

**ИЗМЕРЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ДВИЖЕНИЯ ИНТЕРФЕРЕНЦИОННЫМ
МЕТОДОМ В ШИРОКОМ ДИАПАЗОНЕ АМПЛИТУД ПЕРЕМЕЩЕНИЙ**

Предложена методика измерения перемещения элементов механических систем интерференционным методом при произвольном соотношении между длиной волны электромагнитного излучения и амплитудой перемещения. Данная методика позволяет исключить неоднозначность определения перемещения движущегося объекта из тригонометрического уравнения, связывающего расстояние от объекта до детектора и измеренный ток детектора. Методика проверена экспериментально путем измерения относительного перемещения металлического диска, приводимого в возвратно-поступательное движение кривошипно-шатунным механизмом. Показано, что предложенная реализация интерференционного метода позволяет измерять перемещение при колебательном движении с хорошей точностью даже в случае, когда размах колебаний в несколько раз превышает длину волны электромагнитного излучения, используемого при измерениях.

A procedure is proposed to measure the displacement by the interference method for an arbitrary ratio between the displacement amplitude and the electromagnetic wavelength. The procedure resolves ambiguity in determining the displacement of a moving object from the equation that relates the distance between the object and the detector to the measured detector current. The procedure is verified by experiment by measuring the relative displacement of a crank-driven metal disk executing a reciprocal motion. It is shown that the proposed realization of the interference method does allow one to measure the displacement in vibratory motion to good accuracy even if the peak-to-peak vibration amplitude is far greater than the electromagnetic wavelength used in the measurements.

Для построения измерителей параметров движения, в частности вибраций, является весьма привлекательным применение микроволновых методов. Это обусловлено целым рядом причин, наиболее весомыми из которых являются безынерционность и отсутствие необходимости механического контакта с контролируемым объектом. Одним из распространенных микроволновых методов, применяемых для измерения параметров движения, является интерференционный метод [1 – 3]. В основе этого метода лежит свойство суперпозиции электромагнитных волн, благодаря которому в результате зондирования контролируемого объекта электромагнитной волной между излучающим устройством и объектом образуется стоячая волна. С помощью детектора регистрируется электрическое поле этой волны, модулированное вибрациями объекта. Однако в силу множественности решений тригонометрического уравнения, связывающего расстояние между детектором и объектом с током детектора, непосредственное определение величины перемещения по току детектора без применения специальных методов обработки сигнала возможно только для амплитуд перемещений, не превышающих $\lambda/4$, где λ – длина волны электромагнитного излучения.

Ранее авторами была предложена и протестирована на смоделированных расчетным путем данных измерений простая методика определения параметров вибраций по сигналу детектора при произвольном соотношении между амплитудой вибраций и длиной зондирующей электромагнитной волны [4]. Целью данной работы является экспериментальная проверка данной методики.

Суть предложенной в [4] методики состоит в устранении неоднозначности определения зависимости от времени t координаты x движущегося объекта по измеренному току детектора $J_{det}(t)$ с использованием следующих соотношений, которые получаются из выражения для модуля напряженности

электрического поля в стоячей волне для случая квадратичной вольт-амперной характеристики детектора

$$x(t) = \pm \frac{\lambda}{4\pi} \arccos J_{rel}(t) + \frac{\lambda}{4} (2n+1), \quad n=0, \pm 1, \pm 2, \dots, \quad (1)$$

$$J_{rel}(t) = \tilde{J}(t)/J_1, \quad \tilde{J}(t) = J_{det}(t) - J_0,$$

$$J_1 = \frac{2J_{max}|r|}{(1+|r|)^2}, \quad J_0 = \frac{J_{max}(1+|r|^2)}{(1+|r|)^2}, \quad |r| = \frac{\sqrt{J_{max}/J_{min}} - 1}{\sqrt{J_{max}/J_{min}} + 1},$$

$$J_0 = \frac{J_{max}(1+|r|^2)}{(1+|r|)^2}, \quad J_1 = \frac{2J_{max}|r|}{(1+|r|)^2},$$

где $J_{rel}(t)$ – нормированная переменная составляющая тока детектора $J_{det}(t)$; $\tilde{J}(t), J_1$ – переменная составляющая тока $J_{det}(t)$ и ее амплитуда; J_0 – постоянная составляющая тока $J_{det}(t)$; r – коэффициент отражения; J_{min}, J_{max} – минимальное и максимальное значения тока детектора.

