АКАДЕМИЯ НАУК УКРАИНЫ
ИНСТИТУТ МЕХАНИКИ

На правах рукописи

ФИЛИМОНИХИН Геннадий Борисович

ДИНАМИКА И УСТОЙЧИВОСТЬ МАЯТНИКОВЫХ АВТОБАЛАНСИРОВ СО СВЯЗЯМИ, НАЛОЖЕННЫМИ НА ДВИЖЕНИЯ МАЯТНИКОВ

01.02.01 - теоретическая механика

А в т о р е ф е р а т

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Киев - 1991

Работа выполнена в Киевском ордена Ленина и ордена Октябрьской Революции государственном университете им. Т.Г.Шевченко

Научный руководитель : доктор физико-математических наук, проф. Горошко О.А.

Официальные оппоненты: доктор технических наук проф. Павловский М.А.

кандидат физико-математических наук Краснопольская Т.С.

Ведущая организация: Институт прикладной математики и механики АН УССР, г. Донецк

Защита состоится "26" ноября 1991 г. в 10^{00} часов на заседании специализированного совета К 016.49.01 Института механики АН УССР (252057, Киев-57, ул. Нестерова, 3)

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке Института механики АН УССР

Автореферат разослан "25" октября 1991 г.

Ученый секретарь специализированного совета доктор технических наук В.М.Назаренко

ЛННБ України ім.В.Стефаника
00815796 (-)

АНБ ім. В. Стефаника АН УРСР

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Для балансировки роторов на закритических скоростях вращения применяются маятниковые, шаровые и кольцевые автобалансиры. При вращении ротора с постоянной скоростью, выше критической, корректирующие грузы в таких устройствах со временем приходят в то положение, в котором уравновешивают ротор, после чего при неизменном дисбалансе вращаются с ротором как единое целое. Однако при изменении скорости вращения ротора они это положение покидают, так как начинают отставать, либо опережают ротор. Для устранения этого недостатка в конструкцию автобалансиров вводят различные дополнительные устройства, прекращающие относительные движения грузов после уравновешивания ими ротора. Способ обладает тем недостатком, что корректирующие грузы после фиксации перестают отслеживать текущее изменение дисбаланса ротора.

Для того, чтобы грузы отслеживали изменение как скорости вращения ротора, так и дисбаланса, автором, насколько нам известно, впервые предложено на их движения накладывать связи, позволяющие грузам попарно поворачиваться относительно ротора на равные углы в противоположные стороны. Автобалансиры со связями могут найти широкое применение при уравновешивании на ходу роторов, чей дисбаланс и скорость вращения меняются в процессе эксплуатации: абразивных кругов шлифовальных станков, роторов турбогенераторов; экстракторов центробежных машин и т.д. Всвязи с последним определенный интерес представляют исследования динамики автобалансиров со связями.

Цель работы. Построение математических моделей маятниковых автобалансиров со связями и определение в пространстве параметров областей, обеспечивающих работоспособность устройств.

Методы исследования. При установлении условий работоспособности автобалансиров одним из центральных является вопрос об устойчивости основного и неустойчивости побочных установившихся движений. Это обуславливает широкое применение аппарата математической теории устойчивости при изучении таких устройств. Большой вклад в разработку подходов к изучению динамики и устойчивости роторных и в частности самобалансирующихся систем внесли Ю.В.Агафонов, И.И.Блехман, О.А.Глонь, Б.Г.Гольдштейн, О.А.Горошко, Ф.М.Детинко, Ф.М.Диментберг, М.Я.Кушуль, Т.С.Краснопольская, В.И.Кравченко, А.Я.Лац, Л.Г.Лобас, А.А.Мартынюк, А.И.Муйжниек,

В.П.Нестеренко, М.А.Павловский, А.Я.Савченко и другие. Из зарубежных ученых следует отметить Y.Araki , P.Bövik , I.Inoue, C.Hogfors , S.Miyara и др.

В диссертационной работе при исследовании устойчивости движений был применен подход, основанный на теории устойчивости стационарных движений автономных систем с применением метода прямого разложения решений алгебраических уравнений по степеням малого параметра. Этот подход нашел широкое применение при исследовании устойчивости движения роторов. К изучению устойчивости движений автобалансиров он был повидимому впервые применен Ф.М.Детинко.

Научная новизна. Предложено новое решение задачи снижения чувствительности маятников в маятниковых автобалансирах к изменению скорости вращения ротора, заключающееся в наложении на движения маятников голономных связей специального вида. Построены модели, описывающие плоские движения автобалансиров со связями и ротора. Исследована устойчивость основного и побочных установившихся движений как в классических случаях: при отсутствии сил сопротивления; когда масса маятников намного меньше массы ротора, так и в случаях: быстровращающегося ротора; при большом трении между маятниками и валом; при больших силах внешнего сопротивления. Для рассмотренных случаев даны заключения о работоспособности устройств. Показано, что для определения последних в других случаях достаточно исследовать устойчивость только основного движения.

