

## Электроизмерительный прибор магнитоэлектрической системы как осциллятор для лабораторного изучения механических колебаний и резонанса

© И.Н. Фетисов

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, 105005, Россия

*Представлено описание учебного стенда и методики лабораторного количественного изучения вынужденных механических колебаний и резонанса с использованием в качестве крутильного осциллятора гальванометра или подобных приборов. Осциллятор гальванометра полностью соответствует классической задаче о вынужденных колебаниях: переменная сила, создаваемая переменным током генератора, изменяется по гармоническому закону и прикладывается непосредственно к инерционному телу, а диссипативная сила сопротивления пропорциональна скорости движения этого тела. Приведены результаты лабораторного изучения вынужденных и собственных колебаний осциллятора. Описанная методика изучения колебаний имеет преимущества по сравнению с известными способами.*

**Ключевые слова:** механические колебания, вынужденные колебания, резонанс, гальванометр, лабораторный эксперимент.

**Введение.** Широкая распространенность и важная роль в технике вынужденных механических колебаний и резонанса обуславливают необходимость детального их изучения в лабораторном практикуме. Однако постановка подобного опыта сопряжена с трудностями, которые не удалось полностью преодолеть в известных учебных установках. Например, вращательный крутильный маятник Поля [1], который можно приобрести у немецкой фирмы Phywe и др., имеет недостаток: раскачивание в нем маятника производится через спиральную пружину с помощью электрического мотора с кривошипным механизмом. Такая постановка лабораторного опыта не соответствует классической, изучаемой в программе задаче, когда переменная сила прикладывается непосредственно к инерционному телу. Из этого можно сделать вывод, что маятник Поля больше подходит для лекционной демонстрации, чем для лабораторного опыта.

Другой пример — устройство ФДК 001 для демонстрации колебаний на пружине и явления резонанса, которое изготавливает РНПО Росучприбор [2]. Этот прибор — демонстрационный и не предназначен для лабораторного количественного исследования.

Еще один пример — так называемый «маятник с движущейся точкой подвеса», в котором вынужденные колебания маленького маятника создаются свободными колебаниями более массивного маятника [3]. Такой лабораторный прибор имеет много недостатков: нестандартный способ возбуждения вынужденных колебаний, сложная

теория, трудности контроля и поддержания необходимых условий опыта, в результате чего на данной установке не удается получить удовлетворительных результатов лабораторной работы.

Для изучения в лабораторном практикуме вынужденных механических колебаний и резонанса в [4, 5] предложили и разработали методику, основанную на использовании в качестве осциллятора электроизмерительного прибора (миллиамперметра, гальванометра) магнитоэлектрической системы с нулевой точкой в центре шкалы. Помимо вынужденных колебаний, на том же осцилляторе изучают свободные затухающие колебания. Предлагаемая методика изучения колебаний имеет преимущества по сравнению с известными методами.

**Электроизмерительный прибор как осциллятор.** Электромеханический измерительный преобразователь магнитоэлектрической системы [6] содержит магнитную цепь, состоящую из постоянного магнита, магнитопровода, полюсных наконечников и цилиндрического сердечника. В воздушном зазоре между сердечником и наконечниками создают равномерное радиальное магнитное поле. Подвижная рамка с обмоткой из медного провода может поворачиваться вокруг сердечника в магнитном поле зазора. При протекании тока через обмотку на рамку действует момент сил Ампера, который пропорционален силе тока и не зависит от угла поворота рамки. Две спиральные пружины, закручиваясь при повороте рамки, создают противодействующий момент упругих сил.

Как видно из описания, рамка с обмоткой, обладающая некоторым моментом инерции, и две спиральные пружины образуют крутильный осциллятор.

Рассмотрим диссипативные силы, приводящие к затуханию колебаний рамки прибора. Они имеют двоякую природу и представляют собой, с одной стороны, силы вязкого трения при движении рамки в воздухе, с другой — силы электромагнитной природы. В приборах широкого применения (вольтметры, амперметры) рамка обычно состоит из алюминиевого каркаса, который представляет собой короткозамкнутый виток с небольшим сопротивлением. При вращении рамки в магнитном поле в алюминиевом каркасе возникают ЭДС индукции и индукционный ток, пропорциональный скорости движения. Индукционный ток порождает силу Ампера, направленную, согласно закону Ленца, против направления движения. Таким образом, диссипативная сила сопротивления пропорциональна скорости движения рамки.