Обычно задача заключается в определении размаха перемещений элементов механических систем. В этом случае за начальное значение $x(0)$ можно принять любое значение x , даваемое (1) при $t=0$. Для однозначного определения $x(t)$ из тригонометрического соотношения (1) в последующие моменты времени используется тот факт, что координата движущегося объекта $x(t)$ и его скорость $\dot{x}(t)$ (здесь и далее точка обозначает дифференцирование по t) являются непрерывными функциями времени. Действительно, в соответствии с (1) для скорости $\dot{x}(t)$ имеем

$$\dot{x}(t) = \mp \frac{\lambda}{4\pi} F(t), \quad (2)$$

где введено обозначение

$$F(t) = \dot{J}_{rel}(t) / \sqrt{1 - J_{rel}^2(t)}. \quad (3)$$

Очевидно, непрерывность $\dot{x}(t)$ имеет смысл проверять в точках $t = t_m$ экстремумов нормированного тока детектора, в которых $J_{rel}(t_m) = \pm 1$, поскольку в этих точках знаменатель функции $F(t)$ обращается в ноль. Рассмотрим поведение функции $F(t)$ в окрестности таких точек. Функция J_{rel} и ее производная по времени \dot{J}_{rel} в окрестности точки экстремума $t = t_m$ имеют вид

$$J_{rel} = a_0 + a_{2k}(t - t_m)^{2k} + \alpha(t - t_m)^{2k}, \quad (4)$$

$$\dot{J}_{rel} = 2ka_{2k}(t - t_m)^{2k-1} + \alpha(t - t_m)^{2k-1}, \quad (5)$$

где k – целое число, большее либо равное единице, $a_0 = \pm 1$, $a_{2k} \neq 0$ и $\text{sgn } a_{2k} = -\text{sgn } a_0$.

Подстановка соотношений (4) и (5) в (3) дает следующее асимптотическое равенство для функции $F(t)$ в окрестности точки $t = t_m$

$$F(t) \sim k|t - t_m|^{k-1} \sqrt{2|a_{2k}|} \text{sgn}(t - t_m) \text{sgn}(a_{2k}). \quad (6)$$

Из (6) следует, что при $k=1$ функция $F(t)$ имеет в точке $t = t_m$ конечный скачок, симметричный относительно нуля: $\lim_{t \rightarrow t_m - 0} F(t) = -\sqrt{2|a_2|} \text{sgn}(a_2)$, в то

время как $\lim_{t \rightarrow t_m + 0} F(t) = \sqrt{2|a_2|} \text{sgn}(a_2)$. Поскольку определяемая выражением

(2) скорость $\dot{x}(t)$ является непрерывной функцией времени, то в случае такого скачка знак первого слагаемого в правой части (1) должен быть изменен при прохождении через точку экстремума t_m . Если же $J_{rel}(t_m) = -1$, то для обеспечения непрерывности $x(t)$ должно быть изменено и число n во втором слагаемом.

При $k \geq 2$ функция $F(t)$, а следовательно, и скорость $\dot{x}(t)$ не испытывают скачка в точке $t = t_m$. При прохождении же через экстремумы тока детектора $J_{rel}(t_m) = \pm 1$, в которых нет скачка скорости, никаких изменений в правой части формулы (1), очевидно, не требуется (если считать, что зависимость координаты движущегося объекта от времени не имеет точек перегиба, в которых скорость обращается в ноль, что обычно выполняется для рассматриваемых задач).

В данной работе эта методика протестирована экспериментально в задаче определения параметров перемещения отражательной поверхности по измеренному току детектора. Измерения проводились с помощью лабораторного стенда, внешний вид которого представлен на рис. 1.

