

ДИАГНОСТИКА И АВТОМАТИЗАЦИЯ УПРАВЛЕНИЯ ТЕХНИЧЕСКИМИ ОБЪЕКТАМИ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ

УДК 681.587.72

DOI: 10.17587/mau.18.180-185

А. А. Бошляков, канд. техн. наук, доц., boshlyakov@mail.ru,

В. В. Ковалев, аспирант, maybe78@gmail.com, **В. И. Рубцов**, канд. техн. наук, доц., rubtsov@mail.ru,
Кафедра робототехнических систем и мехатроники МГТУ им. Баумана, Москва

Автоматизация диагностики дефектов сканеров оптико-локационных станций. Часть 1

Предлагается метод автоматизированной диагностики дефектов в сканирующих системах на базе синхронных электродвигателей, использующийся для диагностики дефектов сканеров оптико-локационных станций. Разработаны компьютерные модели сканера и приведены дефекты, наиболее часто встречающиеся при серийном производстве изделий данного типа.

Ключевые слова: мехатроника, управление электроприводом, диагностика, следящие системы, автоматизация, сканер ОЛС, дефекты

Введение

Сканирующее устройство оптико-локационной станции (ОЛС) представляет собой привод, поворачивающий оптическую ось станции в направлении цели или уменьшения угла рассогласования, принятого от координатора. В одноапертурной системе (рис. 1, а, в, см. третью сторону обложки) сканер ОЛС представляет собой двухкоординатный привод, обеспечивающий поворот объекта управления. В многоапертурных (рис. 1, б, г, см. третью сторону обложки) системах это привод, обеспечивающий поворот подвеса с полезной нагрузкой. К данным системам предъявляются жесткие требования по точности наведения, т. е. поворота оптической оси станции. При производстве такого рода изделий и их эксплуатации возникает задача их диагностики, так как даже незначительный дефект сканирующего модуля может привести к неисправности системы в целом. Ужесточение конструктивных требований не всегда приводит к желаемому результату, а отсутствие непосредственного разработчика при процедуре контроля, например в условиях удаленного производства, не всегда позволяет точно выявить неисправность.

К наиболее распространенным решениям диагностики приводов [1, 2] в настоящий момент можно отнести вибрационную диагностику, диагностику по току электродвигателя и набирающую популярность нейросетевую диагностику.

Вибрационная диагностика [3–5] — наиболее распространенный метод диагностирования технических систем и оборудования, основанный на анализе параметров вибрации, либо создаваемой работающим оборудованием, либо являющейся вто-

ричной вибрацией, обусловленной структурой исследуемого объекта. При вибрационной диагностике может исследоваться сигнал вибрации как во временной, так и в частотной областях. Сигналом, несущим информацию о состоянии объекта, могут быть виброперемещение, виброскорость и виброускорение. Из датчиков вибрации наиболее часто применяются пьезоакселерометры (вибропреобразователи ускорения). Анализ выпускаемых диагностических систем показал, что в настоящее время нет готовых систем, которые полностью удовлетворяют требованиям промышленных предприятий с точки зрения стоимости и адаптированности к производственным условиям. Система вибродиагностики должна быть максимально специализирована для конкретных машин и оборудования.

Диагностика по току электродвигателя [6–9] основана на применении современных аппаратно-программных устройств, позволяющих создать систему мониторинга состояния электродвигателя на основе обработки токовых диаграмм и анализа спектров с применением современных математических методов. При этом могут быть выявлены дефекты, возникшие в обмотке якоря и щеточно-коллекторном узле, а также в механических системе электропривода и системе возбуждения. Основными недостатками данного метода являются необходимость учета влияния на электрические параметры двигателя параметров питающей сети, характера нагрузки, воздействия внешних электромагнитных полей, переходных процессов в двигателе, а также сложность обработки данных.

При нейросетевой диагностике [10] задачу поиска неисправностей в электроприводах можно рассматривать как нахождение зависимости между

признаками неисправности в момент отказа (выходными данными) и видом неисправности (входными данными). При проведении эксперимента на реальном объекте в первую очередь определяются входные данные, необходимые для работы автоматической системы оценки состояния привода, анализируются переходные характеристики привода при различных неисправностях в нем. Набор входных данных, полученный при исследовании электропривода (вектор состояния) отражает минимум, по которому можно определить его состояние. Данные представляют собой последовательность числовых значений-координат переходной характеристики (в векторной форме), снятых через определенные равные промежутки времени. Набор входных данных (вектор состояния привода), полученный из координат переходной характеристики, вводится в компьютер и ставится автоматический диагноз. Недостатком метода является число наблюдений, которые необходимо провести для обучения сети и последующей диагностики. Известен ряд эвристических правил, увязывающих число необходимых наблюдений с размерами сети (простейшее из них гласит, что число наблюдений должно быть в десять раз больше числа связей в сети).