Достоверность и обоснованность. Результаты и выводы диссертации получены с помощью классических методов аналитической механики и теории устойчивости движения. Применимость ряда полученных аналитических формул проверена при помощи ЭВМ. Между полученными результатами и результатами, известными из теории классических автобалансиров прослеживается прямая аналогия.

Практическая ценность. Результаты работы могут быть использованы при расчете и проектировании автобалансиров со связями.

Проведенные в работе исследования выполнены в соответствии с темой "Разработка методов исследования виброзащитных и виброакустических систем" Гос. бюджетной НИР № гос. регистр. 01860123165, входящей в план НИР УССР на 1985-1990 г.г. на основании постановления Президиума АН УССР № 210 от 21.05.86 г.

Апробация работы. Основные положения и результаты работы докладывались и обсуждались на научных семинарах кафедры "Теоретическая механика и сопротивление материалов" Кировоградского

института сельскохозяйственного машиностроения /Кировоград, 1989-1991 г.г./, на XУ научной конференции молодых ученых Института механики АН УССР /Киев, 1990 г./, на научном семинаре кафедры "Теоретическая и прикладная механика" Киевского государственного университета под руководством чл.-корр. АН УССР А.Ф.Улитко /Киев, 1990 г./, на республиканской конференции "Динамика твердого тела и устойчивость движения" /Донецк, 1990 г./.

Публикации. Содержание диссертационной работы и основные научные результаты отражены в публикациях [1-6].

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, трех глав, заключения, списка литературы, содержащего 96 наименований и приложения. Основной текст изложен на 125 страницах машинописного текста и поясняется 11 рисунками. Общий объем работы 142 страницы.

Автор выражает глубокую признательность и благодарность своему научному руководителю доктору физико-математических наук профессору О.А.Горошко за помощь и постоянное внимание к работе.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обосновывается актуальность исследований, формулируется цель работы, рассматриваются научная новизна, практическая ценность и достоверность полученных результатов, приводятся основные результаты, выносимые на защиту.

В первой главе построены математические модели автобалансиров со связями, в терминах теории устойчивости сформулированы условия работоспособности устройств, поставлена задача определения в пространстве параметров областей, обеспечивающих работоспособность автобалансиров.

В п.1.1 приведены основные сведения из истории развития пассивных автобалансиров. Дан краткий обзор исследований по динамике этих устройств при этом разобраны подходы Ф.М.Детинко, А.И.Муйжниека, И.И.Блехмана и P. Bövic , C.Högfors . Обоснован выбор плоской модели для автобалансиров со связями. Для изучения динамики этих устройств принят подход Ф.М.Детинко.

В .1.2 описаны плоские модели двухмаятникового и четырехмаятникового автобалансиров со связями. В рамках этих моделей

ротор - симметричный плоский диск массы M, насаженный с эксцентриситетом e на абсолютно жесткий вал, перпендикулярный его плоскости. Маятники - невесомые стержни длиной l, несущие на своем конце сосредоточенные массы m. В четырехмаятниковом автобалансире маятники могут быть выстроены вдоль двух взаимоперпендикулярных прямых U, V, жестко связанных с ротором. В процессе движения маятники попарно поворачиваются относительно ротора на равные углы φ или ψ в противоположные стороны. При этом на них действуют моменты сил вязкого сопротивления $H_1\dot{\varphi}$ или $H_1\dot{\psi}$ соответственно. В двухмаятниковом автобалансире одна пара маятников отсутствует. В процессе движения ротор вращается вокруг оси вращения, параллельной валу, с постоянной угловой скоростью ω. Положение вала определяется координатами x, y относительно подвижных осей X, Y, выходящих из оси вращения и параллельных осям U, V. При движении на вал действует сила упругости опор $-c\bar{r}$ и сила вязкого сопротивления $-H_2\bar{v}$, где $\bar{r}(x,y)$, $\bar{v}=d\bar{r}/dt$.