В чувствительных гальванометрах алюминиевая рамка отсутствует. Если внешняя цепь гальванометра разорвана, то при вращении рамки индукционные токи не возникают, а медленное затухание колебаний рамки обусловлено трением в воздухе. Если гальванометр

включен в замкнутую цепь, то при движении рамки возникает индукционный тормозящий ток, сила которого зависит от полного сопротивления цепи. Поэтому коэффициент затухания колебаний можно изменять, варьируя сопротивлением внешнего участка цепи.

В случае изучения вынужденных колебаний через обмотку прибора пропускают переменный ток низкой частоты от генератора. При этом момент переменной силы прикладывается непосредственно к рамке. Момент силы пропорционален силе переменного тока и изменяется, как и ток, по гармоническому закону с частотой генератора. В результате возникают вынужденные колебания рамки. При их изучении необходимо вывести осциллятор из положения равновесия. Для этого через прибор пропускают небольшой постоянный ток, после выключения которого начинаются свободные затухающие колебания осциллятора.

Таким образом, прибор магнитоэлектрической системы (гальванометр, миллиамперметр и др.) представляет собой крутильный осциллятор. Для испытанных приборов собственная частота осциллятора составляет порядка одного герца, а добротностью лежит в пределах  $Q = 2 \dots 4$  для приборов широкого применения. Осциллятор гальванометров имеет более высокую добротность, причем ее можно уменьшать, снижая сопротивление внешней цепи.

Осциллятор рассматриваемых приборов полностью соответствует классической задаче о вынужденных колебаниях: переменная сила прикладывается непосредственно к инерционному телу, а сила сопротивления пропорциональна скорости движения.

**Описание экспериментальных установок.** На кафедре «Физика» МГТУ им. Н.Э. Баумана разработаны, изготовлены и используются лабораторные установки для изучения механических колебаний и резонанса с помощью различных приборов магнитоэлектрической системы [7]. Ниже приведено описание двух установок, в одной из которых осциллятором служит вольтметр широкого применения, а в другой — чувствительный гальванометр.

При использовании в качестве осциллятора щитового вольтметра М340 из него было удалено большое добавочное сопротивление. В результате вольтметр был преобразован в миллиамперметр с пределами измерения тока  $2,5 \dots 0 \dots 2,5$  мА и сопротивлением обмотки 33 Ом. Прибор имеет крупную четкую шкалу и рассчитан на эксплуатацию в тяжелых условиях.

Электрическая схема лабораторной установки с прибором М340 показана на рис. 1. В положении *I* переключателя *SA* изучают вынужденные колебания, когда источником переменного тока служит генератор (Г) АНР-1002 «Актаком», частоту которого можно изменять от миллигерц и выше. Частоту раскачивающей силы, совпадающую с частотой генератора, регистрируют цифровым индикатором генератора переменного тока.

