

Московский государственный технический университет
имени Н.Э. Баумана

В.В. Дубинин, Ю.Н. Жигулевцев, В.В. Витушкин

Автоматизированный лабораторный комплекс
для изучения гироскопических давлений ТМл-04М

*Методические указания к выполнению лабораторной работы
по курсу «Теоретическая механика»*

Москва
Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана
2007

УДК 521.3
ББК 22.213
Д79

Рецензент *А.В. Конаев*

Дубинин В.В., Жигулевцев Ю.Н., Витушкин В.В.

Д79 Автоматизированный лабораторный комплекс для изучения гироскопических давлений ТМл-04М: Метод. указания к выполнению лабораторной работы по курсу «Теоретическая механика». – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2007. – 16 с.: ил.

Дано описание лабораторного комплекса, предназначенного для исследования с применением ПЭВМ гироскопических давлений на горизонтальную платформу, создаваемых «бегунами» (связкой двух «бегунов») при их вращении с заданной угловой скоростью вокруг вертикальной оси. Проведены теоретический анализ и экспериментальное исследование работы лабораторной установки, описаны методика и порядок выполнения лабораторной работы.

Для студентов 2-го курса, обучающихся по машиностроительным и приборостроительным специальностям.

Ил. 8. Библиогр. 2 назв.

**УДК 521.3
ББК 22.213**

1. ОПИСАНИЕ КОМПЛЕКСА ТМл-04М

Рассматриваемый лабораторный комплекс является оригинальной совместной научно-методической разработкой кафедры «Теоретическая механика» МГТУ им. Н.Э. Баумана и РНПО «Росучприбор», позволяющей проводить эксперименты по изучению гироскопических сил и моментов.

Комплекс состоит из лабораторной установки, аналого-цифрового преобразователя (АЦП), ПЭВМ типа IBM PC и программно-методического обеспечения (рис. 1). С помощью этого комплекса можно проводить лабораторные работы по определению гироскопических давлений на горизонтальную платформу, создаваемых дисками – «бегунами» (связкой двух «бегунов») при вращении их с заданной угловой скоростью вокруг вертикальной оси [1].



Рис. 1. Общий вид лабораторного комплекса ТМл-04М

Лабораторная установка комплекса оснащена специальными датчиками для замера угловой скорости вращения «бегунов» во-

круг вертикальной оси (переносной угловой скорости) и осадки платформы, по которой они перекатываются. «Бегуны» приводятся во вращение вокруг вертикальной оси с помощью электродвигателя и, перекатываясь по платформе, приобретают угловую скорость вращения вокруг собственных осей симметрии, что приводит к появлению динамического (гироскопического) давления на платформу. Платформа выполнена в виде тонкого диска и подпружинена относительно неподвижного основания установки так, что один конец пружины упирается в платформу, а второй – в неподвижное основание установки.

Перед началом экспериментов выполняется тарировка пружины с помощью мерных грузов, накладываемых на платформу в статическом состоянии. Кроме того, для проведения лабораторной работы необходимо знать моменты инерции «бегунов» относительно их осей симметрии (собственных продольных осей). Для определения моментов инерции используется специально разработанный стенд крутильных колебаний. В экспериментах каждый из «бегунов» по отдельности устанавливается на чашке стенда при совмещении его оси симметрии с вертикальной осью колебаний, измеряется период свободных колебаний «бегуна» и определяется его момент инерции. Замеряются также радиусы внешних поверхностей «бегунов».

При проведении эксперимента включают электродвигатель установки и этим приводят «бегуны» во вращение вокруг вертикальной оси. Постепенно увеличивая угловую скорость вращения, непрерывно замеряют эту угловую скорость (переносную угловую скорость) и осадку подпружиненной платформы. На основе полученных данных строят теоретическую зависимость гироскопических давлений от переносной угловой скорости вращения «бегунов». Обработку результатов измерений и построение теоретической зависимости проводят с помощью ПЭВМ по специальной программе.

Программное обеспечение рассматриваемого комплекса реализовано в среде LabVIEW (Laboratory Virtual Instruments Engineering Workbench – среда разработки лабораторных виртуальных приборов) фирмы National Instruments [2], поставляющей также аппаратуру ввода-вывода сигналов, в том числе плату АЦП NI PCI-6221, применяемую в данном комплексе. LabVIEW представляет собой

интегрированную среду для графического программирования и выполнения задач автоматизации измерений и экспериментов, обеспечивающую ввод и обработку экспериментальных данных с отображением результатов обработки в реальном масштабе времени.

