

УДК 621.317

С.Р. Зиборов, доцент, канд. техн. наук,

Е.А. Редькина, доцент, канд. техн. наук,

И.А. Цыганов, магистр

Севастопольский национальный технический университет,

ул. Университетская, 33, г. Севастополь, Украина, 99053,

E-mail: sergey.ziborov@gmail.com

СИСТЕМА ДИАГНОСТИКИ КОЛЛЕКТОРНЫХ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ

Проанализированы основные неисправности коллекторных электродвигателей. Показано, что интенсивность искрения коллекторного электродвигателя можно оценивать по значению дисперсии тока. Предложена система диагностики, основанная на анализе тока, потребляемого электродвигателем. Система позволяет обнаружить и оценить неисправности коллекторно-щеточного узла и симисторного регулятора тока.

Ключевые слова: коллекторный электродвигатель, диагностика неисправности, спектр, искрение на коллекторе, дисперсия тока, симистор.

При изготовлении и ремонте электроинструментов, приводимых в действие коллекторными двигателями мощностью от 0,5 до 2,5 кВт, важную роль играет диагностика их неисправностей. Наиболее уязвимой частью коллекторного двигателя является коллекторно-щеточный узел. Даже в исправном двигателе в этом узле наблюдается искрение, которое вызывает нагрев ламелей. При стачивании щёток искрение может перейти в стадию, при которой ламели коллектора перегреваются и иногда отслаиваются от изолятора, вызывая выход двигателя из строя. Межвитковое замыкание обмоток ротора или статора так же вызывает увеличение искрения коллекторно-щеточного узла, обусловленное увеличением тока двигателя.

В настоящее время на отечественных предприятиях диагностика коллекторных электродвигателей сводится к измерению отдельных параметров (сопротивление обмоток на постоянном токе, контроль изоляция между витками обмоток, обмотками и корпусом, ток и потери холостого хода, визуальная оценка степени искрения коллектора) [1]. Такая диагностика требует механического контакта с электродвигателем, а визуальная оценка искрения коллектора неэффективна и носит субъективный характер.

Целью данной работы является разработка и исследование системы диагностики неисправностей коллекторных электродвигателей, свободной от указанных недостатков и позволяющей обнаружить неисправности на ранней стадии их развития и, таким образом, предотвратить возникновение аварийной ситуации.

С практической точки зрения наиболее предпочтительными являются средства диагностики объекта исследования, удовлетворяющие следующим требованиям:

- отсутствие механического контакта с объектом;
- возможность проведения диагностики в процессе эксплуатации объекта;
- простота обработки результатов диагностики.

Сравнительный анализ известных методов диагностики электродвигателей [2-4] показал, что наиболее полно перечисленным требованиям удовлетворяет метод, основанный на анализе тока электродвигателя. Было выполнено экспериментальное исследование влияния искрения коллекторно-щеточного узла на характеристики тока двигателя. В качестве датчика тока был использован трансформатор тока в виде круглого ферритового сердечника с обмоткой, который одевался на один из проводов, подводящих электрический ток к двигателю. Исследования показали, что случайные изменения тока, обусловленные искрением исправного электродвигателя, много меньше амплитуды первых пяти гармоник тока, частота которых кратна частоте промышленной сети 50 Гц. Поэтому для минимизации влияния этих гармоник на результат диагностики выходной сигнал датчика тока обрабатывался полосно-пропускающим фильтром, нормированная амплитудно-частотная характеристика которого изображена на рисунке 1.

Выходной сигнал фильтра подавался на вход звуковой карты персонального компьютера и затем обрабатывался в цифровом виде. Поскольку частота дискретизации звуковой карты составляла 44 кГц, то это позволило проанализировать спектр диагностического сигнала в частотном диапазоне от 0 до 22 кГц. С помощью программы MathCAD были рассчитаны временные распределения математического ожидания и дисперсии тока (рисунки 2 и 3) путем осреднения значений выборок по ансамблю реализаций тока исправного и неисправного электродвигателей одного типа. Квазипериодический характер временных распределений обусловлен неполным подавлением гармоник тока с частотами 50 Гц и 100 Гц.

