

КРАТКИЕ СООБЩЕНИЯ

УДК 537.533.2

О.Н. Крютченко, А.Ф. Маннанов**ДЕГРАДАЦИЯ ПОВЕРХНОСТИ ХОЛОДНЫХ КАТОДОВ
ГЕЛИЙ-НЕОНОВЫХ ЛАЗЕРОВ**

Выполнены комплексные исследования динамики изменения поверхности холодных катодов гелий-неоновых лазеров в процессе их эксплуатации.

Ключевые слова: оксидное покрытие, холодный катод, гелий-неоновый лазер, сквозная пора.

Введение. Гелий-неоновые лазеры с холодными катодами находят разнообразное применение в науке, технике, промышленности.

Долговременная стабильность параметров лазеров обеспечивается формированием на поверхности катодов (сплавы алюминия) оксидного покрытия толщиной 10–50 нм.

В работах [1,2] показано, что в условиях газового разряда происходит избирательное разрушение незащищенных оксидной пленкой участков металлической основы катодов – сквозных пор. Установлено также [3], что минимизировать данный эффект позволяет снижение суммарной пористости покрытий до 7-10 % при максимальном диаметре сквозных пор, меньшем 10 мкм.

Цель работы заключается в исследовании динамики изменения состояния поверхности катодов гелий-неоновых лазеров в процессе их продолжительной эксплуатации.

Экспериментальные исследования. Экспериментальные исследования выполнены на образцах активных элементов лазеров, при изготовлении которых учтены рекомендации по конструкции катодного узла и технологические решения, разработанные в [3]. В качестве материала основы катодов использовался алюминий марки АД1. Катоды изготавливаются холодной штамповкой заготовок, их поверхность обезжиривается и подвергается химической полировке до получения 10-11 класса чистоты поверхности.

Оксидное покрытие изготовлено термическим окислением поверхности катода непосредственно в активном элементе лазера.

Катоды выполняются в виде цилиндров

длиной 62–65 мм и диаметром 18 мм, заканчивающихся полусферой радиусом 9 мм.

Изготовленные приборы наполнялись гелий-неоновой смесью в соотношении компонентов 9:1 при общем давлении 465 Па и тренировались в режиме нормальной эксплуатации (средняя плотность тока составляла 0,3 мА/см²).

После испытаний катодов в течение 150, 4000 и 15000 часов производилась оценка вторично-эмиссионных свойств поверхности катодов с помощью методики, разработанной в [4,5]. Затем приборы вскрывались, контролировалось давление составляющих смесь инертных газов, пористость и элементный состав поверхности оксидного покрытия методом спектроскопии обратно-рассеянных ионов низких энергий.

В результате выполненных исследований установлены следующие закономерности.

В процессе эксплуатации приборов возрастает катодное падение потенциала: 100 В после 150 часов, 140 В после 4000 часов и 200 В после 15000 часов работы.

На рисунках 1-2 приведены фотографии участков поверхности катодов, получивших разные дозы облучения ионами газового разряда, сделанные в режимах рентгеновского микроанализа на осажденную в поры медь и регистрации вторичных электронов.

Из рисунка 1 следует, что в процессе эксплуатации приборов возрастает количество и размеры пор. Наиболее быстрое увеличение размеров пор происходит там, где они расположены близко друг к другу (на расстоянии порядка их диаметра).

Поверхность катода от мелкозернистой и

гладкой преобразуется в сильно неоднородную, состоящую из отдельных зерен (рисунок 2). Наблюдаемые закономерности однозначно свидетельствуют об избирательной бомбардировке областей пор и их локальных скоплений.

В процессе распыления катодов уменьшается давление газовой смеси в активных элементах при ее обогащении неона: 4000 час. – 420 Па, He:Ne=10,5:1; 15000 час. – 330 Па, He:Ne=12,5:1.

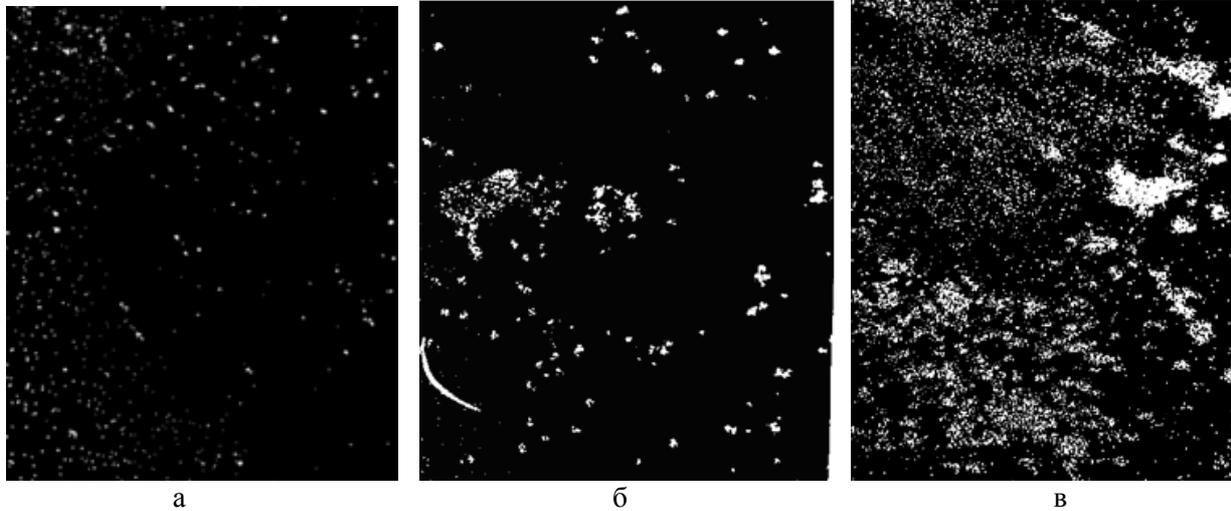
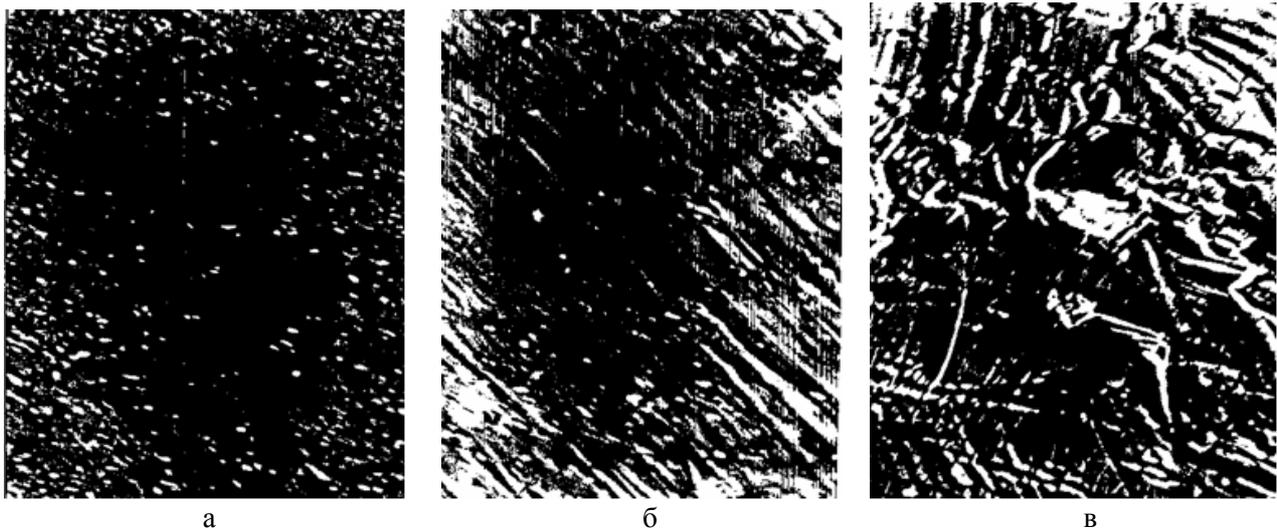