Ниже записаны уравнения движения в безразмерном виде:

- для четырехмаятникового автобалансира со связями

$$\ddot{\xi}-2R_\omega\dot{\eta}-R_\omega^2\xi-R_m\left[\ddot{\psi}\cos\psi+2R_\omega\dot{\varphi}\cos\varphi-\dot{\psi}^2\sin\psi-\right.$$
$$\left.-R_\omega^2(\sin\psi-u_0)\right]+H(\dot{\xi}-R_\omega\eta)+\xi=0$$
$$\ddot{\eta}+2R_\omega\dot{\xi}-R_\omega^2\eta+R_m\left[\ddot{\varphi}\cos\varphi-2R_\omega\dot{\psi}\cos\psi-\dot{\varphi}^2\sin\varphi-\right.$$
$$\left.-R_\omega^2(\sin\varphi+v_0)\right]+H(\dot{\eta}+R_\omega\xi)+\eta=0$$
$$\ddot{\psi}+h\dot{\psi}-(\ddot{\xi}-2R_\omega\dot{\eta}-R_\omega^2\xi)\cos\psi=0$$
$$\ddot{\varphi}+h\dot{\varphi}+(\ddot{\eta}+2R_\omega\dot{\xi}-R_\omega^2\eta)\cos\varphi=0 \qquad /1/$$

- для двухмаятникового автобалансира со связями

$$\ddot{\xi}-2R_\omega\dot{\eta}-R_\omega^2\xi-R_m\left[\ddot{\psi}\cos\psi-\dot{\psi}^2\sin\psi-\right.$$
$$\left.-R_\omega^2(\sin\psi-u_0)\right]+H(\dot{\xi}-R_\omega\eta)+\xi=0$$
$$\ddot{\eta}+2R_\omega\dot{\xi}-R_\omega^2\eta+R_m\left[-2R_\omega\dot{\psi}\cos\psi-R_\omega^2v_0\right]+$$
$$+H(\dot{\eta}-R_\omega\xi)+\eta=0$$

$$\ddot{\psi} + h\dot{\psi} - \left(\ddot{\xi} - 2R_\omega \dot{\eta} - R_\omega^2 \xi\right)\cos\psi = 0, \qquad /2/$$

здесь

$$\xi = \frac{x}{l}; \quad \eta = \frac{y}{l}; \quad \tau = \omega_0 t; \qquad /3/$$

$$R_\omega = \frac{\omega}{\omega_0}, \; R_m = \frac{2m}{M_\Sigma}, \; h = \frac{H_1}{\omega_0 m l^2}, \; H = \frac{H_2}{\omega_0 M_\Sigma},$$

$$u_0 = \frac{Me\cos\gamma}{2ml}, \quad v_0 = \frac{Me\sin\gamma}{2ml}. \qquad /4/$$

В /3/ определены безразмерные переменные, в /4/ - безразмерные параметры. Кроме того в этих соотношениях $\omega_0 = \sqrt{c/M_\Sigma}$ - резонансная частота, $M_\Sigma = M + 4m$ или $M_\Sigma = M + 2m$ - масса всей системы, γ - угол между осью U и вектором дисбаланса ротора.

В п.1.3 найдены стационарные решения уравнений движения и найдены условия существования этих решений /движений/.

При уравновешивании ротора двухмаятниковым автобалансиром со связями предполагалось, что дисбаланс направлен вдоль оси U т.е., что $v_0 = 0$. Уравнения движения /2/ допускают три существенно различных движения; одно основное

$$\tilde{\xi}_0 = 0, \quad \tilde{\eta}_0 = 0, \quad \tilde{\psi}_0 = \arcsin u_0; \qquad /5/$$

и два побочных

$$\tilde{\psi}_{1/2} = \mp\frac{\pi}{2}\,\mathrm{sign}\,u_0, \; \tilde{\xi}_{1/2} = \frac{\Delta_1(\tilde{\psi}_{1/2})}{\Delta}, \; \tilde{\eta}_{1/2} = \frac{\Delta_2(\tilde{\psi}_{1/2})}{\Delta}, \qquad /6/$$

где

$$\Delta = \left(R_\omega^2 - 1\right)^2 + H^2 R_\omega^2,$$

$$\Delta_1(\tilde{\psi}) = R_m R_\omega^2 \left(R_\omega^2 - 1\right)\left(\sin\tilde{\psi} - u_0\right), \; \Delta_2(\tilde{\psi}) = R_m R_\omega^3 H \left(\sin\tilde{\psi} - u_0\right).$$

Уравнения движения ротора и четырехмаятникового автобалансира со связями допускают девять существенно различных решений /движений/: одно основное

$$\tilde{\xi}_0=0,\ \tilde{\eta}_0=0,\ \tilde{\psi}_0=\arcsin u_0,\ \tilde{\varphi}_0=\arcsin(-v_0) \qquad /7/$$