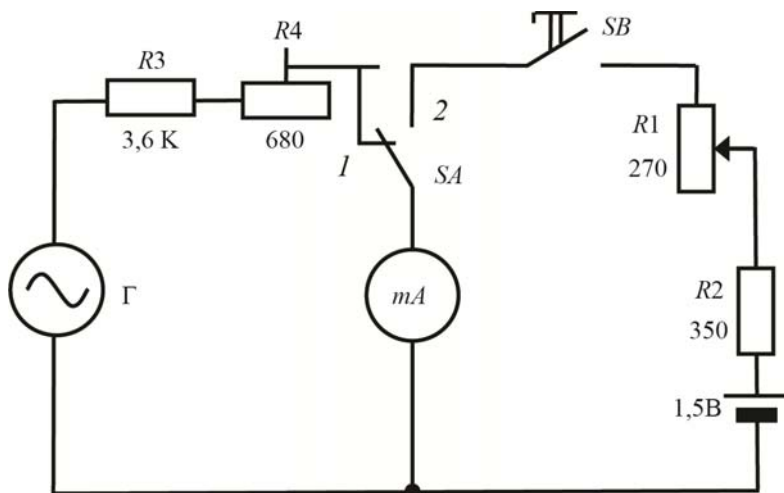


Рис. 1. Схема лабораторной установки с прибором М340

Свободные колебания изучают, установив переключатель  $SA$  в положение 2. При замыкании кнопочного выключателя  $SB$  через прибор пропускают небольшой ток для отклонения стрелки прибора от положения равновесия, находящегося в центре шкалы. Начальное отклонение регулируют переменным резистором  $R1$ . При размыкании выключателя  $SB$  начинаются свободные затухающие колебания.

В приборе М340 затухание колебаний обусловлено индукционными токами в алюминиевой рамке прибора. При этом небольшие индукционные токи во внешней цепи, имеющей большое сопротивление (несколько кОм) не влияют на затухание колебаний. Поэтому добротность осциллятора в режиме свободных колебаний (внешняя цепь разорвана) и вынужденных колебаний (цепь замкнута на большое сопротивление) одинаковая.

В другой лабораторной установке в качестве осциллятора используют гальванометр со световым указателем, чувствительностью  $5 \cdot 10^{-9}$  А/мм и сопротивлением обмотки 1120 Ом. Гальванометр не имеет алюминиевой рамки, поэтому его добротность на разомкнутом входе очень высокая —  $Q = 50$ .

Электрическая схема установки с гальванометром  $G$ , показанная на рис. 2, принципиально отличается от схемы на рис. 1 тем, что в ней добротность осциллятора можно изменять переменной сопротивлением внешней цепи, равного  $R_{вн}$ . Сопротивление внешней цепи одинаковое как для свободных, так и для вынужденных колебаний. Поэтому добротность осциллятора в обоих случаях одна и та же.

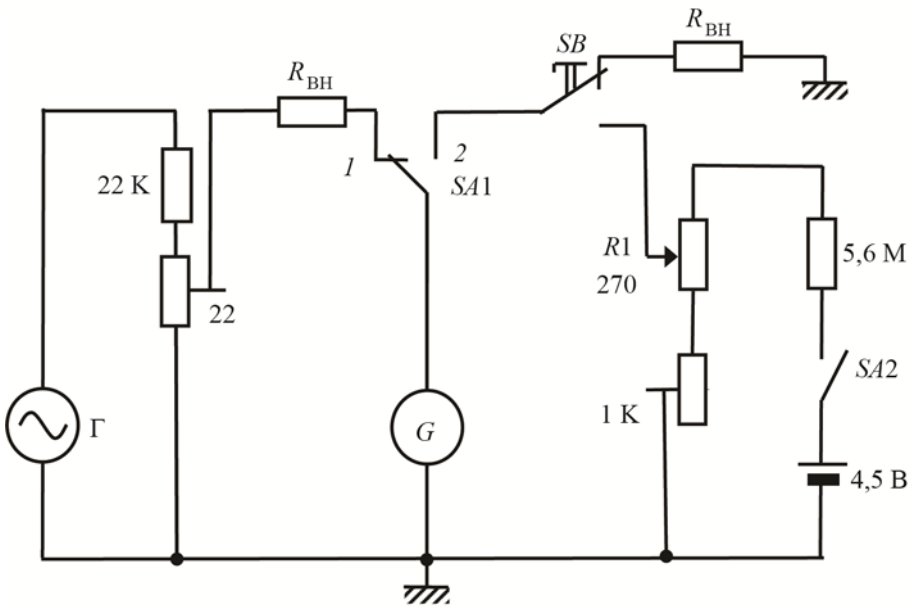


Рис. 2. Схема установки с гальванометром

В положении 1 переключателя  $SA1$  (см. рис. 2) изучают вынужденные колебания, используя такой же генератор, что и в установке с прибором М340. В положении 2 переключателя  $SA1$  изучают свободные затухающие колебания. Для выведения осциллятора из положения равновесия необходимо нажать на кнопочный переключатель  $SB$  и отклонить световой указатель с помощью переменного резистора  $R1$ . В отпущенном положении переключателя  $SB$  начинаются свободные колебания. При этом к гальванометру подключено внешнее сопротивление  $R_{вн}$ , через которое протекает индукционный ток.