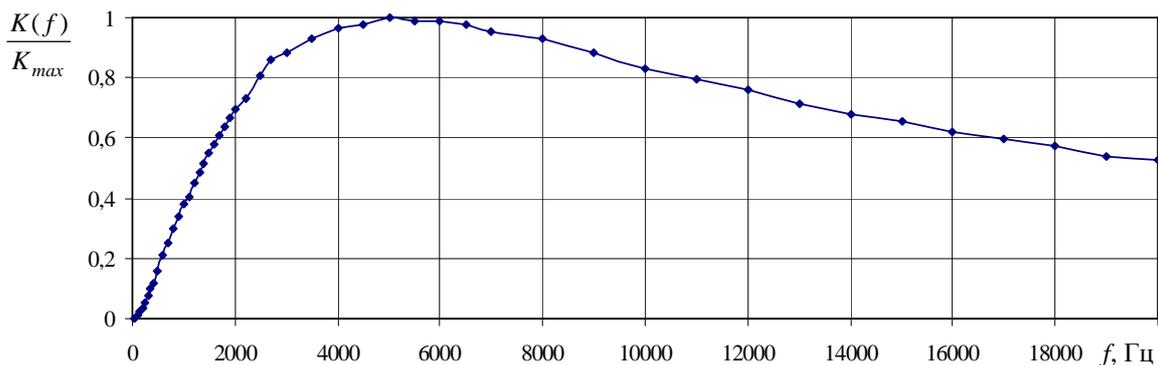


Рисунок 1 — Нормированная АЧХ полосно-пропускающего фильтра

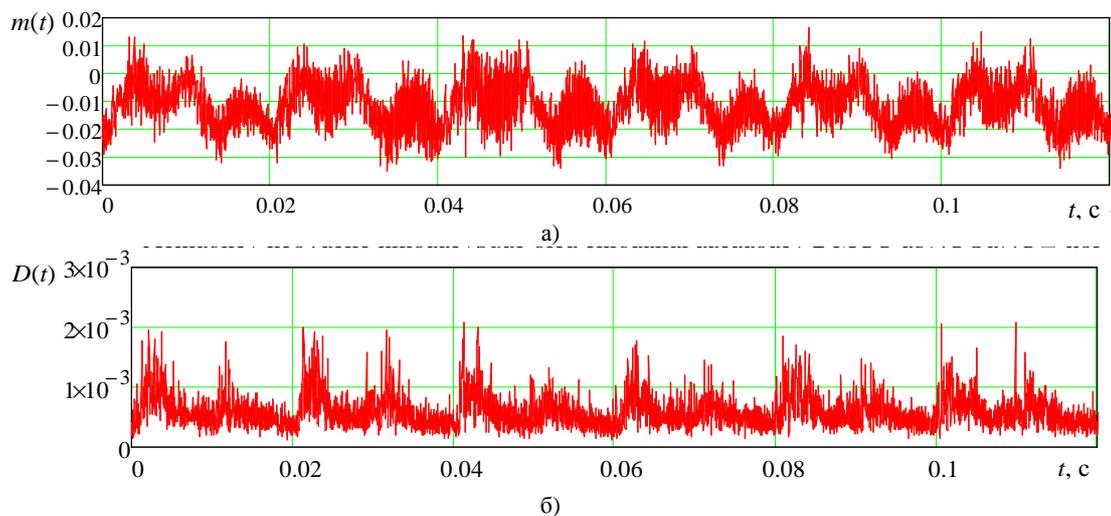


Рисунок 2 — Временное распределение математического ожидания (а) и дисперсия (б) тока исправного электродвигателя

