

АКТИВНАЯ СИСТЕМА КОРРЕКЦИИ ДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК УПРУГОГО ИСЗ

Введение. Рассматривается служебная система, предназначенная для повышения стабильности углового положения малого спутника с упругими солнечными батареями (СБ).

Решаемая системой задача может быть классифицирована как частный случай известной задачи обеспечения микрогравитации на орбитальных станциях [1, 2] – случай, когда объектом виброизоляции является корпус самого спутника, а виброзащита должна осуществляться всего лишь по трем степеням свободы его вращения с помощью средств, установленных на корпусе спутника.

В состав рассматриваемой системы входят три датчика угловых ускорений корпуса спутника, БЦВМ и три двигателя-маховика, каждый из которых охвачен отрицательной обратной связью по сигналам своего тахогенератора. На вход БЦВМ должна поступать информация о скорости и угле поворота вала привода СБ относительно корпуса спутника. Реализуемый в БЦВМ закон управления базируется на достаточно точном знании динамической модели упругого изделия, привода СБ и самих двигателей-маховиков.

Система может быть реализована в виде отдельной служебной системы или входить в состав системы ориентации спутника с использованием в качестве ее исполнительных органов двигателей-маховиков системы ориентации спутника.

В дальнейшем изложении рассматриваемая система для удобства условно называется подсистемой стабилизации.

Принцип действия подсистемы стабилизации. Известно, что система ориентации ИСЗ обладает потенциальной возможностью эффективно парировать действие внешних и внутренних возмущений и тем самым осуществлять решение задачи обеспечения требуемой стабильности положения ИСЗ. Однако на практике частотный диапазон ее работы охватывает только область низких частот, достаточно далеко отстоящую от области резонансных частот ИСЗ с упругими СБ.

Обычно задача обеспечения требуемой стабильности положения решается путем ограничения величин внутренних возмущений, создаваемых различной аппаратурой ИСЗ. В некоторых случаях для уменьшения реакции корпуса на возмущения в области резо-

нансных частот СБ могут использоваться жидкостные демпферы, устанавливаемые на СБ. Известны также активные системы демпфирования упругих колебаний СБ.

Задача обеспечения требуемой стабильности существенно усложняется в случае применения на ИСЗ привода ориентации СБ на Солнце.

Простейший привод СБ включает в себя так называемый компенсационный маховик [3], задача которого состоит в компенсации кинетического момента равномерно вращающихся СБ вокруг оси корпуса ИСЗ, скорость вращения которого в инерциальном пространстве вокруг этой оси практически равна нулю. Поэтому равномерное вращение СБ не оказывает влияние на движение корпуса вокруг оси выходного вала привода.

При неравномерном вращении привода эффективность компенсационного маховика падает с ростом частоты гармонических составляющих спектра движения привода. Амплитудная частотная характеристика реакции корпуса ИСЗ на неравномерность вращения вала привода не имеет спада с ростом частоты. Поэтому можно считать, что при существенно неравномерном вращении вала компенсационный маховик должен быть исключен из состава привода, а сам привод должен быть выполнен таким образом, чтобы его собственный кинетический момент был равен нулю.

В этом случае для парирования воздействия вращающихся СБ на корпус ИСЗ должны использоваться иные средства, например отдельный двигатель-маховик (ДМ), управление скоростью вращения которого должно осуществляться по сигналам тахогенератора (ТГ) привода СБ.

Сочетание привода без компенсационного маховика и отдельного ДМ обеспечивает спад амплитудной частотной характеристики в области высоких частот, чем и достигается желаемое уменьшение влияния высокочастотных составляющих движения вала привода на ИСЗ. На остальных частотах рассматриваемый привод и ДМ не имеют преимуществ перед традиционным приводом с компенсационным маховиком.

Применение привода без компенсационного маховика вместе с ДМ оказывается весьма перспективным, если для управления ДМ использовать более обширную информацию о движении привода и корпуса ИСЗ.

В подсистеме стабилизации (СС) для управления ДМ помимо сигнала ТГ привода используется сигнал датчика углового ускорения корпуса ИСЗ вокруг оси вращения СБ. ДМ охвачен отрицательной обратной связью по сигналам своего ТГ.

