

Получение единого интегрального показателя эффективности внедрения рассматриваемых схем представляется сложной многокритериальной задачей. Для каждой системы производится уникальный технико-экономический анализ. Тем не менее, возможно сравнить относительные показатели затрат и эффективности между схемами. Для этого рассматриваются системы управления для мощностей электродвигателей насосов от нескольких десятков до 500 кВт. Количество насосов в станции составляет от трёх до четырёх единиц. При этих условиях основные относительные показатели затрат и эффективности между схемами в рассматриваемых диапазонах приблизительно постоянны [4]. Результаты сравнения приведены в таблице. За 100 % затрат принимаются максимальные затраты среди рассматриваемых схем для условной одной и той же станции. За 100 % относительной эффективности берётся также максимальная величина.

Используя данные таблицы, можно сделать выводы о наличии оптимальных диапазонов эффективного использования рассматриваемых структур. Для электродвигателей насосов малых и средних мощностей до 110 кВт более эффективны структуры, рис. 2, 3. При дальнейшем увеличении единичной мощности электродвигателей оправдано использование структуры, рис. 4. В рекомендуемом диапазоне числа насосов соответствующая структура позволяет обеспечить максимальный эффект и минимальные затраты. В итоге с исходной информацией по конкретной насосной станции становится возможным быстро произвести коррекцию уровня получаемого эффекта и затрат в технико-экономическом обосновании модернизации систем управления. Каждая из трёх структур имеет свою область применения и с учётом приведённых рекомендаций позволяет выбрать оптимальную конфигурацию системы управления при автоматизации насосных станций.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Чебаевский В.Ф. Проектирование насосных станций и испытание насосных установок – М.: Колос, 2000. – 376 с.
2. Общий курс процессов и аппаратов химической технологии / Под ред. В.Г. Айнштейна. – М.: Химия, 1999. – 888 с.
3. Толпаров Д.В. Эффективность использования насосов со встроенными преобразователями частоты в системах вентиляции, отопления и водоснабжения // Оборудование – регион. – 2006. – № 3. – С. 23.

4. Тысивский И.В., Гриценко К.Г., Червяков В.Д. Ресурсосберегающее управление электроприводами насосов системы коммунального водоснабжения // Проблемы автоматизированного электропривода. Теория и практика: Вестник ХГПУ. – 1998. – С. 237–238.

Поступила 03.10.2007 г.

УДК 621.313.36

ДИАГНОСТИРОВАНИЕ МЕХАНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ КОЛЛЕКТОРНО-ЩЕТОЧНОГО УЗЛА ВЫСОКОСКОРОСТНОЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ МАШИНЫ В ПРОЦЕССЕ РЕСУРСНЫХ ИСПЫТАНИЙ

О.С. Качин

Томский политехнический университет
E-mail: kos@tpu.ru

Рассмотрены вопросы определения механического состояния коллекторно-щеточных узлов в динамических режимах с применением разработанных в ТПУ методик обработки результатов измерений, полученных с использованием бесконтактного профилометра. Приведены результаты экспериментальных исследований механического состояния коллекторно-щеточного узла электродвигателя переменного тока в процессе наработки на ресурс, произведен анализ экспериментальных данных, выработаны рекомендации по улучшению условий токосъема в скользящем контакте и увеличению ресурса щеток.

Повышение коммутационной надежности и ресурса современных высокоскоростных коллекторных машин во многом определяется механической стабильностью электрического скользящего контакта (СК). Однако поведение СК в динамике недостаточно изучено в теоретическом и экспериментальном плане ввиду сложности протекающих процессов, а также отсутствия специальных измерительных систем и методик обработки измеряемой информации [1–4].