Программное обеспечение имеет вид виртуального прибора TML-04M.vi, реализующего алгоритм выполнения лабораторной работы. Экспериментальные данные вместе с указанной теоретической зависимостью выводятся на экран виртуального прибора в виде массива точек.

Целью лабораторной работы является изучение вопроса об определении динамических реакций в гироскопических системах.

Схема лабораторной установки показана на рис. 2. Гироскопические давления являются полезной нагрузкой – они используются для создания дополнительного давления на платформу, например при измельчении того или иного продукта. Гироскопическое давление возникает в системе, если ось твердого тела, вращающегося вокруг нее, поворачивается в пространстве.

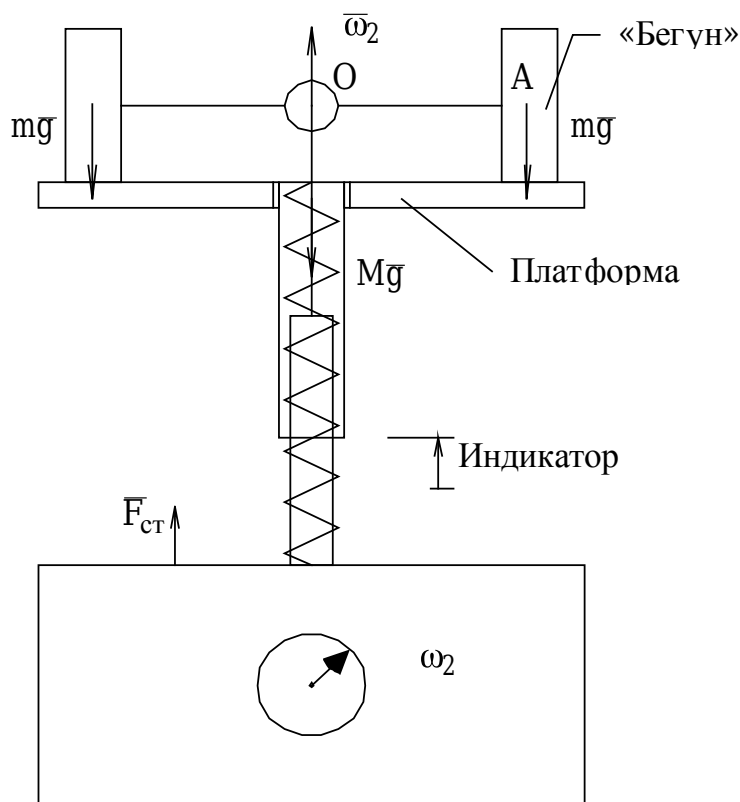


Рис. 2. Схема лабораторной установки

2. ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

На рис. 3 схематично показан отдельный «бегун» с действующими на него внешними силами.

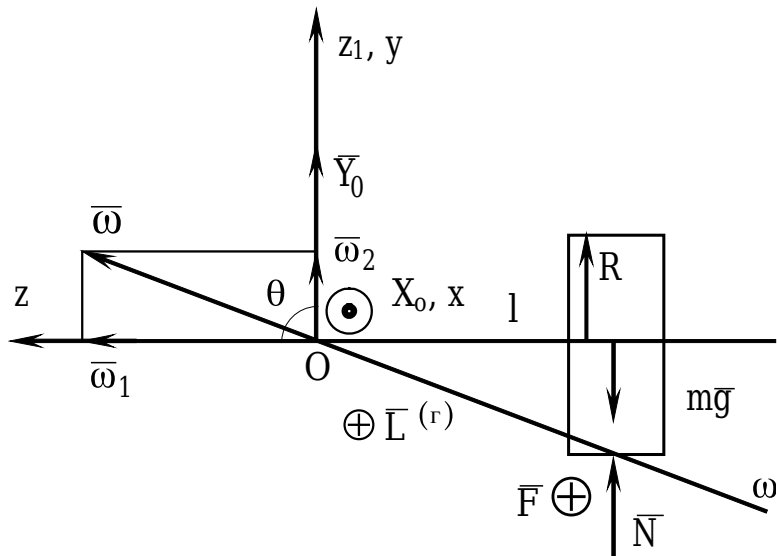


Рис. 3. Схема «бегуна»

