

УДК 681.532.8

**ДИНАМИКА СИСТЕМЫ ОРИЕНТАЦИИ КОСМИЧЕСКОГО
ЛЕТАТЕЛЬНОГО АППАРАТА С ДВИГАТЕЛЯМИ-МАХОВИКАМИ****И.Е. Овчинников, А.В. Лагун**

Рассматривается динамика одноосной системы ориентации космического летательного аппарата с помощью маховой массы, приводимой во вращение управляемым вентильным двигателем. Изучаются режимы при отсутствии внешнего возмущающего момента, действующего на аппарат, и при наличии длительного действующего момента малой величины.

Ключевые слова: космический летательный аппарат, система ориентации, двигатель-маховик, вентильный двигатель.

Введение

В большинстве случаев после вывода на орбиту космических летательных аппаратов (КЛА) или искусственных спутников Земли (ИСЗ) требуется ориентация одной из их конструктивных осей на некоторый объект в космическом пространстве (Солнце, Звезда, планета) или по вертикали к Земле. Такая ориентация должна поддерживаться многие месяцы и даже годы, в силу чего встает задача экономии затрат энергии, необходимой для поддержания заданного направления оси аппарата, отработки внешних возмущений или переориентации оси на другое направление.

Для решения подобных задач наилучшие результаты зачастую дают электрические двигатели-маховики, для питания которых электрическая энергия обеспечивается солнечными батареями, устанавливаемыми на КЛА [1]. Рассмотрим динамику двигателей-маховиков с целью исследования возможности применения для такой задачи вентильного двигателя.

Уравнения динамики двигателя-маховика в системе ориентации КЛА

Принцип осуществления ориентации или управляемого поворота КЛА основывается на законе сохранения момента количества движения системы тел спутник (КЛА)–двигатель-маховик. Если предположить, что на такую систему тел не действуют внешние моменты, что хорошо оправдывается для условий свободного тела в космическом пространстве, то закон сохранения момента количества движения для случая плоского вращательного движения относительно некоторой оси формулируется в виде [2]

$$J_a \cdot \omega_a + J_m \cdot \Omega_m = J_a \cdot \omega_a(0) + J_m \cdot \Omega_m(0) = \text{const} . \quad (1)$$

Здесь J_a, J_m – моменты инерции КЛА и ротора-маховика двигателя; ω_a, Ω_m – соответственно их угловые скорости; $\omega_a(0), \Omega_m(0)$ – начальные значения угловых скоростей, которые в частном случае могут быть равны нулю. Произведения $J_a \cdot \omega_a$ и $J_m \cdot \Omega_m$ называются моментами количества движения КЛА и маховика соответственно.

Из выражения (1) видно, что любое изменение скорости движения $\Delta\Omega_m$ приводит к изменению скорости КЛА (или спутника) $\Delta\omega_a$, но в противоположном направлении и в соотношении, определяемом моментами инерции. Если $\Delta\omega_a = \omega_a - \omega_a(0)$,

$\Delta\Omega_m = \Omega_m - \Omega_m(0)$, то с учетом уравнения динамики двигателя $J_m \cdot \frac{\Delta\Omega_m}{\Delta t} = M_\delta$ из (1) имеем

$$\Delta\omega_a = -\frac{J_i}{J_a} \cdot \Delta\Omega_i = -\frac{1}{J_a} \cdot M_a \cdot \Delta t. \quad (2)$$

Таким образом, управляя скоростью ω_a за счет изменения скорости двигателя Ω_m или момента двигателя M_δ , в соответствии с (1) или (2) можно управлять некоторой угловой координатой КЛА $\alpha = \int \omega_a dt$. Схематически такая «плоская» задача представлена на рис. 1, а, где двигатель-маховик ДМх размещен внутри спутника А, причем статор двигателя неподвижно закреплен в корпусе А.

