

**СИМУЛЯЦИОННАЯ МОДЕЛЬ СИСТЕМЫ  
АДАПТИВНОГО УПРАВЛЕНИЯ СЕГМЕНТАМИ  
СОСТАВНОГО ЗЕРКАЛА КОСМИЧЕСКОГО ТЕЛЕСКОПА  
И ЕЕ МЕТРОЛОГИЧЕСКАЯ АТТЕСТАЦИЯ**

**В.В. Сычев<sup>1</sup>**  
**А.И. Клем<sup>1,2</sup>**

viktorsychev@list.ru  
black.n.hot.ice@gmail.com

<sup>1</sup> МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация

<sup>2</sup> ПАО «Компания «Сухой» «ОКБ Сухого», Москва, Российская Федерация

---

**Аннотация**

Статья посвящена измерительной задаче идентификации неадекватности математической модели системы адаптивного управления сегментами составного зеркала крупногабаритного телескопа. Идентификация необходима для оценки достоверности указанной модели. Управление сегментами зеркала осуществляется с использованием двухосевого блока сервоприводов, построенного на основе синхронных электрических машин с постоянными магнитами. Блок сервоприводов осуществляет поворот каждого сегмента составного зеркала относительно своей оси симметрии, а также их наклон относительно центрального неподвижного опорного сегмента. Приведено общее описание структуры модели, а также обратной связи контура управления током с измерением фазных токов и преобразованиями координат. Представлены наборы исходных данных для метрологической аттестации модели. Метрологическая аттестация проведена с использованием программного обеспечения «ММК-стат М» в целях контроля эмпирических соотношений, определения диапазона применения модели, а также для обоснования ее достоверности. В процессе метрологической аттестации подтверждена достоверность модели системы управления составным зеркалом телескопа и найдена структура модели, позволяющая более точно описать измерительную задачу контроля пространственного положения объекта моделирования

**Ключевые слова**

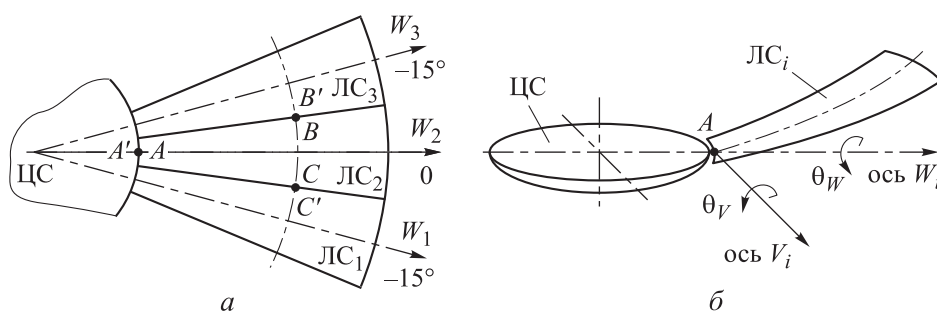
*Система адаптивного управления, синхронная машина с постоянными магнитами, симуляционная модель, метрологическая аттестация, погрешность неадекватности*

Поступила 04.04.2020

Принята 16.04.2020

© Автор(ы), 2021

**Введение.** Перспектива исследования глубокого космоса связана с созданием космических телескопов, ключевым элементом которых является крупногабаритное (диаметром 10...12 м) составное главное зеркало. При создании крупногабаритного космического телескопа, кроме ограничений конструктивного и технологического характера, существуют проблемы обеспечения высокоточного измерения и контроля пространственного положения сегментов составного главного зеркала. Представлена реализованная в среде *MATLAB Simulink* математическая модель прецизионной системы адаптивного управления пространственным положением сегментов составного 10-метрового зеркала телескопа на примере трех соседних лепестковых сегментов (рис. 1, а). Кинематика лепестковых сегментов задается вращением относительно осей  $W$  и  $V$  на углы  $\theta_W$  и  $\theta_V$  соответственно (рис. 1, б) [1]. Схема контроля лепестковых сегментов по взаимному углу наклона в опорных точках  $AA'$ ,  $BB'$  и  $CC'$  позволит получить предельно возможный объем информации из космоса за счет улучшения качества получаемого телескопом изображения.



**Рис. 1.** Схемы расположения центрального (ЦС) и лепестковых (ЛС<sub>*i*</sub>) сегментов составного зеркала телескопа (а) и поворотных осей  $W_i$ ,  $V_i$  указанных сегментов (б),  $i = 1, 2, 3$

Рассмотрена метрологическая аттестация математического обеспечения указанной выше модели в соответствии с действующим в Российской Федерации стандартом Р 50.2.004 2000\* для идентификации погрешностей, вносимых в результаты решения измерительной задачи контроля положения сегментов составного зеркала. Для структурно-параметрической идентификации модели предварительно рассматривается общая структура

\* Р 50.2.004 2000. Определение характеристик математических моделей зависимостей между физическими величинами при решении измерительных задач. Государственная система обеспечения единства измерений. М., Госстандарт России, 2000, 12 с.

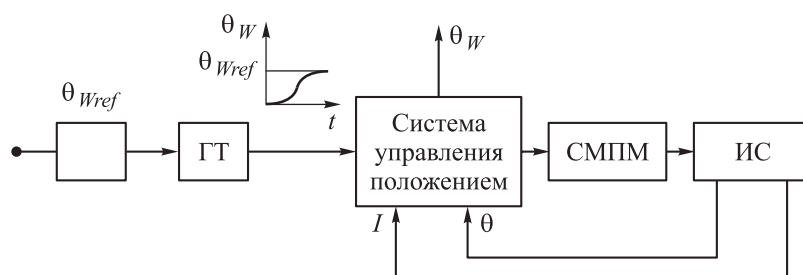
модели объекта измерений, в которой моделируется отработка сервоприводами углового положения лепестков главного зеркала  $\theta_W$ ,  $\theta_V$  (см. рис. 1). В блоке сервоприводов используются синхронные машины с возбуждением от постоянных магнитов на роторе (СМПМ). Достоинствами СМПМ, согласно [2], являются меньшие габариты, больший КПД, более простое управление по сравнению с асинхронными машинами. Управление СМПМ подразумевает отдельный контроль электромагнитного поля и момента вращения вала ротора посредством управления вектором статорного тока  $\bar{I}_S$  в проекциях на оси системы координат  $Odq$ , привязанной к положению ротора электродвигателя и вращающейся синхронно с потоком ротора. Удобство работы в такой системе координат связано с жестким закреплением постоянных магнитов на роторе электродвигателя.