Целью проведенных исследований была апробация разработанных в Томском политехническом университете (ТПУ) методик, позволяющих выделять интересующую разработчиков коллекторных электрических машин информацию об изменении профиля коллектора в процессе эксплуатации, о величине и характере вибраций якоря, а также о других механических параметрах из всего массива результатов измерений, проведенных с применением бесконтактного профилометра. На основе

выполненных экспериментальных исследований и последующей обработки данных с применением разработанных методик было произведено разделение исходного массива первичной информации на составляющие, характеризующие уровни поверхности коллектора в отсутствие вибраций якоря и изменения данных уровней вследствие вибраций якоря. В результате получена количественная информация о состоянии профиля коллектора высокоскоростной электрической машины, о величине и характере подшипниковых вибраций якоря, а также о степени их влияния на механическое состояние коллекторно-щеточного узла (КЩУ) в процессе наработки на ресурс. Полученные в ходе исследований данные должны стать основой для моделирования динамических процессов в СК и выработки рекомендаций относительно повышения ресурса работы КЩУ.

Объект испытаний: коллекторный электродвигатель пылесосного агрегата фирмы LG Electronics, модель VCE280E02, 35000 об/мин, 1800 Вт, электрические щетки марки HG25.

В ходе испытаний электродвигатель работал с вентиляторной нагрузкой. Продолжительность ресурсных испытаний составила 709 ч. С интервалом 35...45 ч производились замеры изнашивания щеток с помощью микрометра, а также измерялся профиль коллектора электрической машины в динамике при номинальной частоте вращения с использованием бесконтактного программно-аппаратного измерительного комплекса [5]. Все представленные в данной статье графические материалы построены на основе экспериментальных данных и их математической обработки по специальным методикам.

Полученные за время ресурсных испытаний экспериментальные данные показывают, что при предельном износе щеток в 28,8 мм (1900 мм^3) износ дорожки скольжения коллектора составил 0,74 мм (532 мм^3). Это свидетельствует о трехкратном запасе ресурса коллектора в сравнении с ресурсом комплекта щеток (исходя из конструктивно заложенного запаса на износ ламелей, составляющего порядка 2...3 мм [6]). Следовательно, увеличение ресурса КЩУ в подобных машинах возможно путем снижения интенсивности изнашивания электрощеток, которая зависит от факторов фрикционной, электрокоррозионной (токовой) и электроэрозионной природы. Электроэрозионная составляющая изнашивания элементов СК является наиболее значимой и определяется характером коммутации, который во многом обусловлен состоянием профиля коллектора и вибрациями якоря.

Измерения расстояния от измерительного преобразователя (вихретокового типа), неподвижного относительно корпуса исследуемого электродвигателя, до рабочей поверхности коллектора в номинальных режимах работы выполнялись с использованием бесконтактной диагностической системы [5]. Это позволило, используя разработанные в ТПУ

методики, определить изменение профиля коллектора в процессе эксплуатации, величину и характер вибраций якоря, а также другие параметры, характеризующие механическое состояние КЩУ на заданном временном интервале наработки на ресурс.

Изменения профиля коллектора рассматриваемой высокоскоростной электрической машины в процессе ресурсных испытаний проиллюстрированы на рис. 1. В левой части рисунка приведены развертки профилей коллектора относительно средних линий соответствующих профилей в процессе наработки на ресурс. Для улучшения восприятия геометрии поперечного сечения коллектора в правой части рис. 1 приведены профили коллектора в процессе ресурсных испытаний относительно идеальных окружностей (средних линий), приведенных к уровню в 100 мкм. Как видно из графиков, в течение срока службы электродвигателя геометрия коллектора существенно изменяется. В частности, интенсивные изменения профиля происходят уже после 350 ч работы, т. е. после выработки электродвигателем приблизительно половины ресурса щеток.

Динамика изменений значений перепадов между соседними ламелями коллектора в процессе наработки на ресурс представлена на рис. 2. Из приведенных данных следует, что максимальные значения перепадов между ламелями за время ресурсных испытаний возросли в 7,8 раз, а среднее значение перепадов вдоль окружности коллектора — в 13,5 раз.

Из рис. 2 видно, что в первые 220 ч работы электрической машины максимальные значения перепадов между ламелями уменьшаются на треть, среднее значение перепадов вдоль окружности коллектора также уменьшается, но незначительно ($83,5 \text{ ч} - 0,34 \text{ мкм}$, $215,5 \text{ ч} - 0,32 \text{ мкм}$). Это свидетельствует о том, что в этот период идет приработка коллектора. Далее в процессе работы геометрия коллектора постепенно ухудшается.