В большинстве случаев указанные методы рассчитаны на работу с существенно менее точными, чем привод сканера, системами и, как правило, требуют использования специализированных стендов.

В данной работе предлагается метод выявления сложнодиагностируемых дефектов в мехатронных системах и, в частности, сканерах ОЛС, предложенный впервые в работе [11]. Метод основан на сопоставлении процессов в диагностируемом сканере с процессами в компьютерной модели сканера, включающей описание набора дефектов. Для выявления сложнодиагностируемых дефектов в мехатронных системах на базе синхронных электродвигателей используются переменные состояния штатной системы управления объектом. Такими данными могут быть: выходы отдельных звеньев корректирующего фильтра (КФ), сигналы рассогласования по координате, скорости и пройденному пути, а также выходы различных нелинейных звеньев в случае их присутствия в системе.

Такой подход избавляет от необходимости применения специализированных диагностических стендов. Информация о состоянии объекта регулирования, его дефектах и необходимых доработках может быть получена путем использования данных штатной системы управления при работе в специализированных диагностических режимах (реакция на ступенчатое воздействие и перемещение объекта регулирования с постоянной скоростью).

Данный метод может быть использован для диагностики широкого спектра устройств, причем он особенно актуален при диагностике сканирующих модулей ОЛС из-за высоких требований к точности изготовления электромеханической части подобных систем.

Математическая модель сканера ОЛС

Для *диагностики сканера* необходимо построение математической модели эталонного сканера ОЛС (под эталонным сканером подразумевается сканер, входящий в состав изделия ОЛС, прошедшего летные испытания), адекватность модели должна быть подтверждена путем сравнения данных моделирования с данными, полученными экспериментально. Также необходимо составить перечень наиболее часто встречаемых дефектов и оценить их влияние на выходные характеристики системы.

Модель диагностируемой системы должна быть построена с учетом характера внешних воздействий, внутренних дефектов и физических параметров, изменение которых приводит к выходу параметров системы за заданные пределы или выводу системы из строя.

Ключевым элементом сканера является синхронный электродвигатель. В модели двигателя необходимо учесть следующие физические параметры двигателя:

- число пар полюсов;
- сопротивление секций фаз обмотки при постоянном токе;
- коэффициент ЭДС, приведенный к фазе (C_e);
- коэффициент момента, приведенный к фазе (C_M);
- момент инерции ротора;
- электромагнитную постоянную времени фазы обмотки.

Двигатель представляет собой магнитоэлектрическую синхронную машину с синусоидальным распределением магнитного поля в зазоре. В настоящее время для коммутации обмоток двигателей переменного тока (т. е. преобразования управляющего воздействия в реальные напряжения на обмотках двигателя) используются два основных подхода. Первый заключается в непосредственном формировании сигналов, пропорциональных фазным токам двигателя в неподвижной системе координат (I_a и I_b) в зависимости от заданного момента и электрического угла. При втором подходе рассчитываются векторы тока и потокосцепления (I_d и I_q) двухфазного двигателя во вращающейся системе координат.

В первом случае для создания электромагнитного момента в двигателе мы управляем непосредственно токами в обмотках статора. Во втором случае необходимо поддерживать постоянным результирующий вектор токов статора I_d и результирующий вектор потокосцеплений I_q (Field Oriented Control) [12, 13] или вычисленное по ним значение электромагнитного момента с последующей коммутацией токов в фазах таким образом, чтобы вычисленное значение момента сравнялось с заданным за минимальное время (Direct Torque Control) [14, 15].