Синхронные машины с возбуждением от постоянных магнитов на роторе широко используют в прецизионном станкостроении. В аттестуемой математической модели реализован передовой опыт по совершенствованию структуры и алгоритмов системы управления блока сервоприводов в новом, астрофизическом приложении, а именно для достижения прецизионной точности пространственного положения сегментов составного главного зеркала телескопа. Возрастающий интерес к проблеме измерения и контроля пространственного положения сегментов многоэлементных составных зеркал, все более востребованных при создании наземных и космических супертелескопов, делает актуальными работы исследователей в части разработки алгоритмов и математических моделей систем управления такими зеркалами [3–5].

Существующие методы контроля пространственного положения сегментов телескопа, основанные на избыточной информации об их пространственном положении, а также на методах фазовой коррекции на вторичном зеркале оптической системы, имеют недостаточные для исследуемого космического телескопа пределы точности и помехоустойчивость. В частности, к неработоспособным в условиях действия помеховых сигналов можно отнести получившие широкое распространение интерференционные методы контроля. С увеличением диаметра главного зеркала ввиду опережающего роста влияния помеховых факторов вклад фазовой коррекции на выходном зрачке оптической системы снижается. Методы фазирования хорошо работают с искажениями первого и второго порядков, однако для аббераций высших порядков они менее эффективны. Вместо традиционной обработки избыточных данных о положении каждого сегмента, приводящей к появлению дополнительных погрешностей в бюджете по-

грешностей телескопа, в рассматриваемой математической модели предложено контролировать и поддерживать заданное исходной юстировкой нулевое взаимное угловое рассогласование сегментов в опорных зонах  $AA'$ ,  $BB'$  и  $CC'$ , в которых размещаются стыковочные датчики (см. рис. 1, а).

**Общие сведения о модели системы адаптивного управления сегментами составного зеркала.** Рассмотрим задачи раскрытия лепестковых сегментов составного главного зеркала (см. рис. 1) из транспортного положения в рабочее и поддержания заданного положения раскрытого зеркала космического телескопа. Обобщенная схема системы управления сегментами составного зеркала телескопа приведена на рис. 2.



**Рис. 2.** Обобщенная схема системы управления сегментами составного зеркала телескопа для оси  $W$  (для оси  $V$  схема аналогична; управление сегментами синхронизировано по осям  $W$  и  $V$ ):

$\theta_{Wref}$  — заданное скачкообразное целевое угловое положение сегмента; ГТ — генератор траекторий; ИС — измерительная система;  $I$  — ток обратной связи системы управления;  $\theta$  — угол поворота ротора, определяющий его пространственное положение;  $\theta_W$  — выходное значение углового положения сегмента

Для раскрытия и дальнейшего поддержания заданного положения сегмента составного зеркала на вход генератора траекторий скачком подается задание его углового положения  $\theta_{Wref}$  по оси  $W$  ( $\theta_{Vref}$  по оси  $V$ ). Генератор траекторий сглаживает введенное задание углового положения сегмента и передает параметры сгенерированной траектории для отработки системе управления положением прецизионного вращающегося сервопривода. В модели рассмотрен блок двухосевого сервопривода с параметрами неявнополюсной трехфазной СМПМ *TMRIGF-WC* [1]. Блок сервоприводов с двумя поворотными осями реализован, например, в приводе *HIWIN RAB-500* [6], показанном на рис. 3.

Система управления прецизионного сервопривода с пропорционально-интегрально-дифференцирующим регулятором положения реализует динамическую модель ослабления поля СМПМ для формирования прямых программных связей по напряжению [7–10]. В модели использован

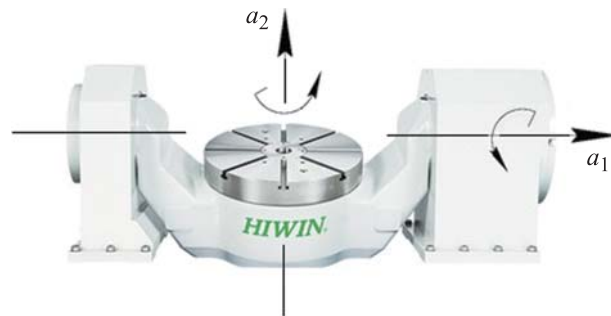


Рис. 3. Блок сервоприводов HIWIN RAB-500 с поворотными осями  $a_1$ ,  $a_2$

принцип управления током на основе алгоритма параллельной обработки вычислений и сокращения времени задержки для управления перемещениями сервопривода [11]. Такой принцип обеспечивает высокое быстродействие и производительность системы управления для реализации прецизионности перемещений сервопривода в режиме реального времени. Измерительная система тока с координатными преобразованиями и системой фазовой автоподстройки частоты формирует обратные связи по токам  $I_d$ ,  $I_q$  в системе координат ротора  $Odq$  и по положению СМППМ  $\theta$ .

**Структура системы управления током сервопривода на постоянных магнитах.** Управление током СМППМ реализовано в системе управления положением сервопривода. Обобщенная структура системы управления током СМППМ приведена на рис. 4.

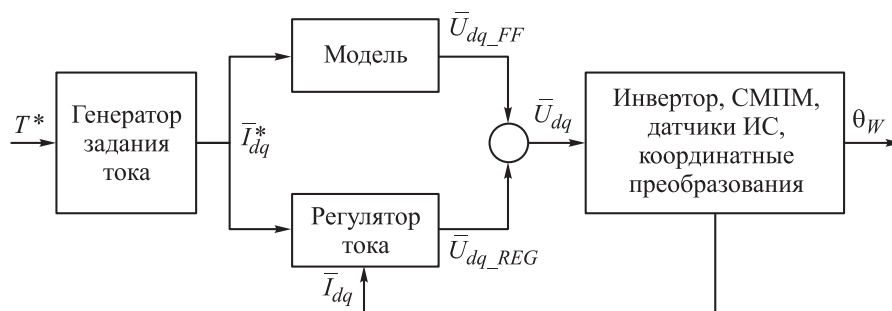


Рис. 4. Обобщенная структура системы управления током СМППМ для оси  $W$  сегментов (для оси  $V$  схема аналогична; управление сегментами синхронизировано по осям  $W$ ,  $V$ ):