Рисунок 1 - Изменения пористости окисного покрытия катодов в процессе эксплуатации гелий-неоновых лазеров (в 1 см - 20 мкм). Время испытаний, тыс. часов: а - 0,15; б - 4,0; в - 15,0.



**Рисунок 2 - Топография поверхности катода после различных доз ионного воздействия (режим вторичных электронов, увеличение - 450 раз).
Время испытаний, тыс. часов: а - 0,15; б - 4,0; в - 15,0.**

После 150 часов наработки поверхность катодов состоит в основном из окиси магния толщиной ~15 нм. Кроме нее на спектрах фиксируются следы Р, S, F и С - результаты химической и электровакуумной обработки катодов.

После 4000 часов испытаний состояние катода изменяется качественным образом: содержание окиси магния в области максимального токового воздействия, расположенной за срезом капилляра, уменьшается до фонового уровня, а состав поверхности катода определяется окисью алюминия толщиной ~ 20 нм.

У дна и на внутренней поверхности катода,

отстоящей на 1,5–2,0 см от среза капилляра (минимальная токовая нагрузка), появляется налет желто-синего цвета, состоящий из окиси магния [6] толщиной ~ 50 нм.

При включении ионного зонда в вакуумной камере наблюдается кратковременное повышение давления неона.

Увеличение продолжительности испытаний приборов до 15000 часов сопровождается уменьшением толщины оксидного покрытия до 10 нм в зоне максимального токового воздействия и ее ростом на периферийных участках катода до ~100 нм (смесь окислов магния и алюминия).

Таким образом, разрушение холодного

катода из алюминия марки АД1 в газовом разряде определяется динамикой преобразования рельефа и элементного состава его поверхности.

Важную роль играет избирательное распыление участков двухслойного окисного покрытия, расположенных в местах расположения сквозных пор. При этом на фоне уменьшения толщины покрытия (обычное катодное распыление) происходит нарастающее нарушение его сплошности. В результате снижается вторично-эмиссионная эффективность катода (растет катодное падение потенциала) и происходит поступление распыленного материала в газоразрядный промежуток.

Атомы магния и алюминия диффундируют из зоны разряда и оседают на периферийных участках (не принимающих участия в поддержании разряда) катода, замуровывая атомы неона [6-7]. В объеме приборов уменьшается суммарное давление газовой смеси, что приводит к еще большему возрастанию степени воздействия газового разряда на сквозные поры покрытия (растет коэффициент усиления тока порами).

Использование катодов из алюминия марки АД1 с оксидным защитным покрытием приводит к тому, что негативные тенденции, связанные с их разрушением, начинают сказываться на состоянии лазеров после 15000 часов непрерывной работы – мощность излучения уменьшается на 10 % от исходного уровня.

Заключение. Формирование на поверхности катодов гелий-неоновых лазеров оксидных покрытий, обладающих суммарной пористостью 7-10 % при максимальном размере сквозных пор в 10 мкм, обеспечивает долговременную

стабильность параметров приборов. Прогнозируемый срок службы таких приборов составляет 60 – 80 тысяч часов.

Библиографический список

1. Крютченко О.Н., Маннанов А.Ф., Носов А.А. Особенности взаимодействия плазмы газового разряда с поверхностью холодного катода // Радиотехника и электроника. – 1992. – Т. 37. – № 9. – С. 1716–1718.
2. Крютченко О.Н., Маннанов А.Ф., Носов А.А., Степанов В.А., Чиркин М.В. Механизмы проводимости оксидного покрытия холодных катодов газоразрядных приборов // Поверхность. Физика, химия, механика. – 1994. – № 6. – С. 93-99.
3. Крютченко О.Н. Холодные катоды газоразрядных приборов // Дис. докт. техн. наук. – Москва. – 1997. – 313 С.
4. Крютченко О.Н., Маннанов А.Ф., Степанов В.А., Чиркин М.В. Частотные характеристики прикатодной области разряда в гелии // Журнал технической физики. – 1994. – Т. 64. – Вып. 11. – С. 42-52.
5. Крютченко О.Н., Маннанов А.Ф., Чиркин М.В. Электрическая диагностика аномального тлеющего разряда в неоне: – межвуз. Сб. статей «Электроника» / Рязан. гос. радиотехн. ун-т. – Рязань. – 2010. – С. 60-65.
6. Трофимов Е.А., Труханенко Э.М., Арцыхович В.Ф., Файфер С.И. Взаимодействие холодных катодов и активной среды гелий-неоновых лазеров // Электронная техника. – Сер. 4. Материалы. – 1975. – Вып. 1(82). – С. 28 – 32.
7. Авлахова Р.Г., Савичева М.И. Исследование процессов поглощения ионизированных газов поверхностью катода методом радиоактивных изотопов // Электронная техника. – Сер. 4. Электровакуумные и газоразрядные приборы. – 1975. – Вып. 8. – С. 9–16.

УДК 621.391

А.А. Богданов, В.К. Клочко, А.Б. Фельдман

ИССЛЕДОВАНИЕ АЛГОРИТМА ФОРМИРОВАНИЯ ТРЕХМЕРНЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ НА БАЗЕ БОРТОВОЙ ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННОЙ СИСТЕМЫ НАБЛЮДЕНИЯ

Исследуется влияние условий наблюдения и уровня шума на точность работы алгоритма формирования трехмерных изображений в бортовой оптико-электронной системе наблюдения.

Ключевые слова: оптико-электронные системы, трехмерные изображения.