Абсолютная угловая скорость «бегуна» $\vec{\omega}$ равна векторной сумме двух составляющих (см. рис. 3 и 4):

$$\bar{\omega} = \bar{\omega}_1 + \bar{\omega}_2 ,$$

где $\bar{\omega}_1$ – угловая скорость собственного вращения; $\bar{\omega}_2$ – угловая скорость прецессии (переносная угловая скорость «бегуна»), при этом, согласно рис. 3, справедливо соотношение

$$\frac{\omega_1}{\omega_2} = \frac{1}{R}. \quad (1)$$

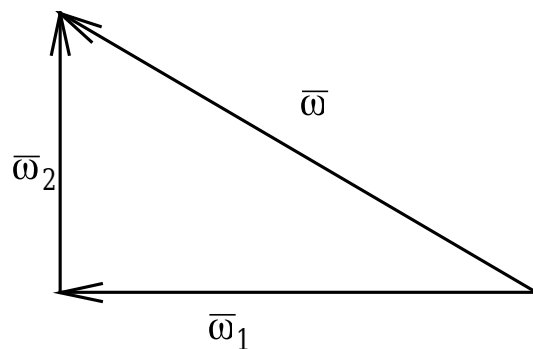


Рис. 4. Сложение угловых скоростей «бегуна»

Силы, действующие на платформу при вращении «бегунов», показаны на рис. 5, где силы нормального давления на платформу со стороны «бегунов» \bar{N}' и \bar{N}'_1 одинаковы вследствие симметрии установки, т. е. $\bar{N}'_1 = \bar{N}' = \bar{N}$. Сила упругой деформации пружины определяется соотношением

$$F_{\text{упр}} = c\lambda_{\Sigma},$$

где c – коэффициент жесткости пружины; $\lambda_{\Sigma} = \lambda_{\text{ст}} + \lambda$ ($\lambda_{\text{ст}}$ – статическая деформация пружины в отсутствие вращения «бегунов»; λ – дополнительная деформация пружины при вращении «бегунов»).

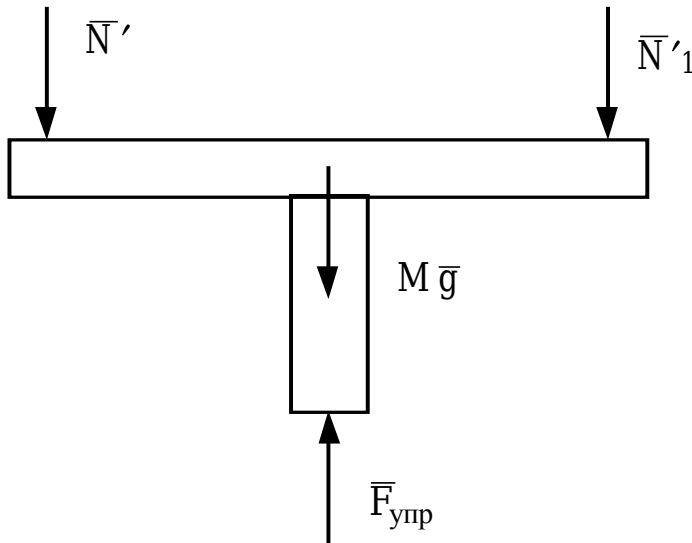


Рис. 5. Силы, действующие на платформу

Согласно рис. 2, при отсутствии вращения «бегунов» условие равновесия для всего устройства имеет вид

$$F_{\text{ст}} - 2mg - Mg = 0,$$

где $F_{\text{ст}} = c\lambda_{\text{ст}}$, и следовательно,

$$c\lambda_{\text{ст}} = (2m + M)g. \quad (2)$$

Запишем теперь выражение для гироскопического момента при вращении «бегуна»:

$$\bar{\Gamma}^{(r)} = J_z (\bar{\omega}_1 \times \bar{\omega}_2),$$

где J_z – момент инерции «бегуна» (вместе с его осью) относительно собственной оси вращения Oz (см. рис. 3). В данном случае угол нутации (угол между осями Oz и Oz_4) $\theta = 90^\circ$.

Применяя принцип Даламбера, для отдельного «бегуна» (см. рис. 3) имеем

$$\bar{L}_O^{(u)} + \bar{L}_O^{(e)} = 0,$$

где $\bar{L}_O^{(u)}$ – главный момент сил инерции «бегуна»; $\bar{L}_O^{(e)}$ – главный момент внешних сил, при этом $\bar{L}_O^{(u)} \cong \bar{L}^{(r)}$ и, следовательно, $\bar{L}_O^{(r)} + \bar{L}_O^{(e)} = 0$.