Использование второй схемы управления требует дополнительных координатных преобразований, названных прямым и обратным преобразованиями Парка, а в случае трехфазного двигателя —

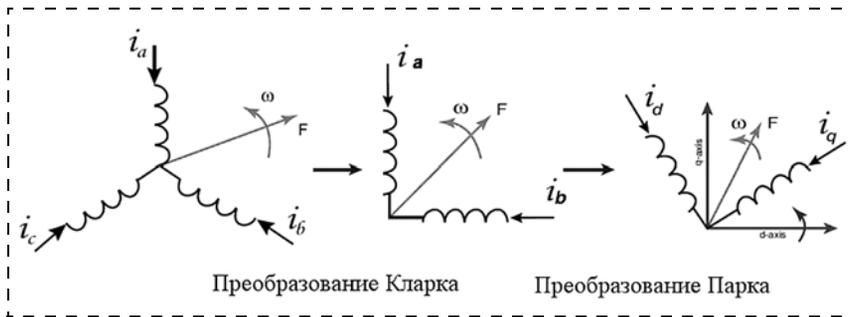


Рис. 2. Координатные преобразования в моделях электродвигателя

также и прямого и обратного преобразований Кларка (рис. 2), так как в обмотки двигателей по-прежнему необходимо подавать реальные значения токов/напряжений.

Если в первом случае для управления двигателем достаточно обратной связи по положению ротора, то для второго случая требуется введение обратной связи по току. Поскольку в экспериментальном стенде отсутствует обратная связь по току и управление двигателем осуществляется путем формирования синусоидального напряжения на обмотках двигателя, математическая модель системы строится в неподвижной системе координат ab , связанной с обмотками статора.

При построении математической модели синхронного двигателя с постоянными магнитами прием следующие допущения:

- отсутствуют насыщение магнитной цепи, потери в стали, эффект вытеснения тока;
- обмотки статора симметричны;
- индуктивность рассеяния не зависит от положения ротора в пространстве;
- отсутствуют потери в коммутирующих силовых ключах.

Рассмотрим модель синхронного двигателя с постоянными магнитами в неподвижной системе координат [16]. Учитывая, что в сканере ОЛС используется двухфазный моментный электродвигатель с симметричными обмотками, принимаем, что индуктивности фаз L_a и L_b равны.

С учетом $L_a = L_b = L$ получим:

$$\begin{aligned}
 U_a &= Ri_a + Lpi_a - C_M\omega\sin\varphi_{эл}; \\
 U_b &= Ri_b + Lpi_b + C_M\omega\cos\varphi_{эл}; \\
 M &= C_M[-i_a\sin\varphi_{эл} + i_b\cos\varphi_{эл}]; \\
 J\frac{d^2\varphi}{dt^2} &= M - M_{ст} - \beta\omega - \alpha\omega^2; \\
 \varphi_{эл} &= Z_n\varphi,
 \end{aligned}
 \tag{1}$$

где U_a, U_b — напряжения на обмотках двигателя; i_a, i_b — токи в обмотках; R — сопротивления обмоток; L — индуктивность обмотки; Z_n — число полюсов; C_M — коэффициент момента, приведенный к фазе; ω — угловая скорость вращения ротора; $\varphi_{эл}$ — электрический угол поворота ротора; J — момент инер-

ции ротора и нагрузки; M — момент, создаваемый двигателем; β — коэффициент вязкого трения; α — коэффициент вентиляторного момента.

В целях последующей реализации системы уравнений (1) в среде MATLAB Simulink приведем ее к следующему виду:

$$\begin{cases}
 i_a = \frac{U_a + C_M\omega\sin\varphi_{эл}}{R\left(p\frac{L}{R} + 1\right)}; \\
 i_b = \frac{U_b - C_M\omega\cos\varphi_{эл}}{R\left(p\frac{L}{R} + 1\right)}; \\
 M = C_M[-i_a\sin\varphi_{эл} + i_b\cos\varphi_{эл}]; \\
 J\frac{d^2\varphi}{dt^2} = M - M_{ст} - \beta\omega - \alpha\omega^2; \\
 \varphi_{эл} = Z_n\varphi.
 \end{cases}
 \tag{2}$$

Заметим, что переменные i_a, i_b, U_a, U_b соответствуют реальным физическим значениям токов и напряжений на фазах двигателя при работе на экспериментальном стенде.

В разработанной модели учитываются разрядность и точность работы датчика обратной связи. В силовой части контроллера управлением приводом применяются микросхемы силовых МОП-ключей (полевых транзисторов), объединенных в полный мост, со встроенным драйвером ключей и формирователем защитного интервала. На вход полевых транзисторов усилителя мощности поступает ШИМ-сигнал, который формируется цифровой управляющей частью контроллера.