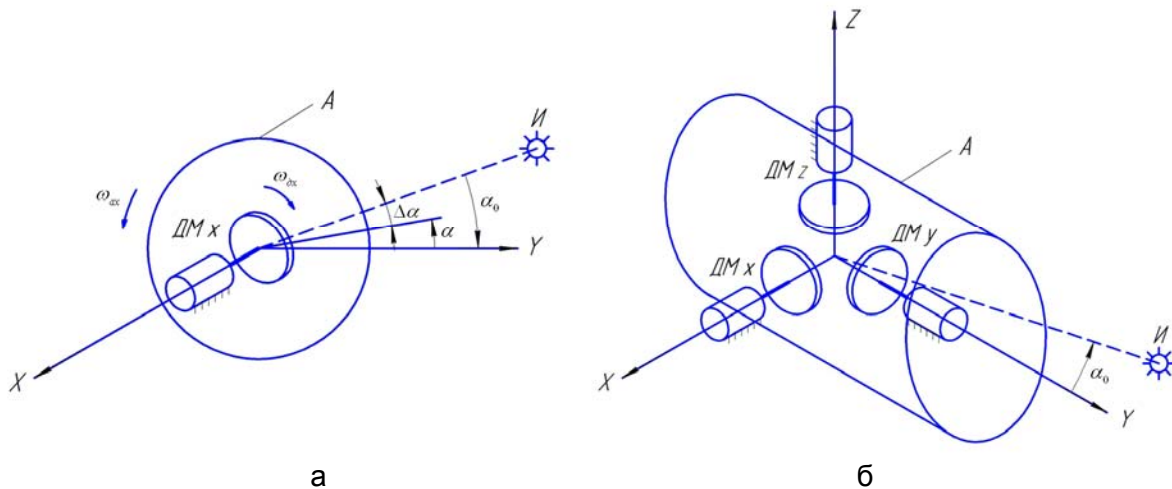


Рис. 1. Расположение электрических двигателей-маховиков в системе ориентации КЛА: а – одноосная система, б – трехосная система

Появление скорости двигателя-маховика в направлении ω_{mx} приводит к появлению скорости спутника ω_{ax} , но в противоположном направлении, что соответствует закону сохранения момента количества движения (1). В действительности задача движения может оказаться много сложнее, поскольку КЛА представляет собой твердое тело, поворачивающееся в процессе ориентации относительно точки, связанной с центром масс. Движение твердого тела относительно точки описывается уравнениями Эйлера [2], которые для нашего случая применительно к одной из осей имеют вид

$$J_{ax} \cdot \frac{d\omega_{ax}}{dt} + (J_{az} - J_{ay}) \cdot \omega_{ay} \cdot \omega_{az} = \sum M_x, \quad (3)$$

$$\sum M_x = -M_{\delta x} + M_{\text{вк}},$$

где $\omega_{ax}, \omega_{ay}, \omega_{az}$ – угловые скорости аппарата относительно соответствующих осей; J_{ax}, J_{ay}, J_{az} – моменты инерции аппарата относительно тех же осей; $\sum M_x$ – сумма моментов, действующих относительно оси x ; $M_{\delta x}$ – электромагнитный момент двигателя ДМ, расположенного по оси x аппарата А (рис. 1, б); $M_{\text{вк}}$ – внешний возмущающий момент, действующий на корпус аппарата по оси x . Управление моментами двигателя $M_{\delta x}, M_{\delta y}, M_{\delta z}$ в функции координат рассогласования осей x, y, z от требуемого положения, их производных и интегралов от рассогласования позволяет обеспечить задачу трехосной ориентации космического летательного аппарата. Знак «минус» обусловлен

тем, что учитывается момент, прикладываемый к статору двигателя, т.е. к корпусу аппарата A .

В случае, когда моменты инерции $J_{ax} = J_{ay} = J_{az}$, что имеет, например, место для однородного тела сферической формы, нелинейное уравнение с перекрестными связями (3) распадается на три независимых уравнения. Именно этот случай и будет исследован далее. Для оси x , таким образом, получим уравнение динамики для корпуса аппарата

$$J_{ax} \cdot \frac{d^2\alpha}{dt^2} = -M_{\alpha x} + M_{\beta x}$$

и уравнение динамики для ротора-маховика двигателя

$$\frac{d\alpha}{dt} = \omega_{ax}, \quad J_m \cdot \frac{d\Omega_m}{dt} = M_{\alpha x}.$$

Подставив одно уравнение в другое и затем интегрируя, получаем:

$$J_{ax} \cdot \frac{d\alpha}{dt} + J_m \cdot \Omega_m = M_{\beta x} \cdot t + H_x(0), \quad (4)$$

где $H_x(0) = J_{ax} \cdot \omega_{ax}(0) + J_m \cdot \Omega_m(0)$ – начальные значения суммарного момента количества движения. Уравнение (4) позволяет исследовать возможные условия ориентации при начальном рассогласовании α_0 : 1) $H(0) = 0$, $M_g = 0$; 2) $H_x(0) = J_{ax} \cdot \omega_{ax}(0) \neq 0$, $M_g = 0$; 3) $H(0) = 0$, $M_g \neq 0$.