Во всех установках приняты меры для защиты осциллятора от перегрузок по амплитуде колебаний. Например, в схеме на рис. 1 резисторы  $R2-R4$  ограничивают ток прибора и амплитуду механических колебаний в допустимых пределах. С помощью регулировок, доступных учащимся, измерительный прибор не может быть выведен из строя, что особенно важно в режиме вынужденных колебаний.

Внешний вид экспериментальной установки с гальванометром представлен на рис. 3. Помимо гальванометра (на фото справа) и генератора переменного тока (вверху) установка имеет пульт управления (в центре) и демонстрационные приборы (слева) — прибор магнитоэлектрической системы, внутреннее устройство которого можно рассмотреть, и крutiльный осциллятор механических часов.



Рис. 3. Экспериментальная установка с гальванометром

**Результаты экспериментов.** В процессе лабораторной работы выполняют следующие задания. Для свободных колебаний измеряют период колебаний  $T$  и вычисляют собственную частоту осциллятора  $\nu_{\text{соб}} = \frac{1}{T}$ . Определяют также логарифмический декремент затухания  $\lambda$ , измеряя начальное отклонение  $A_0$  стрелки прибора и отклонение  $A_n$  через целое число  $n$  колебаний. Значение логарифмического декремента вычисляют по формуле

$$\lambda = \frac{1}{n} \ln \frac{A_0}{A_n}.$$

Число  $n$  выбирают в зависимости от коэффициента затухания, и оно может составлять от 1 до 5.

Для вынужденных колебаний:

- сравнивают частоту вынужденных колебаний с частотой вынуждающей силы, совпадающей с частотой генератора;
- измеряют резонансную кривую;
- наблюдают переходные процессы при резком изменении амплитуды или частоты генератора переменного тока.

Из резонансной кривой определяют следующие характеристики осциллятора: а) резонансную частоту  $\nu_p$ , которую сравнивают с собственной частотой  $\nu_{\text{соб}}$ ; б) амплитуду  $A_p$  в резонансе и статическое отклонение  $A_{\text{ст}}$ , измеряемое на самой низкой частоте колебаний; в) ши-

рину резонансной кривой  $\Delta v$ , измеряемую на высоте, которая в  $\sqrt{2}$  раз меньше резонансной амплитуды. Из этих данных находят добротность осциллятора по формулам

$$Q = \frac{A_p}{A_{ст}}; Q = \frac{v_p}{\Delta v}.$$

Для прибора М340 из результатов измерений свободных колебаний получены следующие характеристики осциллятора: собственная частота  $v_{соб} = 1,75$  Гц, логарифмический декремент затухания  $\lambda = 0,88$ , добротность  $Q = \frac{\pi}{\lambda} = 3,6$ .

Измеренная резонансная кривая для прибора М340 представлена на рис. 4. Из нее получены следующие характеристики резонанса (см. таблицу): отношение собственной частоты к резонансной частоте  $\frac{v_{соб}}{v_p} = 1,00$ , ширина резонансной кривой  $\Delta v = 0,5$  Гц, добротность осциллятора