Известно [7, 8], что при разложении вибрационного сигнала от тела вращения в ряд Фурье, 1-я гармоника характеризует эксцентриситет, 2-я — эллиптичность, а 3-я — трехгранность. Полученные данные свидетельствуют о том, что в течение первых 220 ч работы электродвигателя амплитуды указанных гармоник уменьшаются, или слабо увеличиваются (эксцентриситет) — идет приработка поверхности коллектора, далее амплитуды гармоник возрастают. Эксцентриситет за время работы электродвигателя возрос в 21,2 раза, эллиптичность — в 5,6 раза, а трехгранность — в 7,7 раза. Приведенные данные еще раз демонстрируют ухудшение профиля коллектора в процессе наработки на ресурс.

Согласно разработанной на кафедре электропривода и электрооборудования (ЭПЭО) ТПУ методике, были определены ускорения щетки, обусловленные воздействием со стороны рабочей поверхности коллектора. На рис. 3 показана динамика изменения среднего ускорения щетки в течение срока службы электрической машины.

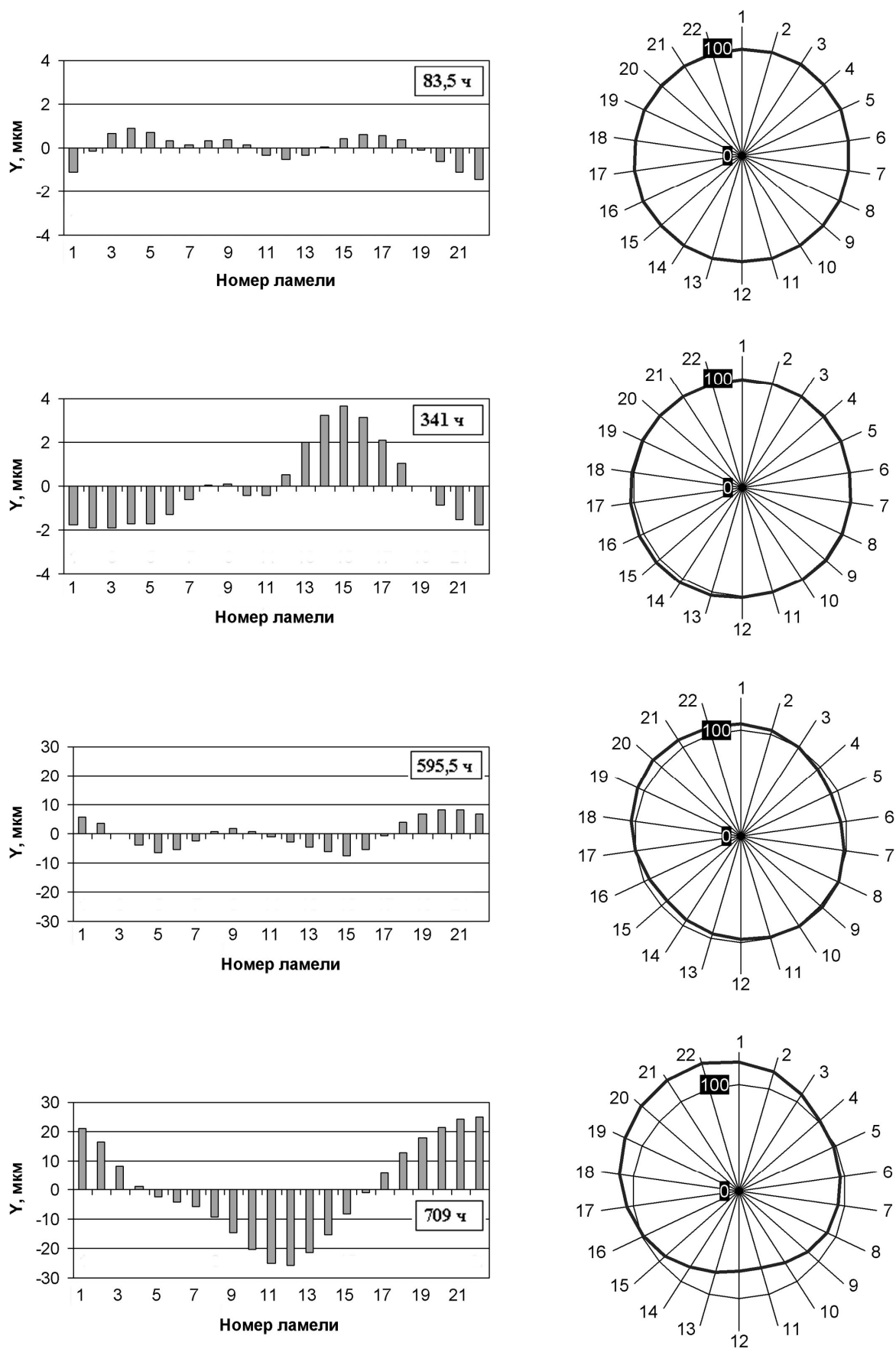


Рис. 1. Изменение профиля коллектора в процессе наработки на ресурс

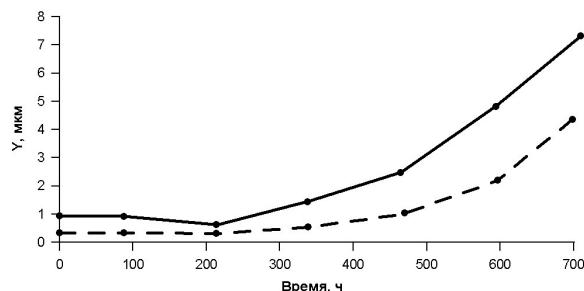


Рис. 2. Динамика изменения максимальных (—) и средних (---) значений перепадов между ламелями коллектора вдоль окружности коллектора в период ресурсных испытаний

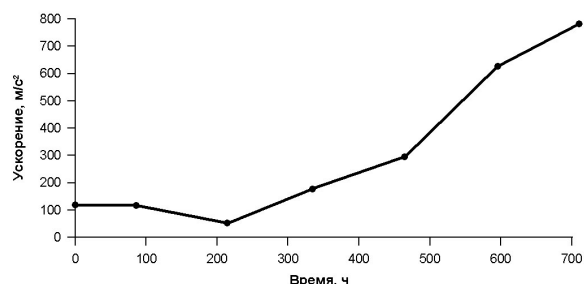


Рис. 3. Динамика изменения среднего ускорения щетки, обусловленного воздействием со стороны рабочей поверхности коллектора в процессе ресурсных испытаний электрической машины