При длительном функционировании системы ориентации к двигателю-маховику предъявляется ряд требований, среди которых – малая масса и высокая надежность двигателя, малые потери холостого хода, высокий удельный момент на единицу массы двигателя. Наилучшим образом данному комплексу требований отвечает вентильный двигатель [3] с возбуждением от редкоземельных постоянных магнитов, регулировочные характеристики которого и будут использованы при дальнейшем рассмотрении.

Моделирование динамики одноосной системы ориентации КЛА с вентильным двигателем-маховиком

Момент двигателя с учетом только первой гармоники питающего напряжения можно представить выражением [3]

$$M_{\alpha x} \approx \frac{3 \cdot \sqrt{3}}{2 \cdot \pi} \cdot \left[C' \cdot U - \frac{3 \cdot \sqrt{3}}{\pi} \cdot (C')^2 \cdot \Omega_m \right] \cdot \frac{R_1}{R_1^2 + 0,3 \cdot X_1^2}, \quad (5)$$

где U – регулируемое напряжение в звене постоянного тока, R_1, X_1 – активное и индуктивное сопротивление фазы, причем $X_1 = \frac{3}{2} \cdot p \cdot L_1 \cdot \Omega_m$, L_1 – собственная индуктивность фазы, p – число пар полюсов, $C' = p \cdot k_{01} \cdot w_1 \cdot \Phi$, $k_{01} \cdot w_1$ – эффективное число витков фазы, Φ – рабочий поток на пару полюсов.

Уравнение напряжения U , подаваемого на двигатель, запишем в форме

$$U = k_1 \cdot \Delta\alpha + k_2 \cdot \dot{\Delta\alpha} + k_3 \cdot \int \Delta\alpha dt, \quad (6)$$

где ошибка $\Delta\alpha = \alpha - \alpha_0$ (рис. 1, а).

Выражения (4), (5), (6) образуют следующую систему уравнений:

$$J_{ax} \cdot \frac{d^2 \Delta\alpha}{dt^2} = -\frac{3 \cdot \sqrt{3}}{2 \cdot \pi} \cdot \left[C' \cdot U - \frac{3 \cdot \sqrt{3}}{\pi} \cdot (C')^2 \cdot \Omega_m \right] \cdot \frac{R_1}{R_1^2 + 0,3 \cdot X_1^2} + M_{ex},$$

$$U = k_1 \cdot \Delta\alpha + k_2 \cdot \dot{\Delta\alpha} + k_3 \cdot \int \Delta\alpha dt, \tag{7}$$

$$J_m \cdot \frac{d\Omega_m}{dt} = \frac{3 \cdot \sqrt{3}}{2 \cdot \pi} \cdot \left[C' \cdot U - \frac{3 \cdot \sqrt{3}}{\pi} \cdot (C')^2 \cdot \Omega_m \right] \cdot \frac{R_1}{R_1^2 + 0,3 \cdot X_1^2}.$$

Использование интеграла от ошибки позволит обеспечить астатизм системы, т.е. отсутствие установившейся ошибки по окончании переходного процесса ориентации. Структурная схема системы, соответствующей уравнениям (7), представлена на рис. 2, а. В зависимости от рассматриваемого варианта мы будем полагать в структурной схеме: 1) $H(0) = 0, M_e = 0$; 2) $H(0) \neq 0, M_e = 0$; 3) $H(0) = 0, M_e \neq 0$. Моделирование системы дифференциальных уравнений (7), имеющих нелинейность относительно Ω_m , обусловленную характеристикой момента двигателя M_{ax} (5), было проведено при следующих исходных данных: $\Phi = 1,15 \cdot 10^{-3}$ Вб, $R_1 = 0,0353$ Ом, $L_1 = 9,15 \cdot 10^{-5}$ Гн, $p = 3$, $w_1 = 36$, $k_1 = 100$ В/рад, $k_2 = 200$ В·с/рад, $k_3 = 0,1$ В/рад·с, $J_m = 33,1$ кг·м², $J_a = 2385$ кг·м², $\alpha_0 = 0,5$ рад. Максимальное напряжение в звене постоянного тока двигателя $U_{max} = 100$ В, скорость идеального холостого хода двигателя $\Omega_{0xx} = 100$ рад/с.