$T^*$  — заданный крутящий момент СМППМ;  $\bar{I}_{dq}^*$  — заданный вектор тока в системе координат ротора  $Odq$ ;  $\bar{I}_{dq}$  — вектор тока обратной связи внутреннего контура системы управления;  $\bar{U}_{dq\_FF}$  — вектор прямой программной связи по напряжению;  $\bar{U}_{dq\_REG}$  — вектор коррекции задания напряжения от обратной связи системы управления;  $\bar{U}_{dq}$  — результирующий вектор напряжения, подаваемого на СМППМ

Во внутренний контур системы управления током из внешнего контура системы управления положением прецизионного сервопривода [1] подаются значения крутящего момента СМПМ  $T^*$ , которые преобразуются генератором задания тока в вектор тока  $\bar{I}_{dq}^*$  в проекциях на оси системы координат  $Odq$  ротора синхронного вентильного двигателя сервопривода. Заложенная в системе управления током модель формирует прямую программную связь по напряжению вектором  $\bar{U}_{dq\_FF}$ , компенсирующим перекрестные связи и противоЭДС движения. В регуляторе тока проводится сопоставление значений вектора  $\bar{I}_{dq}^*$  и вектора тока обратной связи внутреннего контура системы управления  $\bar{I}_{dq}$ , расчет и выдача вектора коррекции задания напряжения от обратной связи системы управления  $\bar{U}_{dq\_REG}$ . Такая коррекция напряжения добавляется к прямой программной связи по напряжению  $\bar{U}_{dq\_FF}$ , образуя результирующий вектор подаваемого на СМПМ напряжения  $\bar{U}_{dq}$ . Таким образом, компенсируются погрешности динамической модели.

Динамическую модель системы управления током СМПМ, формирующую вектор прямой программной связи по напряжению  $\bar{U}_{dq\_FF}$  в системе координат  $Odq$ , можно описать выражениями

$$U_{d\_FF} = I_d^* R + L \frac{dI_q^*}{dt} - \omega L I_q^*;$$

$$U_{q\_FF} = I_d^* R + L \frac{dI_q^*}{dt} + \omega (L I_d^* + \Psi_M),$$

где  $U_{d\_FF}$ ,  $U_{q\_FF}$  — проекции вектора  $\bar{U}_{dq\_FF}$  на оси  $d, q$  в системе координат ротора;  $R, L$  — сопротивления и индуктивности статора в осях системы координат  $Odq$  ротора СМПМ;  $\omega$  — угловая скорость вращения ротора;  $\Psi_M$  — потокосцепление в воздушном зазоре СМПМ.

**Методика измерения силы тока обратной связи и определения времени задержки системы управления током сервопривода на постоянных магнитах.** Передаточная функция системы управления током СМПМ:

$$W_p(p) = \frac{1/R_p}{1 + (L_p/R_p)p} e^{-pT_{\Sigma i}}.$$

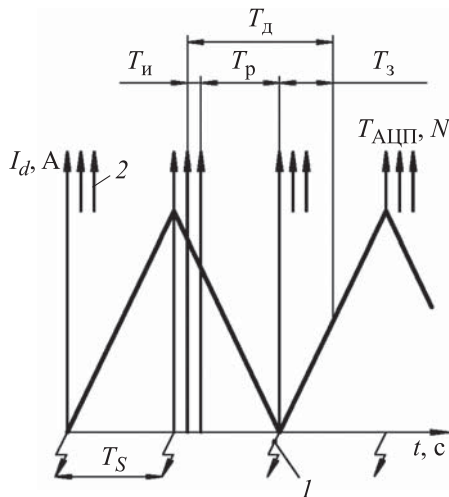
Здесь  $R_p, L_p$  — сопротивление и индуктивность статорной обмотки СМПМ;  $T_{\Sigma i}$  — время задержки контура управления током,

$$T_{\Sigma i} = T_{\Phi} + T_{\Delta} = T_{\Phi} + T_{и} + T_{р} + T_{з}, \quad (1)$$

где  $T_{\Phi}$ ,  $T_{\Delta}$ ,  $T_{и}$ ,  $T_{р}$ ,  $T_{з}$  — время задержки аналоговых фильтров, дискретной обработки тока, измерения тока, расчета нового задания тока и задержки широтно-импульсной модуляции соответственно.

Время задержки контура управления током зависит от методики его измерения. В модели использован алгоритм измерения тока с треугольным опорным сигналом, рассмотренный в [12].

Измерения вектора тока обратной связи  $\bar{I}_{dq}$  в системе координат  $Odq$  проводят с периодичностью  $T_s$  дважды за каждый период широтно-импульсной модуляции. Применение широтно-импульсной модуляции в векторном управлении электродвигателя описано в [13]. Поясняющая схема методики измерения тока обратной связи на примере тока  $I_d$  в системе координат  $Odq$  приведена на рис. 5.



**Рис. 5.** Поясняющая схема методики измерения тока обратной связи на примере тока  $I_d$  в системе координат  $Odq$ :  
1 — начало очередного измерения;  
2 — единичное измерение тока в составе серии из  $N$  измерений

Начало измерений соответствует пикам треугольного опорного сигнала. Для повышения точности измерения проводят серийно для нескольких последовательных токов с дальнейшим усреднением полученных в ходе измерений значений токов. Таким образом, время  $T_{и}$  для серии из  $N$  измерений с периодом дискретизации аналого-цифрового преобразователя (АЦП)  $T_{АЦП}$  определяется как

$$T_{и} = (N - 1)T_{АЦП}/2. \quad (2)$$

Задание напряжения обновляется через интервал времени  $T_s$  после начала преобразования АЦП, при этом

$$T_{р} = T_s - 2T_{и}. \quad (3)$$

Новые эталонные значения вычисляются с дополнительной задержкой

$$T_3 = 0,5T_S. \quad (4)$$

Выражение (1) с учетом (2)–(4) принимает вид

$$T_{\Sigma i} = T_{\Phi} + 1,5T_S - (N - 1)T_{\text{АЦП}}/2.$$

Во внутреннем контуре модели системы адаптивного управления составного зеркала обратная связь по токам реализована с помощью 16-канального АЦП. Измерения тока проводят сериями по  $N = 8$  раз с периодом дискретизации  $T_{\text{АЦП}} = 1,5 \cdot 10^{-6}$  с. После усреднения значений токов по серии измерений получается значение тока одной фазы. Таким образом, из трех фазных токов измеряют токи  $I_A, I_B$  фаз  $A, B$ . Ток  $I_C$  третьей фазы  $C$  рассчитывают по измеренным токам двух указанных фаз по первому закону Кирхгофа.