Из представленных на рис. 3 данных также видна область приработки коллектора, после которой амплитуда ускорений возрастает по мере увеличения времени работы электродвигателя, что свидетельствует об ухудшении геометрии рабочей поверхности коллектора из-за неравномерного изнашивания и, возможно, снижения прочности вследствие механических и тепловых воздействий на коллектор. Средние значения ускорений, действующих на щетку со стороны поверхности коллектора, за время ресурсных испытаний электродвигателя возросли в 6,5 раза.

С использованием оригинальных методик, разработанных в ТПУ, получена информация о параметрах вибраций якоря, которые в основном обусловлены подшипниковыми вибрациями (радиальными перемещениями внутреннего кольца подшипника относительно поверхности внешнего кольца вследствие неточностей изготовления элементов подшипника и их изнашивания). Динамика изменения максимумов вибраций якоря, обусловленных биениями подшипников в процессе работы электродвигателя, представлена на рис. 4. Как видно из приведенного графика, за время ресурсных испытаний максимальный размах вибраций якоря возрос в 5,9 раза.

Используя данные о вибрациях якоря электрической машины, можно определить его виброскорость и виброускорение. На рис. 4 представлена динамика изменения среднего значения виброускорений якоря электродвигателя в процессе эксплуатации электрической машины. Из графика видно, что среднее значение виброускорений якоря электродвигателя возрастает в процессе наработки на ресурс и на конечном этапе превышает начальное значение в 6,6 раза.