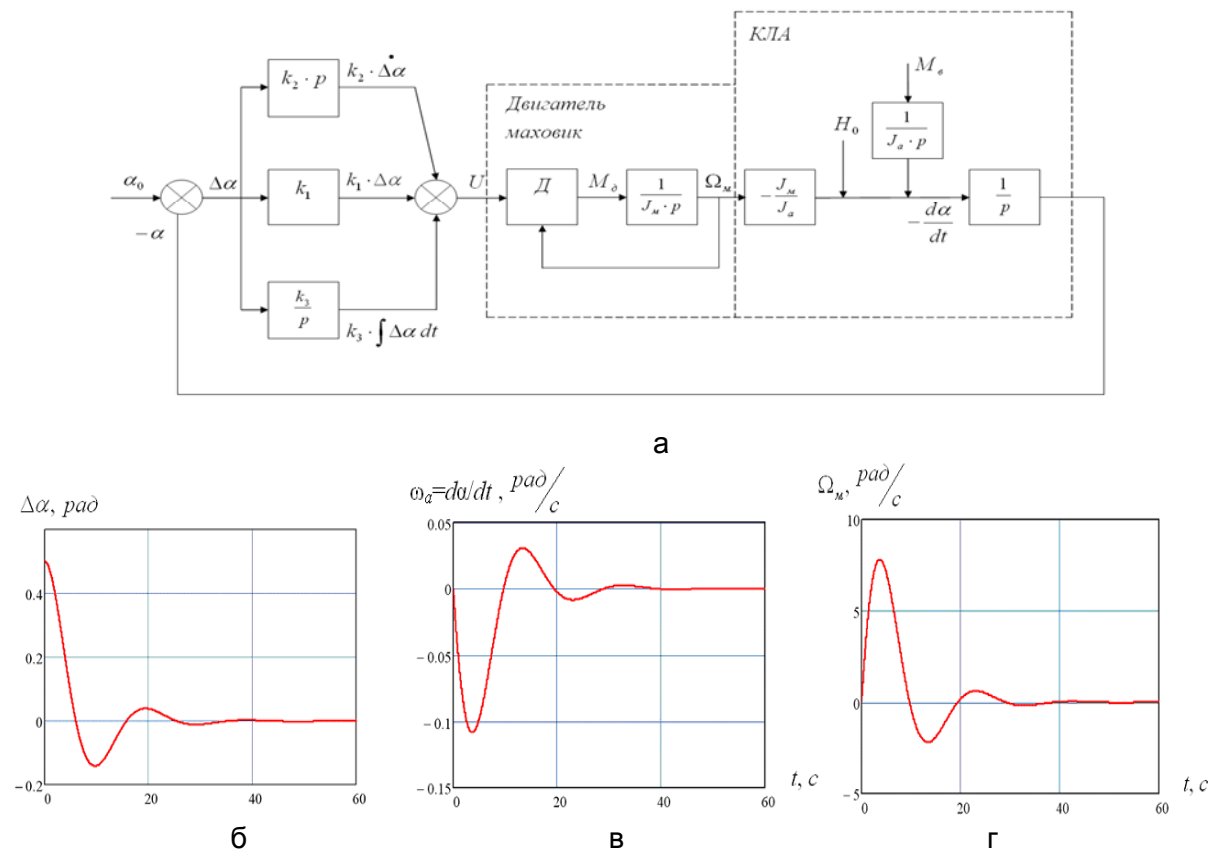


Рис. 2. Структурная схема (а) и переходный процесс одноосной ориентации с двигателем-маховиком по углу ошибки (б), по скорости аппарата (в), по скорости маховика (г)

Результаты моделирования представлены на рис. 2, б–г. Из рисунков видно, что переходный процесс заканчивается приблизительно через 40 с, причем, как и следовало ожидать, в установившемся режиме скорость аппарата $\frac{d\alpha}{dt}$ и скорость двигателя-маховика Ω_m равны нулю, поскольку начальное значение момента количества движения было нулевым:

$$H_x(0) = J_{ax} \cdot \omega_{ax}(0) + J_m \cdot \Omega_m(0) = 0.$$

Второе условие применительно к уравнению (3) было сформулировано для начальных условиях по углу рассогласования и угловой скорости аппарата в виде $\alpha_0 = 0,5$ рад, $\frac{d\alpha}{dt}(0) = 0,58$ рад/с. Возмущающий момент $M_{вх}$ предполагался равным нулю. Все остальные данные были приняты, как и в предыдущем примере. Результаты моделирования представлены на рис. 3.