Отсюда получаем в проекции на ось Ox

$$L_x^{(r)} + L_x^{(e)} = 0,$$

или

$$-J_z \omega_1 \omega_2 \sin 90^\circ + Nl - mgl = 0. \quad (3)$$

Рассматривая силы, действующие на платформу при установившемся движении (см. рис. 5), имеем

$$c(\lambda_{ст} + \lambda) - 2N - Mg = 0. \quad (4)$$

Используя (1), (2) и (3), из (4) получаем

$$c\lambda = \frac{2J_z \omega_1 \omega_2}{l}, \quad \text{или} \quad c\lambda = \frac{2J_z \omega_2^2}{R}. \quad (5)$$

3. ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЫ

Проведение тарировок

На лабораторной установке комплекса ТМл-04М имеются два датчика, позволяющие измерять угловую скорость ω_2 и вертикальное смещение платформы λ .

Вначале проводят тарировку пружины с помощью мерных грузов. Грузы различной массы накладывают на крышку установки и измеряют осадку пружины. Считая зависимость упругой силы пружины от ее деформации (приращения деформации) λ линейной, определяют коэффициент жесткости пружины c . Ре-

зультаты этих измерений представлены на рис. 6, в соответствии с которым $c = 8060...9000$ Н/м.

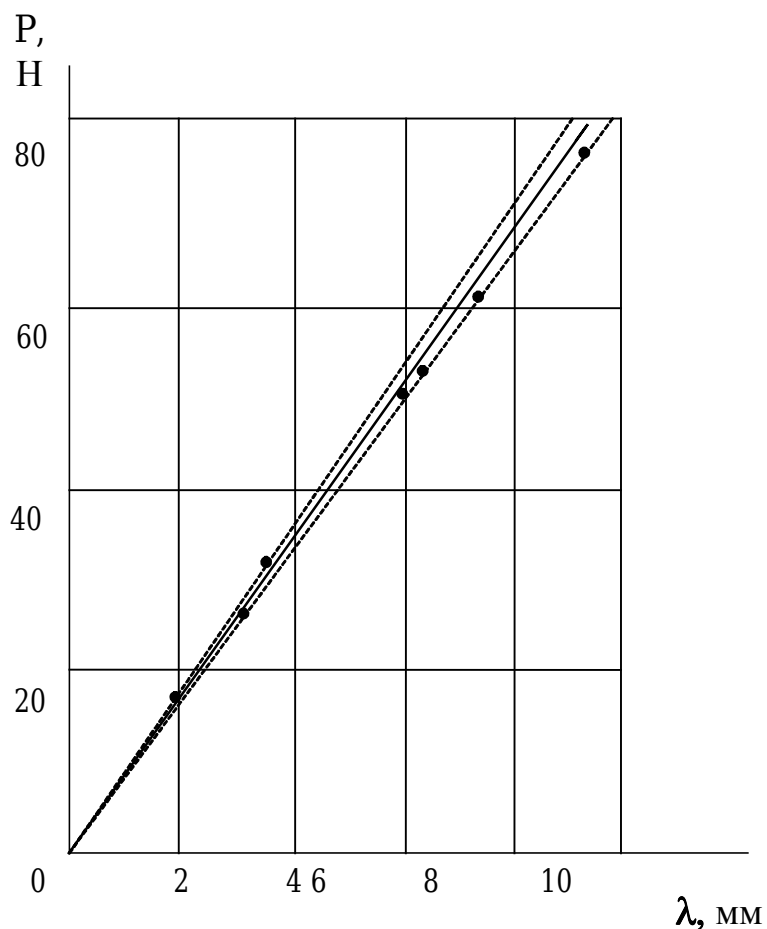


Рис. 6. Характеристика пружины

Далее определяют момент инерции бегунов относительно их продольной оси z . Методика определения момента инерции «бегунов» изложена в разработке по лабораторному комплексу ТМл-20 [3]. В экспериментах измеряются периоды крутильных колебаний чашки установки – T , чашки с мерным грузом в виде цилиндра – $T_{\text{ц}}$ и чашки с «бегуном» – $T_{\text{б}}$, затем определяется момент инерции «бегуна» J_z по уравнению

$$J_z = \frac{T_{\text{б}}^2 - T^2}{T_{\text{ц}}^2 - T^2} J_{z_{\text{ц}}}.$$

Момент инерции мерного груза – цилиндра – относительно его продольной оси симметрии рассчитывают по формуле

$$J_{z_{ц}} = \frac{m_{ц} r_{ц}^2}{2}.$$

Средние значения T , $T_{ц}$, $T_{б}$, а также значения J_z и $J_{z_{ц}}$ приведены ниже:

