

форма детектирующих элементов устройства, температура окружающей среды и т. д. [1].

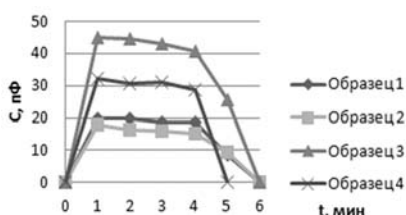


Рисунок 3 – Зависимость емкости от времени измерения для образцов *Bacillus pumilus* с разной степенью разведения: 1 – исходная культура; 2 – культура разведена в 10 раз; 3 – культура разведена в 100 раз; 4 – культура разведена в 10 000 раз

Таким образом при проведении экспериментов была реализована следующая последовательность действий:

1. Подключение датчика к измерителю иммитанса Е 7-25.
2. Фиксация исходного значения.
3. Нанесение анализа размером 0,5–1 мкл при помощи микрошприца.
4. Фиксация выходного сигнала.
5. Очистка поверхности датчика.
6. Фиксация значения степени очистки путем измерения величины емкости на электродах биоанализатора.

Химическая обработка кристалла биосенсорного устройства необходима для очистки поверхности измерительного элемента с целью

исключения влияния возможных остатков анализируемого состава, предшествующего следующему эксперименту.

Если степень очистки элементов является неудовлетворительной, дополнительно может производиться отжиг при температуре выше 100 °С. При этом будут удалены органические остатки биологических структур, нанесенные ранее на поверхность датчика.

Необходимо отметить, что для уменьшения влияния физраствора на выходной сигнал биосенсора необходимо приступить к измерениям, начиная с наибольшей концентрации биоструктур, что соответствует минимальным концентрациям физраствора.

Работа выполнялась в рамках Государственной программы научных исследований «Конвергенция-2020», подпрограммы «Объединение».

Литература

1. Плещачевский, Ю.М., Исследование емкостных характеристик биоанализаторов на основе электродных биосенсорных устройств / Ю.М. Плещачевский, О.Г. Реутская, К.С. Люцко, А.Г. Песнякевич, И.А. Таратын // Материалы 12 МНТК «Приборостроение–2019» / под ред. О.К. Гусева [и др.]. – Мн.: БНТУ, 2019. – С. 30–32
2. Феоктистова Н.А., Выделение бактерий вида *Bacillus mesentericus* из объектов санитарного надзора / Н.А. Феоктистова, М.А. Юдина, Д.А. Васильев [и др.] // Молодежь и наука XXI века: материалы III-й Международной научно-практической конференции молодых ученых. – Ульяновск, 2010. – С. 82–84.

УДК 531.385

ЭЛЕКТРОПРИВОД ПРИБОРНЫХ СИСТЕМ

Малютин Д.М.

ФГБОУ ВО «Тульский государственный университет»
Тула, Российская Федерация

Электропривод широко применяется в информационно-измерительных и управляющих приборных системах [1–6]. Несмотря на то, что в настоящее время разработана достаточно широкая линейка электродвигателей [7], в ряде случаев параметры серийно выпускаемых промышленностью исполнительных двигателей не удовлетворяют требуемым техническим характеристикам разрабатываемого приборного механизма, например по развиваемому двигателем моменту. В этом случае для реализации «высокомоментного», компактного, быстродействующего исполнительного привода приборных систем с требуемыми техническими характеристиками и уменьшенным уровнем пульсаций по моменту в работе рассмотрен «пакетный» способ установки коллекторных датчиков момента постоянного тока на оси исполнительного механизма (рисунок 1). С целью уменьшения пульсаций

по моменту в исходном положении ротора датчиков момента смещены на небольшие углы относительно друг друга.

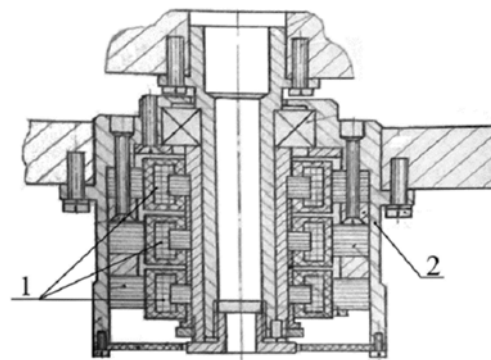


Рисунок 1 – «Пакетный» способ установки датчиков момента:

1 – ротора датчиков момента; 2 – корпусная деталь

Уравнения, описывающие работу исполнительного привода на основе трех датчиков момента, запишутся:

$$J_z \ddot{\delta} = M_{\Sigma} - M_n, \quad (1)$$

здесь J_z – момент инерции приведенный к выходной оси исполнительного привода; M_{Σ} – вращающий момент исполнительного привода; M_n – момент нагрузки, включающий приведенные к выходной оси моменты сухого и вязкого трения; δ – угловое ускорение выходной оси.

$$J_z \ddot{\delta} = c_{m1}i_{j1} + c_{m2}i_{j2} + c_{m3}i_{j3} - M_n, \quad (2)$$

здесь c_{mi} – коэффициент момента соответствующего датчика момента; i_{ji} – ток якоря соответствующего датчика момента.