В симуляционной модели системы адаптивного управления сегментами составного главного зеркала [1] в процессе измерения токов фаз  $I_A, I_B$  в целях имитации реальных погрешностей аналоговой части измерительной системы тока, а также погрешностей аналого-цифрового преобразования в сигнал обратной связи вводится белый гауссов шум с дискретным временем, имеющий нулевое математическое ожидание. Дисперсия шума

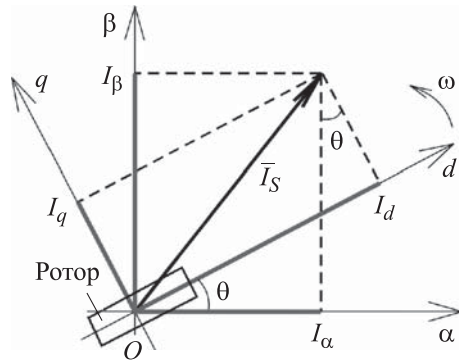
$$\sigma = \left( \frac{I_{\text{дат max}}}{2^{K_{\text{АЦП}} - M}} \right)^2,$$

где  $I_{\text{дат max}}$  — максимальное значение тока для датчика (в модели 500 А);  $K_{\text{АЦП}}$  — число бит АЦП датчика (32 бит);  $M$  — число шумящих младших бит обратной связи системы управления током (2 бит).

**Преобразования координат фазовых токов.** Для корректной работы СМПИМ в режиме вентильного двигателя необходима информация об угловом положении ротора относительно статора без использования отдельного датчика углового положения. Эту информацию получают косвенно по наблюдаемым координатам положения СМПИМ, а также по мгновенным значениям фазных напряжений и токов. В частности, наблюдателем отслеживаются значения потокосцепления статорной обмотки в неподвижной системе координат  $O\alpha\beta$ . Удобство такой системы координат заключается в простоте выражения в ней дифференциальных уравнений, описывающих СМПИМ.

По данным измеренных токов  $I_A, I_B$  и восстановленного тока  $I_C$  в реальном времени выполняется переход от неподвижной системы координат  $O\alpha\beta$  статора СМПИМ к подвижной системе координат  $Odq$  ротора





**Рис. 6.** Схема преобразования результирующего вектора тока статора  $\bar{I}_S$  из обобщенной двухфазной системы координат  $O\alpha\beta$  статора в подвижную систему координат  $Odq$  ротора:

$I_\alpha, I_\beta, I_d, I_q$  — проекции вектора тока статора  $\bar{I}_S$  на оси  $\alpha, \beta, d, q$

СМПМ. Преобразование результирующего вектора тока статора  $\bar{I}_S$  в подвижную систему координат  $Odq$  показано на рис. 6.

Для перехода от неподвижной системы координат статора к подвижной системе координат ротора используется преобразование Кларка вектора тока статора  $\bar{I}_S$  при переходе от реальной трехфазной системы координат  $OABC$  в обобщенную двухфазную  $O\alpha\beta$  с последующим преобразованием Парка при переходе к системе координат  $Odq$  ротора [23]:

$$\begin{aligned} I_\alpha &= I_A, \\ I_\beta &= (2I_B + I_A)/\sqrt{3}; \\ I_d &= I_\alpha \cos(p\theta) + I_\beta \sin(p\theta), \\ I_q &= -I_\alpha \sin(p\theta) + I_\beta \cos(p\theta). \end{aligned}$$

Здесь  $p$  — число пар полюсов СМПМ.

Регулятор тока, работающий во вращающейся со скоростью  $\omega$  системе координат  $Odq$ , использует данные обратной связи: измеренные и преобразованные в систему координат  $Odq$  значения проекций вектора тока статора  $I_d$  и  $I_q$ . Регулятор тока формирует в системе координат  $Odq$  вектор напряжения статора  $\bar{U}_S$ , который преобразуется в неподвижную систему координат статора обратным преобразованием Кларка — Парка и затем реализуется с использованием инвертора широтно-импульсной модуляцией. Для координатных преобразований необходимы значения угла поворота системы координат  $Odq$  ротора, равные углу поворота ротора  $\theta$ .

В симуляционной модели [1] наблюдатель определяет электрический угол поворота ротора СМПМ  $\theta$  посредством следящего контура фазовой автоподстройки частоты. Этот контур осуществляет подстройку фазы собственного управляемого генератора до ее совпадения с фазой  $\varphi$  входных сигналов фазовых токов  $I_A, I_B$ . Наблюдатель электрического угла поворота ротора СМПМ, состоящий из вычислителя проекций вектора