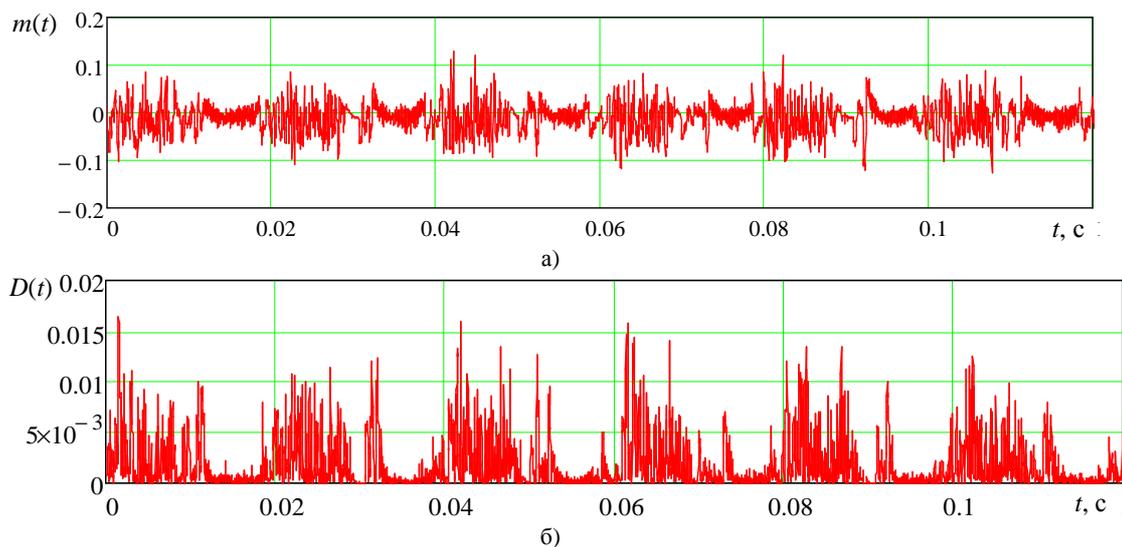


Рисунок 3 — Временное распределение математического ожидания (а) и дисперсия (б) тока неисправного электродвигателя

Анализ временных распределений математического ожидания и дисперсии показывает, что повышенное искрение коллекторно-щеточного узла электродвигателя приводит к увеличению как математического ожидания, так и дисперсии тока. Поскольку изменения дисперсии наиболее существенны, то ее значение может быть использовано в качестве меры интенсивности искрения.

С помощью программы MathCAD была также рассчитаны спектральные плотности токов (рисунки 4 и 5) исправного и неисправного электродвигателей с номинальной скоростью вращения ротора от 15000 до 30000 об/мин.