Полагая, что $c_{m1} = c_{m2} = c_{m3}$ и $i_{j1} = i_{j2} = i_{j3}$

получим: $J_z \ddot{\delta} = 3c_m i_j - M_n$.

Ток якоря найдем из уравнения:

$$U_y = L_j \dot{i}_j + c_e \dot{\delta} + R_j i_j, \quad (3)$$

здесь U_y – входное напряжение, приложенное к якору двигателя с усилителя; L_j – индуктивность якоря; R_j – активное сопротивление якоря; c_e – коэффициент противоЭДС.

Переходя к операторной форме записи:

$$i_j(p) = \frac{U_y(p) - c_e \delta(p)p}{L_j p + R_j}, \quad (4)$$

$$J_z \delta(p)p^2 = 3c_m \left(\frac{U_y(p) - c_e \delta(p)p}{L_j p + R_j} \right) - M_n(p), \quad (5)$$

$$\text{отсюда: } \frac{\delta(p)p}{U_y(p)} = \frac{3c_m / R_j}{J_z T_{ds} p^2 + J_z p + \frac{3c_m c_e}{R_j}},$$

$$\text{где } T_{ds} = \frac{L_j}{R_j}.$$

$$\text{Введем обозначения } K_{ds} = \frac{c_m}{R_j}, \quad b = \frac{c_m c_e}{R_j},$$

тогда функционирование исполнительного привода может быть описано следующей передаточной функцией с учетом того, что $3T_{ds}b$ много меньше, чем J_z :

$$\frac{\delta(p)p}{U_y(p)} = \frac{3K_{ds}}{(T_{ds}p + 1)(J_z p + 3b)}. \quad (6)$$

Установка трех датчиков момента на одной оси приводит к увеличению эквивалентных коэффициента передачи и удельного момента сил вязкого трения в три раза по сравнению с

использованием одного датчика момента. Эквивалентная электромагнитная постоянная времени исполнительного привода равна постоянной времени одного датчика момента. Численные значения параметров передаточной функции находятся из соотношений:

$$\frac{\dot{\delta}_{xx}}{U_{bx}} = \frac{1}{c_e}, \quad c_m = \frac{M_{ds, nom}}{i_{nom}}, \quad K_{ds} = \frac{M_{ds, nom}}{U_{nom}},$$

$$b = \frac{M_{ds, n} - M_{ds, nom}}{\omega_{nom}}. \quad (7)$$

здесь $\dot{\delta}_{xx}$ – скорость холостого хода, U_{bx} – напряжение, соответствующее скорости холостого хода; $M_{ds, nom}$ – номинальный момент, U_{nom} – номинальное напряжение, ω_{nom} – номинальная скорость, $M_{ds, n}$ – пусковой момент.

В случае применения редуктора и трех датчиков момента, работающих на одну ось, передаточная функция исполнительного привода запишется в виде:

$$\frac{\delta(p)p}{U_y(p)} = \frac{3c_m i / R_j}{J_y T_{ds} p^2 + J_y p + \frac{3c_m c_e i^2}{R_j}} \quad (8)$$

или с учетом того, что $3T_{ds}b i^2$ много меньше, чем J_y :

$$\frac{\delta(p)p}{U_y(p)} = \frac{3K_{ds} i}{(T_{ds} p + 1)(J_y p + 3b i^2)}, \quad (9)$$

здесь i – передаточное отношение редуктора, J_y – момент инерции при использовании в исполнительном приводе редуктора.

При расчете суммарного момента инерции момент инерции ротора каждого из датчиков момента учитывается с множителем равным передаточному отношению редуктора, возведенному в квадрат – $J_a i^2$.

Заключение. Таким образом, с целью создания «высоко моментного», компактного, быстродействующего исполнительного привода приборных систем с требуемыми техническими характеристиками и уменьшенным уровнем пульсаций по моменту в работе рассмотрен «пакетный» способ установки нескольких коллекторных датчиков момента постоянного тока на оси исполнительного механизма. Приведен вариант конструкции без редукторного исполнительного привода. Приведено математическое описание без редукторного и редукторного исполнительных приводов на примере использования трех коллекторных датчиков момента постоянного тока.

