

лизации макроскопических дефектов, выходящих на поверхность. Обнаружено, что локальным отклонением потенциала поверхности SPV более 25 мВ соответствует локализация повышенной плотности дефектов (дислокации, микроскопления примеси).

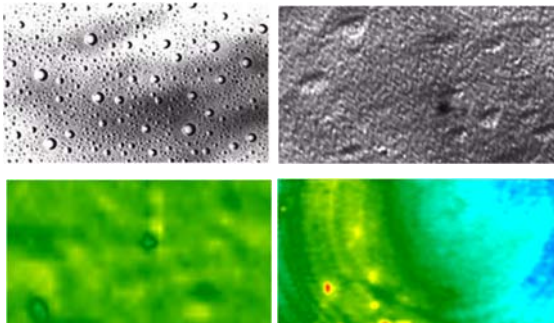


Рисунок 2 – Микроморфологии участков поверхности эпитаксиальных слоев и соответствующие им распределения поверхностной фото-ЭДС

Пространственное распределение сильно-сигнальной поверхностной фото-ЭДС, соответствующей приповерхностному изгибу энергетических зон, и распределение дефектов эпитаксиального слоя совпадают не для всех участков полупроводниковых пластин. Очевидно, это связано с тем, что локальные отклонения в распределении поверхностной фото-ЭДС от среднего обусловлены неоднородным распределением остаточных примесей из обрабатывающих растворов при подготовке пластин к эпитаксии, адсорбцией отдельных загрязняющих частиц. Эти неоднородности в распределении SPV и адсорбированных частиц не всегда связаны со структурными дефектами и не во всех случаях

приводят к генерации дефектов в эпитаксиальной пленке.

Таким образом, изменения распределения поверхностного потенциала связаны с изменениями распределения остаточных загрязнений на поверхности подложки и дефектов в подложках, наследуемых эпитаксиальными слоями.

Локальные изменения сильносигнальной поверхностной фото-ЭДС соответствуют локализации структурных неоднородностей с характерными размерами более 500 нм/

Интенсивность полос низкотемпературной люминесценции пропорциональна концентрации гетеризирующей примеси, а смещение узких полос люминесценции и их уширение соответствует величине внутренних напряжений в эпитаксиальных структурах.

### Литература

1. Пилипенко В.А., Горушко В.В., Петлицкий А.Н., Турцевич А.С., Шведов С.В. Методы и механизмы геттерирования кремниевых структур в производстве интегральных микросхем. // Технология и конструирование в производстве интегральных схем, – 2013, № 2–3. – С. 43–57.
2. Зондовые электрометрические методы для измерения удельного электрического сопротивления ионно-легированных и диффузионных слоев / А.К. Тявловский [и др.] // Приборостроение: материалы 12 между-нар. науч.-техн. конф., Минск, 13–15 ноября 2019 г. / Белорус. нац. техн. ун-т ; редкол.: О. К. Гусев (гл. ред.) [и др.]. – Минск, 2019. – С. 36–38.
3. Характеризация электрофизических свойств границы раздела кремний-двуокись кремния с использованием методов зондовой электрометрии / В.А. Пилипенко [и др.] // Приборы и методы измерений. – 2017, Т. 8, № 4. – С. 344–356.

УДК 629.7.054

## ИНЕРЦИОННЫЕ МОМЕНТЫ СИСТЕМ НАВЕДЕНИЯ И СТАБИЛИЗАЦИИ ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЯ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ

Лихошерст В.В., Родионов В.И.

ТулГУ «Тулский государственный университет»  
Тула, Российская Федерация

Современная система бортового электрооборудования летательного аппарата (ЭЛА) имеет в своем составе приборы наблюдения, которые устанавливаются на корпусе летательного аппарата (ЛА) в кардановых подвесах, позволяющих им совершать сложное угловое движение относительно корпуса ЛА. Электродвигатели (ЭД), обеспечивающие такое движение по осям карданова подвеса работают в условиях постоянно изменяющихся управляющих и возмущающих воздействий. При этом они должны преодолевать инерционные моменты, создаваемые угловыми ускорениями и скоростями наведения оси визирования (ОВ) прибора и качки ЛА.

В докладе рассматривается двухосная система слежения оптико-электронного прибора, работающая в режиме стабилизированного наведения. Такая следящая система (СС) имеет платформу, наружную рамку и ЭД карданова подвеса (рисунок 1).