и восемь побочных

1),2) $$\tilde{\xi}_{1/2}=0,\ \varphi_{1/2}=\pm\frac{\pi}{2}\operatorname{sign} v_0,\ \tilde{\eta}_{1/2}=-\frac{R_m R_\omega^2}{R_\omega^2-1}\left(\sin\tilde{\varphi}_{1/2}+v_0\right),$$

$$\tilde{\psi}_{1/2}=\arcsin\left[u_0-\frac{HR_\omega}{R_\omega^2-1}\left(\sin\tilde{\varphi}_{1/2}+v_0\right)\right]; \qquad /8/$$

3),4) $$\tilde{\eta}_{3/4}=0,\ \tilde{\psi}_{3/4}=\mp\frac{\pi}{2}\operatorname{sign} u_0,\ \tilde{\xi}_{3/4}=\frac{R_m R_\omega^2}{R_\omega^2-1}\left(\sin\tilde{\psi}_{3/4}-u_0\right),$$

$$\tilde{\varphi}_{3/4}=\arcsin\left[-v_0+\frac{HR_\omega}{R_\omega^2-1}\left(\sin\tilde{\psi}_{3/4}-u_0\right)\right]; \qquad /9/$$

5),...,8) $$\tilde{\psi}_{5,6/7,8}=\mp\frac{\pi}{2}\operatorname{sign} u_0,\ \tilde{\varphi}_{5,6/7,8}=\pm\frac{\pi}{2}\operatorname{sign} v_0,$$

$$\tilde{\xi}_j=\frac{\Delta_1(\tilde{\psi}_j,\tilde{\varphi}_j)}{\Delta},\ \tilde{\eta}_j=\frac{\Delta_2(\tilde{\psi}_j,\tilde{\varphi}_j)}{\Delta},\ /j=\overline{5,8}/ \qquad /10/$$

где

$$\Delta=(R_\omega^2-1)^2+H^2R_\omega^2,$$

$$\Delta_1(\tilde{\psi},\tilde{\varphi})=R_m R_\omega^2\left[(R_\omega^2-1)(\sin\tilde{\psi}-u_0)+HR_\omega(\sin\tilde{\varphi}+v_0)\right],$$

$$\Delta_2(\tilde{\psi},\tilde{\varphi})=R_m R_\omega^2\left[HR_\omega(\sin\tilde{\psi}-u_0)-(R_\omega^2-1)(\sin\tilde{\varphi}+v_0)\right].$$

Условия работоспособности автобалансиров сформулированы следующим образом:

- при ограниченных дисбалансах, обеспечивающих существование основного движения, для работоспособности автобалансиров на определенной скорости вращения ротора необходимо, чтобы при любом таком дисбалансе основное движение было единственным устойчивым стационарным движением;
- при произвольном изменении дисбаланса для работоспособности

автобалансиров на определенной скорости вращения ротора необходимо, чтобы при любом дисбалансе из всех существующих стационарных движений устойчивым было только то, в котором ротор наиболее уравновешен.

В п.1.4 приведены основные результаты, полученные в первой главе.

Во второй главе, в предположении существования, исследуется устойчивость по первому приближению основного движения.

В п.2.1 для основного движения выведены уравнения первого приближения, составлены характеристические уравнения. Последние имеют вид:

- для двухмаятникового автобалансира со связями

$$a_{11}\bar{a}_{11}a_{33} - \varepsilon_1\left(a_{11}\bar{a}_{31}^2 + \bar{a}_{11}a_{31}^2\right) = 0 \qquad /11/$$

где

$$\varepsilon_1 = \frac{R_m \cos^2\tilde{\varphi}_0}{2}$$

- для четырехмаятникового автобалансира со связями

$$a_{11}\bar{a}_{11}a_{33}^2 - \varepsilon_2\left(a_{11}\bar{a}_{31}^2 + \bar{a}_{11}a_{31}^2\right)a_{33} + \varepsilon_2^2\left(1-\delta^2\right)a_{31}^2\bar{a}_{31}^2 = 0 \qquad /12/$$

где

$$\varepsilon_2 = R_m\frac{\cos^2\tilde{\psi}_0 + \cos^2\tilde{\varphi}_0}{2},\quad \delta = \frac{\cos^2\tilde{\psi}_0 - \cos^2\tilde{\varphi}_0}{\cos^2\tilde{\psi}_0 + \cos^2\tilde{\varphi}_0},$$

причем в обоих случаях

$$a_{11} = \left(\lambda + iR_\omega\right)^2 + H\left(\lambda + iR_\omega\right) + 1,\quad a_{31} = \left(\lambda + iR_\omega\right)^2,\quad a_{33} = \lambda^2 + h\lambda \qquad /13/$$

и знак сопряжения над a_{ij} к λ не относится.