Литература

1. Распопов В.Я., Малютин Д.М. Измерительные приборы и системы для ориентации, стабилизации и управления / Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2018. – № 4. – С. 372–386.

2. Малютин Д.М., Телухин С.В., Распопов В.Я. Гиросtabilизаторы оптической аппаратуры / Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2016. – № 10. – С. 290–300.

3. Распопов В.Я., Алалуев Р.В., Иванов Ю.В., Малютин Д.М. Информационно – измерительная и управляющая система многооборотного электропривода трубопроводной арматуры / Приборы и методы измерений. – 2011. – № 2 (3). – С. 33–40.

4. Алалуев Р.В., Малютин Д.М., Плясов А.В., Распопов В.Я., Сидоров П.Г. Испытания многообо-

ротного электропривода для управления, регулирования и мониторинга запорной арматуры магистралей трубопроводного транспорта / Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2012. – № 12-1. – С. 77–88.

5. Дмитриев А.В., Кухарь В.Д., Распопов В.Я., Малютин Д.М., Рогов С.В., Родионов В.И. Электропривод для управления потоками рабочей среды. Патент на полезную модель RU112973 U1, 27.01.2012.

6. Малютин Д.М. Конструкции многооборотных электроприводов трубопроводной арматуры: учебное пособие / Тула : Изд-во ТулГУ, 2014. – 121 с.

7. Горлов В.Ф., Дмитриев В.А., Распопов В.Я. Завод и кафедра / Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2017. – № 9–2. – С. 274–284.

УДК 621.382

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДОВ СКАНИРУЮЩЕЙ ЗОНДОВОЙ ЭЛЕКТРОМЕТРИИ В ТЕХНОЛОГИЧЕСКОМ КОНТРОЛЕ ПРОИЗВОДСТВА ИЗДЕЛИЙ МИКРОЭЛЕКТРОНИКИ Жарин А.Л.¹, Петлицкий А.Н.², Пилипенко В.А.², Тявловский А.К.¹, Тявловский К.Л.¹, Гусев О.К.¹, Воробей Р.И.¹, Пантелеев К.В.¹

¹Белорусский национальный технический университет
Минск, Республика Беларусь

²ОАО «ИНТЕГРАЛ» – управляющая компания холдинга «ИНТЕГРАЛ»
Минск, Республика Беларусь

Большинство традиционных методов технологического контроля полупроводниковых пластин, используемых в производстве изделий микроэлектроники, связаны с использованием разрушающих воздействий либо требуют создания непосредственного контакта с поверхностью образца, что делает последний непригодным для дальнейшего использования в технологическом процессе. В связи с этим в таких исследованиях используются, как правило, пластины-спутники, что исключает возможность сплошного входного, а также промежуточного, контроля исходных пластин и формируемых структур. Методы зондовой электрометрии, основанные на бесконтактной регистрации поверхностного электрического потенциала (контактной разности потенциалов), выгодно отличаются отсутствием какого-либо повреждающего воздействия на поверхность образца. Реализация данных методов в режиме сканирования обеспечивает не только выявление, но и точную локализацию мест расположения дефектов поверхности. Для уточнения физической природы дефектов электрометрические измерения могут быть дополнены неразрушающими воздействиями на поверхность, в частности, освещением монохроматическим или белым светом, нагревом инфракрасным излучением и др.

В частности, различные режимы сканирующих зондовых электрометрических измерений с дополнительными неразрушающими воздей-

ствиями на поверхность полупроводниковой пластины реализованы в серии измерительных установок СКАН (СКАН-2013, СКАН-2015, СКАН-2019), созданных в НИЛ полупроводниковой техники Белорусского национального технического университета. Данные установки нашли применение при выявлении и исследовании дефектов поверхности полупроводниковых пластин в условиях реального производства.

Непосредственно регистрируемая средствами зондовой электрометрии контактная разность потенциалов (КРП) является комплексным параметром, зависящим от большого количества факторов. Вследствие этого визуализация пространственного распределения КРП, обеспечиваемая в установках серии СКАН как базовая функция, позволяет выявлять дефекты поверхности полупроводниковой пластины, но не характеризовать их физическую природу. Для анализа дефектов, связанных с изменениями длины диффузии неосновных носителей заряда (ННЗ) в кремнии измерения могут выполняться в режиме исследования поверхностной фотоЭДС на нескольких (не менее двух) длинах волн оптического излучения. Реализация данного режима в установках СКАН обеспечивает не только качественное, но и количественное определение длины диффузии ННЗ с визуализацией её пространственного распределения по всей поверхности пластины с высоким пространственным разрешением (не хуже