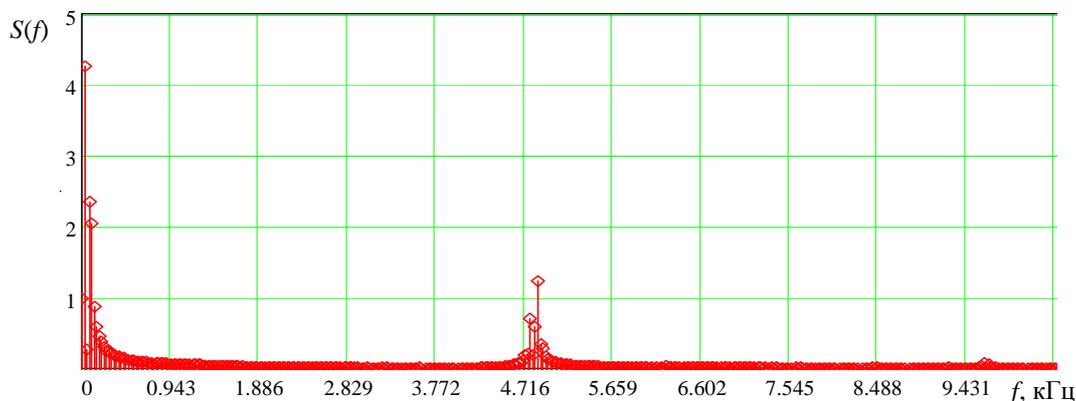


Рисунок 4 — Спектральная плотность тока исправного электродвигателя

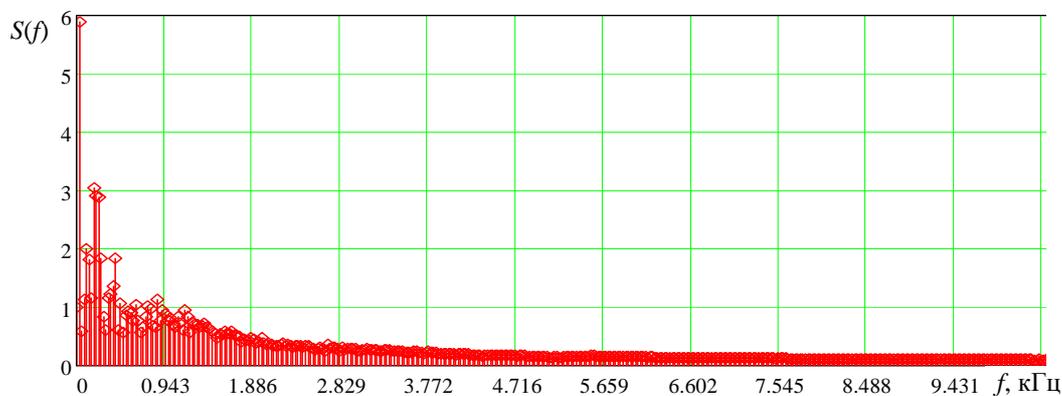


Рисунок 5 — Спектральная плотность тока неисправного электродвигателя

Из рисунков 4 и 5 видно, что повышенное искрение коллекторно-щеточного узла электродвигателя вызывает уменьшение спектральной плотности тока на частотах кратных скорости вращения ротора и увеличение на частотах менее 3 кГц. Следовательно, указанное изменение спектральной плотности тока является характерным признаком возникновения неисправности в виде повышенного искрения.

Кроме того, временные диаграммы тока были дополнительно обработаны с помощью программы Multi-Instrument Pro, в результате чего были получены нормированные амплитудные спектры тока исправного (а) и неисправного (б) электродвигателей (рисунок 6). Полученные зависимости по форме аналогичны спектральным плотностям, рассчитанным с помощью программы MathCAD (см. рисунки 4 и 5).

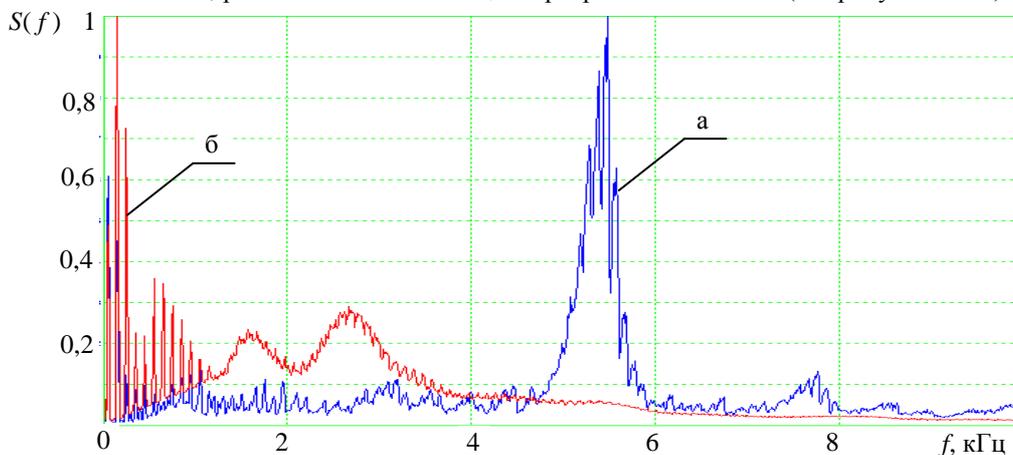


Рисунок 6 — Нормированный амплитудный спектр тока исправного (синий) и неисправного (красный) электродвигателей

Експериментальні дослідження несправності симісторного регулятора тока колекторного двигателя показали, що така несправність викликає збільшення спектральної густоти тока в околиці частоти кратної швидкості обертання ротора.