Сигнал ТГ привода СБ необходим для обеспечения желаемых

свойств на низких частотах – для компенсации кинетического момента СБ. Использование сигнала датчика угловых ускорений для управления ДМ с обратной связью по скорости позволяет ввести в закон управления сигнал по третьей производной от угла поворота корпуса ИСЗ и, тем самым, осуществить рассеивание энергии упругих колебаний СБ, т.е. обеспечить желаемые свойства в области средних частот. ДМ с обратной связью по сигналам своего ТГ позволяет обеспечить желаемый спад амплитудной частотной характеристики на высоких частотах для уменьшения влияния неравномерности вращения привода СБ.

В СС по осям, перпендикулярным оси привода, используются два аналогичных ДМ, управление которыми осуществляется только по сигналам соответствующих датчиков углового ускорения корпуса с целью обеспечения демпфирования упругих колебаний СБ вокруг этих осей. В законе управления ДМ используется сигнал датчика угла поворота привода СБ, что позволяет учитывать изменения динамических свойств объекта регулирования при изменении положения СБ относительно ИСЗ.

СС предназначена для коррекции динамических свойств ИСЗ с СБ с целью уменьшения влияния возмущающих воздействий. При решении этой задачи используются известные методы синтеза систем автоматического регулирования. Однако, для того, чтобы синтезируемый алгоритм управления мог быть реализован на практике, желаемые амплитудные частотные характеристики СС заранее не конкретизируются. Полагается только, что СС выполнит свою задачу, если она обеспечит компенсацию кинетического момента СБ при движении вала привода в диапазоне низких частот, демпфирование первых форм колебаний СБ и минимизацию влияния высокочастотных составляющих движения привода на корпус ИСЗ. Эти свойства должны реализовываться с использованием минимального объема информации о движении корпуса ИСЗ, привода и СБ, а также с учетом практически достижимых точностей знания параметров объекта регулирования и неизбежных погрешностей реализации закона управления.

Математическая модель ИСЗ с подвижными упругими СБ является достаточно громоздкой: движения ИСЗ вокруг его строительных осей являются взаимосвязанными, степень взаимовлияния зависит от положения СБ относительно ИСЗ, упругие деформации СБ описываются бесконечным рядом по собственным формам колебаний, движение привода СБ сопровождается рядом существенных особенностей и т.д. Для практической реализации СС законы управления ДМ должны базироваться на использовании сравнительно простой модели изделия. При этом не учитываемые эффек-

ты не должны существенно влиять на получаемые с помощью СС свойства.

Очевидно, что реализация достаточно сложного алгоритма работы СС возможна только в случае использования в ее составе БЦВМ. Наличие БЦВМ предоставляет дополнительные возможности при решении задачи повышения стабильности положения ИСЗ путем использования информации, полученной в процессе наземных испытаний отдельной аппаратуры ИСЗ. Например с помощью БЦВМ двигатели-маховики СС могут в определенной мере компенсировать кинетический момент, возникающий при работе сканеров научной аппаратуры, парировать в какой-то мере возмущения, которые возникают при вращении СБ и действуют в направлении, перпендикулярном оси вращения привода, и т.п. Кроме того, для повышения эффективности работы СС может оказаться полезным использование информации о кинематической погрешности редуктора привода СБ.

Считается [1], что при реализации систем виброзащиты существенной проблемой является практическая возможность регистрации колебаний объекта виброизоляции с необходимой точностью. В равной мере это относится и к рассматриваемой СС. Особенностью создания СС является необходимость проведения расчетных и экспериментальных работ по определению достаточно достоверной математической модели ИСЗ с упругими СБ. Кроме того, нельзя исключать необходимость в проверке работы СС в процессе наземных испытаний упругого изделия.

Были проведены исследования на макете КА «Электро» в упругом подвесе. Известно, что испытание упругого изделия в наземных условиях может быть осуществлено путем закрепления его корпуса в упругом подвесе при одновременном упругом обезвешивании панелей СБ. Размеры испытательного комплекса (прежде всего его высота) должны позволять использование в подвесе достаточно длинных строп с тем, чтобы собственные частоты ИСЗ и СБ, обусловленные упругостью подвеса, были ниже собственных частот самого упругого изделия в полете. В этом случае динамические свойства испытуемого изделия, начиная с частот, несколько превышающих частоты изделия в упругом подвесе, могут мало отличаться от его свойств в штатном режиме.