$$Q = \frac{A_p}{A_{ст}} = 3,6; Q = \frac{v_p}{\Delta v} = 3,5.$$

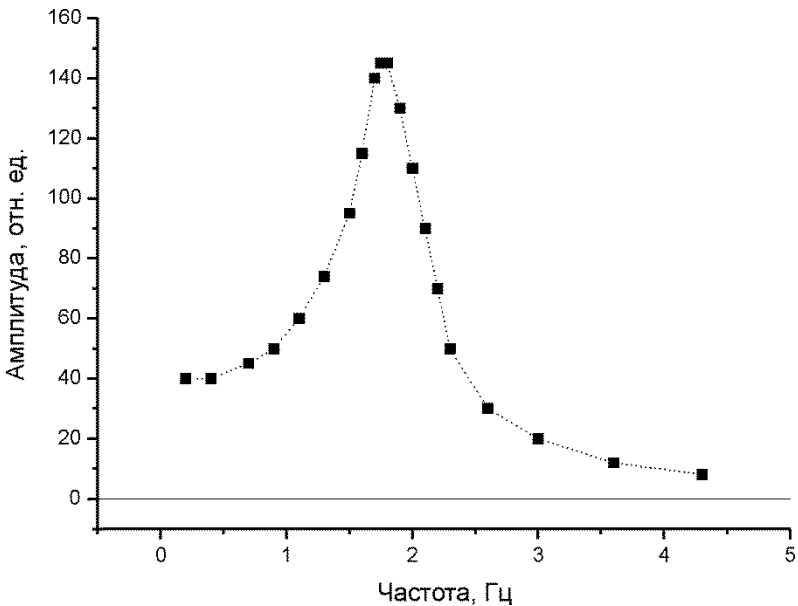


Рис. 4. Резонансная кривая для прибора М340

Результаты измерений на установке с гальванометром для двух значений внешнего сопротивления  $R_{вн}$  представлены в виде резонансных кривых на рис. 5 и 6, а также в таблице. Добротность осциллятора изменяется от  $Q = 7,1$  для  $R_{вн} = 100$  кОм до  $Q = 3,6$  для  $R_{вн} = 44$  кОм.

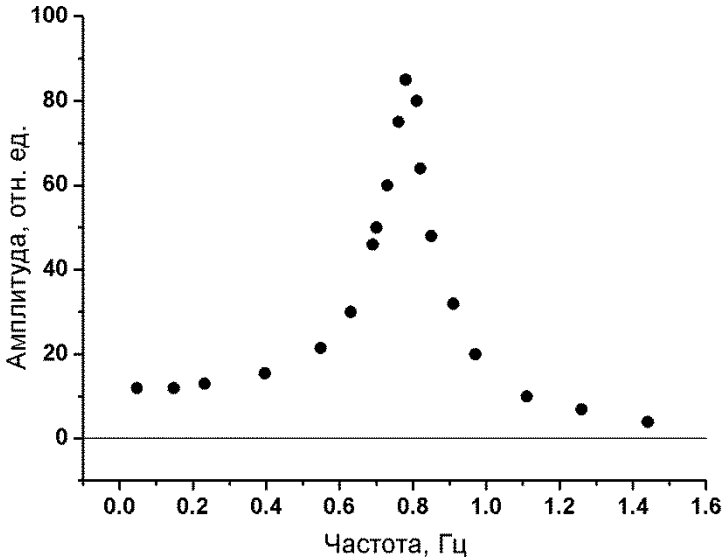


Рис. 5. Резонансная кривая гальванометра при  $R_{вн} = 100$  кОм

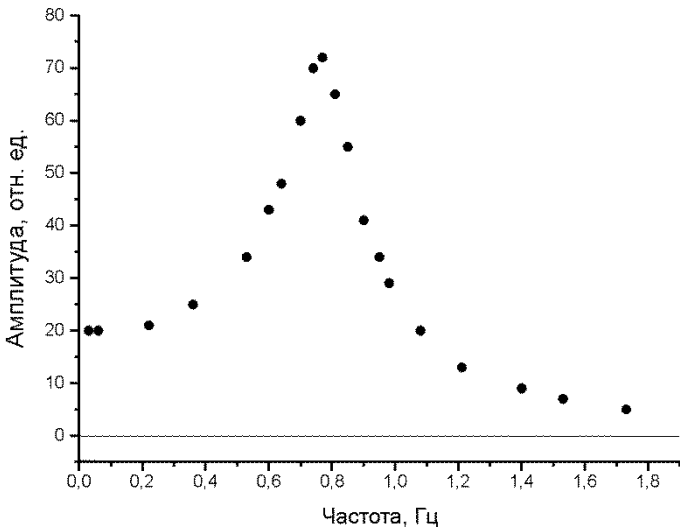


Рис. 6. Резонансная кривая гальванометра при  $R_{вн} = 44$  кОм



**Результаты измерений параметров двух осцилляторов**

Прибор	$R_{вн}$ , кОм	$\nu_p$ , Гц	$\frac{\nu_{соб}}{\nu_p}$	$\Delta\nu$ , Гц	$Q = \frac{\pi}{\lambda}$	$Q = \frac{A_p}{A_{ст}}$	$Q = \frac{\nu_p}{\Delta\nu}$
М340	–	1,75	1,00	0,5	3,6	3,6	3,5
Гальванометр	100	0,78	1,00	0,11	7,06	7,1	7,1
	44	0,78	1,00	0,21	3,4	3,6	3,7

Согласно данным в таблице, значения добротности осциллятора, полученные различными способами, совпадают, что свидетельствует о высокой точности измерений характеристик осциллятора.

