электротехника. — 1971. — № 5. — С. 29–32.
8. Burrig M., Qu Z. An Improved Nonlinear Control Design for Series DC Motors // Computers & Electrical Engineering. — 2003. — V. 29. — № 2. — P. 273–288.
9. Козлов А.А., Скороспешкин А.И. Динамический контроль профиля коллекторов электрических машин // Электротехника. — 1977. — № 7. — С. 36–39.
10. Герасимов В.Г., Ключев В.В., Шатерников В.Е. Методы и приборы электромагнитного контроля промышленных изделий. — М.: Энергоатомиздат, 1983. — 271 с.
11. Пат. 2234054 РФ. МПК⁷ G01B 7/14. Способ измерения зазора между измерительным преобразователем и контролируемой поверхностью (варианты) / С.И. Качин, Ю.С. Боровиков, М.А. Нечаев, О.С. Качин. Заявлено 17.07.2003; Опубл. 10.08.2004, Бюл. № 22. — 11 с.: ил.
12. Бромберг Э.М., Куликовский К.Л. Тестовые методы повышения точности измерений. — М.: Энергия, 1978. — 176 с.
13. Качин С.И. Высокоиспользованные коллекторные электрические машины малой мощности: Дис. ... докт. техн. наук. — Томск, 2002. — 438 с.
14. Боровиков Ю.С. Программно-аппаратные средства для оценки коммутационной напряженности коллекторных электрических машин: Дис. ... канд. техн. наук. — Томск, 2003. — 155 с.

Поступила 01.12.2006 г.