Упомянутые исследования позволили отработать методику регулировки и балансировки упругого подвеса КА «Электро» в испытательном комплексе и определить средства регистрации его колебаний на уровне нескольких десятых долей угловых секунд. В процессе испытаний хорошо зарекомендовал себя так называемый [4] молекулярно-электронный преобразователь колебаний ИСМ-К16,

который может использоваться не только для наземных испытаний упругого изделия, но и в составе СС в качестве датчика угловых ускорений с порогом чувствительности около 10^{-7} с^{-2} .

Ниже рассмотрены свойства простейшей СС на примере одноосной задачи с учетом первых трех форм колебаний СБ.

Особенности динамических свойств СС в простейшем случае. Рассматривается движение ИСЗ только вокруг одной оси, совпадающей с осью выходного вала привода СС. Считается, что упругие свойства СБ вокруг этой оси подобны крутильным колебаниям однородного призматического стержня. Учитываются только первые три формы колебаний. Полагается, что ИСЗ должен ориентироваться в инерциальной системе координат, а привод должен двигаться в инерциальном пространстве, ориентируя СБ на Солнце.

Механическая модель рассматриваемой системы приведена на рис. 1, где введены обозначения: J_k - момент инерции корпуса ИСЗ; J_M - момент инерции ДМ; J_1 - суммарный момент инерции вращающихся частей двигателя привода и первого зубчатого колеса редуктора; J_2 - момент инерции второго зубчатого колеса; J_{CB1} , J_{CB2} , J_{CB3} - моменты инерции модели СБ; φ - угол поворота ИСЗ в инерциальном пространстве; φ_0 - угол поворота ДМ относительно корпуса; φ_1 - угол поворота двигателя привода относительно корпуса; φ_2 - угол поворота выходного вала привода относительно корпуса; α_1 , α_2 , α_3 - углы поворота вращающихся масс модели СБ в инерциальном пространстве; M - внешний момент, действующий на корпус ИСЗ; i - передаточное отношение редуктора (так что $\varphi_1 = -i\varphi_2$).

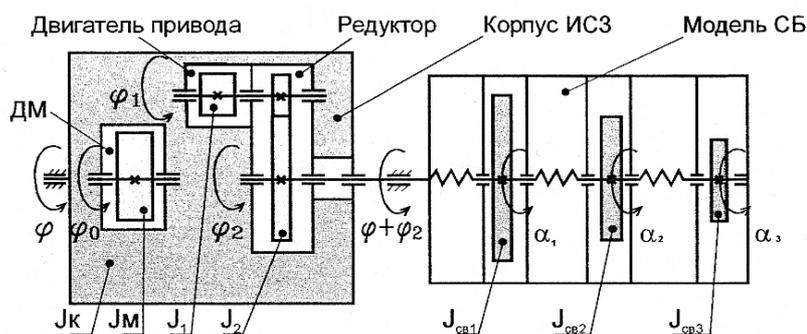


Рис. 1. Механическая модель системы

Механическая модель СБ получена методом, изложенным в [5]. При ограничении числа собственных форм колебаний СБ условно полагалось, что $\omega_2/\omega_1 = 3$, $\omega_3/\omega_1 = 5$, $J_{СВ1} = 0,871J_{СВ}$, $J_{СВ2} = 0,097J_{СВ}$, $J_{СВ3} = 0,032J_{СВ}$, $J_{СВ1} + J_{СВ2} + J_{СВ3} = J_{СВ}$, где $\omega_1, \omega_2, \omega_3$ - частоты первых трех тонов колебаний СБ на неподвижном основании, а $J_{СВ}$ - суммарный момент инерции СБ. В модели СБ не учитывались ее демпфирующие свойства.

Рассматривается простейший закон управления с использованием колебательного звена в качестве корректирующего элемента. Управляющий момент, действующий на ротор ДМ, представлен в простейшем виде:

$$M_M = -(D \cdot d\varphi_0/dt - E \cdot d\beta/dt - K\beta).$$

Здесь β определяется решением уравнения корректирующего элемента: $d^2\beta/dt^2 = -H \cdot d\beta/dt - C(\beta + K_2U_2) + U$, где $U = d\varphi_2/dt + \delta_2$ - сигнал ТГ привода СБ, $U_2 = d^2\varphi/dt^2 + \delta$ - сигнал датчика угловых ускорений корпуса ИСЗ, δ_2 и δ - погрешности ТГ и датчика ускорений.