Введение. Современные оптико-электронные системы наблюдения позволяют формировать трехмерные изображения наблюдаемой сцены на основе эффекта стереопары [1]. Это относится как к стационарным системам наблюдения, так и к бортовым системам, установленным на летательных аппаратах [2] и спутниках [3]. Однако бортовые системы проигрывают стационарным в точности полученных изображений. Это обусловлено ошибками определения координат пространственного положения двух камер, появляющимися из-за нестабильности полета и неточности навигационной системы. В связи с этим возникает необходимость устранения подобных ошибок.

Цель статьи - исследование влияния условий наблюдения и уровня шума на точность формирования трехмерных изображений в бортовой оптико-электронной системе наблюдения.

Система наблюдения и постановка задачи. Бортовая система наблюдения представляет собой видеокамеру, навигатор и бортовой компьютер. Эффект стереопары достигается за счет пространственного перемещения видеокамеры по траектории движения летательного аппарата (ЛА) при облете им наблюдаемого объекта.

Пусть при наблюдении одного и того же объекта с разных положений на траектории полета были получены два плоских (двумерных) видеокadra в местных прямоугольных системах координат $o'x'y'$ и $o''x''y''$. Оси $o'z'$ и $o''z''$ направлены в сторону объекта наблюдения. При перемещении камеры по траектории полета ЛА происходят поворот осей соответственно на углы α, β, γ (тангаж, крен, курс) и параллельный перенос на $\Delta x, \Delta y, \Delta z$. Наблюдаемый объект расположен в прямоугольной системе координат

$OXYZ$. Задача заключается в формировании трехмерных изображений объекта в координатах $o'x'y'z'$ и $o''x''y''z''$, т.е. в определении третьих координат z' и z'' в системах наблюдателя, и соответственно в формировании трехмерного изображения объекта в его системе $OXYZ$.

Данную задачу теоретически можно решить [1] следующим образом. Обозначим: M' - точка на изображении объекта в первом кадре с координатами x', y', z' и M'' - соответствующая ей точка на изображении объекта во втором кадре с координатами x'', y'', z'' ; f - фокусное расстояние (между центром камеры и наблюдаемым изображением объекта в матрице фотоприемника); w - масштаб вдоль оси OX для матрицы фотоприемника; h - масштаб вдоль оси OY ; u_0, v_0 - координаты главной точки относительно начала координат фотоприемника (в частном случае $u_0 = v_0 = 0$); u и v - координаты рассматриваемой точки в матрице фотоприемника, связанные с x и y : $u = x/w + u_0, v = y/h + v_0$. Обозначим далее $V = (x, y, 1)^T$ - вектор координат точки в плоскости изображения первой или второй камеры; T - символ транспонирования; $M = (X, Y, Z)^T$ - вектор координат соответствующей точки в системе объекта; $S = (\Delta x, \Delta y, \Delta z)^T$; R - матрица поворота осей; A - матрица параметров камеры:

$$R = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \alpha & \sin \alpha \\ 0 & -\sin \alpha & \cos \alpha \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \cos \beta & 0 & \sin \beta \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \beta & 0 & \cos \beta \end{bmatrix} x$$

$$x \begin{bmatrix} \cos \gamma & \sin \gamma & 0 \\ -\sin \gamma & \cos \gamma & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad A = \begin{bmatrix} f/w & 0 & u_0 \\ 0 & f/h & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}.$$

Тогда из соотношений

$$zu = \frac{f}{w} X + u_0 z, \quad zv = \frac{f}{h} Y + v_0 z, \quad z = z,$$

или в матричной форме

$$z'V' = AM', \quad z''V'' = AM'', \quad (1)$$

а также из связи координат $M'' = RM' + S$ с точностью до вектора ошибок (помех) P следует связь:

$$z''A^{-1}V'' = Rz'A^{-1}V' + S + P. \quad (2)$$

Из (2) на основе минимизации $P^T P$ методом наименьших квадратов находятся искомые координаты z' и z'' :

$$\begin{bmatrix} z' \\ z'' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -V'^T A^{-T} A^{-1} V' & V''^T A^{-T} R A^{-1} V' \\ -V''^T A^{-T} R A^{-1} V' & V^T A^{-T} A^{-1} V'' \end{bmatrix}^{-1} \times \\ \times \begin{bmatrix} V'^T A^{-T} R^T \\ V''^T A^{-T} \end{bmatrix} \cdot S. \quad (3)$$

В реальных условиях возникает проблема поиска сопряженных точек M' и M'' , соответствующих одной и той же точке M объекта, выбора траектории движения и взаимного расположения систем координат $o'x'y'z'$ и $o''x''y''z''$, что требует разработки соответствующего алгоритма.

Алгоритм формирования трехмерного изображения объекта

1. Предварительно определяются параметры камеры в матрице A (например, путем калибровки [1]).

2. На основе данных навигационной системы в текущий момент времени наблюдения определяются матрица поворота R и матрица смещения S .

3. Далее для каждой точки наблюдаемого изображения в области пересечения двух соседних кадров [4] происходит поиск сопряженной точки (на практике – поиск сопряженных областей). Для этого чаще всего применяют корреляционно-экстремальные алгоритмы [5]. Однако подобные алгоритмы требуют больших вычислительных затрат. Для того чтобы ускорить работу алгоритма на данном этапе, можно сузить зону поиска. Доказано [1], что если в плоскости изображения первой камеры указана точка с вектором координат V' , то сопряженная точка V'' в плоскости изображения второй камеры лежит на прямой, заданной уравнением

$$V''^T A^{-1} S^T R^T A^{-1} V' = 0. \quad (4)$$

4. Для каждой пары сопряженных точек устанавливаются трехмерные координаты точек изображения по формулам, следующим из (1):

$$M' = z'A^{-1}V', \quad M'' = z''A^{-1}V''. \quad (5)$$

5. Координаты M' и M'' пересчитываются из местных систем координат наблюдателя в систему координат объекта:

$$M_1 = R_1^{-1}(M' - S_1), \quad M_2 = R_2^{-1}(M'' - S_2), \quad (6)$$

где R_1, R_2, S_1, S_2 определяют взаимное положение наблюдателя и объекта.

Учитывая, что в реальности M_1 и M_2 точно не совпадают, осуществляем усреднение: $M = (M_1 + M_2)/2$. Усреднение может быть рекуррентным, если рассматривается последовательность кадров изображения [2, 4].

6. По совокупности точек $M(X, Y, Z)$ формируется матрица высот H (координат Z) в системе координат объекта.

Исследование работы алгоритма. Для исследования была создана программа в среде Matlab, которая моделирует трехмерную поверхность наземного объекта, его изображения в плоскости камер с разных ракурсов, восстанавливает трехмерное изображение объекта в соответствии с указанным алгоритмом и вычисляет показатель качества его работы – среднеквадратическое отклонение (СКО) найденных третьих координат объекта (высот) от истинных (моделируемых) координат. Результаты исследования представлены в следующих таблицах.