Наблюдаемое изменение добротности гальванометра при изменении внешнего сопротивления находится в согласии с теорией колебаний и с физической природой тормозящей диссипативной силы. Можно показать, что добротность осциллятора гальванометра пропорциональна внешнему сопротивлению  $R_{вн}$  в случае, когда вязким торможением в воздухе можно пренебречь по сравнению с электромагнитным торможением, а внешнее сопротивление  $R_{вн}$  намного больше сопротивления обмотки гальванометра. Приведенные в таблице результаты измерения добротности при двух значениях внешнего сопротивления подтверждают этот вывод.

Помимо экспериментальных установок, описанных выше, изготовлены и применяются аналогичные установки с использованием приборов других марок. Для прибора ЛМ-1 со шкалой 10...0...10 мА осциллятор имеет следующие характеристики:  $\nu_p = 1,05$  Гц и  $Q = 3,0$ ; для прибора М381 —  $\nu_p = 2$  Гц и  $Q = 3,0$ .

Согласно измерениям, для данной лабораторной работы оптимальны приборы с добротностью в интервале  $Q = 3...10$ . При добротности  $Q \approx 2$  резонанс не очень выразительный, а при  $Q > 10$  резонансная кривая узкая, поэтому ее трудно измерять.

**Заключение.** Разработана методика лабораторного изучения вынужденных механических колебаний и резонанса, а также свободных затухающих колебаний, с использованием в качестве крутильного осциллятора гальванометра или других измерительных приборов магнитоэлектрической системы.

Осциллятор таких приборов полностью соответствует классической, изучаемой в программе задаче о вынужденных колебаниях: переменная сила, создаваемая переменными токами генератора, изменяется по гармоническому закону и прикладывается непосредственно к инерционному телу, а диссипативная сила сопротивления пропорциональна скорости движения этого тела. Диссипативная сила, возникающая по причине наличия индукционных токов, может быть легко изменена переменной электрического сопротивления в цепи гальванометра. Поэтому добротность осциллятора гальванометра можно изменять в широких пределах.

Разработанные и построенные экспериментальные установки для изучения механических колебаний и резонанса прошли длительную апробацию в учебном процессе. Лабораторные стенды продемонстрировали их полную адекватность поставленным задачам: они позволяют всесторонне изучать механические колебания с высокой степенью повторяемости и точности измерений, удобны в использовании, на них студенты выполняют большой объем исследований за время проведения лабораторного занятия. Установки надежные, недорогие и простые в изготовлении и эксплуатации.

Таким образом, данная методика лабораторного изучения вынужденных механических колебаний и резонанса имеет преимущества по сравнению с известными способами.

## ЛИТЕРАТУРА

- [1] Поль Р.В. *Механика, акустика и учение о теплоте*. Москва, Наука, 1971, 480 с.
- [2] <http://www.rosuchpribor.ru/russian/prof/phys/koleb/fdk001.html> (дата обращения 08.03.2013).
- [3] Хаустова В.И. *Изучение вынужденных колебаний маятника с движущейся точкой подвеса: метод. указания к выполнению лабораторной работы М-13 по курсу общей физики*. М., Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 1990, 16 с.
- [4] Фетисов И.Н. Изучение механического резонанса с помощью гальванометра магнитоэлектрической системы. *Сб. трудов XII Международной учебно-метод. конф. «Современный физический практикум»*. Москва, Издательский дом Московского физического общества, 2012, с. 121.
- [5] Фетисов И.Н. Лабораторное изучение механических колебаний и резонанса с помощью гальванометра. *Физическое образование в вузах*, 2014, №1, с. 63–65.
- [6] Введенский Б.А., Вул Б.М., ред. *Физический энциклопедический словарь*, т. 3. Москва, Советская Энциклопедия, 1963, 624 с.
- [7] Фетисов И.Н. *Механический резонанс*. Москва, Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2013, 31 с.