В модели учитывается цифровая реализация алгоритма работы системы управления на микроконтроллере, а также цифровая обработка сигналов с датчика обратной связи.

Адекватность полученной модели должна подтверждаться сравнением переменных состояния модели с реальными сигналами сканера (углом поворота ротора и управляющим сигналом) при отработке ими тестовых воздействий: реакции на ступенчатое воздействие и перемещение объекта регулирования с постоянной скоростью.

Блок-схема экспериментального стенда и соответствующая ей блок-схема математической модели сканера представлена на рис. 3. Математическая модель включает:

1) модель ПИД регулятора, описывающая управляющую систему. На вход регулятора подается задание по углу и измеренный угол, на выходе формируется управляющее воздействие;

2) усилитель мощности (УМ). На входе блока угол поворота ротора и управляющее воздействие с помощью описанных выше координатных преобразований пересчитывается в напряжения на обмотках двигателя;

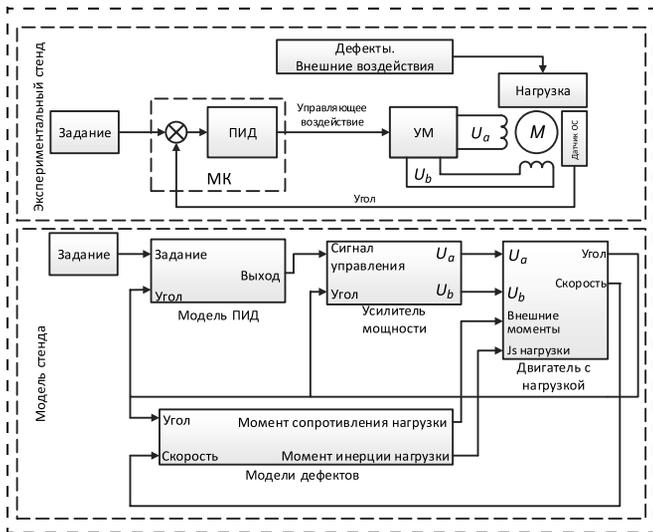


Рис. 3. Экспериментальный стенд и математическая модель сканера ОЛС

3) модель двигателя с нагрузкой. На входе: напряжение на фазах (U_a , U_b), заданный момент инерции нагрузки, внешние воздействия; на выходе: угол поворота ротора и угловая скорость;

4) блок, описывающий дефекты в сканере, которые изменяют момент инерции нагрузки и ее момент сопротивления.

Выход цифрового регулятора в системе управления сканера является эквивалентом момента сопротивления, взятого с обратным знаком. Оценка формы этого сигнала при движении с малой постоянной скоростью позволяет получить данные о неравномерности момента сопротивления в объекте регулирования, что может свидетельствовать о недостатках системы.

Однако для оценки момента сопротивления недостаточно учитывать только среднее значение сигнала управления. Большая неравномерность трения при различных углах вращения может приводить к недопустимым погрешностям регулирования, особенно это заметно при резком изменении этой неравномерности, поэтому помимо среднего значения сигнала управления необходимо учитывать размах его неравномерности.

Особенности моделирования дефектов сканера

Был проведен анализ и составлен перечень наиболее часто встречаемых дефектов, изучено их влияние на выходные характеристики системы. К наиболее типовым сложнодиагностируемым дефектам изделия относятся:

- дисбаланс объекта регулирования;
- момент сопротивления нагрузки вне допуска;
- неравномерность момента трения (из-за деградации смазки подшипника, грязи в шестерне редуктора, низкого качества обработки деталей, неправильной укладки жгутов);
- перекося оси вращения объекта регулирования.

Для автоматизированной диагностики дефектов необходимо иметь возможность вводить дефекты в компьютерную модель сканера и путем сопоставления результатов моделирования и экспериментальных данных выявлять дефекты реальной системы.

• Дисбаланс объекта регулирования

Наиболее часто приходится сталкиваться с дисбалансом механической нагрузки в объекте регулирования. При перемещении объекта регулирования в вертикальной плоскости и дисбалансе нагрузки для движения регулятору приходится создавать разные по модулю значения момента на двигателе. Эта разница в усилии отражается на форме сигнала управления.