1. Исследование влияния фокусного расстояния f – таблица 1. Камеры расположены на высоте $h = 100$ м и смещены на $\Delta x = 80$ м, $\Delta y = 80$ м, $\Delta z = 0$. Высота объекта – H . Можно сделать вывод, что увеличение фокусного расстояния повышает качество изображения, поэтому целесообразно применять камеры с высоким f .

Таблица 1 – влияние фокусного расстояния

Фокусное расстояние f	10	20	40	80	160
$H = 1$	4,96	2,63	1,83	0,95	0,33
$H = 5$	8,21	3,22	2,13	0,43	0,17
$H = 20$	8,71	5,16	2,43	1,14	0,54

2. Исследование влияния взаимного смещения камер – таблица 2. Фокусное расстояние $f = 40$. Камеры на высоте $h = 100$, $\Delta z = 0$. База

(расстояние между камерами) – b . Для более точной работы алгоритма необходимо, чтобы расстояние между двумя положениями камеры было достаточно большим.

Таблица 2 – влияние взаимного смещения

База b		28	71	142	283	566
СКО	$H = 1$	2,76	1,78	0,97	0,86	0,81
	$H = 5$	2,95	1,50	1,08	0,84	0,63
	$H = 20$	1,48	1,47	1,32	0,93	0,86

3. Исследование влияния угла поворота γ – таблица 3. Фокусное расстояние $f = 40$. Смещения $\Delta x=80$, $\Delta y=80$, $\Delta z=0$. Камеры на высоте $h=100$. Высота объекта $H=5$.

Исследования показали, что при вращении вокруг оси oz СКО в среднем меньше, чем при вращении вокруг осей ox и oy . Для качественного формирования трехмерного изображения желательно, чтобы углы поворота были как можно меньше.

Таблица 3 – влияние угла поворота

γ	10^0	30^0	50^0	70^0	90^0
СКО	1,34	1,39	1,42	1,51	2,02

4. Исследование влияния помех – таблица 4. Фокусное расстояние $f = 40$. Смещения $\Delta x=80$, $\Delta y=80$, $\Delta z=0$. Камеры на высоте $h = 100$. Высота объекта $h=1$. Размерность матрицы изображения - 400 пикселей. Уровень шума задавался как процент искаженных пикселей в первой камере, вторая камера не искажалась. Повышение уровня шума приводит к увеличению ошибки.

Таблица 4 – влияние помех

Уровень шума, %	0	1	2	3	5	10	20
СКО	1,4 1	1,4 4	1,4 8	1,5 1	1,5 8	1,7 2	2,0 0

5. Исследование влияния разрешения камеры – таблица 5. Фокусное расстояние $f = 40$. Смещения $\Delta x=80$, $\Delta y=80$, $\Delta z=0$. Камеры на высоте $h = 100$. Высота объекта $h=5$.

Необходимо, чтобы камера имела высокое разрешение.

Таблица 5 – влияние разрешения камеры

Разрешение камеры	50	100	200	400	800	2000	4000
СКО	11,75	6,10	2,66	1,45	0,51	0,29	0,14

Заключение. Проведенное исследование дает направление работы для совершенствования алгоритма формирования трехмерных изображений и исследования качества его работы. Это следующее: выявление оптимальных условий наблюдения за наземным объектом; разработка мер по компенсации траекторных нестабильностей; совершенствование алгоритма поиска сопряженных точек; поиск оптимального режима наблюдения для подавления помех и ошибок измерения координат; применение комплекса современных показателей качества изображения; испытание алгоритма в реальных условиях; сравнение с отечественными и зарубежными аналогами; сопоставление с работой теплоточечных систем. Работа в указанных направлениях получит отражение в последующих публикациях.

Работа проводилась при поддержке Министерства образования и науки РФ (госконтракт № 16.740.11.0519).

Библиографический список

1. Цифровая обработка изображений в информационных системах: учеб. пособие / И.С. Грузман, В.С. Киричук и др. Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2002. 352 с.
2. Методы автоматического обнаружения и сопровождения объектов. Обработка изображений и управление / Б.А. Алпатов, П.В. Бабаян, О.Е. Балашов, А.И. Степашкин. М.: Радиотехника, 2008. 176 с.
3. Обработка изображений в геоинформационных системах: учеб. пособие / В.К. Злобин, В.В. Еремеев, А.Е. Кузнецов; Рязан. гос. радиотехн. ун-т. Рязань, 2006. 264 с.
4. Математические методы восстановления и обработки изображений в радиотеплооптоэлектронных системах / В.К. Ключко. Рязань: РГРТУ, 2009. 228 с.
5. Методы фильтрации сигналов в корреляционно-экстремальных системах навигации / В.К. Баклицкий, А.М. Бочкарев, М.П. Мусьянов; под ред. В.К. Баклицкого. М.: Радио и связь, 1986. 216 с.

УДК 621.398.62

И.С. Холопов

ПРОГРАММНЫЙ ИМИТАТОР СИГНАЛОВ ЦИФРОВЫХ ТРЕХОСНЫХ ДАТЧИКОВ ОРИЕНТАЦИИ

Рассмотрена реализация программного имитатора сигналов трехосных датчиков с цифровым интерфейсом: магнитометра, MEMS гироскопа и MEMS акселерометра. Разработаны математические модели сигналов перечисленных датчиков ориентации. Приведено сравнение эюр программного имитатора и записей сигналов инерциальных MEMS датчиков при их вращении в трех плоскостях, показывающее адекватность составленной математической модели.

Ключевые слова: MEMS гироскоп и акселерометр, магнитометр, углы Эйлера-Крылова, аффинные преобразования, кватернион.

Введение. Микроэлектромеханические (MEMS) датчики угловой скорости (гироскопы) и ускорения (акселерометры) представляют одно из активно развивающихся направлений микросистемной техники. Под MEMS датчиками понимают интегрированные измерительные системы с размерами от нескольких микрометров до нескольких миллиметров, объединяющие в себе механические и электрические компоненты, физически размещенные на одном кристалле [1]. Принцип работы MEMS датчиков основан на преобразовании в электрический сигнал дифференциальной емкости, образуемой подвижными и неподвижными микромеханическими пластинами.

Интегрированные датчики измерения направления вектора магнитного поля Земли (магнитометры) строятся по мостовым схемам и используют анизотропный магниторезистивный, гальваномагниторекомбинационный или туннельный магниторезистивный эффект [2-4].

Комбинация трехосных магнитометра, MEMS гироскопа и MEMS акселерометра позволяет реализовать автономные навигационные системы с 9-ю степенями свободы – бесплатформенные системы ориентации и навигации и гиросtabilизированные платформы [5].

Цель работы: разработка математических моделей и программного средства, имитирующего сигналы трехосных датчиков систем инерциальной навигации, для оптимизации алгоритмов цифровой обработки сигналов указанных датчиков.