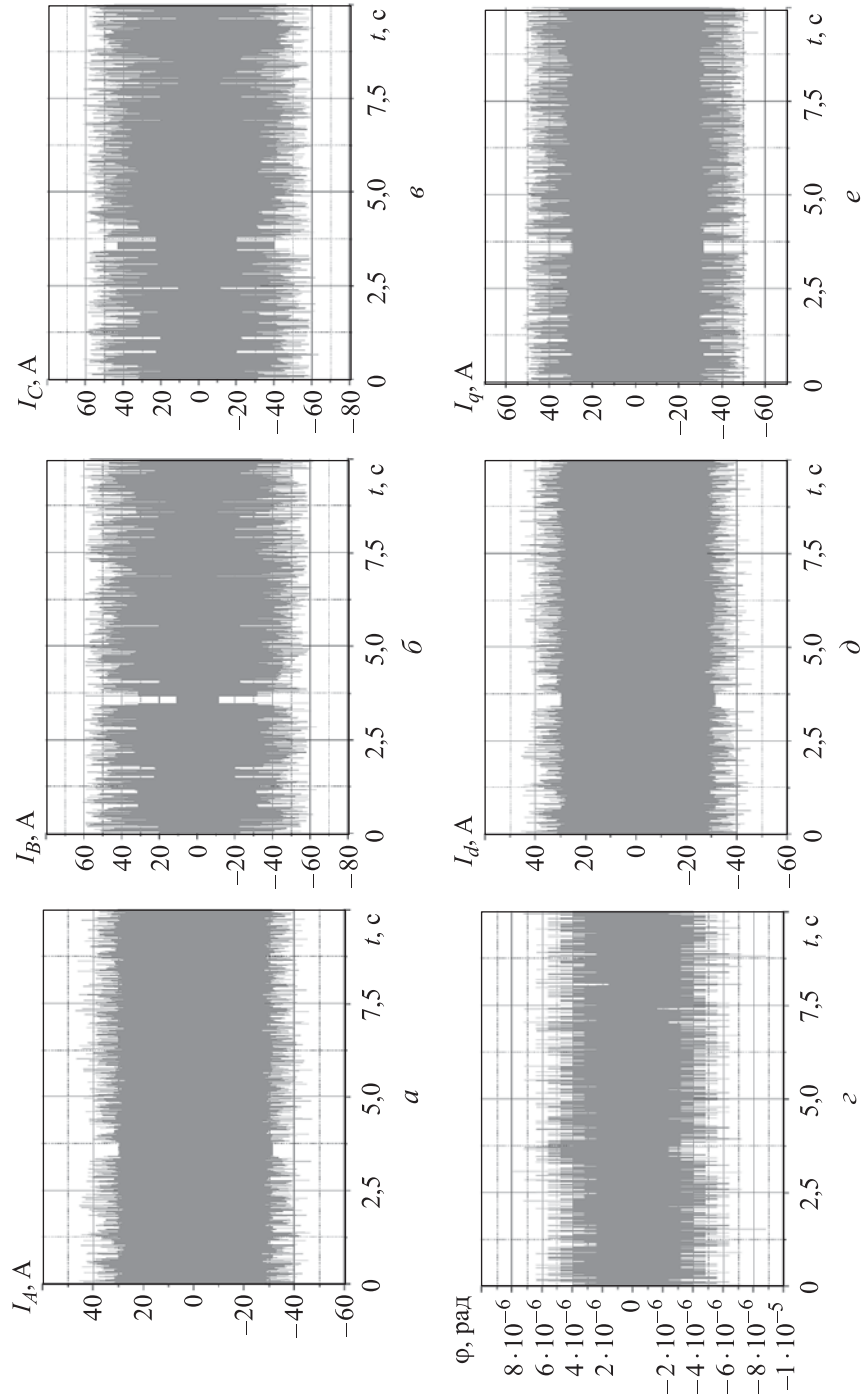
потокоцепления на оси неподвижной системы координат  $O\alpha\beta$  и следящего контура, сопровождающего этот вектор по фазе, описан в [14].

Полученные в симуляционной модели [1] фрагменты таких осциллограмм, как фазовые токи  $I_A$ ,  $I_B$ ,  $I_C$  в неподвижной системе координат  $O\alpha\beta$ , значения фазы  $\varphi$ , проекции результирующего вектора тока статора  $\bar{I}_S$  в системе координат  $Odq$  ротора ( $I_d$ ,  $I_q$ ) длительностью 10 с приведены на рис. 7. Данные представлены для режима поддержания сегментов составного главного зеркала после отработки системой скачка задания положения.

**Идентификация погрешностей математической модели системы адаптивного управления сегментами зеркала.** Проверка правильности постановки измерительной задачи связана с оценкой погрешности математической модели объекта измерений. Согласно Р 50.2.004 2000, эта погрешность может быть оценена разностью расчетного значения выходной величины как переменной математической модели объекта измерений и результата ее измерения в соответствующих расчету условиях. Для целей идентификации погрешностей, вносимых математической моделью в результаты решения измерительных задач, погрешность неадекватности модели интерпретируется как погрешность предсказания возможных значений ее выходной переменной [15].

Согласно [16], погрешности неадекватности моделей подразделяются по источникам их возникновения на структурные погрешности идентификации модели и реализации вычислительной схемы; параметрические погрешности аппроксимации моделью данных совместных измерений функционально связанных величин; размерностные погрешности данных, использованных для идентификации модели.

Идентификация модели объекта измерений осуществляется в схеме перекрестного наблюдения погрешностей неадекватности: точность математической модели проверяется на основе данных измерений ее переменных, не использованных при построении модели. Задача структурно-параметрической идентификации погрешностей решается подбором комбинации параметров модели, при которой погрешность неадекватности минимальна. Алгоритмы и критерии структурно-параметрической идентификации погрешностей неадекватности математических моделей объектов измерений описаны в Р 50.2.004 2000. Параметры модели определяют по пробной части данных, а погрешности модели — по контрольной части с их последующим чередованием и объединением полученных результатов. Таким образом реализуется метод максимума компактности (ММК) идентификации интерпретирующих моделей объектов измерений.



**Рис. 7.** Полученные в симуляционной модели [1] осциллограммы: фазовые токи: *a* —  $I_A$ ; *б* —  $I_B$ ; *в* —  $I_C$ ; *г* — фаза  $\varphi$ ; *д* — ток  $I_d$ ; *е* — ток  $I_q$

**Результаты метрологической аттестации рассматриваемой математической модели.** Метрологическая аттестация математической модели системы адаптивного управления сегментами составного зеркала проведена с использованием программного обеспечения «ММК-стат М» (Р 50.2.004 2000) на основе обобщения критерия Колмогорова и схемы перекрестного наблюдения погрешности неадекватности. Искомая измеряемая величина  $Y$  находится через  $N$  величин  $X_1, X_2, \dots, X_N$ . Для определения структуры модели в программу вводят значения входных и соответствующих им выходных параметров. Затем программное обеспечение подбирает комбинацию параметров, обеспечивающую наименьшую погрешность неадекватности. Для получения наборов исходных данных смоделировано 15 заданий положения раскрытия сегментов составного зеркала с отработкой моделью каждого раскрытия в течение  $10^{-3}$  с. Раскрытие проводится синхронно и независимо по осям  $W, V$ . Входными параметрами математической модели относительно оси  $W$  лепесткового сегмента (для оси  $V$  аналогично) являются заданное скачкообразное целевое угловое положение сегмента  $\theta_{Wref}$  составного зеркала; текущее время отработки указанного скачкообразного углового положения, зависящее от параметров генерации траектории  $t$ ; данные по шумам для токов в проекциях на оси системы координат  $Odq$  ротора  $I_{dW}$  и  $I_{qW}$ .

Выходной параметр — смоделированное в ходе раскрытия составного зеркала телескопа угловое положение лепесткового сегмента  $\theta_W$ .

Выборка вариантов для структурно-параметрической идентификации модели с округлением до трех знаков после запятой приведена в табл. 1.

С использованием приведенных данных путем структурной идентификации рассматриваемой модели методом наименьших модулей (ММКМНМ) найдены комбинации параметров модели, дающие наименьшие значения погрешностей неадекватности с первой и второй степенями полинома интерпретирующей регрессионной модели в качестве старших.