Уравнения представлены в виде полиномов от λ, после чего на основании следствий из формул Виета установлено, что основное движение может быть устойчивым только на зарезонансных скоростях вращения ротора, т.е. когда $|R_\omega| > 1$.

В п.2.2 характеристическое уравнение /11/ исследовано в предположении отсутствия сил сопротивления, т.е. когда

$$h = 0,\quad H = 0 \qquad /14/$$

В этом случае устойчивость движения зависит от двух параметров ε_1 и R_ω. На рисунке 1 изображены области устойчивости в первом приближении A, B, построенные в плоскости $\varepsilon_1 \times R_\omega$ в результате исследований. Границами областей устойчивости являются критические скорости $R_{\omega j}(\varepsilon_1)$, /j=1,3/. Из рисунка видно, что если $\varepsilon_1 < 0,25$, то у системы три критические скорости, если $\varepsilon_1 > 0,25$, то одна. Наинизшая скорость совпадает с резонансной частотой. Для остальных скоростей с использованием метода прямого разложения корней алгебраических уравнений по степеням малого параметра найдены разложения, дающие относительную погрешность не более 7 %. Эти разложения:

- при $0 < \varepsilon_1 \leq 0,05$

$$R_{\omega 2} = 1 + \frac{49}{16}\varepsilon_1 + \frac{12397}{1024}\varepsilon_1^2 + \cdots$$

$$R_{\omega 3} = 1 + 2\left(\frac{\varepsilon_1}{2}\right)^{1/3} + \frac{7}{3}\left(\frac{\varepsilon_1}{2}\right)^{2/3} + \frac{29}{8}\,\frac{\varepsilon_1}{2} + \cdots ; \qquad /15/$$

- при $0,05 < \varepsilon_1 < 0,25$

$$R_{\omega 2/3} = \frac{1}{8\alpha}\left[1 \pm 2\alpha^{1/2} + \frac{11}{2}\alpha \mp \frac{37}{4}\alpha^{3/2} - \frac{155}{8}\alpha^2 + \cdots\right], \qquad /16/$$

где

$$\alpha = \frac{1}{2}\left(0,25 - \varepsilon_1\right).$$

В результате исследований было также установлено следующее:

- если масса маятников меньше массы ротора, то при вращении ротора со скоростями большими, чем третья критическая, вычисленная при отсутствии дисбаланса, основное движение в первом приближении устойчиво вне зависимости от дисбаланса, а при вращении с меньшими скоростями основное движение при определенных дисбалансах неустойчиво;
- если масса маятников больше массы ротора, то движение в первом приближении будет устойчивым на зарезонансных скоростях для дисбалансов, удовлетворяющих условию

$$|u_0| \leq \sqrt{\frac{R_m - 0,5}{R_m}}, \quad /R_m > 0,5/. \qquad /17/$$

В п.2.3 характеристическое уравнение /12/ исследовано в предположении отсутствия сил сопротивления. В этом случае устойчивость движения зависит от трех параметров ε_2, R_ω, K, где $K=1-\delta^2$. Критические скорости при этом являются функциями вида $R_{\omega j}=R_{\omega j}(\varepsilon_2, K)$. В свою очередь

$$\varepsilon_2=\frac{R_m}{2}\left(2-\nu^2\right),\quad K=\frac{4\left(1-\nu^2\sin^2\gamma\right)\left(1-\nu^2\cos^2\gamma\right)}{\left(2-\nu^2\right)^2}, \qquad /18/$$

где

$$\nu=\frac{Me}{2ml}$$

То есть ε_2 зависит от отношения массы /пары/ маятников к массе всей системы и от величины /приведенного/ дисбаланса, а K зависит от величины и направления вектора дисбаланса. В результате исследований установлено, что система в зависимости от отношения массы маятников к массе всей системы и в зависимости от дисбаланса имеет три или одну критические скорости. При этом движение в первом приближении устойчиво соответственно либо между первой и второй и над третьей скоростями, либо на закритических скоростях. В плоскости $R_m \times R_\omega$ построены области устойчивости в первом приближении для случаев ограниченных дисбалансов, не превышающих той величины, которую может уравновесить одна пара маятников и для дисбалансов, обеспечивающих существование основного движения. В первом случае это области A, B на рисунке 2, во втором - область B на этом же рисунке. Снизу области A и B ограничивает критическая скорость

$$R_{\omega_1}\left(R_m, 1\right)=\frac{\sqrt{1-s^2}}{1-2s^2}, \qquad /19/$$

где

$$s=\left\{\frac{\varepsilon}{2}\left[1-\frac{16}{27}\varepsilon^2+\left(1-\frac{32}{27}\varepsilon^2\right)^{\frac{1}{2}}\right]\right\}^{\frac{1}{3}}+$$

$$+\left\{\frac{\varepsilon}{2}\left[1-\frac{16}{27}\varepsilon^2-\left(1-\frac{32}{27}\varepsilon^2\right)^{\frac{1}{2}}\right]\right\}^{\frac{1}{3}}-\frac{2}{3}\varepsilon\cdot$$