Математическое описание поворота в трехмерном пространстве. Классическими

независимыми параметрами, позволяющими однозначно задать угловое положение твердого тела, являются углы Эйлера - Крылова: курс (yaw) φ , крен (roll) ψ и тангаж (pitch) θ [6]. Положительные значения углов принято отсчитывать против хода часовой стрелки, а итоговое угловое положение объекта в неподвижной системе координат $Ox^*y^*z^*$ задавать последовательностью поворотов $\varphi \rightarrow \theta \rightarrow \psi$ (рисунок 1). В так называемых самолетных углах [6] положительные значения курса и крена принято отсчитывать по ходу часовой стрелки.

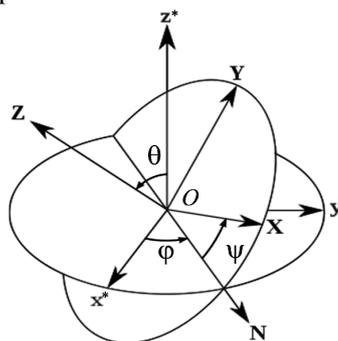


Рисунок 1 – Углы Эйлера - Крылова

Математическая модель сигналов трехосного магнитометра. Сигналы с выходов трехосного магнитометра (ТОМ) представляют собой проекции вектора магнитного поля Земли на оси связанной с данным датчиком подвижной системы координат. Если использовать правую тройку векторов (см. рисунок 1), в которой ось Oy^* совпадает с направлением движения, а за нулевое принято направление юг-север $S-N$ (нулевой азимут), то проекции вектора магнитного поля на оси датчика X , Y и Z можно

рассчитать путем аффинных преобразований с матрицами поворота [7]

$$\mathbf{R}_X = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\theta & -\sin\theta \\ 0 & \sin\theta & \cos\theta \end{pmatrix}, \mathbf{R}_Y = \begin{pmatrix} \cos\psi & 0 & \sin\psi \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin\psi & 0 & \cos\psi \end{pmatrix}, \quad (1)$$

$$\mathbf{R}_Z = \begin{pmatrix} \cos\varphi & -\sin\varphi & 0 \\ \sin\varphi & \cos\varphi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

на основе соотношений:

$$\begin{aligned} m_z &= M(\sin\varphi\sin\psi - \cos\varphi\cos\psi\sin\theta), \\ m_y &= M\cos\varphi\cos\theta, \\ m_x &= M(\sin\varphi\cos\psi + \cos\varphi\sin\psi\sin\theta), \end{aligned} \quad (2)$$

где M – модуль вектора магнитного поля Земли.

Математическая модель сигналов трехосного акселерометра. Сигналы с выходов трехосного акселерометра (ТОА) представляют собой проекции вектора результирующего ускорения на оси связанной с данным датчиком подвижной системы координат. В состоянии покоя ТОА выдает проекции вектора ускорения свободного падения $g = 9,81 \text{ м/с}^2$. Если MEMS ТОА ориентировать в пространстве аналогично ТОМ, то проекции вектора g на оси датчика X , Y и Z также можно рассчитать с использованием аффинных преобразований с матрицами поворота \mathbf{R}_X и \mathbf{R}_Y :

$$\begin{aligned} a_z &= -g\cos\psi\cos\theta, \\ a_y &= -g\sin\theta, \\ a_x &= g\cos\theta\sin\psi. \end{aligned} \quad (3)$$

Математическая модель сигналов трехосного гироскопа. Получить математическую модель сигналов трехосного гироскопа (ТОГ) MEMS нельзя ни с использованием аффинных преобразований (1), приводящих к появлению эффекта «шарнирного замка» (Gimbal lock), когда из-за совпадения плоскостей вращения теряется одна степень свободы, ни с использованием математического аппарата кватернионов [6, 8].

Для описания вращения твердого тела введена [6-8] система кинематических уравнений относительно угловых скоростей $(w_z, w_y, w_x)^T$ с выходов ТОГ:

$$\begin{aligned} w_x^* &= \sin\psi w_z + \cos\psi w_x, \\ w_y^* &= w_y - (w_z\cos\psi - w_x\sin\psi)\tan\theta, \\ w_z^* &= (w_z\cos\psi - w_x\sin\psi)/\cos\theta. \end{aligned} \quad (4)$$

В особых точках $\theta = \pm 0,5(2k+1)\pi$, $k = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$, уравнения (4) вырождаются. Однако решение обратной задачи – вычисление вектора угловых скоростей $(w_z, w_y, w_x)^T$ ТОГ в связанной с ним подвижной системе координат $OXYZ$ по заданным значениям угловых скоростей вращения $(w_z^*, w_y^*, w_x^*)^T$ в неподвижной

системе координат $OX^*Y^*Z^*$ – позволяет получить уравнения без особых точек:

$$\begin{aligned} w_z &= w_x^* \sin\psi + w_z^* \cos\psi \cos\theta; \\ w_y &= w_y^* + w_z^* \sin\theta; \\ w_x &= w_x^* \cos\psi - w_z^* \cos\theta \sin\psi. \end{aligned} \quad (5)$$

Как видно из приведенных выражений, система уравнений (5) является универсальной математической моделью ТОГ.

По аналогии с серийно выпускаемыми MEMS ТОГ положительные направления угловых скоростей w_z и w_x и соответствующих углов φ и θ в имитаторе отсчитываются против часовой стрелки, а угловой скорости w_y и угла ψ – по часовой (рисунок 2).

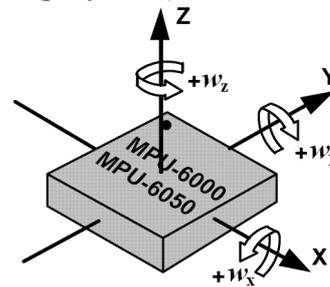


Рисунок 2 – Положительные направления отсчета угловых скоростей MEMS ТОГ

Описание программы имитатора.

Имитатор сигналов датчиков инерциальной навигации – ТОМ, ТОА и ТОГ – реализован в виде программного модуля, скомпилированного в среде C++ Builder 6. Программа позволяет аддитивно наложить на результаты вычислений по формулам (2), (3) и (5) реализации шума, записанные с реальных датчиков ориентации (в ходе исследований [9, 10] получены записи с MEMS ТОГ L3G4200D фирмы ST Microelectronics [11], MEMS ТОГ и ТОА MPU-6050 фирмы InvenSense [12], ТОМ НМС 5843 фирмы Honeywell [13] длиной 60000 отсчетов в режиме покоя при нулевых углах крена и тангажа с частотой дискретизации 100 Гц) в файл с расширением *.m или *.txt. Пользователь может выбирать интервал времени моделирования, начальное угловое положение датчиков, тип вращения (равномерная угловая скорость или ее изменение по гармоническому закону), тип интегрирования (кинематические уравнения или кватернионы). Полученные последовательности отсчетов для каждого имитируемого датчика в ходе диалога записываются в отдельные файлы с расширением *.txt, *.m или *.xls. Имитатор выдает значения отсчетов с ТОА и ТОМ, нормированные к величине модулей векторов g и M соответственно, а значения угловых скоростей – в градусах в секунду. Алгоритмы вычисления

угловых координат по сформированным сигналам рассмотрены в [9].