Электродвигателя возрастает в процессе наработки на ресурс и на конечном этапе превышает начальное значение в 6,6 раза.

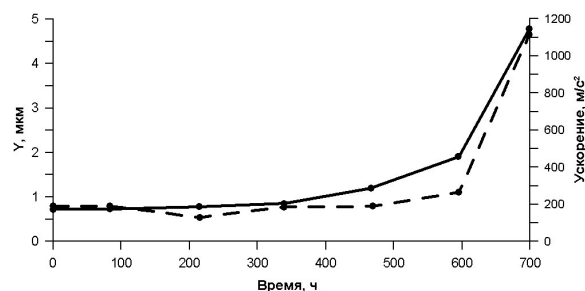


Рис. 4. Динамика изменения максимумов вибраций якоря (—) и среднего значения виброускорений якоря электродвигателя (---) в процессе наработки на ресурс

Следует отметить, что за время ресурсных испытаний вибрационные воздействия якоря электродвигателя на щетки были в среднем в 1,6 раза выше в сравнении с аналогичными воздействиями профиля коллектора, что, видимо, характерно для высокоскоростных машин.

Обладая данными о средних значениях ускорений щетки, вызванных воздействием со стороны поверхности коллектора $a_{щ,кол}$, а также данными о средних виброускорениях якоря электрической машины $a_{щ,якоря}$, действующих на щетку вследствие вибраций в подшипниковых узлах, можно определить суммарное среднее виброускорение (максимальное среднее виброускорение) щетки в процессе работы электродвигателя: $a_{щ,сум} = a_{щ,кол} + a_{щ,якоря}$. Изменение среднего суммарного виброускорения в процессе ресурсных испытаний электродвигателя отражено на рис. 5.

Используя данные об изнашивании щетки, а также ее плотность, можно определить динамику изменения массы щетки $m_{щ}$ и, используя значение коэффициента жесткости нажимной пружины (в нашем случае $k=48$ Н/м), можно найти максимальное ускорение щетки, обеспечиваемое нажимной пружиной в любой момент времени в процессе эксплуатации электродвигателя, рис. 5.

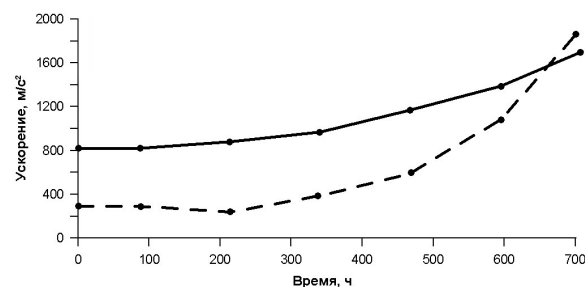


Рис. 5. Ускорение, развиваемое нажимной пружиной (—), а также суммарное среднее виброускорение коллектора и подшипниковых узлов электродвигателя (---) в процессе наработки на ресурс

Как видно из приведенных данных, за время работы электродвигателя суммарное среднее виброускорение (коллектора и якоря) возросло в 6,5 раз и достигло предельной величины для нормальной ра-

боты коллекторно-щеточного узла. Это свидетельствует о том, что в некоторые моменты времени возможно нарушение механического контактирования в скользящей паре щетка-коллектор (зависание щетки, нарушение коммутации и, как следствие, повышенное изнашивание элементов СК).

Анализируя рис. 5, можно прийти к выводу, что для дальнейшего увеличения срока службы электродвигателя необходимо обеспечить надежное контактирование в скользящем контакте щетка-коллектор на конечном этапе эксплуатации электродвигателя. Этого можно добиться либо корректировкой ускорения, развиваемого нажимной пружиной (необходимо, чтобы кривая ускорения на конечном этапе возрастала более круто), либо корректировкой кривой суммарного среднего виброускорения коллектора и якоря электродвигателя (необходимо, чтобы кривая была более пологая, и величина ускорения на конечном этапе уменьшалась). Иными словами, необходимо добиться того, чтобы кривая ускорения, развиваемого нажимной пружиной, была параллельна кривой суммарного среднего виброускорения коллектора и подшипниковых узлов.