Согласно Р 50.2.004 2000 и [15, 16], расчетными характеристиками в процессе метрологической аттестации являются:

- средний модуль погрешности неадекватности (СМПН), характеризующий качество исследуемой модели в оценке точности интерпретирующей модели;
- средний модуль случайной составляющей погрешности неадекватности (среднее алгебраическое отклонение от модели, САО);
- модуль разности СМПН и САО — средний модуль невязки (СМН) — характеристика систематической погрешности измерения.

Таблица 1

## Выборка вариантов для структурно-параметрической идентификации модели

Номер	$\theta_{Wref} \cdot 10$ , рад	$t \cdot 10^4$ , с	$I_{dW} \cdot 10^7$ , А	$I_{qW} \cdot 10^7$ , А	$I_{dV} \cdot 10^7$ , А	$I_{qV} \cdot 10^7$ , А	$\theta_{W} \cdot 10$ , рад	$\theta_{V} \cdot 10$ , рад
	$x_1$	$x_2$	$x_3$	$x_4$	$x_5$	$x_6$	$y_W(x_1, x_2, x_3, x_4)$	$y_V(x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6)$
1	0,524	5	-2,597	3,174	-3,604	2,849	0,524	6,92
2	0,873	7,5	4,721	8,448	-2,38	-0,178	0,873	7,269
3	1,396	2,5	-1,143	-4,722	2,641	-0,516	1,396	7,793
4	1,745	8	-2,061	-7,972	-1,189	1,943	1,745	8,142
5	2,094	1,5	-1,23	0,644	5,11	1,542	2,094	8,491
6	2,618	6,5	-3,861	-2,386	1,12	1,864	2,618	9,015
7	3,142	2,5	-2,517	3,867	6,324	-2,367	3,142	9,538
8	3,491	9	-3,704	5,922	8,027	0,554	3,491	9,887
9	3,84	3	-1,625	-3,838	2,406	11,225	3,84	10,237
10	4,363	7,5	4,636	2,0978	7,42	4,818	4,363	10,76
11	4,887	1	-1,367	9,455	7,488	-4,289	4,887	11,284
12	5,236	4,5	-2,66	-2,284	-10,407	9,788	5,236	11,633
13	5,76	2,5	-3,263	-3,167	-5,19	-9,118	5,76	12,156
14	6,109	9	-2,67	-1,144	-12,902	0,792	6,109	12,506
15	6,632	1,5	1,43	-3,818	0,575	1,21	6,632	13,029

Следовательно, для оси  $W$  идентификация МНМ с первой и второй старшей степенью интерпретирующей модели позволила получить модели:

$$\bar{y}_W \text{ ммкмнм} (x_1, x_2, x_3, x_4) = 0,99999738x_1, \text{ СМПН} = 8,9729826 \cdot 10^{-7}. \quad (5)$$

$$\begin{aligned} \bar{y}_W \text{ ммкмнм} (x_1, x_2, x_3, x_4) = \\ = 1,0000075x_1 - 0,016528936x_2 - 20,54221x_3 + 15,8904x_2^2 - \\ - 13121489x_3^2 + 39,336678x_1x_3 + 3374,0215x_2x_3 - \\ - 220902,97x_4^2 + 3763,9929x_2x_4 + \\ + 24441578x_3x_4, \text{ СМПН} = 3,6830704 \cdot 10^{-7}. \end{aligned} \quad (6)$$

Аналогично для оси  $V$  получены модели:

$$\begin{aligned} \bar{y}_V \text{ ммкмнм} (x_1, x_2, x_5, x_6) = 0,63968271 + 0,99999517x_1, \\ \text{СМПН} = 1,6132991 \cdot 10^{-6}. \end{aligned} \quad (7)$$

$$\begin{aligned} \bar{y}_V \text{ ммкмнм} (x_1, x_2, x_5, x_6) = \\ = 0,63967848 + 1,0000111x_1 - 0,010611637x_2 - 2,4852116x_3 + \\ + 6,521368x_2^2 - 5,1560828x_1^2 - 10,68204x_2^2 - 245931,09x_3^2 - \\ - 2,2704346x_1x_3 + 2484,7795x_2x_3 - 5052659,5x_4^2 - 19131,35x_2x_4, \\ \text{СМПН} = 1,390775 \cdot 10^{-7}. \end{aligned} \quad (8)$$

Результаты метрологической аттестации математической модели приведены в табл. 2.

Таблица 2

**Результаты метрологической аттестации математической модели**

Характеристика	$\bar{y}_W \text{ ммкмнм} (x_1, x_2, x_3, x_4)$		$\bar{y}_V \text{ ммкмнм} (x_1, x_2, x_5, x_6)$	
	1	2	1	2
СМПН · 10 <sup>7</sup>	8,9729826	3,6830704	16,132991	1,390775
САО · 10 <sup>7</sup>	8,8637074	3,2906732	16,411145	1,2715658
СМН · 10 <sup>7</sup>	0,1092752	0,3923972	0,278154	0,1192092

Здесь 1, 2 — старшие степени.

Согласно данным, приведенным в табл. 2, расчетные значения, характеризующие погрешности неадекватности аттестуемой модели, являются малыми величинами. Поэтому нет необходимости усложнять интерпретирующую модель путем увеличения ее старшей степени. Малые значения погрешностей неадекватности модели свидетельствуют о высокой достоверности аттестуемой модели.

**Заключение.** Результаты анализа идентификации математической модели системы адаптивного управления составным главным зеркалом телескопа в программном обеспечении «ММК-стат М» позволяют сделать следующие выводы.

Рассмотренная математическая модель обладает высокой достоверностью, что подтверждается малыми значениями расчетных характеристик погрешности неадекватности модели.

Для старшей степени 1 интерпретирующей модели осей  $W$  (5) и  $V$  (7) закономерна и физически обоснована зависимость угловых положений  $\theta_W$  и  $\theta_V$  сегментов составного зеркала лишь от скачкообразного целевого углового положения сегментов  $\theta_{Wref}$  и  $\theta_{Vref}$ . Наличие и величина свободного члена в интерпретирующей модели (7) соответствует смещению оси  $V$  относительно оси  $W$ , заданному в аттестуемой линеаризованной модели.

Интерпретирующая модель старшей степени 2 для осей  $W$  (6) и  $V$  (8) имеет более точную с позиции систематической погрешности формулу. Однако с повышением точности формулы неоправданно возрастает сложность модели.