Адекватность выходных данных имитатора сигналам реальных инерциальных датчиков проверена на экспериментальных данных, полученных с MEMS TOG и TOA MPU-6050 для различных режимов его вращения: последовательное вращение с постоянной угловой скоростью вокруг разных осей и гармонический закон изменения угловой скорости. Максимальная величина невязки наблюдается для сигналов угловой скорости в плоскости тангажа и составляет не более $0,18^\circ/\text{с}$. Временные диаграммы сигналов с выходов TOG и TOA для модели датчика MPU-6050 и гармонического закона вращения приведены в [14].

Основным отличием рассматриваемого в данной статье программного имитатора сигналов инерциальных датчиков от представленного на рынке имитатора SimSENSOR фирмы Spirent Communications [15] является возможность загрузки записей шума интересующего MEMS устройства. Это позволяет учитывать в модели возмущающих воздействий характерные для выбранного датчика закон распределения и дисперсию шума. В SimSENSOR для описания детерминированных и стохастических ошибок датчиков MEMS используется математическая модель с заданной дисперсией Аллана.

В рассмотренном имитаторе на данный момент не реализована модель температурного дрейфа показаний датчиков (при условии, что записи шума сделаны при фиксированной температуре).

Выводы. Таким образом, разработанный программный имитатор реализует адекватную математическую модель сигналов, выдаваемых трехосными датчиками (гироскопами, акселерометрами и магнитометрами) инерциальных бесплатформенных навигационных систем. Это позволяет использовать генерируемые им массивы данных для оптимизации параметров алгоритмов обработки (фильтрации и интегрирования), обеспечивающих максимизацию коэффициента подавления шумов датчиков при минимизации фазовой задержки и ошибки интегрирования. При наличии соответствующей базы данных записей шума различных датчиков рассмотренный имитатор также может быть использован для выбора модели MEMS устройства при заданных погрешностях измерения угловых координат.

Библиографический список

1. Распопов В.Я. Микромеханические приборы. – М.: Машиностроение, 2007. – 400 с.
2. Агеев О.А., Мамиконова В.М., Петров В.В. Микроэлектронные преобразователи неэлектрических величин. – Таганрог: Изд-во ТРТУ, 2000. – 153 с.
3. Самарин А. Мультисенсорные навигационные системы для локального позиционирования // Современная электроника. – 2006. – № 6. – С. 10-17.
4. Сысоева С.С. Магнитоуправляемые, MEMS и мультисенсорные датчики движения 2009 года – функциональнее, точнее, миниатюрнее предшественников // Компоненты и технологии. – 2009. – № 8. – С. 54-63.
5. Матвеев В.В., Распопов В.Я. Основы построения бесплатформенных инерциальных навигационных систем. – СПб.: ГНЦ РФ ОАО «Концерн ЦНИИ «Электроприбор», 2009. – 280 с.
6. Челноков Ю.Н. Кватернионные и бикватернионные модели и методы механики твердого тела и их приложения. Геометрия и кинематика движения. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2006. – 512 с.
7. Лурье А.И. Аналитическая механика – М.: Физматгиз, 1961. – 824 с.
8. Бранец В.Н., Шмыглевский И.П. Применение кватернионов в задачах ориентации твердого тела – М.: Наука, 1973. – 320 с.
9. Холопов И.С., Штрунова Е.С. Программный имитатор сигналов трехосного MEMS гироскопа с цифровым выходом // Труды РНТОРЭС им. А.С.Попова. Серия: «Цифровая обработка сигналов и её применение». Выпуск: XIV, Т. 1. – М., 2012. – С. 237-238.
10. Белокуров В.А., Горкин В.Н., Кошелев В.И. и др. Использование трехосных MEMS гироскопов и акселерометров для задач определения пространственной ориентации подвижных объектов // Вестник РГРТУ. – 2012. – Вып. 41. – С. 26-31.
11. http://www.st.com/internet/com/technical_resources/technical_literature/datasheet/CD00265057.pdf. Дата обращения: 02.06.11.
12. <http://www.invensense.com/mems/gyro/documents/PS-MPU-6000A.pdf>. Дата обращения: 19.10.11.
13. http://www51.honeywell.com/aero/common/documents/myaerospacatalog-documents/Defense_Brochures-documents/HMC5843.pdf. Дата обращения: 24.02.12.
14. http://stk-kholopov.space.rsreu.ru/public/Рисунки_для_статьи_Программный_имитатор.pdf. Дата обращения: 30.10.12.
15. <http://www.syrus.ru/index.cgi?Template=catalog&DeptId=1&TreeId=10708&ProductId=10573>.

УДК.621.313.075

И.Е. Синуцын, А.Н. Варнавский, Е.С. Корочкин

**ВЛИЯНИЕ КОНСТРУКТИВНЫХ ОСОБЕННОСТЕЙ
НЕКОТОРЫХ ТИПОВ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ
ДЛЯ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ В ЭЛЕКТРОПРИВОДАХ,
АДАПТИРОВАННЫХ К РАБОТЕ С УЧЁТОМ
СОСТОЯНИЯ ОПЕРАТОРА**

Рассмотрены вопросы влияния конструктивных особенностей некоторых типов электродвигателей для использования их в электроприводах, адаптированных к работе с учётом состояния оператора. Обоснована целесообразность конструктивных доработок электродвигателя и возможность использования двигателя-усилителя.

Ключевые слова: электропривод, электродвигатель, двигатель-усилитель, момент, безопасность.

Введение. Увеличение числа транспортных средств, участвующих в дорожном движении, свидетельствует о несомненном повышении материального состояния граждан России, это положительный факт. Однако, с другой стороны, в связи с этим наблюдается негативная сторона жизненного цикла, состоящая в ухудшении экологической обстановки в связи с использованием токсичных горюче-смазочных материалов, повышении нервно-психического напряжения участников движения. Особое внимание уделяется внедрению экологически безопасного электрического привода для транспортных средств и обеспечению их безопасной эксплуатации. С этой точки зрения представляет интерес поиск методов и средств реализации систем безопасной эксплуатации транспортных средств и силовых элементов электропривода с учётом состояния оператора.

Цель работы состоит в том, чтобы обосновать необходимость конструктивных доработок некоторых электродвигателей и целесообразность использования специальных асинхронных электродвигателей в электроприводах транспортных средств, адаптированных для работы с учётом состояния оператора.

Безопасность транспорта во многом определяется безопасностью и совершенством транспортных приводных механизмов, элементов их обслуживания и управления. Элементы управления электроприводами транспортных средств в большинстве своем являются сложными дорогостоящими системами, использующими электронное оборудование, различ-

ного рода преобразователи энергии, микроконтроллеры и ряд других устройств, в том числе малогабаритные накопители энергии, аккумуляторы.