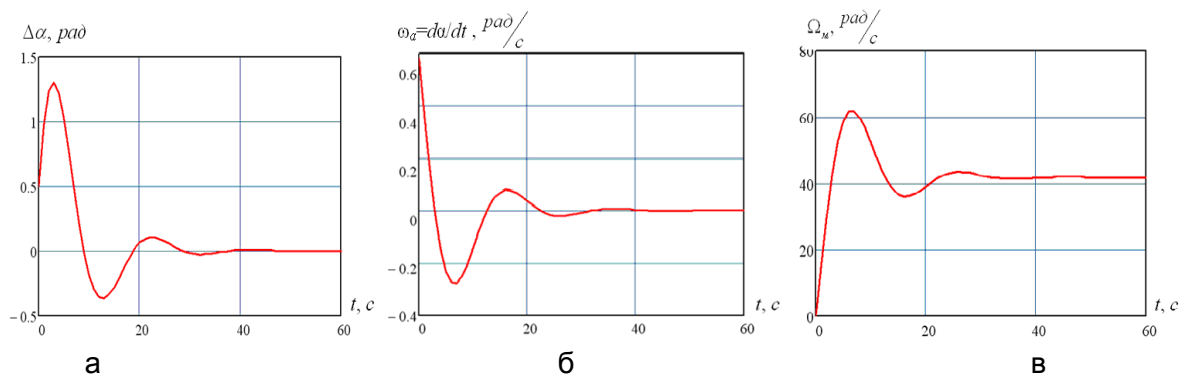


Рис. 3. Переходный процесс при наличии начального угла рассогласования и начальной угловой скорости аппарата: а – для угла ошибки, б – для скорости аппарата, в – для скорости маховика

В отличие от предыдущего случая, установившаяся скорость маховика отлична от нуля (рис. 3, в), поскольку в соответствии с законом сохранения момента количества движения (3) при $M_{вх} = 0$ $\left(\frac{d\alpha}{dt}\right)_\infty = 0$, $(\Omega_m)_\infty = \frac{H_x(0)}{J_m}$, т.е. весь начальный момент количества движения, обусловленный начальной скоростью аппарата, $J_{ax} \cdot \frac{d\alpha}{dt}(0) = H_x(0)$, по окончании переходного процесса «перекачивается» в момент количества движения маховика:

$$J_m \cdot (\Omega_m)_\infty = J_{ax} \cdot \frac{d\alpha}{dt}(0).$$

Рассмотрим последний случай для уравнения (3), когда на аппарат действует некоторый малый возмущающий момент M_{ax} , а начальные условия по угловой скорости аппарата – нулевые. Величина момента принята равной $M_g = 10^{-3}$ Н·м. Результат моделирования представлен на рис. 4.