и

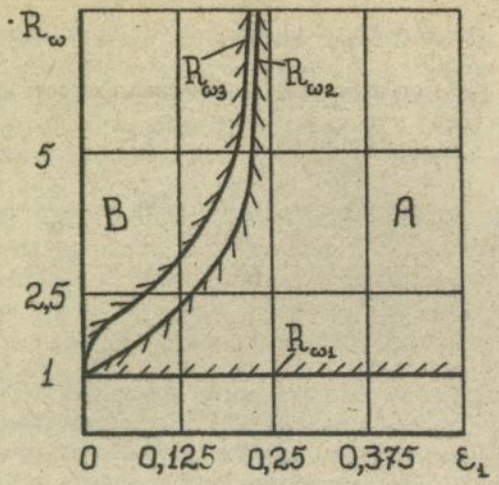
R_ω
$R_{\omega 3}$
$R_{\omega 2}$
5
B
A
2,5
$R_{\omega 1}$
1
0
0,125
0,25
0,375
ε_1

Рис. 1.

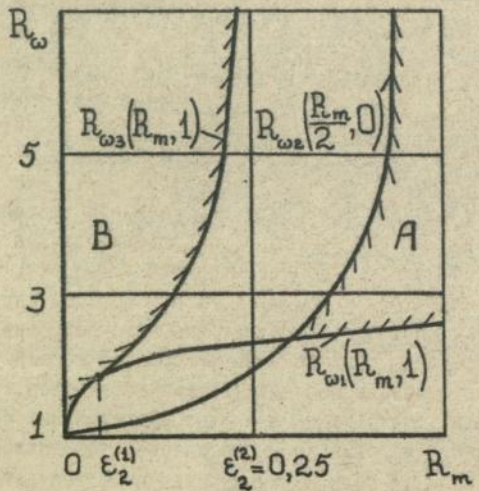
R_ω
$R_{\omega 3}(R_m, 1)$
$R_{\omega 2}\left(\frac{R_m}{2}, 0\right)$
5
B
A
3
$R_{\omega 1}(R_m, 1)$
1
0
$\varepsilon_2^{(1)}$
$\varepsilon_2^{(2)}=0,25$
R_m

Рис. 2.

$$\varepsilon = \sqrt{R_m}, \quad 0 < R_m < 0{,}5$$

Сверху область A ограничивает критическая скорость

$$R_{\omega 2}\left(\frac{R_m}{2}, 0\right) = R_{\omega 2}\left(\frac{R_m}{2}\right), \quad 0 < R_m < 0{,}5 \qquad /20/$$

Здесь $R_{\omega 2}(R_m/2)$ вторая критическая скорость двухмаятникового автобалансира со связями, вычисленная при $\varepsilon_1 = R_m/2$. Справа область B ограничивает критическая скорость

$$R_{\omega 3}(R_m, 1) = \frac{\sqrt{2(1-2R_m)}}{1-4R_m}, \quad \varepsilon_2^{(1)} < R_m < \varepsilon_2^{(2)} \qquad /21/$$

здесь

$$\varepsilon_2^{(1)} = 0{,}040173\ldots, \quad \varepsilon_2^{(2)} = 0{,}25$$

В результате исследований установлено также, что:

- если масса маятников меньше массы ротора, то существует скорость, равная наибольшей критической, вычисленной при отсутствии дисбаланса, такая, что по ее превышении основное движение становится устойчивым в первом приближении вне зависимости от дисбаланса, а при вращении ротора с меньшими скоростями становится неустойчивым при определенных дисбалансах;
- если масса маятников больше массы ротора, то независящую от дисбаланса область устойчивых скоростей вращения ротора можно выделить только для ограниченных сверху дисбалансов.

В п.2.4 исследована устойчивость основного движения в ряде важных с точки зрения практики предельных случаев: когда масса маятников намного меньше массы ротора /$R_m \ll 1$/; для быстровращающегося ротора /$|R_\omega| \gg 1$/; при большом внутреннем трении /$h \gg 1$/; при больших силах внешнего сопротивления /$H \gg 1$/. При этом были найдены разложения корней уравнений /11/, /12/ по степеням соответствующих параметров, после чего были выделены необходимые, а с учетом предельных соотношений и достаточные условия ассимптотической устойчивости. В результате исследований были получены следующие результаты.