Введение в математическую модель сканера дополнительного момента сопротивления будет влиять на скорость изменения положения ротора. Добиваемся совпадения процессов изменения скорости в компьютерной модели с реальной системой и определяем значения дисбаланса.

• Недостаточный момент сопротивления нагрузки

По значению модуля сигнала управления также можно определять недостаточный момент трения объекта регулирования в системе, сказывающийся на работе системы управления. В этом случае модуль сигнала управления при движении с постоянной скоростью будет меньше или больше номинального значения. К изменению момента сопротивления объекта регулирования может привести недостаточная/избыточная затяжка подшипников, деградация смазки в подшипниках, изменение массы объекта регулирования. В модель этот дефект вводится в виде блока дополнительного момента нагрузки на валу двигателя, зависящего от знака скорости.

• Неравномерность момента трения

Аналогичным образом можно выявить дефекты в редукторе системы. Причиной таких дефектов могут являться посторонний мусор в шестернях либо низкое качество изготовления деталей. В этом случае на определенном участке редуктора случайным образом меняется момент трения, что недопустимо в высокоточных системах.

Для моделирования этого дефекта в модель вводится блок, который в определенном диапазоне перемещения объекта регулирования случайным образом меняет момент трения, что смоделировано блоком белого шума. Входом блока являются показания с датчика угла, выход заводится на вход внешнего момента двигателя с нагрузкой.

• Перекося оси вращения объекта регулирования

Еще один дефект, на который может указывать размах неравномерности — это перекося оси объекта управления. Математически его можно описать как меняющийся по определенному закону и в определенном диапазоне углов (ближе к границам диапазона) момент инерции объекта. Неравномерность момента сопротивления в данном случае имеет по-

вторяющийся характер, однако не такой, как при неравномерности момента трения.

Автоматизированное определение приведенных параметров при анализе данных системы управления и компьютерной модели поможет указать на возможные причины неисправности системы.

Заключение

Метод автоматизированной диагностики дефектов в мехатронных системах на базе синхронных электродвигателей был применен для сканеров ОЛС. Была разработана математическая модель сканера с учетом модели двигателя с нагрузкой, цифровой системы управления, преобразования управляющего сигнала в напряжение на обмотках двигателя, датчика обратной связи и возможных дефектов электромеханической части сканера. Выявлен перечень типовых сложно-диагностируемых дефектов серийных сканеров. Разработаны алгоритмы анализа данных штатной системы управления сканера, позволяющие определять дефекты по форме процессов в штатной системе и автоматизировать процесс диагностики высокоточных приводов сканирующих устройств.

Дальнейшее подтверждение адекватности математических моделей путем проведения исследований на экспериментальном стенде позволит использовать данные алгоритмы при диагностике сканирующих устройств в условиях серийного производства.

Список литературы

1. **Коробейников А. Б., Сарваров А. С.** Анализ существующих методов диагностирования электродвигателей и перспективы их развития // ЭСиК. 2015. № 1 (26). С. 4–9.
2. **Лукьянов С. И., Кондратьев А. С.** и др. Разработка и внедрение интеллектуальных систем диагностирования технического состояния электрического оборудования // Вестник государственного технического университета им. Г. И. Носова. 2014. № 1 (45). С. 129–134.

3. **Барков А. В., Баркова Н. А.** Интеллектуальные системы мониторинга и диагностики машин по вибрации // Тр. Петербургского энергетического института повышения квалификации Минтопэнерго Российской Федерации и Института вибрации США. 1999. Вып. 9.

4. **Александров А. В., Барков А. В., Баркова Н. А., Шафранский А. А.** Вибрация и вибродиагностика судового электрооборудования // Судостроение. 1986.

5. **Барков А. В., Баркова Н. А., Борисов А. А.** Вибрационная диагностика электрических машин в установившихся режимах работы. URL: <http://vibrotek.ru>

6. **Прахов И. В., Баширов М. Г., Самородов А. В.** Анализ взаимосвязи параметров высших гармонических составляющих токов и напряжений, генерируемых электродвигателем электропривода, с режимами работы и характерными повреждениями машинных агрегатов // Проблемы безопасности и чрезвычайных ситуаций. 2011. № 1. С. 62–69.

7. **Петухов В. С., Соколов В. А.** Диагностика состояния электродвигателей. Метод спектрального анализа потребляемого тока // Новости электротехники. 2005. № 1 (31).