З урахуванням результатів експериментального дослідження була розроблена функціональна схема системи діагностики, зображена на рисунку 7. Система складається з набору датчиків тока і пристроїв аварійного відключення, число яких дорівнює числу діагностованих електродвигателів, коммутатора, блоку попередньої обробки і персонального комп'ютера. Як датчиків тока цілком доцільно використовувати трансформатори тока, які практично не впливають на працюючий електродвигатель. Вихідні сигнали датчиків тока з допомогою мультиплексора 1 подаються періодично або вибірково на полосно-пропускаючий фільтр ПФ з верхньої граничної частотою полоси пропускання f_{max} . При періодичному опросі датчиків їх вихідні сигнали по черзі підключаються до ПФ на час, перевищує тривалість перехідного процесу, обумовленого переключенням. Фільтр ПФ посилює діагностичний сигнал, послаблює гармоніки мережевого напруги і обмежує ширину спектра сигналу. Демультіплексор забезпечує подачу керуючих сигналів на пристрої аварійного відключення, які, за потреби, відключають несправні електродвигатели. Автономний блок живлення виробляє напруги, необхідні для живлення вузлів коммутатора.

Датчики тока, пристрої аварійного відключення і коммутатор повинні розташовуватися безпосередньо в приміщенні, в якому проводиться випробування працюючого електроінструмента і, відповідно, присутність підвищеного шуму і вібрації, шкідливі для здоров'я людини. Тому таке приміщення повинно бути віддалено від приміщення, в якому встановлюються блок попередньої обробки і персональний комп'ютер, що дозволяє захистити випробувача від шкідливих впливів. Вихідний сигнал коммутатора подається по екранованому кабелю на блок попередньої обробки сигналів, де розділяється на два канали. В першому каналі сигнал поступає на фільтр нижніх частот ФНЧ, а во другому — на фільтр верхніх частот ФВЧ з однаковими граничними частотами f_{min} . В результаті, в перший канал проходять складові спектра сигналу з частотами від 0 до f_{min} , а во другому каналі — складові спектра в частотному діапазоні від f_{min} до f_{max} . Розділення спектра сигналу на два частотних піддіапазони обумовлено особливостями впливу різних несправностей електродвигателя на спектр його тока [3, 4].

Складові спектра тока колекторного електродвигателя в частотному діапазоні від 0 до f_{min} дозволяють діагностувати:

- вібрації електродвигателя;
- міжвиткові замикання обмоток електродвигателя;
- інтенсивність іскрення колекторно-щіткового вузла.

В діапазоні частот від f_{min} до f_{max} складові спектра тока колекторного електродвигателя дозволяють діагностувати:

- число оборотів електродвигателя;
- інтенсивність іскрення колекторно-щіткового вузла;
- дефекти підшипників качення
- дефекти симісторного регулятора тока.

В залежності від діапазону частот, в якому з'являються складові спектра тока, свідетельствующие про несправності, можливі несправності можна об'єднати в три групи. К першій групі належать несправності, відповідні складовим спектра в діапазоні частот від 0 до f_{min} , до другої групи — в діапазоні частот від f_{min} до f_{max} , і до третьої групи — одночасно в обох діапазонах частот, вказаних раніше.

В зв'язі з різницею рівнів вихідних сигналів датчиків тока, обумовленим різницею потужності випробуваних електроінструментів, сигнали ФНЧ і ФВЧ подаються на аттенуатори з регульованими коефіцієнтами передачі, зміна яких здійснюється з допомогою мультиплексорів 2 і 3. С виходів аттенуаторів сигнали поступають на амплітудні детектори, а також на лінійний вхід звукової карти персонального комп'ютера. Вихідні сигнали амплітудних детекторів подаються на порогові пристрої.