При уравновешивании ротора двухмаятниковым автобалансиром со связями в случаях, когда $R_m \ll 1$, или $h \gg 1$, или

$H \gg 1$ для устойчивости основного движения достаточно, чтобы ротор вращался с зарезонансными скоростями. Устойчивость будет иметь место и при уравновешивании быстровращающегося ротора.

При уравновешивании ротора четырехмаятниковым автобалансиром со связями в случаях, когда $R_m \ll 1$ или $h \gg 1$ основное движение будет устойчивым на зарезонансных скоростях. Для быстровращающегося ротора устойчивость не будет нарушаться при выполнении условия

$$h > \sqrt{\varepsilon_2} H, \qquad /22/$$

ограничивающего внешнее сопротивление. При больших силах внешнего сопротивления основное движение для быстровращающегося ротора неустойчиво, однако при выполнении условия

$$4R_m < h \qquad /23/$$

существует интервал скоростей

$$(R_{\omega 1}, R_{\omega 2}) \qquad /24/$$

где

$$R_{\omega 1/2} = \frac{1}{\kappa}\sqrt{1 \mp \sqrt{1-2\kappa^2}}, \quad \kappa = \frac{\sqrt{2R_m}}{h},$$

не зависящий от дисбаланса, внутри которого основное движение ассимптотически устойчиво.

В п.2.5 приведены основные результаты, полученные во второй главе.

<u>В третьей главе</u> исследуется устойчивость по первому приближению побочных движений.

В п.3.1 для побочных движений двухмаятникового автобалансира со связями составлены уравнения первого приближения, получены характеристические уравнения. Последние, по разложении на сомножители, можно записать в виде

$$(\lambda + iR_\omega)^2 + H(\lambda + iR_\omega) + 1 = 0, \quad (\lambda - iR_\omega)^2 + H(\lambda - iR_\omega) + 1 = 0$$

$$\lambda^2 + h\lambda - R_\omega^2 \tilde{\xi}_j \sin\tilde{\psi}_j = 0, \quad /j = 1,2/ \qquad /25/$$

здесь j - номер побочного движения.

Исследования корней характеристических уравнений позволили сделать следующие выводы:

- если основное движение существует, то побочные могут быть устойчивыми только на дорезонансных скоростях вращения ротора;
- если основное движение не существует, то на зарезонансных скоростях вращения ротора единственным устойчивым стационарным движением становится то, в котором ротор наиболее уравновешен.

В п.3.2 для побочных движений четырехмаятникового автобалансира со связями составлены уравнения первого приближения, получены характеристические уравнения. Последние, по разложении на сомножители, можно записать в виде:

- для движений 1, 2

$$a_{11}\bar{a}_{11}a_{33} - \varepsilon_2\left(a_{11}\bar{a}_{31}^2 + \bar{a}_{11}a_{31}^2\right) = 0,$$
$$\lambda^2 + h\lambda + R_\omega^2\tilde{\eta}_{1/2}\sin\tilde{\varphi}_{1/2} = 0 \qquad /26/$$

здесь a_{ij} из /13/;

- для движений 3, 4 эти уравнения аналогичны /26/;
- для движений 5-8

$$(\lambda+iR_\omega)^2 + H(\lambda+iR_\omega) + 1 = 0,\ (\lambda-iR_\omega)^2 + H(\lambda-iR_\omega) + 1 = 0$$

$$\lambda^2 + h\lambda - R_\omega^2\tilde{\xi}_j\sin\tilde{\varphi}_j = 0,\ \lambda^2 + h\lambda + R_\omega^2\tilde{\eta}_j\sin\tilde{\varphi}_j = 0,\ /j=\overline{5,8}/ \qquad /27/$$

Корни характеристических уравнений, составленных для движений 1-4, исследованы при отсутствии сил сопротивления и в предельных случаях пункта 2.4. Корни уравнений, составленных для движений 5-8 исследованы в общем случае. При этом в пространстве параметров были найдены области существования и устойчивости побочных движений. Анализ областей позволил сделать следующие заключения:

- если основное движение существует, то побочные могут быть устойчивыми только на дорезонансных скоростях вращения ротора;
- если основное движение не существует, то при наличии сил сопротивления не существует области скоростей, не зависящей от дисбаланса, внутри которой из всех существующих побочных движений устойчиво только то, в котором ротор наиболее уравновешен;

- если основное движение не существует, то при отсутствии сил сопротивления существует скорость

$$\tilde{R}_{\omega}\left(R_m\right)=R_{\omega 3}\left(R_m/2\right) \qquad /28/$$

/равная третьей критической скорости двухмаятникового автобалансира со связями, вычисленной при $\varepsilon_1=R_m/2$ /, по превышении которой при любых дисбалансах из всех существующих побочных движений устойчивым в первом приближении становится только то, в котором ротор наиболее уравновешен.