Оставляя в стороне вопрос о характере движения привода (что, как известно, является предметом отдельных исследований для каждого конкретного типа привода) будем полагать, что угол поворота выходного вала φ_2 является заданной функцией времени.

При принятых упрощающих предположениях динамика рассматриваемой системы в безразмерном времени $\tau = \omega_1 t$ описывается следующей системой:

$$\begin{vmatrix} S^2 & \chi_1 S^2 & \chi_2 S^2 & \chi_3 S^2 & \chi_0 S^2 & 0 \\ -1 & (S^2 + 1) & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -\lambda_2^2 & 0 & (S^2 + \lambda_2^2) & 0 & 0 & 0 \\ -\lambda_3^2 & 0 & 0 & (S^2 + \lambda_3^2) & 0 & 0 \\ S^2 & 0 & 0 & 0 & (S^2 + \Omega_2 S) & -(eS + k) \\ -S^2 & 0 & 0 & 0 & 0 & (S^2 + 2\xi\Omega S + \Omega^2) \end{vmatrix} \cdot X$$

$$X \begin{vmatrix} \varphi(S) \\ \alpha_1(S) \\ \alpha_2(S) \\ \alpha_3(S) \\ \varphi_0(S) \\ \beta(S) \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} \varepsilon(S) - \chi_4 S^2 \varphi_2(S) \\ \varphi_2(S) \\ \lambda_2^2 \varphi_2(S) \\ \lambda_3^2 \varphi_2(S) \\ 0 \\ -k_2 \Omega^2 (S \varphi_2(S) + \Delta_2(S)) + \Delta(S) \end{vmatrix}.$$

Здесь введены обозначения: $\chi_1=J_{CB1}/J$; $\chi_2=J_{CB2}/J$; $\chi_3=J_{CB3}/J$; $\chi_0=J_M/J$; $\chi_4=J_B/J$; $J=J_K+M_1(r_1+r_2)^2+J_1+J_2+J_M$; M_1 - суммарная масса вращающихся частей привода и первого зубчатого колеса редуктора; r_1 и r_2 - радиусы первого и второго зубчатых колес; $J_B=J_2-iJ_1$ ($J_B=0$ - условие, обеспечивающее желаемое равенство нулю собственного кинетического момента привода СБ);

$$\varepsilon = M/J\omega_1^2; \lambda_2 = \omega_2/\omega_1 = 3; \lambda_3 = \omega_3/\omega_1 = 5; \Omega_2 = D/J_M \omega_1;$$

$$e = E/J_M \omega_1; k = K/J_M \omega_1^2; \Omega^2 = C/\omega_1^2; \xi = H/2\Omega\omega_1;$$

$$k_2 = K_2\omega_1; \Delta = \delta/\omega_1^2; \Delta_2 = \delta_2/\omega_1.$$

Условие компенсации кинетического момента равномерно вращающихся привода и СБ имеет вид:

$$kk_2 = \Omega_2(\chi_1 + \chi_2 + \chi_3 + \chi_4)/\chi_0.$$

Определитель рассматриваемой системы является многочленом 9-го порядка. Количество параметров управления равно всего пяти ($e, k, \xi, \Omega, \Omega_2$). Поэтому рассматриваемое управление не позволяет обеспечить любое желаемое распределение корней многочлена. Кроме того, параметры управления должны быть взаимосвязанными, чтобы обеспечить подъем амплитудной частотной характеристики φ^a/φ_2^a на низких частотах с наклоном 40 дБ/дек (как в приводе с компенсационным маховиком): $e = k(\Omega + 2\xi\Omega_2)/\Omega\Omega_2$. К тому же при выборе k желательно соблюдать условие

$$k > \Omega^2 M_M(\min)/J_M U(\min),$$

где $M_M(\min)$ - минимальный гарантированный момент ДМ, $U(\min)$ - минимальный гарантированный сигнал датчика угловых ускорений (например порог его чувствительности). Наконец необходимо иметь в виду, что параметр Ω_2 имеет ограничение по максимуму, определяемое запаздывающими свойствами ДМ, которые здесь для простоты не учитываются.