Частоти f_{min} і f_{max} слід вибирати так, щоб складові спектра тока, відповідні номінальній частоті обертання електродвигателя при стендових випробуваннях потрапили в діапазон частот від f_{min} до f_{max} , а складові, обумовлені підвищеним іскренням на колекторі і зниженням швидкості обертання, — в діапазон частот від 0 до f_{min} . Слід мати на увазі, що при дуже високій ступені іскрення можливо збільшення спектральної густоти тока во всьому частотному діапазоні від 0 до f_{max} . В більшості випадків несправність симісторного регулятора тока

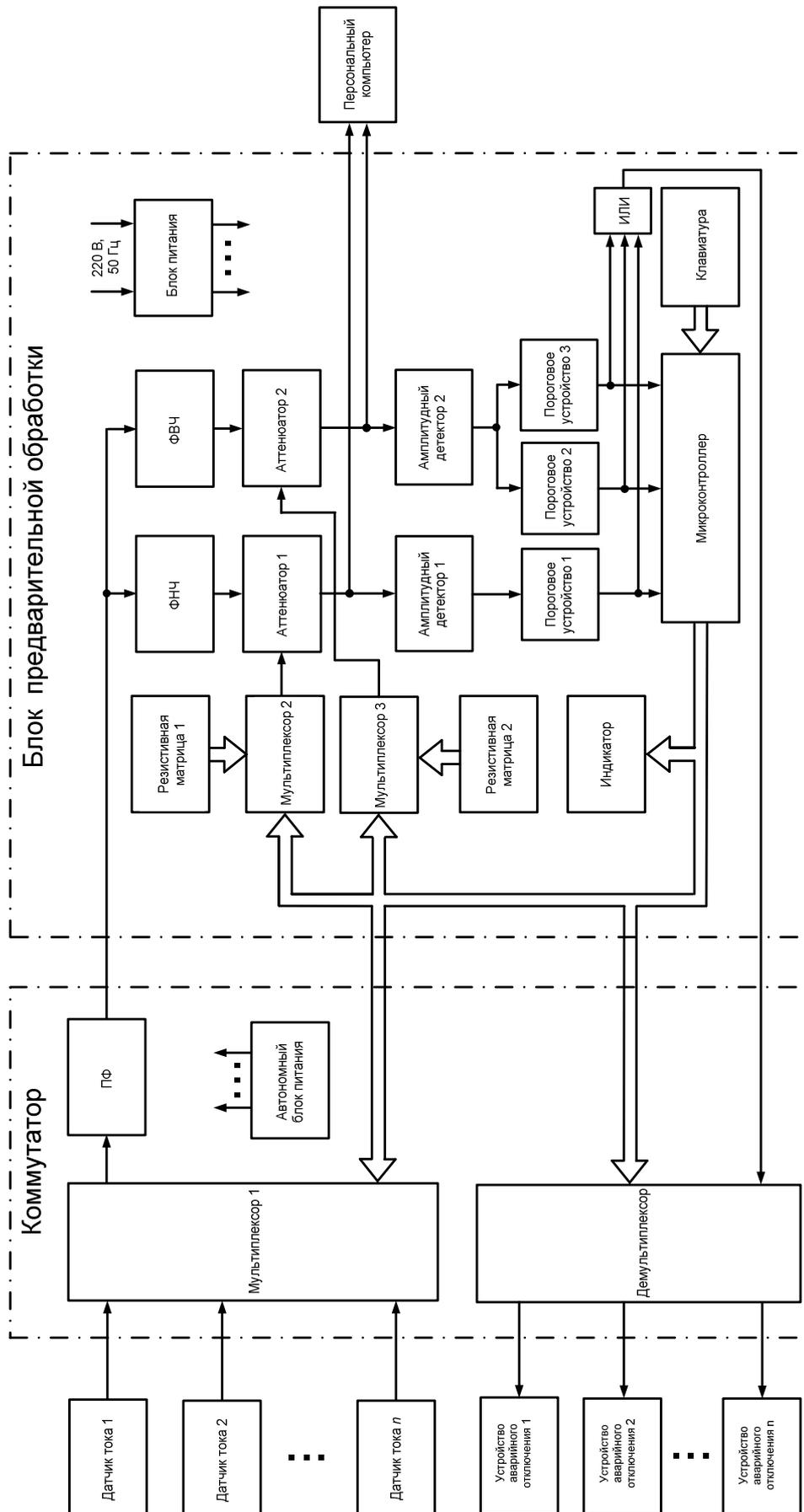


Рисунок 7 — Функциональная схема системы диагностики

вызывает увеличение спектральной плотности тока в диапазон частот от f_{min} до f_{max} , а искрение коллекторно-щеточного узла — в диапазон частот от 0 до f_{min} .