На рисунке 1 приведены следующие обозначения: НП – направление полета ЛА; ЗЛВ – заданная линия визирования, связанная с объектом наблюдения;  $X_0Y_0Z_0$ ,  $X_1Y_1Z_1$ ,  $X_2Y_2Z_2$  – системы координат, связанные с ЛА, наружной рамкой и ОВ соответственно;  $\omega_{y2}, \omega_{z2}, \omega_{ly}, \omega_{lz}, \omega_{ox}, \omega_{oy}, \omega_{oz}$  – проекции абсолютных угловых скоростей

ОВ, ЗЛВ и ЛА;  $\varphi_Y, \varphi_Z, \varphi_A, \varphi_B$  – проекции пеленга ОВ и ЗЛВ;  $\alpha, \beta$  – проекции углового отклонения ОВ относительно ЗЛВ.

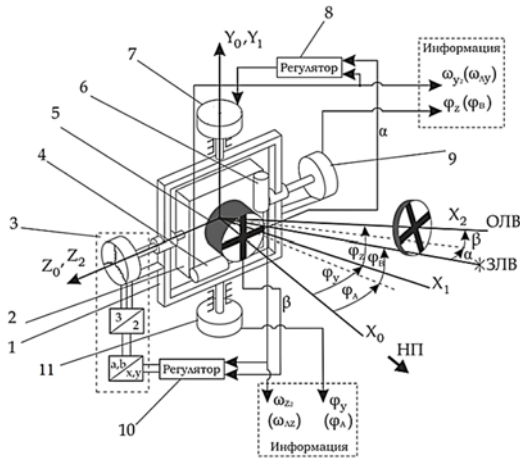


Рисунок 1 – Схема двухосной следящей системы:  
1 – наружная рамка; 2 – платформа; 3 – ЭП;  
4 – гироскоп; 5 – ОЭД; 6 – датчик угла

В настоящее время существенно повышаются требования к скоростям и точности наведения ОВ. Это приводит к усложнению методов управления и требует повышения достоверности исследования происходящих в них процессов, в частности, становится необходимым учитывать влияние переменных углов пеленга на динамические погрешности стабилизации и наведения ОВ [2]. С целью повышения точности исследования в докладе применяется метод декомпозиции, основанный на принципе «наведение-стабилизация», в котором в качестве первого приближения при оценке динамической погрешности многоосной следящей системы используются ее кинематические уравнения [3]. Для двухосной СС, приведенной на рисунке 1, кинематические уравнения имеют следующий вид:

$$\varphi_Y = \varphi_A + \frac{\alpha}{\cos \varphi_B}; \quad \varphi_Z = \varphi_B + \beta. \quad (1)$$

При такой декомпозиции динамическая модель проекций  $\alpha, \beta$  погрешности двухосной СС в первом приближении распадается на две независимые системы линейных дифференциальных уравнений по каждому каналу движения ОВ [3].

Известно, что инерционный момент, действующий вокруг оси наружной рамки имеет следующий вид [4]:

$$M_Y^{ин} = -(J_{Y1} + J_{Y2} \cos^2 \varphi_Z + J_{X2} \sin^2 \varphi_Z) \dot{\omega}_{Y2} / \cos \varphi_Z - (J_{Y1} + J_{X2}) \dot{\omega}_{X1} \operatorname{tg} \varphi_Z - (J_{X2} - J_{Z2}) \omega_{X2} \omega_{Z2} \cos \varphi_Z + (J_{Y2} - J_{Z2}) \omega_{Y2} \omega_{Z2} \sin \varphi_Z + (J_{Z1} - J_{X1}) \omega_{X1} \omega_{Z1}, \quad (2)$$

$J_{X1}, J_{Y1}, J_{X2}, J_{Y2}, \omega_{X1}, \omega_{Z1}, \omega_{X2}, \omega_{Y2}, \omega_{Z2}$  – моменты инерции и угловые скорости наружной

рамки и платформы по осям X и Y соответственно.