8. **Самородов А. В., Баширов М. Г., Чурагулов Д. Г.** Разработка программно-аппаратного комплекса для оценки электрического состояния машинных агрегатов с электроприводом // Электронный журнал "Нефтегазовое дело". 2012. № 6. С. 10–19.

9. **Кузеев И. Р., Баширов М. Г.** Способ диагностики механизмов и систем с электрическим приводом. Патент № 2431152 от 10.10.2011.

10. **Прахов И. В., Баширов М. Г., Самородов А. В.** Повышение эффективности использования искусственных нейронных сетей в задачах диагностики насосно-компрессорного оборудования применением теории планирования эксперимента // Транспорт и хранение нефтепродуктов и углеводородного сырья. М.: ОБРАКАДЕМНАУКА, 2011. № 2. С. 14–17.

11. **Бошляков А. А., Ковалев В. В., Рубцов В. И.** Диагностика высокоточных сканирующих мехатронных модулей — 2012 // Известия ЮФУ, Технические науки. Тематический выпуск. С. 224.

12. **Aengus Murray.** Transforming motion: field-oriented control of AC motors // International Rectifier. September 27. 2007.

13. **Dong Gan.** Sensorless and Efficiency Optimized Induction Machine Control with Associated Converter PWM Modulation Schemes // Tennessee Technological University. Dec. 2007.

14. **Casadei D., Serra G.** Assessment of direct torque control for induction motor drives // Bulletin of polish academy of sciences. Technical Sciences. 2006. Vol. 54, N. 3.

15. **Thomas G. Habelter.** Direct Torque Control of induction machines using space vector modulation // IEEE Transactions on industry applications. September/October 1992. Vol. 28, N. 5.

16. **Pragasam Pillay, Krishnan R.** Modelling of Permanent Magnet Motor Drives // IEEE Transactions on Industrial Electronics. 1988. Vol. 35, № 4.

Automated Fault Diagnostics in the Scanners of the Optical-Location Stations

A. A. Boshlyakov, boshlyakov@mail.ru, **V. V. Kovalev**, maybe78@gmail.com ✉, **V. I. Rubtsov**,
Bauman State University, Moscow, 105005, Russian Federation

Corresponding author: **Kovalev Vladimir V.**, Postgraduate Student,
Bauman State University, Moscow, 105005, Russian Federation,
e-mail: maybe78@gmail.com

Received on July 30, 2016
Accepted on August 07, 2016

This paper presents an automated method for fault diagnostics in the mechatronic modules of the optical-location stations. Apart from the existing methods, the use of an object native control system for the diagnostics purpose is discussed. It allows us not to use an external hardware during the diagnosis process, because all the information concerning the state of a mechanical structure could be acquired from the control loop information (data from the feedback sensors, outputs of the equalized filters, etc.). This data is enough to detect even the smallest mechanical defects. In future automatization of the control loop data analysis will allow even a low-qualified staff to diagnose and eliminate complex failures, critical for the precise mechatronic modules during the serial pro-

duction. This is extremely important, because even small mechanical defects can influence the tracking precision of a complete system. This method was successfully implemented for the serially produced modules for the optical-location stations. Realization of the described method requires construction of an adequate mathematical model of a mechatronic module. The authors describe development of an ideal system model, including a servo-drive, a control system and additional hardware, such as sensors and servo-controller parameters. A list of typical failures for these types of systems is presented. This list was obtained after experimental diagnostics of over 100 produced units. The authors also describe how these failures can be presented in a mathematical model. An experiment is required to prove the effectiveness of this method by comparison of the model data with the data acquired.

Keywords: mechatronics, servo, servo-drive control, fault diagnostics, FLIR systems, automatization

For citation:

Boshlyakov A. A., Kovalev V. V., Rubtsov V. I. Automated Fault Diagnostics in the Scanners of the Optical-Location Stations, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2017, vol. 18, no. 3, pp. 180—185.