Для обнаружения повышенного искрения коллекторно-щеточного узла и механических неисправностей, вызывающих понижение скорости вращения электродвигателя, выходной сигнал $U_{д1}$ амплитудного детектора 1 подается на пороговое устройства 1, которое срабатывает при выполнении условия $U_{д1} > U_{п1}$, где $U_{п1}$ — порог срабатывания, что свидетельствует о неисправности коллекторно-щеточного узла.

Для обнаружения неисправности симисторного регулятора выходной сигнал $U_{д2}$ амплитудного детектора 2 подается на пороговые устройства 2 и 3 с порогами срабатывания $U_{п2}$ и $U_{п3}$, удовлетворяющих условию $U_{п2} < U_{п3}$. При выполнении условия $U_{д2} < U_{п2}$ срабатывает пороговое устройства 2, что свидетельствует о неисправности коллекторно-щеточного узла или понижении скорости вращения ротора. При выполнении условия $U_{д2} > U_{п3}$ срабатывает пороговое устройства 3, что свидетельствует о неисправности симисторного регулятора или крайне высокой степени искрения на коллекторе.

При срабатывании любого из пороговых устройств его выходной сигнал, соответствующий логической «1», через логический элемент ИЛИ поступает в блоке коммутации на вход демультимплексора, вызывая аварийное отключение электродвигателя, диагностический сигнал которого вызвал срабатывание порогового устройства. Кроме того, выходные сигналы пороговых устройств подаются на порты микроконтроллера, управляющего работой системы диагностики.

Микроконтроллер выполняет следующие функции:

- формирование сигналов управления мультимплексорами;
- формирование задержки 500 мс срабатывания мультимплексора 1, что позволяет избежать ложных отключений электродвигателя, вызванных переходными процессами, возникающими в момент пуска электродвигателя;
- определение номера группы неисправности, номера неисправного электроинструмента и запоминание этих номеров;
- управление цифровым индикатором.

При срабатывании пороговых устройств индикатор оповещает о неисправности диагностируемого электроинструмента, указывая его номер, а также номер группы, к которой относится неисправность.

Клавиатура обеспечивает выбор режимов мониторинга, а также возможность просмотра номеров групп обнаруженных неисправностей и номеров неисправных электроинструментов, записанных в памяти микроконтроллера.

Система диагностики может работать в следующих режимах, задаваемых оператором программным путем:

- режим калибровки;
- режим обнаружения неисправности;
- режим определения вида неисправности.

В режиме калибровки производится диагностика электроинструмента с исправным двигателем, в процессе которой измеряются его характеристики и записываются в память персонального компьютера. В дальнейшем эти характеристики используются как эталонные. Сравнение характеристик диагностируемого электродвигателя с эталонными позволяет классифицировать неисправность электродвигателя.

В режиме обнаружения неисправности производится диагностика испытываемых электродвигателей автоматически или вручную, в процессе которой цифровой индикатор отображает номера группы неисправности и неисправного электроинструмента. При этом на экране монитора персонального компьютера отображаются следующие характеристики электродвигателя:

- число оборотов;
- наличие/отсутствие неисправности;
- спектральная плотность тока.

В режим определения вида неисправности система диагностики позволяет выполнить анализ тока электродвигателя как во временной, так и частотной области путем обработки сигнала с помощью персонального компьютера. В случае обнаружения неисправности сведения о ней отображаются на экране монитора персонального компьютера.