С учетом формул (1) выражение (2) принимает следующий вид:

$$M_Y^{ин} = -J_Y \dot{\omega}_{Y2} / \cos \varphi_B - (J_{Y1} + J_{X2}) [\dot{\omega}_\xi \sin \varphi_B + (\omega_{ЛЗ} - \omega_{ОХ} \sin \varphi_A - \omega_{ОZ} \cos \varphi_A) \omega_{ЛY} \operatorname{tg} \varphi_B / \cos \varphi_B] - (J_{Y1} + J_{X2} - J_{Z2}) \omega_\xi \omega_{ЛЗ} \cos \varphi_B + (J_{Y2} - J_{X2}) \times \omega_{ЛY} \omega_{ЛЗ} \sin \varphi_B - (J_{X1} - J_{Y1} - J_{Z1}) [\omega_{ОZ} \omega_{ОХ} \cos 2\varphi_A + 0.5(\omega_{ОZ}^2 - \omega_{ОХ}^2) \sin 2\varphi_A]. \quad (3)$$

где

$$J_Y = J_{Y1} + J_{Y2} \cos^2 \varphi_Z + J_{X2} \sin^2 \varphi_Z.$$

Здесь проекции пеленга ЗЛВ  $\varphi_A, \varphi_B$  и  $\omega_\xi$  определяются из уравнений кинематики ЗЛВ по формулам [2]:

$$\begin{aligned} \dot{\varphi}_A &= \frac{\omega_{ЛY}}{\cos \varphi_B} - \omega_{OY} + \omega_\xi \sin \varphi_B; \\ \dot{\varphi}_B &= \omega_{ЛЗ} - \omega_{OХ} \sin \varphi_A - \omega_{OZ} \cos \varphi_A; \\ \omega_\xi &= \omega_{OХ} \frac{\cos \varphi_A}{\cos \varphi_B} - \frac{\sin \varphi_A}{\cos \varphi_B} \omega_{OZ}. \end{aligned} \quad (4)$$

Решениями уравнений (4) являются углы пеленга ЗЛВ  $\varphi_A$  и  $\varphi_B$ , которые в первом приближении определяют траекторию стабилизированного наведения ОВ.

Из формулы (3) видно, что суммарный инерционный момент вокруг оси наружной рамки СС состоит из суммы следующих моментов:

$$M_Y^{ин} = M_{Л}^{ин} + M_{O}^{ин} + M_{Л}^{ин} + M_{ЛЛ}^{ин} + M_{ОЛ}^{ин},$$

где:

$$M_{Л}^{ин} = -J_Y \dot{\omega}_{Y2} / \cos \varphi_B \quad (5)$$

– инерционный момент, вызванный угловым ускорением наведения ОВ;

$$M_{O}^{ин} = -(J_{Y1} + J_{X2}) \dot{\omega}_\xi \sin \varphi_B - (J_{X1} - J_{Y1} - J_{Z1}) \times [\omega_{OZ} \omega_{OХ} \cos 2\varphi_A + 0.5(\omega_{OZ}^2 - \omega_{OХ}^2) \sin 2\varphi_A] \quad (6)$$

– инерционный момент, вызванный качкой ЛА;

$$M_{ЛЛ}^{ин} = -(J_{Y1} + J_{X2}) \operatorname{tg} \varphi_B / \cos \varphi_B + (J_{X2} - J_{Y2}) \sin \varphi_B \omega_{ЛY} \omega_{ЛЗ} \quad (7)$$

– инерционный момент, вызванный ускорением Кориолиса при совместном наведении ОВ по двум осям;

$$M_{ОЛ}^{ин} = -(J_{Y1} + J_{X2} - J_{Z2}) \omega_\xi \omega_{ЛЗ} \cos \varphi_B - (\omega_{OХ} \sin \varphi_A - \omega_{OZ} \cos \varphi_A) \omega_{ЛY} \operatorname{tg} \varphi_B / \cos \varphi_B \quad (8)$$

– инерционный момент, вызванный ускорением Кориолиса при наведении на качающемся ЛА.

Заметим, что формулы (5) – (8) справедливы для случая, когда ось вращения наружной рамки СС установлена перпендикулярно продольной оси ЛА и уравнения движения записаны относи-

тельно абсолютных угловых скоростей ОВ. Если рассматриваемой переменной СС является относительный угол пеленга ОВ  $\Phi_Y$ , то выражения (5) – (8) принимают следующий вид:

$$M_{\text{л}}^{\text{ин}} = -J_Y \ddot{\Phi}_Y$$

– инерционный момент, вызванный угловым ускорением пеленга ОВ;

$$M_{\text{о}}^{\text{ин}} = -J_{Y2} \dot{\omega}_{0Y} - (J_{X1} - J_{Y1} - J_{Z1})[\omega_{OZ} \omega_{OX} \cos 2\varphi_A + 0.5(\omega_{OZ}^2 - \omega_{OX}^2) \sin 2\varphi_A]$$

– инерционный момент, вызванный качкой ЛА.