Особое внимание уделяется силовым электродвигателям, используемым в приводе транспортных средств, и способам управления ими.

Общее управление электроприводом осуществляется оператором, от физического состояния которого зависит безопасность и безаварийность работы транспортного средства. Предлагается в качестве одного из способов влияния на функциональное состояние тягового двигателя использовать дополнительную обмотку на статоре. В практике тягового электропривода на сегодняшний день не достаточно сведений по использованию тяговых электродвигателей с дополнительной обмоткой, предназначенной для компенсации части или полностью основного магнитного потока статорной обмотки без её отключения от источника питания. Известны двигатели, в которых дополнительная обмотка статора используется для изменения числа полюсов статорной обмотки без изменения основного магнитного потока и образующая с остальными обмотками статора единую многофазную (трёхфазную) систему обмоток с числом полюсов, кратных двум для каждой фазы.

В силу этого обстоятельства **научный интерес** представляет исследование процесса взаимодействия магнитных полей статорной обмотки – основного магнитного потока и

магнитного поля, создаваемого дополнительной обмоткой при её замыкании. Поскольку подобные исследования в открытой печати не освещаются, то поставленная задача носит актуальный характер и обладает всеми признаками **научной новизны**. Для **оценки эффективности** взаимодействия магнитных полей используется коэффициент ослабления основного магнитного потока электродвигателя – $k_{осл.}$, который определяется в работе.

Обоснование целесообразности конструктивных доработок тяговых электродвигателей. Прогнозирование безаварийной работы транспортного средства осуществляется до начала его работы с помощью ряда тестовых программ и врачебного контроля оператора. Однако предусмотреть все возможные ситуации нельзя.

Возникает необходимость текущего определения физического состояния оператора и процедуры принятия решения в критических ситуациях. Результатом принятого решения является замедление и полная остановка транспортного средства. Притормаживание и торможение, осуществляемое электродвигателем, подчиняется общему закону движения вида [1]

$$M_{ДВ} - M_{Н} = J \frac{d\omega}{dt}$$

где $M_{ДВ}$ – момент, развиваемый двигателем;
 $M_{Н}$ – момент сопротивления;
 J – момент инерции всех движущихся (вращающихся) частей;
 ω – скорость вращения ротора двигателя.

Произведение $J \frac{d\omega}{dt}$ называют динамическим моментом, который может быть положительным при разгоне и отрицательным при торможении транспортного средства. Момент электродвигателя определяется для асинхронного трёхфазного двигателя в виде [2]:

$$M = C_M \Phi_m I_2 \cos \psi_2,$$

где $C_M = pm_2 k_{осл.} / \sqrt{2}$ – постоянная;
 p – число пар полюсов обмотки ротора;
 m_2 – число фаз обмотки ротора;
 Φ_m – амплитудное значение магнитного потока статорной обмотки;
 I_2 – ток обмотки ротора;
 ψ_2 – угол между E_2 и I_2 роторной обмотки.

$$\text{Известно [3], что } I_2 = \frac{E_{2S}}{Z_2} = \frac{E_{2S}}{\sqrt{R_2^2 + X_{2S}^2}},$$

где $E_{2S} = E_2 S$ – ЭДС обмотки ротора,

$E_2 = 4,44 f_1 w_2 k_{осл.} \Phi_m$ – ЭДС роторной обмотки при заторможенном роторе;
 S – скольжение ($0 < S < 1$); f_1 – частота сети;
 w_2 – число витков обмотки ротора;
 $k_{осл.}$ – обмоточный коэффициент роторной обмотки;
 R_2, X_2 – активное и реактивное сопротивления роторной обмотки.

Приняв во внимание, что $\Phi = \frac{\Phi_m}{\sqrt{2}} \sin \left(\omega_1 t - \frac{\pi}{2} \right)$ –

действующее значение магнитного потока в зазоре и $E_2 = -w_{осл.} \frac{d\Phi}{dt}$, можно показать, что

$$I_2 = -\frac{w_{осл.} (d\Phi / dt) s}{\sqrt{R_2^2 + X_{2S}^2}},$$

перейдя от производной к приращениям имеем $I_2 \cong -\frac{w_{осл.} (\Phi_1 - \Phi_0) s}{\Delta t \sqrt{R_2^2 + X_{2S}^2}}$, где

Φ_0 – значение магнитного потока в некоторый момент времени t_0 , Φ_1 – магнитный поток обмотки статора. Изменяя Φ_0 , можно менять ток якорной обмотки, а следовательно, и момент, развиваемый двигателем. Известно [4], что при пересечении замкнутого контура магнитными силовыми линиями, в последнем возникает собственное магнитное поле, направленное против порождающего его магнитного поля, (закон Ленца). Величина собственного магнитного поля зависит от скорости изменения порождающего магнитного поля, наводимой ЭДС и внутреннего сопротивления контура, а, следовательно, на величину поля можно влиять, изменяя сопротивление контура. Внутреннее (собственное) сопротивление контура определяет ток в контуре и, как следствие, магнитный поток, связанный с током. Символически эта связь выражается в виде [3]

$$\Phi = \frac{IW}{R_m},$$

где Φ – магнитный поток контура,
 IW – ампервитки контура,
 R_m – магнитное сопротивление цепи контура.

Количественную величину степени влияния на основной магнитный поток магнитного потока от дополнительной обмотки оценим через коэффициент ослабления $k_{осл.}$, который определим исходя из соотношения магнитных потоков. Пусть основная обмотка имеет число витков, равное W_1 , а дополнительная – W_1' , определим отношение $W_1 / W_1' = k$ – коэффициент трансформации обмоток выразим $W_1' = k^{-1} W_1$. При известном

магнитном потоке $\Phi = \frac{\Phi_m}{\sqrt{2}} \sin \omega t$ ЭДС в дополнительной обмотке W_1' определится в виде

$$E_1' = -W_1' \frac{d\Phi}{dt} = k^{-1} W_1' \omega \frac{\Phi_m}{\sqrt{2}} \sin \left(\omega t - \frac{\pi}{2} \right).$$

Замыкая дополнительную обмотку через контактор на активное сопротивление R_κ , определяем ток в цепи дополнительной обмотки без учёта активного сопротивления самой обмотки, имеем

$$I_1' = \frac{E_1'}{R_\kappa} = \frac{k^{-1} W_1' \omega \Phi_m \sin \left(\omega t - \frac{\pi}{2} - \psi_\kappa \right)}{\sqrt{2} Z_\kappa},$$