Граничные частоты f_{min} , f_{max} следует выбирать, руководствуясь типом и параметрами диагностируемых электродвигателей, а также особенностями влияния неисправностей на их характеристики. Кроме того, частота f_{max} не должно превышать половины частоты дискретизации,

определяемой параметрами звуковой карты компьютера. Выполнение данного условия позволяет уменьшить погрешность расчета характеристик дискретизированного сигнала. Например, для диагностики коллекторных электродвигателей, характеристики которых изображены на рисунках 2 — 6, значения граничных частот были выбраны равными $f_{min} = 3$ кГц и $f_{max} = 20$ кГц. Для диагностики электродвигателей, имеющих другие характеристики, могут потребоваться фильтры с другими граничными частотами. Изменение граничных частот реализуется либо путем смены фильтров, либо путем их перестройки. В последнем случае можно использовать фильтры с переключаемыми конденсаторами, граничные частоты которых изменяются путем изменения частоты переключения конденсаторов, либо цифровые фильтры, перестраиваемые с помощью соответствующего программного обеспечения.

На основании сравнительного анализа методов технической диагностики коллекторных электродвигателей установлено, что с практической точки зрения наиболее предпочтительным является метод, основанный на анализе тока электродвигателя. Показано, что интенсивность искрения коллекторно-щеточного узла можно оценивать по значению дисперсии тока. Установлено, что для определения неисправностей коллекторно-щеточного узла и симисторного регулятора необходимо отслеживать максимумы и минимумы спектральной плотности тока. Предложена функциональная схемы системы диагностики, которая позволяет дистанционно выполнять диагностику коллекторных электродвигателей, сохраняя полученные данные в компьютерной базе данных.

В дальнейшем предполагается выполнить корреляционный анализ тока коллекторных электродвигателей с различного вида неисправностями и тока эталонного исправного электродвигателя.

Библиографический список использованной литературы

1. ГОСТ 183-74 Машины электрические вращающиеся. Общие технические условия. — Взамен ГОСТ 183-66; введен 1976-01-01. — М.: Изд-во стандартов, 2001. — 26 с.
2. Котеленец Н.Ф. Испытание и надежность электрических машин: учебное пособие для вузов по спец. “Электромеханика” / Н.Ф. Котеленец, Н.Л. Кузнецов. — М.: Высш. шк., 1988. — 232 с.
3. High order current spectral components utilisation to improve induction machine diagnostics / F. Filippetti, G. Gentile, S. Meo, A. Ometto, N. Rotondale // International Conference on Electrical Machines “ICEM’00”, August, 2000. — Espoo: Finland, 2000. — Vol. 2. — P. 941–945.
4. Gentile G. Induction motor current signature analysis to diagnostics of stator short circuits / G. Gentile, S. Meo, A. Ometto // IEEE Symposium on Diagnostics for Electrical Machines, Power Electronics and Drives SDEMPED’03”, August, 2003.— Atlanta: USA, 2003. — P. 47–51.

Поступила в редакцию 19.12.2013 г.

Зіборов С.Р., Редкіна Е.О., Циганов І.А. Система діагностики колекторних двигунів

Проаналізовані основні несправності колекторних електродвигунів. Показано, що міру іскріння колекторного двигуна можна оцінювати за значенням дисперсії струму. Запропонована система діагностики, принцип роботи якої заснований на аналізі струму, споживаного електродвигуном. Система дозволяє виявити і оцінити несправності колекторно-щіткового вузла і симисторного регулятора струму.

Ключові слова: колекторний електродвигун, діагностика несправності, спектр, іскріння колектора, дисперсія струму, симістор.

Ziborov S.R., Redkina E.A., Tsiganov I.A. Diagnostic system of commutator motors

The basic faults of electric motors are analyzed. It is shown that the degree of sparking of collector motor can be estimated by value dispersions of current. The system of diagnostics, based on the analysis of the current consumed by an electric motor is proposed. The system allows to discover and estimate the faults of a collector-brush knot sparking and symistor current regulator.

Keywords: collector electric motor, diagnostics of disrepair, spectrum, sparking of collector, dispersion of current, symistor.