DOI: 10.17587/mau.18.180-185

References

1. **Korobeynikov A., Sarvarov A.** *ESiK*, 2015, no. 1 (26), pp. 4—9 (in Russian).
2. **Lukyanov S., Kondratiev A.** *Vestnik Gosudarstvennogo Tehnicheskogo Universiteta im. G. I. Nosova*, 2014, no. 1 (45), pp. 129—134 (in Russian).
3. **Barkov A., Barkova N.** *Trudy Peterburgskogo Energeticheskogo Instituta Povysheniya Kvalifikatsiy Mintopenergo Rossiyskoy Federatsiy i Instituta Vibratsii SShA*, Sankt-Peterburg, 1999, no. 9 (in Russian).
4. **Alexandrov A., Barkov A., Barkova N., Shafranskiy V.** *Vibratsiya i vibrodiagnostika sudovogo elektrooborudovaniya* (Vibration and vibration diagnostics of the ship's electrical), Sudostroenie, 1986 (in Russian).
5. **Barkov A., Barkova N., Borisov A.** *Vibratsionnaya diagnostika elektricheskikh mashin v ustanovivshisya rejimah raboty* (Vibration di-

agnostics of electrical machines in steady state operation), available at: <http://vibrotek.ru> (in Russian).

6. **Prakhov I., Bashirov M., Samorodov A.** *Problemy Bezopasnosti Chrezvychaynykh Situatsiy*, Moscow, VINITI, 2011, no. 1, pp. 62—69 (in Russian).
7. **Petukhov V., Sokolov V.** *Novosti Elektrotehniki* no. 1 (31), 2005 (in Russian)
8. **Samorodov A., Bashirov M., Churagulov D.** *Elektronnyi zhurnal "Neftegazovoe Delo"*, 2012, no. 6, pp. 10—19 (in Russian).
9. **Kuzeev I., Bashirov M.**, Sposob diagnostiki mekhanizmov i sistem s elektricheskim privodom, *Patent no. 2431152 ot 10.10.2011* (In Russian).
10. **Prakhov I., Bashirov M., Samorodov A.**, *Transport i Hranenie Nefteproduktov i Uglevodorodnogo Syrva. Obrakademnauka*, 2011, no. 2, pp. 14—17 (in Russian).
11. **Boshlyakov A., Kovalev V., Rubtsov V.** *Izvestiya YUFU, Tehnicheskie nauki*, 2012 (in Russian).
12. **Aengus Murray.** *International Rectifier*, September 27, 2007.
13. **Dong Gan.** *Tennessee Technological University*, Dec. 2007.
14. **Casadei D., Serra G.** *Bulletin of polish academy of sciences. Technical Sciences*, 2006, vol. 54, no. 3.
15. **Thomas G. Habelter.** *IEEE Transactions on industry applications*, September/October 1992, vol. 28, no. 5.
16. **Pragasam Pillay, Krishnan R.** *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 1988, vol. 35, no. 4.

УДК 66.021.2.065.5:681.516.42

DOI: 10.17587/mau.18.185-191

А. Г. Лютов, д-р техн. наук, проф., lutov1@mail.ru, **А. Р. Ишкулова**, аспирант, aliya.ishkulova@yandex.ru, Уфимский государственный авиационный технический университет

Автоматизированная система экстремального управления процессом нанесения гальванического покрытия в ванне с многосекционными анодами

Рассмотрены вопросы управления процессом нанесения гальванического покрытия в ванне с многосекционными анодами. Проведен анализ существующих способов управления процессом в ванне с многоанодной системой. Исследовано влияние плотности тока, межэлектродного расстояния и интенсивности перемешивания электролита на равномерность распределения толщины и скорость осаждения покрытия. Процесс нанесения гальванического покрытия рассмотрен как объект автоматизированного управления. Разработана структурная и функциональная схемы системы экстремального управления процессом нанесения гальванического покрытия. Разработан алгоритм управления процессом нанесения гальванического покрытия с помощью предложенной автоматизированной системы экстремального управления в ванне с многосекционными анодами.

Ключевые слова: гальваническое покрытие, равномерность, многосекционный анод, экстремальное управление, структурная схема системы, алгоритм управления

Введение

В настоящее время гальваническая обработка металлических изделий является одним из самых распространенных способов защиты от коррозии, придания поверхности декоративной отделки и необходимых свойств (твердости, износостойкости, электропроводности, теплостойкости и т. д.).

Одним из важнейших показателей качества гальванического покрытия (ГП), оказывающим влияние

на его защитные и механические свойства, является равномерность распределения толщины покрытия по всей обрабатываемой поверхности деталей.

Равномерность в большей степени зависит от размеров, форм и взаимного расположения анодов и обрабатываемых деталей в ванне, режима электролиза, состава электролита и перемешивания электролита.

Одним из современных и перспективных направлений в управлении процессом нанесения ГП