В п.3.3. приведены основные результаты, полученные в третьей главе.

В заключении сформулированы основные результаты, полученные в диссертации:

1. Предложено новое решение задачи снижения чувствительности маятников в маятниковых автобалансирах к изменению скорости вращения ротора, заключающееся в наложении на движения маятников голономных связей, позволяющих маятникам попарно поворачиваться относительно ротора на равные углы в противоположные стороны.

2. Построены плоские модели ротора и двухмаятникового и четырехмаятникового автобалансиров со связями.

3. Исследована устойчивость по первому приближению основного и побочных установившихся движений, причем наряду с классическими для теории автобалансиров случаями: отсутствия сил сопротивления; когда масса маятников намного меньше массы ротора рассмотрены случаи: быстровращающегося ротора; большого трения между маятниками и валом; больших сил внешнего сопротивления. Для рассмотренных случаев даны заключения о работоспособности устройств.

4. Установлено, что при определении условий работоспособности в других случаях достаточно исследовать устойчивость только основного движения.

На основании полученных результатов сделаны следующие основные выводы об работоспособности автобалансиров со связями:

— при отсутствии сил сопротивления для работоспособности автобалансиров со связями необходимо, чтобы масса грузов была меньше массы ротора и последний вращался со скоростями, превышающими наибольшую критическую, найденную при отсутствии дисбаланса;

- при наличии сил сопротивления двухмаятниковый автобалансир со связями в ряде важных с точки зрения практики случаев: когда масса маятников намного меньше массы ротора; при больших силах внешнего сопротивления; при больших силах внутреннего сопротивления работоспособен на зарезонансных скоростях вращения ротора; устройство работоспособно и при уравновешивании быстровращающегося ротора;

- при наличии сил сопротивления четырехмаятниковый автобалансир со связями работоспособен только при уравновешивании ограниченных дисбалансов, обеспечивающих существование основного движения, причем: в случае, когда масса маятников намного меньше массы ротора или при больших силах внутреннего сопротивления устройство работоспособно на зарезонансных скоростях; на больших скоростях вращения ротора устройство работоспособно при выполнении условия /22/, ограничивающего внешнее трение; при больших силах внешнего сопротивления устройство работоспособно в интервале скоростей /24/, существующем при выполнении условия /23/.

В приложении содержится текст программы для табулирования функций, составленный на языке программирования бейсик. Там же приведены тексты подпрограмм для вычисления табулируемых функций. Последними являются критические скорости автобалансиров со связями.

Основные положения и результаты диссертационной работы изложены в следующих публикациях:

1. Филимонихин Г.Б. Динамика маятникового автобалансирующего устройства со связями, наложенными на движения корректирующих грузов. - Кировоград, 1989. - 19 с. Деп. в УкрНИИНТИ 07.06.89, № 1515-Ук89.

2. Филимонихин Г.Б. Динамическая устойчивость ротора, уравновешиваемого маятниковым автобалансирующим устройством со связями, наложенными на движения маятников. - Кировоград, 1989. - 12 с. Деп. в УкрНИИНТИ 04.11.89, № 2431-Ук89.

3. Филимонихин Г.Б. Устойчивость маятникового автобалансирующего устройства со связями, наложенными на движения маятников. - Кировоград, 1990. - 12 с. Деп. в УкрНИИНТИ 11.03.90, № 431-Ук90.

АНБ ім. В. Стефаника
АН УРСР

4. Филимонихин Г.Б. Динамика нового автобалансирующего устройства со связями, наложенными на движения маятников // Тр. ХУ науч. конф. мол. ученых Ин-та мех. АН УССР. - Киев, 1990. - Ч.3. - С. 535-541. - Деп. в ВИНИТИ 10.07.90, № 3802-В90.

5. Филимонихин Г.Б. Динамика и устойчивость нового автобалансирующего устройства для роторных систем // Тезисы докладов республиканской конференции "Динамика твердого тела и устойчивость движения"/ Донецк, 1990. -С. 63.

6. Филимонихин Г.Б. К устойчивости автобалансирующего устройства со связями, наложенными на движения корректирующих грузов // Доп. АН УРСР. Сер. А. - 1990. - № 12. - С. 26-29.

Подписано к печати 24.10.91г. Формат 60х84/16.
Бумага офсетная Усл.-печ.лист. 1,0. Уч.-изд.лист 1,0.
Тираж 100 Заказ. 1376. Бесплатно
ФОП Института электродинамики АН УССР,
252057, Киев-57, проспект Победы, 56.

Ab 25.394