Статья поступила в редакцию 11.06.2014

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

Фетисов И.Н. Электроизмерительный прибор магнитоэлектрической системы как осциллятор для лабораторного изучения механических колебаний и резонанса. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2014, вып. 2.

URL: <http://engjournal.ru/catalog/pedagogika/hidden/1208.html>

**Фетисов Игорь Николаевич** родился в 1931 г. Канд. физ.-мат. наук, доцент кафедры «Физика» МГТУ им. Н.Э. Баумана. В 1955 г. окончил физический факультет МГУ им. М.В. Ломоносова. Области научных интересов: биофизика зрения, миллиметровые радиоволны, экспериментальные методы физических измерений, лабораторный практикум. e-mail: [infetisov@mail.ru](mailto:infetisov@mail.ru)

# Electrical measuring instrument of the magnetoelectric system as an oscillator for laboratory study of mechanical vibrations and resonance

© I.N. Fetisov

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, 105005, Russia

*The article describes the training kit and laboratory techniques for quantitative studies of forced mechanical vibrations and resonance with the use of galvanometer or similar devices as torsional oscillator. The oscillator of the galvanometer fully corresponds to the classical problem of forced vibrations: variable force generated by alternating current of the generator varies harmonically and is applied directly to the inertial body and the dissipative resistance force is proportional to the velocity of the body. We show the results of the laboratory study of forced and intrinsic vibrations of the oscillator and prove that the described method of studying the vibrations has advantages over conventional methods.*

**Keywords:** *mechanical vibrations, forced vibrations, resonance, galvanometer, a laboratory experiment.*

## REFERENCES

- [1] Pol' R.V. *Mekhanika, akustika i uchenie o teplate* [Mechanics, acoustics, and heat]. Moscow, Nauka Publ., 1971, 480 p.
- [2] <http://www.rosuchpribor.ru/russian/prof/phys/koleb/fdk001.html> (accessed 08 March 2013).
- [3] Khaustova V.I. *Izuchenie vynuzhdennykh kolebanií maiatnika s dvizhushcheisia tochkoi podvesa: metod ukazaniia k vypolneniiu laboratornoi raboty M-13 po kursu obshchei fiziki* [Study of forced oscillations of a pendulum with a moving point of suspension: guidelines for laboratory work M-13 on general physics]. Moscow, Bauman MSTU Publ., 1990, 16 p.
- [4] Fetisov I.N. *Izuchenie mekhanicheskogo rezonansa s pomoshchyu gal'vanometra magnitoelektricheskoi sistemy* [Study of mechanical resonance with a galvanometer of magnetoelectric system]. *Sb. trudov XII Mezhdunarodnoi uchebno-metod. konf. «Sovremennyi fizicheskii praktikum»*. [Proc. XII Int. Method. Conf. "Modern physics practicum"]. Moscow, Moscow Phys. Soc. Publ., 2012, p. 121.
- [5] Fetisov I.N. *Fizicheskoe obrazovanie v vuzakh — Physics in Higher Education*, 2014, no. 1, pp. 63–65.
- [6] Vvedenskii B.A., Vul B.M., eds. *Fizicheskii entsiklopedicheskii slovar'* [Physical Encyclopedic Dictionary]. Vol. 3. Moscow, Sovetskaya Entsiklopediya Publ., 1963, 624 p.
- [7] Fetisov I.N. *Mekhanicheskii rezonans* [Mechanical resonance]. Moscow, Bauman MSTU Publ., 2013, 31 p.

**Fetisov I. N.** (b. 1931) graduated from Lomonosov Moscow State University, Physics Faculty in 1955. Ph.D., Assoc. Professor of the Physics Department in Bauman Moscow State Technical University. Research interests include biophysics of the vision, millimeter radio waves, experimental methods of physical measurements, laboratory session.  
e-mail: infetisov@mail.ru