Ниже рассмотрены два примера, для которых были подобраны ориентировочные значения параметров управления.

Для случая, когда $J_{CB} = 3J$ (момент инерции СБ больше момента инерции корпуса спутника), $\chi_0 = 0,0001$ и $\Omega_2 = 20$, были приняты следующие значения параметров:

$$k = 150000; k_2 = 4; e = 30000; \xi = 0,075; \Omega = 1,0.$$

В этом случае, если $J_M = 0,2 \text{ кг}\cdot\text{м}^2$, то при сигнале акселерометра $U(\min) = 10^{-7} \text{ с}^{-2}$ управляющий момент ДМ будет составлять величину $30 \cdot 10^{-4} \text{ Н}\cdot\text{м}$, а (при $\omega_1 = 0,5 \text{ Гц}$) запаздывание ДМ должно быть не более 0,1 с.

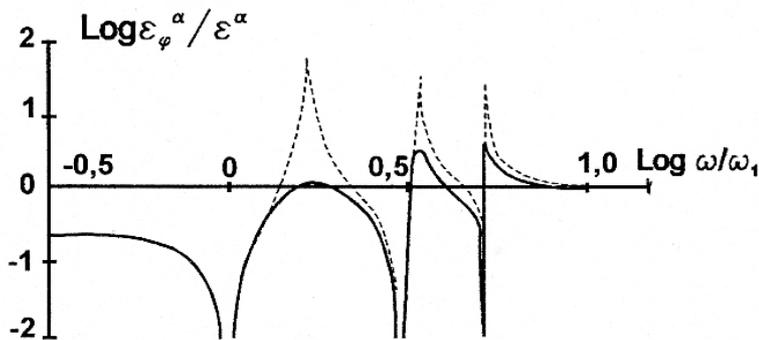


Рис. 2. Реакция на внешнее воздействие

На рис. 2 приведена амплитудная частотная характеристика (АЧХ) реакции корпуса на действие возмущающего момента M ($\varepsilon_\varphi^\alpha$ - амплитуда безразмерного ускорения корпуса, ε^α - амплитуда безразмерного возмущающего ускорения). На рис. 3 приведена АЧХ реакции корпуса φ^α на неравномерность вращения вала привода СБ φ_2^α . Логарифмический декремент затухания по первому тону равен 0,8 (при собственном демпфировании СБ равном нулю). Для сравнения на рис. 2 и 3 пунктиром показаны аналогичные АЧХ для привода с компенсационным маховиком в случае, если логарифмические декременты затухания самой СБ на неподвижном основании равны 0,01 для каждого тона. Видно, что во всем диапазоне частот СС обеспечивает решение поставленной задачи коррекции динамических свойств ИСЗ с упругими СБ.

На рис. 4 показано влияние следующих погрешностей параметров модели механической системы и закона управления: погрешности оценки момента инерции J корпуса ИСЗ, момента инерции $J_{СБ}$ СБ и момента инерции J_M ДМ; погрешность оценки частоты ω_1 первого тона колебаний СБ; погрешность крутизны ТГ ДМ и ТГ привода; погрешность χ_4 компенсации кинетического момента привода СБ; погрешность создания управляющего момента двигателем-маховиком.

Величина последней погрешности принималась равной 15%, остальные 3%. Существенная деформация АЧХ на низких частотах связана с погрешностью компенсаций подсистемой стабилизации кинетического момента СБ, на высоких частотах – погрешностью компенсации собственного кинетического момента привода СБ. Видно, что малые погрешности знания параметров механической системы и погрешности элементов СС не вызывают резкого изменения динамических свойств ИСЗ.