где Z_κ – полное сопротивление цепи дополнительной обмотки, а

$$\psi_\kappa = \arctg \frac{X_\kappa}{R_\kappa},$$

X_κ – реактивное сопротивление дополнительной обмотки. Магнитный поток дополнительной обмотки, порождаемый током I_1' , определится из выражения:

$$\Phi_1' = \frac{I_1' W_1'}{R_\mu} = \frac{(k^{-1})^2 W_1'^2 \omega \Phi_m \sin \left(\omega t - \frac{\pi}{2} - \psi_\kappa \right)}{\sqrt{2} Z_\kappa R_\mu},$$

где R_μ – магнитное сопротивление цепи дополнительной обмотки, аналогичное для основной обмотки. Просуммировав магнитные потоки от основной и дополнительной обмоток, получим:

$$\Phi_\Sigma = \frac{\Phi_m}{\sqrt{2}} \sin \omega t \left(1 + \frac{(k^{-1})^2 W_1'^2 \omega \sin \left(\omega t - \frac{\pi}{2} - \psi_\kappa \right)}{Z_\kappa R_\mu \sin \omega t} \right).$$

При малых значениях R_κ , $\psi_\kappa = \arctg \frac{X_\kappa}{R_\kappa} \approx \frac{\pi}{2}$ в этом случае имеем:

$$\Phi_\Sigma = \frac{\Phi_m}{\sqrt{2}} \sin \omega t \left(1 - \frac{(k^{-1})^2 W_1'^2 \omega}{Z_\kappa R_\mu} \right).$$

Суммарный магнитный поток отличается от основного магнитного потока на величину, пропорциональную коэффициенту

$$k_1 = 1 - \frac{(k^{-1})^2 W_1'^2 \omega}{Z_\kappa R_\mu},$$

который можно назвать коэффициентом ослабления $k_{осл}$. Величина **коэффициента ослабления** заключена в пределах от 0 до 1 и является функцией коэффициента трансформации

$$k_{осл} = k_1 = f(k).$$

Таким образом, для достижения поставленной цели достаточно уложить дополнительную обмотку на статор асинхронного двигателя, расположив её в тех же пазах, в которых размещается основная обмотка.

Пути реализации изменений. Предлагается дополнительную обмотку замыкать на активное сопротивление с помощью контакторов. Активное сопротивление должно иметь несколько номиналов для получения различной степени закорачивания контура, в том числе и короткое замыкание. Контактор, с помощью которого замыкается дополнительная обмотка, управляется системой безопасности в соответствии с состоянием оператора независимо от других средств управления приводом транспортного средства. Степень воздействия определяется состоянием оператора и может изменяться в некоторых пределах. В особо критических ситуациях, когда необходимо экстренное торможение, в системе безопасности транспортного средства должна быть предусмотрена возможность использования тормозных режимов работы электродвигателя, наиболее эффективным из которых является режим противовключения, хотя он является наиболее энергозатратным.

Другим возможным вариантом асинхронного электродвигателя, который можно использовать на транспортном средстве в электроприводе, адаптированном с учётом состояния оператора, является электродвигатель, в статорную обмотку которого включены управляемые дроссели насыщения, в частности, магнитные усилители. Такие двигатели обладают рядом достоинств по сравнению с обычными асинхронными двигателями, но и имеют свои недостатки в связи со сложностью конструкции. Асинхронные двигатели, в которых магнитные усилители включены совместно со статором (на спинке статора), называют двигателями усилителями [5]. Обмотки магнитных усилителей уложены в те же пазы, что и основная обмотка двигателя. Схематично такой двигатель изображён на рисунке.

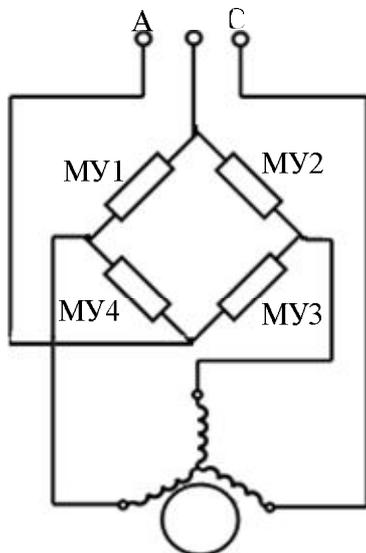
Управление моментом, развиваемым асинхронным двигателем, осуществляется с помощью магнитных усилителей, от степени насыщения которых зависит напряжение, подаваемое на статорную обмотку асинхронного двигателя. Известно [6], что

$$M_{дв} = \frac{m_1 U_1^2 r_2' p}{2\pi f_1 s [(r_1 + r_2' / s)^2 + (x_1 + x_2')^2]},$$

где U_1 – напряжение, подводимое к обмотке статора. Остальные параметры можно принять постоянными. В этом случае имеем

$$M_{ДВ} = kU_1^2,$$

$k = \text{const}$ - коэффициент пропорциональности.



Реверсивный асинхронный электродвигатель с магнитными усилителями

Изменяя реактивное сопротивление рабочей обмотки магнитного усилителя, включённой последовательно со статорной обмоткой, изменяется U_1 – напряжение, приложенное к статорной обмотке. Тем самым изменяется момент двигателя и скорость движения транспортного средства. Так как мощность управления магнитным усилителем не высока, то управление ими можно осуществлять непосредственно с устройств системы безопасности транспортного средства в соответствии с состоянием оператора. Таким образом, можно решить проблему безопасной эксплуатации транспортного средства, адаптировав электропривод транспортного средства к состоянию оператора. Глобальное решение данной проб-

лемы не ограничивается только рассмотренными предложениями, оно требует дополнительных исследований.

Заключение. В результате проведенного анализа в работе предложены обоснованные конструктивные решения для доработки некоторых асинхронных электродвигателей и использование специальных асинхронных электродвигателей для работы в электроприборах, адаптированных с учётом состояния оператора.

Показано, что работа имеет научную новизну и определен критерий влияния дополнительной обмотки, выраженный в коэффициенте ослабления. Показано изменение величины коэффициента ослабления, которая позволяет до 95 % влиять на ослабление основного магнитного потока, что важно при использовании в транспортных средствах.

Экономический эффект от использования предложений подсчитать сложно, однако, социальная значимость его достаточно велика.

Работа проводилась при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ в рамках ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» (госконтракт № 14.740.11.1108).

Библиографический список

1. Ильинский Н.Ф. Основы электропривода: учеб. пособие для вузов. М.: МЭИ, 2003. 224 с.
2. Брускин Д.Э. Электрические машины и микромашины. М.: Высшая школа, 1981. 482 с.
3. Общая электротехника: учеб. пособие для вузов; под ред. А.Т. Блажкина. Л.: Энергия, 1979. 472 с.
4. Савельев И.В. Курс общей физики. Том 2. М.: Высшая школа, 1978. 480 с.
5. Копылов И.П. Электрические машины М.: Высшая школа, 2006. 607 с.
6. Гейлер Л.Б. Основы электропривода. М.: Высшая школа, 1972. 608 с.