Кривая ускорения, развиваемого нажимной пружиной, может быть скорректирована изменением вида пружины, типа нажимного устройства, марки щетки.

Кривая суммарного среднего виброускорения коллектора и якоря электрической машины в свою очередь может быть скорректирована улучшением прочностных характеристик коллектора, снижением степени искрения и, соответственно, изнашивания рабочей поверхности коллектора (например, путем оптимизации электромагнитных условий процесса коммутации), применением более качественных и износостойких подшипников.

Таким образом, из полученных экспериментальных данных четко прослеживается тенденция ухудшения профиля коллектора по мере его изнашивания, а также возрастание вибраций и виброускорений, обусловленных воздействием со стороны якоря электрической машины, что свидетельствует об износе и зарождающихся дефектах в подшипниковых узлах.

Следует отметить, что за время ресурсных испытаний вибрационные воздействия якоря электродвигателя на щетки были в среднем в 1,6 раза выше в сравнении с аналогичными воздействиями профиля коллектора.

Одним из путей продления ресурса электродвигателя может служить установка более качественных, более износостойких подшипников, или же применение в них улучшенных смазочных материалов для продления их ресурса. Эти меры призваны уменьшить подшипниковые вибрации и виброускорения, что улучшит коммутационные процессы и повысит ресурс коллекторно-щеточного узла, однако данные меры требуют проведения значительного объема дополнительных экспериментальных исследований и экономического обоснования.

Эффективным направлением увеличения ресурса щеток является применение новых конструктивных решений, снижающих коммутационное искрение и эрозионную составляющую изнашивания [9, 10]. При этом повышается стабильность профиля коллектора во времени, что позволяет дополнительно снижать коммутационное искрение вследствие улучшения механического состояния коллекторно-щеточного узла в процессе эксплуатации электрической машины и уменьшать износ элементов СК.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Hudson B. HV motor condition monitoring – the end user's view // IEE Colloquium Design, Operation and Maintenance of High Voltage (3.3 kV to 11 kV) Electric Motors for Process Plant. – Glasgow, UK, 1999. – P. 7.
2. Regan R.H., Wakeley K. Rotor monitoring and protection for large generators // Seventh International Conference on Electrical Machines and Drives. – Durham, UK, 1995. – P. 203–207.
3. Thorsen O., Dalva M. Condition monitoring methods, failure identification and analysis for high voltage motors in petrochemical industry // 8th International Conference on Electrical Machines and Drives. – Cambridge, UK, 1997. – P. 109–113.
4. Ross W.H. Condition monitoring of electrical machines in ScottishPower // IEE Colloquium on Condition. – London, UK, 1995. – P. 3.
5. Качин С.И., Боровиков Ю.С., Нечаев М.А. Программно-аппаратный комплекс для оценки механического состояния скользящих контактов коллекторных электрических машин электроприводов // Известия Томского политехнического университета. – 2004. – Т. 307. – № 1. – С. 140–144.
6. Коллекторы электрических машин / Под ред. Б.Н. Красовского. – М.: Энергия, 1979. – 200 с.
7. Руссов В.А. Спектральная вибродиагностика. – Пермь: Виброцентр, 1996. – 173 с.
8. Гольдин А.С. Вибрация роторных машин. – М.: Машиностроение, 2000. – 344 с.
9. Пат. 2107375 РФ. МКИ⁶ H02K 3/12. Статор коллекторной электрической машины / С.И. Качин. Заявлено 13.05.1996; Оpubл. 20.03.1998, Бюл. № 8. – 5 с.: ил.
10. Пат. 2277282 РФ. МПК⁸ H02K 3/12. Обмотка якоря электрической машины / С.И. Качин, Ю.С. Боровиков, О.С. Качин. Заявлено 16.03.2005; Оpubл. 27.05.2006, Бюл. № 15. – 10 с.: ил.

Поступила 04.07.2007 г.