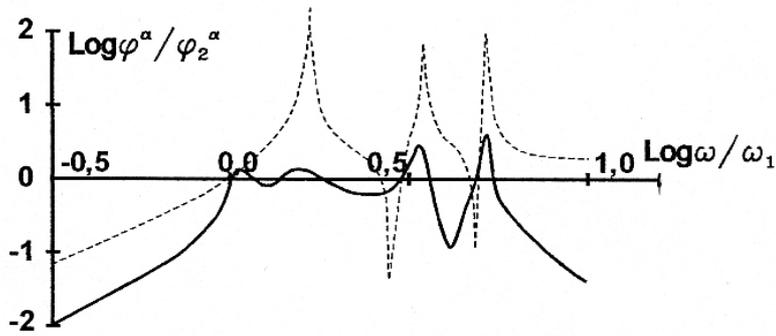


Рис. 3. Реакция на вращение привода

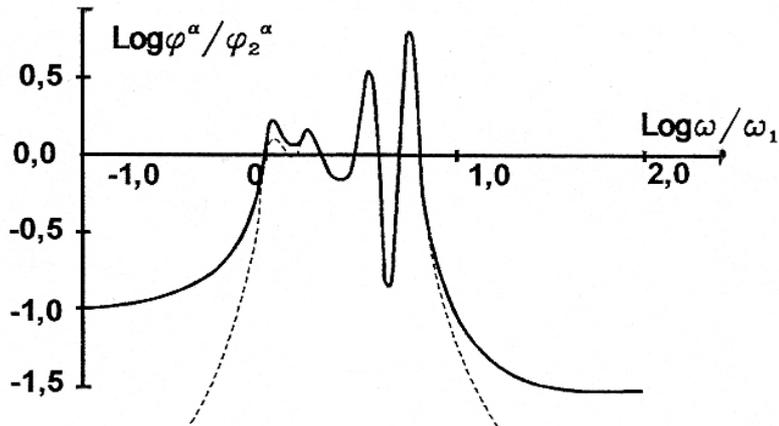


Рис. 4. Влияние погрешностей параметров

Для случая, когда $J_{CB} = 0,3J$ (момент инерции СБ меньше момента инерции корпуса ИСЗ), $\chi_0 = 0,0001$ и $\Omega_2 = 7,0$, были приняты следующие параметры:

$$k = 43350; k_1 = 0,4844; e = 11290; \xi = 0,05; \Omega = 0,85.$$

В этом случае минимальному гарантированному сигналу акселерометра, равному 10^{-7} с^{-2} , должен соответствовать управляющий момент ДМ, равный $12 \cdot 10^{-4} \text{ Н} \cdot \text{м}$, а запаздывание ДМ (при $\omega_1 = 1,5 \text{ Гц}$) должно быть менее $0,1 \text{ с}$. В рассматриваемом случае логарифмический декремент затухания по первому тону оказыва-

ются равным 0,28. Остальные динамические свойства мало отличаются от свойств в ранее рассмотренном примере.

Очевидно, что приведенные выше результаты нужно рассматривать как предварительные, имеющие качественный характер. Они могут использоваться для приближенной оценки свойств подсистемы стабилизации при сравнении ее с другими средствами обеспечения требуемой стабильности углового положения ИСЗ.

Заключение. Подсистема стабилизации представляет собой устройство, создание которого связано с проведением обширных расчетных и экспериментальных работ. Она может использоваться на ИСЗ с высокими требованиями по обеспечению стабильности его углового положения в случае, когда применение традиционных методов виброзащиты оказывается недостаточным.

Очевидна также целесообразность рассмотрения возможности применения подсистемы стабилизации на ИСЗ с непрерывно работающим или часто включаемым на витке информационным комплексом, а также в случае, когда временной режим работы комплекса позволяет осуществить остановку вращения СБ на время получения информации, но требования по стабильности углового положения ИСЗ являются достаточно высокими. В последнем случае применение подсистемы стабилизации, осуществляющей эффективное демпфирование упругих колебаний СБ, будет способствовать значительному снижению требований на ограничение возмущающих моментов, создаваемых аппаратурой ИСЗ во время работы информационного комплекса.

ЛИТЕРАТУРА

1. Рыбак Л.А. и др. Синтез активных систем виброизоляции на космических объектах. М.: Имаш. РАН. 1997.
2. Красовский А.А. Базовая концепция комбинированной многоярусной виброзащиты и орбитальные измерения микромаятниковым прибором. Космические исследования. Т. 38. № 4. М.: Наука. 2000.
3. Андронов И.М., Вейнберг Д.М., Морозов А.Г., Рылов Ю.П., Шереметьевский Н.Н. Система управления положением спутника «Метеор». Управление в пространстве. Т.1. М.: Наука. 1975.
4. Лидоренко Н.С. и др. Введение в молекулярную электронику. М.: Энергоатомиздат. 1984.
5. Лурье А.И. Аналитическая механика. М.: ФМ. 1961.