T , с	$T_{ц}$, с	$T_{б}$, с	J_z , кг · м ²	$J_{z_{ц}}$, кг · м ²
1,70	4,92	5,10	$3,424 \cdot 10^3$	$3,157 \cdot 10^{-3}$

Теоретическая кривая

Гироскопическое давление «бегуна» на платформу определяется соотношением

$$N^{(r)} = \frac{J_z \omega_1 \omega_2}{l} = \frac{J_z \omega_2^2}{R}, \quad (6)$$

или с учетом (5)

$$N^{(r)} = \frac{c\lambda}{2}. \quad (7)$$

Теоретическую зависимость $N_{\Sigma} = f(\omega_2)$, т. е. зависимость суммарного гироскопического давления от угловой скорости прецессии «бегунов» ($N_{\Sigma} = 2N^{(r)}$ – суммарное гироскопическое давление обоих «бегунов» на платформу), определяют, принимая за основу зависимости (5) и (7). После проведения расчетов (с учетом найденного значения J_z) получают зависимость для N_{Σ} :

$$N_{\Sigma} = c\lambda = 0,11476\omega_2^2, \quad (8)$$

где размерности величин следующие: $[\omega_2] = \text{с}^{-1}$ (рад/с – единица измерения), $[N_{\Sigma}] = \text{Н}$.

Проведение экспериментов и обработка данных

При проведении лабораторной работы включают электродвигатель, который сообщает переносную угловую скорость ω_2 «бегунам». Эту угловую скорость (угловую скорость прецессии) постепенно увеличивают с помощью специальной ручки-регулятора. При этом осадка платформы соответственно увеличивается. Экс-

периментальные значения $N_z^{(r)}$ при фиксированных значениях λ определяют по формуле (7).

Возможны два способа представления экспериментальных и расчетных данных.

В первом случае для построения теоретической кривой определяют осадку пружины платформы в зависимости от значений ω_2 , используя соотношение (8):

$$\lambda = \frac{N_z}{c} = 0,11476 \frac{\omega_2^2}{c}.$$

При этом на расчетную величину осадки (деформации) пружины будет оказывать влияние точность определения коэффициента жесткости пружины.