### Благодарности

Авторы выражают благодарность д-ру техн. наук, профессору, заведующему кафедрой «Метрология и метрологическое обеспечение» ФГБОУ ДПО «МИЭИ» С.Ф. Левину за ценные замечания по содержанию рукописи статьи, а также студентке магистратуры кафедры автоматизированного электропривода НИУ МЭИ Е.К. Самыгиной за помощь при подготовке рукописи статьи.

### ЛИТЕРАТУРА

- [1] Самыгина Е.К., Клем А.И. Численное моделирование системы адаптивного управления составного главного зеркала крупногабаритного космического телескопа. *Оптика атмосферы и океана*, 2019, т. 32, № 4, с. 317–323. DOI: <http://dx.doi.org/10.15372/AOO20190410>
- [2] Калачев Ю.Н. Векторное регулирование (заметки практика). М., ЭФО, 2013.
- [3] Демин А.В. Математическая модель процесса юстировки составных зеркал. *Известия высших учебных заведений. Приборостроение*, 2015, т. 58, № 11, с. 901–907. DOI: <https://doi.org/10.17586/0021-3454-2015-58-11-901-907>
- [4] Демин А.В., Ростокин П.В. Алгоритм юстировки составных зеркал. *Компьютерная оптика*, 2017, т. 41, № 2, с. 291–294. DOI: <https://doi.org/10.18287/2412-6179-2017-41-2-291-294>
- [5] Дубрович В.К., Заика Д.Ю., Качурин В.К. и др. Моделирование процесса адаптации космического телескопа «Миллиметрон». *Информация и Космос*, 2017, № 4, с. 39–43.

- [6] Dreh- und Schwenkrundtische. *directindustry.de: веб-сайт*.  
<https://pdf.directindustry.de/pdf/hiwin-gmbh/dreh-schwenkrundtische/14370-835949.html> (дата обращения 15.01.2018).
- [7] Samygina E.K. Enhancement of servodrive control system for exact tracking in the extended speed range. *2018 X International Conference on Electrical Power Drive Systems (ICEPDS)*, Novocherkassk, 2018, pp. 1–4.  
DOI: <https://doi.org/10.1109/ICEPDS.2018.8571515>
- [8] Wang J., Wu J., Gan C., et al. Comparative study of flux-weakening control methods for PMSM drive over wide speed range. *2016 19th International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS)*, Chiba, 2016, pp. 1–6.  
URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/7837218>
- [9] Заботин А.В. Повышение эксплуатационных характеристик прецизионного диагностического сервопривода. *Наука. Технология. Производство–2016. Мат. Всерос. науч.-техн. конф.* Уфа, УГНТУ, 2016, с. 110–114.
- [10] Rassudov L.N., Balkovoi A.P. Dynamic model exact tracking control of a permanent magnet synchronous motor. *2015 International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON)*, Omsk, 2015.  
DOI: <https://doi.org/10.1109/SIBCON.2015.7147187>
- [11] Rassudov L.N., Balkovoi A.P. FPGA-based broadband current control for a servodrive. *Proc. 2016 IEEE NW Russia Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering Conference (EIconRusNW)*, St. Petersburg, 2016, pp. 664–667.  
DOI: <https://doi.org/10.1109/EIconRusNW.2016.7448270>
- [12] Samygina E.K., Tiapkin M., Rassudov L.N., et al. Extended algorithm of electrical parameters identification via frequency response analysis. *2019 26th International Workshop on Electric Drives: Improvement in Efficiency of Electric Drives (IWED)*, Moscow, Russia, 2019, pp. 1–4. DOI: <https://doi.org/10.1109/IWED.2019.8664340>
- [13] Шпак Д.М. Разработка и исследование системы управления высокоскоростных шпинделей станков на базе асинхронных и синхронных электродвигателей. Дис. ... канд. техн. наук. М., МЭИ, 2019.
- [14] Клиначев Н.В., Кулева Н.Ю., Воронин С.Г. Определение углового положения ротора синхронного двигателя с возбуждением от постоянных магнитов. *Вестник ЮУрГУ. Серия Энергетика*, 2014, т. 14, № 2, с. 49–54.
- [15] Левин С.Ф. Руководство по выражению неопределенности измерения: проблемы, нереализованные возможности и ревизия. Ч. 2. Вероятностно-статистические проблемы. *Измерительная техника*, 2018, № 4, с. 7–12.  
DOI: <https://doi.org/10.32446/0368-1025it.2018-4-7-12>
- [16] Левин С.Ф. Метрологическая аттестация программного обеспечения методик решения измерительных задач: теория и практика. *Системы обработки информации*, 2008, № 4 (71), с. 117–125.



**Сычев Виктор Васильевич** — д-р техн. наук, профессор кафедры «Метрология и взаимозаменяемость» МГТУ им. Н.Э. Баумана (Российская Федерация, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1).

**Клем Андрей Иванович** — аспирант кафедры «Метрология и взаимозаменяемость» МГТУ им. Н.Э. Баумана (Российская Федерация, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1); инженер-конструктор ПАО «Компания «Сухой» «ОКБ Сухого» (Российская Федерация, 125284, Москва, ул. Поликарпова, д. 23Б, а/я 604).

**Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:**

Сычев В.В., Клем А.И. Симуляционная модель системы адаптивного управления сегментами составного зеркала космического телескопа и ее метрологическая аттестация. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Приборостроение*, 2021, № 1 (134), с. 14–32. DOI: <https://doi.org/10.18698/0236-3933-2021-1-14-32>

**SIMULATION MODEL OF AN ADAPTIVE CONTROL SYSTEM FOR A SEGMENTED DEFORMABLE MIRROR IN A SPACE TELESCOPE AND ITS METROLOGICAL CERTIFICATION**

V.V. Sychev<sup>1</sup>  
A.I. Klem<sup>1,2</sup>

viktorsychev@list.ru  
black.n.hot.ice@gmail.com

<sup>1</sup> **Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation**

<sup>2</sup> **Public Joint Stock Company Aviation Holding Company Sukhoi, Moscow, Russian Federation**

**Abstract**

The paper concerns a measurement problem of identifying inadequacy in a mathematical model of an adaptive control system driving segments of a deformable mirror in a large telescope. This is necessary to assess the validity of this model. A dual-axis servo drive unit utilising permanent magnet synchronous machines controls the mirror segments. The servo unit rotates each segment of the deformable mirror with respect to its axis of symmetry and tilts each segment relative to the fixed central reference segment. The paper provides general descriptions of the model structure and the feedback in the current control loop employing phase current measurement and coordinate transformations. We present initial data sets for metrological certification of the model. We used the *MMK-stat M* software to perform the metrological certification so that we could check empirical equations, determine the scope of applica-