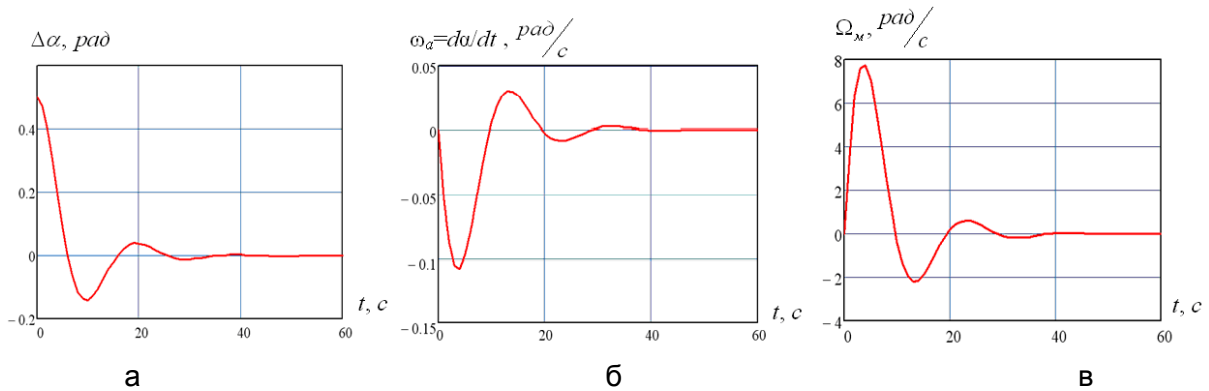


Рис. 4. Переходный процесс при наличии начального угла рассогласования и возмущающего момента: а – для угла рассогласования, б – для скорости аппарата, в – для скорости маховика

На рис. 4, а, и 4, б, также как и в случае рис. 2, б, и 2, в, угловая скорость аппарата $\frac{d\alpha}{dt}$ в конце переходного процесса приходит к нулевому значению. Однако скорость маховика Ω_m медленно возрастает, что можно наблюдать за сравнительно продолжительное время. Это объясняется тем, что по окончании процесса ориентации, когда угловая скорость аппарата $\frac{d\alpha}{dt}$ равна нулю, двигатель должен создавать электромагнитный момент, равный и встречно направленный к внешнему моменту M_e , действующему на корпус КЛА. Этот момент создается за счет подаваемого на двигатель нарастающего сигнала вида $\int \Delta\alpha_\infty dt$, где $\Delta\alpha_\infty$ – установившееся значение ошибки, которая в силу малости (0,001) на рис. 4, а, не видна. Под действием этого весьма малого электромагнитного момента ротор двигателя с маховиком будет постепенно разгоняться. Разгон может осуществляться вплоть до скорости холостого хода двигателя. Это, в свою очередь, означает, что время непрерывного «парирования» внешнего возмущающего момента с помощью электромагнитного момента двигателя-маховика будет равно $t_{\max} = \frac{J_m \cdot \Omega_{mxx}}{M_e}$. Для нашего случая время составит $t_{\max} = \frac{33,1 \cdot 418}{10^{-3} \cdot 3600} = 3843$ час. После

разгона до скорости холостого хода двигатель должен быть остановлен, а момент количества движения и соответственно угловая скорость КЛА, приобретенная в связи с этим, в соответствии с законом сохранения момента количества движения составят

$$\left(\frac{d\alpha}{dt}\right)_{\max} = -\frac{J_m \cdot \Omega_{mxx}}{J_{ax}}.$$

Чтобы процесс ориентации двигателем-маховиком мог быть возобновлен, следует «разгрузить» аппарат импульсом реактивного момента, создаваемого специальными микрореактивными разгрузочными двигателями, причем импульс разгрузочного момента должен быть равен

$$M_p \cdot t_p = J_{ax} \cdot \left(\frac{d\alpha}{dt}\right)_{\max},$$

где M_p – разгрузочный момент, t_p – время действия разгрузочного момента.

Заключение

Показано, что вентильный двигатель-маховик является эффективным средством управления угловым положением космического летательного аппарата. Сигнал управления напряжением, подаваемым на двигатель, состоящий из трех компонентов (отклонение по углу, производная отклонения, интеграл от отклонения), позволяет обеспечить приемлемое качество переходного процесса и астатизм системы при наличии начальной угловой скорости объекта. Постоянный внешний возмущающий момент, действующий на корпус КЛА, приводит в установившемся режиме к появлению малой ошибки $\Delta\alpha$ и плавному разгону двигателя-маховика, а время поддержания заданной ориентации становится ограниченным и зависящим от величины максимального кинетического момента двигателя $J_m \cdot \Omega_{mxx}$ и величины возмущающего момента.

Литература

1. Петров В.П., Сочивко А.А. Искусственные спутники Земли и погода. – Л.: Гидрометеоздат, 1961.
2. Аппель П. Теоретическая механика. – М.: Физматгиз, 1960.
3. Овчинников И.Е. Вентильные электрические двигатели и привод на их основе. – СПб: Корона-Век, 2006.

Овчинников Игорь Евгеньевич

– Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, доктор технических наук, профессор, ludimit@yandex.ru

Лагун Антон Владимирович

– Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, студент, lagunanton@yandex.ru