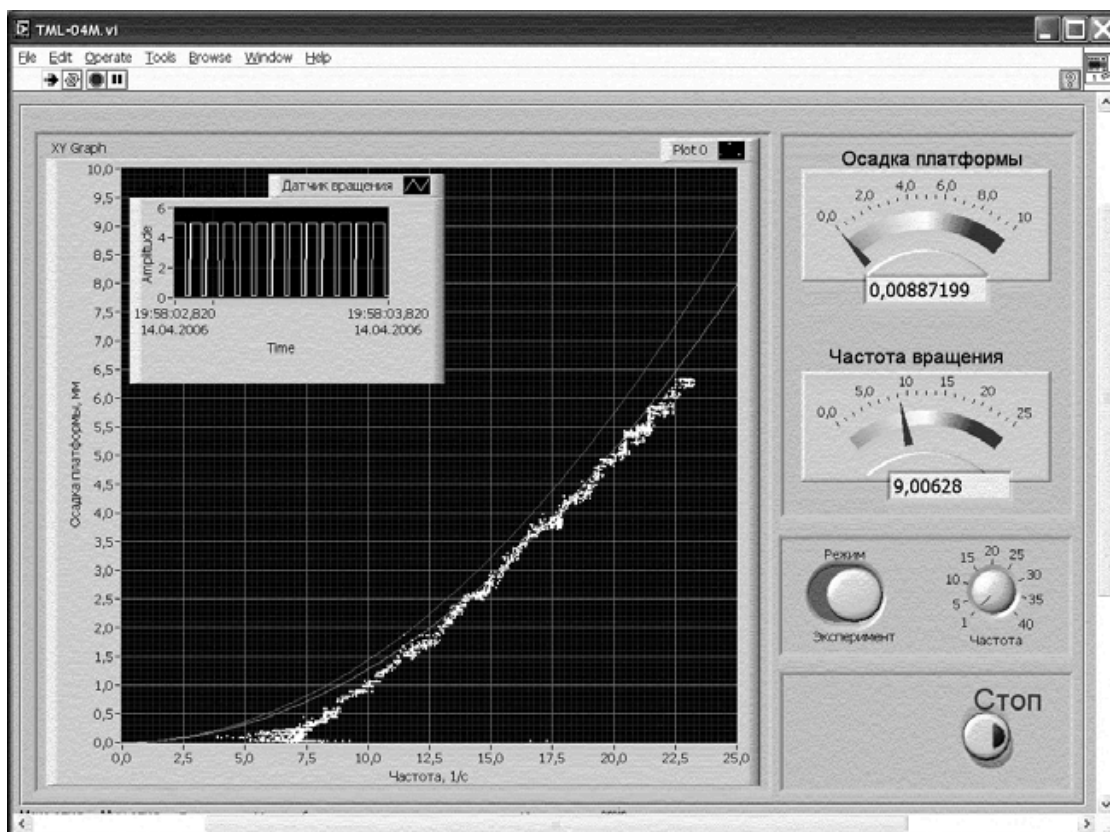


Рис. 7. Панель виртуального прибора TML-04M.vi

На экране виртуального прибора TML-04M.vi (рис. 7) в среде LabVIEW 7.0 отображаются расчетные зависимости и эксперимен-

тальные данные реализуемого алгоритма выполнения лабораторной работы.

Расчетные кривые $\lambda = \lambda(\omega)$ представлены на экране виртуального прибора для двух крайних значений коэффициента жесткости пружин – c_1 и c_2 , полученных экспериментально при тарировке пружины.