**Keywords**

*Adaptive control system, permanent magnet synchronous machine, simulation model, metrological certification, error of inadequacy*

tion for the model and validate it. The metrological certification allowed us to confirm that the model of an adaptive control system for a segmented deformable telescope mirror is valid, and to find the model structure that ensures a more accurate description of the measurement problem that concerns controlling the spatial position of the object simulated

Received 04.04.2020

Accepted 16.04.2020

© Author(s), 2021

---

## REFERENCES

- [1] Samygina E.K., Klem A.I. Numerical simulation of the adaptive control system of the composite primary mirror of a large-size space telescope. *Atmos. Ocean Opt.*, 2019, vol. 32, no. 5, pp. 590–596. DOI: <https://doi.org/10.1134/S1024856019050142>
- [2] Kalachev Yu.N. *Vektornoe regulirovanie (zametki praktika)* [Vector regulation (notes of practical person)]. Moscow, EFO Publ., 2013.
- [3] Demin A.V. Mathematical model of composite mirror adjustment process. *Izvestiya vysshih uchebnykh zavedeniy. Priborostroenie* [Journal of Instrument Engineering], 2015, vol. 58, no. 11, pp. 901–907 (in Russ.). DOI: <https://doi.org/10.17586/0021-3454-2015-58-11-901-907>
- [4] Demin A.V., Rostokin P.V. Alignment algorithm for composite mirrors. *Komp'yuternaya optika* [Computer Optics], 2017, vol. 41, no. 2, pp. 291–294 (in Russ.). DOI: <https://doi.org/10.18287/2412-6179-2017-41-2-291-294>
- [5] Dubrovich V.K., Zaika D.Yu., Kachurin V.K. et al. Modeling the “Millimetron” space telescope alignment. *Informatsiya i Kosmos* [Information and Space], 2017, no. 4, pp. 39–43 (in Russ.).
- [6] Dreh- und Schwenkrundtische. *directindustry.de: website*. <https://pdf.directindustry.de/pdf/hiwin-gmbh/dreh-schwenkrundtische/14370-835949.html> (accessed 15.01.2018).
- [7] Samygina E.K. Enhancement of servodrive control system for exact tracking in the extended speed range. *2018 X International Conference on Electrical Power Drive Systems (ICEPDS)*, Novocherkassk, 2018, pp. 1–4. DOI: <https://doi.org/10.1109/ICEPDS.2018.8571515>
- [8] Wang J., Wu J., Gan C., et al. Comparative study of flux-weakening control methods for PMSM drive over wide speed range. *2016 19th International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS)*, Chiba, 2016. Available at: <https://ieeexplore.ieee.org/document/7837218>
- [9] Zabotin A.V. [Improving exploitation characteristics of precision diagnostic servodrive]. *Nauka. Tekhnologiya. Proizvodstvo–2016. Mat. Vseros. nauch.-tekh. konf.* [Science. Technology. Production–2016. Proc. Rus. Sc.-Tech. Conf.]. Ufa, USPTU Publ., 2016, pp. 110–114 (in Russ.).
- [10] Rassudov L.N., Balkovoi A.P. Dynamic model exact tracking control of a permanent magnet synchronous motor. *2015 International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON)*, Omsk, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1109/SIBCON.2015.7147187>

[11] Rassudov L.N., Balkovoi A.P. FPGA-based broadband current control for a servodrive. *Proc. 2016 IEEE NW Russia Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering Conference (EIconRusNW)*, St. Petersburg, 2016, pp. 664–667.

DOI: <https://doi.org/10.1109/EIconRusNW.2016.7448270>

[12] Samygina E.K., Tiapkin M., Rassudov L.N., et al. Extended algorithm of electrical parameters identification via frequency response analysis. *2019 26th International Workshop on Electric Drives: Improvement in Efficiency of Electric Drives (IWED)*, Moscow, Russia, 2019, pp. 1–4. DOI: <https://doi.org/10.1109/IWED.2019.8664340>

[13] Shpak D.M. Razrabotka i issledovanie sistemy upravleniya vysokoskorostnykh shpindel'nykh stankov na baze asinkhronnykh i sinkhronnykh elektrodvigateley. Dis. kand. tekhn. nauk [Development and study on control system of high-speed work spindles based on synchronous and asynchronous motors. Cand. Sc. (Eng.) Diss.]. Moscow, MPEI, 2019 (in Russ.).

[14] Klinachev N.V., Kuleva N.Yu., Voronin S.G. Rotor position estimation for permanent magnet synchronous motor. *Vestnik YuUrGU. Seriya Energetika* [Bulletin of South Ural State University. Series Power Engineering], 2014, vol. 14, no. 2, pp. 49–54 (in Russ.).

[15] Levin S.F. Guide to the expression of uncertainty in measurement: problems, unrealized capabilities, and revisions. Part 2. Probabilistic-statistical problems. *Meas. Tech.*, 2018, vol. 61, no. 4, pp. 327–334.

DOI: <https://doi.org/10.1007/s11018-018-1429-y>

[16] Levin S.F. Metrological attestation of software methods of decision of measuring's tasks: theory and practice. *Sistemy obrabotki informatsii* [Information Processing Systems], 2008, no. 4 (71), pp. 117–125 (in Russ.).

**Sychev V.V.** — Dr. Sc. (Eng.), Professor, Department of Metrology and Interchangeability, Bauman Moscow State Technical University (2-ya Baumanskaya ul. 5, str. 1, Moscow, 105005 Russian Federation).

**Klem A.I.** — Post-Graduate Student, Department of Metrology and Interchangeability, Bauman Moscow State Technical University (2-ya Baumanskaya ul. 5, str. 1, Moscow, 105005 Russian Federation); Design Engineer, Public Joint Stock Company Aviation Holding Company Sukhoi (Polikarpova ul. 23B, p/b 604, Moscow, 125284 Russian Federation).

**Please cite this article in English as:**

Sychev V.V., Klem A.I. Simulation model of an adaptive control system for a segmented deformable mirror in a space telescope and its metrological certification. *Herald of the Bauman Moscow State Technical University, Series Instrument Engineering*, 2021, no. 1 (134), pp. 14–32 (in Russ.).

DOI: <https://doi.org/10.18698/0236-3933-2021-1-14-32>