В высокоточных СС динамические уравнения часто записывают в отклонениях ОВ от ЗЛВ. Для этих уравнений с учетом того, что  $\alpha = \omega_{Y2} - \omega_{\text{л}}$ , инерционный момент в оси вращения наружной рамки, вызванный угловым ускорением наведения, имеет вид

$$M_{\text{л}}^{\text{ин}} = -(J_{Y2} \ddot{\alpha} + \omega_{\text{л}}) / \cos \varphi_B$$

Из последних выражений видно, что угловые скорости и ускорения наведения и качки создают инерционные моменты на оси наружной рамки как непосредственно и совместным действием. Одновременно они также влияют на проекции пеленга ЗЛВ  $\Phi_A, \Phi_B$ , вызывая изменения инерционных моментов по величине.

**Выводы по работе.** В работе получены аналитические выражения для расчета инерционного момента наружной рамки двухосного карда-

нова подвеса следящей системы, работающей в режиме стабилизированного наведения на подвижном ЛА. Показано, что при угловых скоростях наведения ОВ, соизмеримых с угловыми скоростями движения ЛА в выражениях для инерционного момента наружной рамки подвеса необходимо учитывать составляющие, вызванные ускорениями Кориолиса и переменными углами пеленга ОВ.

#### Литература

1. Родионов В.И. Гироскопические системы стабилизации линии визирования оптических приборов // Изв. вузов. Приборостроение. – 2001. – Т. 44. – № 9. – С. 36–41.
2. Родионов В.И. Анализ и синтез управляемого гиросtabilизатора при переменных углах пеленга летательного аппарата // Авиакосмическое приборостроение. Вып 3. – 2005. – С. 2–6.
3. Родионов В.И. Декомпозиция и метод исследования гироскопических систем, использующих принцип «наведение-стабилизация». // Известия ТулГУ. Технические науки. Вып. 10. Тула: Изд-во ТулГУ, 2016. – С. 301–310.
4. Родионов В.И. Метод расчета инерционных моментов управляемых гиросtabilизаторов линии визирования, использующий принцип «наведение-стабилизация» // Известия ТулГУ. Технические науки. Вып. 8. – Тула: Из-во ТулГУ, 2019. – С. 210–216.
5. Лихошерст В.В., Родионов В.И. Двухосный следящий электропривод электрооборудования летательных аппаратов // Материалы докладов 12-ой Международной научно-технической конференции, Минск, Республика Беларусь, 2019. – С. 47–49.

УДК 621.396

### СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ МОБИЛЬНОЙ СОЛНЕЧНОЙ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЕЙ

Савёлов П.И., Лившиц Ю.Е.

*Белорусский национальный технический университет  
Минск, Республика Беларусь*

Применение возобновляемых источников энергии инициировало разработку устройств генерации электричества при помощи солнечной энергии различных конструктивных исполнений.

Нами ранее была разработана конструкция мобильной солнечной электростанции (МСЭ) с функцией автоматического позиционирования солнечных батарей [1]. Система управления МСЭ разработана на базе программируемого логического контроллера (ПЛК) [2].

Целью данной работы является разработка печатного узла системы управления МСЭ для минимизации энергозатрат при функционировании в автономном режиме.

Основными функциями проектируемого печатного узла являются:

– определение географического местоположение МСЭ при помощи GPS-ГЛОНАСС модуля;

– автоматическое ориентирование мобильной электростанции относительно сторон света при помощи электронного компаса;

– управление шаговыми приводами системы позиционирования солнечных батарей;

– мониторинг в реальном времени параметров окружающей среды (скорости ветра, температуры);

– осуществление коммуникации блоков МСЭ по протоколу ModbusRTU;

– обеспечение удалённого контроля состояния МСЭ.

Разработана структурная схема печатного узла системы управления (рисунок 1).

Для обеспечения функционального назначения мобильной солнечной электростанции печатный узел системы управления состоит из следующих основных элементов: микроконтроллера, модуля GPS, модуля WiFi, модуля RS485.