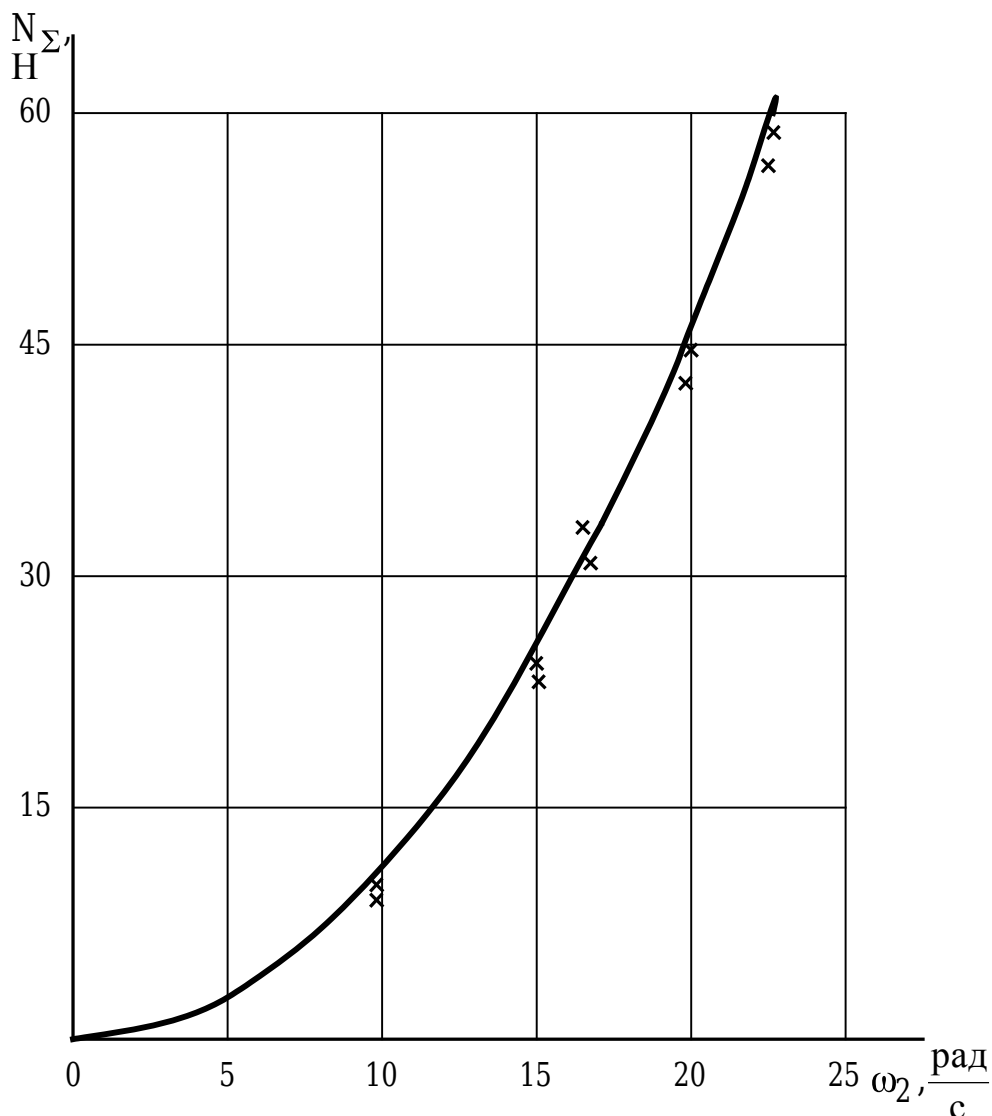


Рис. 8. Зависимость N_Σ от ω_2

Экспериментальные значения ω_2 и λ определяют с помощью датчиков, и экспериментальная кривая $\lambda = \lambda(\omega)$, которую строят по результатам этих измерений, не зависит от значений J и c . На рис. 7 экспериментальные данные представлены массивом точек. При этом каждая точка соответствует установившемуся режиму

работы (вращения «бегунов»), и запись результатов ведется через малый промежуток времени. При регистрации экспериментальных данных необходимо делать паузы при переходе из одного режима работы в другой для того, чтобы дать время для установления стационарного динамического режима.

После проведения экспериментов данные могут быть обработаны вторым способом и представлены в виде зависимости $N_{\Sigma} = f(\omega_2)$ (рис. 8). Теоретическую кривую в этом случае строят по формуле (8). При расчетах задаются величиной ω_2 и определяют значение N_{Σ} , на которое не влияет точность определения жесткости пружины c . Поэтому теоретическая кривая на рис. 8 – одна, а не две, как на рис. 7.

Экспериментальные данные нанесены на рис. 8 в виде крестиков и представлены парами точек для каждого значения ω_2 : $N_{\Sigma 1} = c_1 \lambda$ и $N_{\Sigma 2} = c_2 \lambda$, т. е. учитывается разброс значений жесткости пружины при ее тарировке. Так как для каждого значения ω_2 экспериментально был получен некоторый массив значений λ (точек из массива), то при $\omega_2 = \text{const}$ определялось среднее значение $\lambda_{\text{ср}}$, и тогда $N_{\Sigma i} = \lambda_{\text{ср}} c_i$, где $i = 1, 2$.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Динамика: Метод. указания по проведению практических занятий с использованием моделей и приборов по курсу «Теоретическая механика» / Под ред. Г.Д. Блюмина; МВТУ им. Н.Э. Баумана. М., 1988.

2. *Тревис Дж.* LabVIEW для всех / Пер. с англ. Н.А. Клушина. М.: ДМК Пресс; ПриборКомплект, 2004.

3. Лабораторный аппаратно-программный комплекс ТМл-20/МР: метод. указания к лабораторным работам по курсу теоретической механики / В.В. Дубинин, Е.Н. Солохин, В.А. Иванников, Б.П. Назаренко. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 1998.

ОГЛАВЛЕНИЕ

1. Описание комплекса ТМл-04М	3
2. Теоретическая часть	6
3. Порядок проведения лабораторной работы	8
Проведение тарировок	8
Теоретическая кривая	10
Проведение экспериментов и обработка данных	10
Список литературы	14

Методическое издание

**Владимир Валентинович Дубинин
Юрий Николаевич Жигулевцев
Вячеслав Валентинович Витушкин**

Автоматизированный лабораторный комплекс для изучения гироскопических давлений ТМл-04М

Редактор *Е.К. Кошелева*
Корректор *Л.И. Малютина*
Компьютерная верстка *Е.В. Зимакова*

Подписано в печать 21.06.2007. Формат 60х84/16. Бумага офсетная.

Печ. л. 1,0. Усл. печ. л. 0,93. Уч.-изд. л. 0,85. Тираж 300 экз.

Изд № 43. Заказ

Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана
105005, Москва, 2-я Бауманская, 5