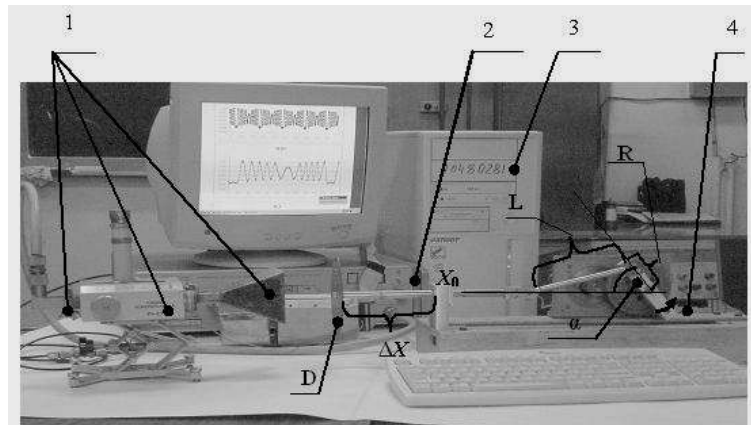


Рис. 1

Стенд состоял из измерительного преобразователя 1, включающего волноводную измерительную линию с установленным в ней детекторным блоком и рупорную антенну; СВЧ-генератора 2; компьютера 3 с аналогоцифровым преобразователем и кривошипно-шатунного механизма 4 с приводом от электродвигателя, приводящего отражательную поверхность (металлический диск D) в возвратно-поступательное движение соосно направле-

нию распространения электромагнитной волны генератора по рупору. Частота колебаний диска f_{vib} (частота вращения электродвигателя) регулировалась величиной напряжения на электродвигателе. Угол поворота кривошипа $\alpha = 2\pi f_{vib}t$ отсчитывался, как показано на рис. 1. Амплитуда колебаний диска регулировалась с помощью изменения радиуса кривошипа R . Как видно из рис. 1, перемещение Δx металлического диска D относительно точки x_0 , соответствующей максимальному расстоянию между диском и детектором (углу поворота кривошипа $\alpha = \pi$), дается выражением

$$\Delta x = \sqrt{L^2 - R^2 \sin^2 2\pi f_{vib}t} - L + R(1 + \cos 2\pi f_{vib}t), \quad (7)$$

где L – плечо кривошипа.

Создаваемое генератором 2 электромагнитное излучение проходило через волноводную линию, излучалось рупорной антенной, достигало колеблющегося металлического диска и отражалось от него, в результате чего в волноводной линии образовывалась стоячая волна, амплитуда которой регистрировалась детекторным блоком. Длина волны электромагнитного излучения, измеренная в волноводной линии, была равна $\lambda_{wg} = 3,725$ см, что соответствовало длине волны в свободном пространстве $\lambda_0 = \lambda_{wg} / \sqrt{1 + (\lambda_{wg}/2W)^2} = 2,90$ см, где $W = 2,3$ см – ширина широкой стенки волноводной линии. Диаметр диска был равен $d = 30$ см, т.е. выполнялось соотношение $d/\lambda_0 \gg 1$, обеспечивающее практическое отсутствие дифракционных эффектов.

Ток детектора регистрировался с помощью аналого-цифрового преобразователя L-Card E14-140. Измерения производились с шагом по времени $\Delta t = 0,2$ мс. Для последующей обработки с целью извлечения величины относительного перемещения металлического диска измеренный ток сглаживался путем усреднения по заданному количеству соседних точек.

На рис. 2 приведена измеренная временная зависимость тока детектора при радиусе кривошипа $R = 2,5$ см (размах колебаний диска $\Delta x_{max} = 2R = 5,0$ см). На рис. 3 в увеличенном масштабе приведен фрагмент зависимостей $J_{rel}(t)$ и $F(t) = J_{rel}(t) / \sqrt{1 - J_{rel}^2(t)}$, полученных из измеренной зависимости $J_{det}(t)$, показанной на рис. 2.

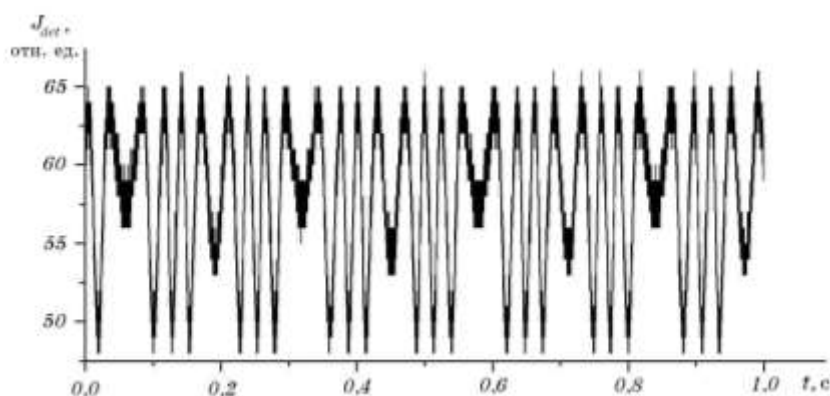


Рис. 2

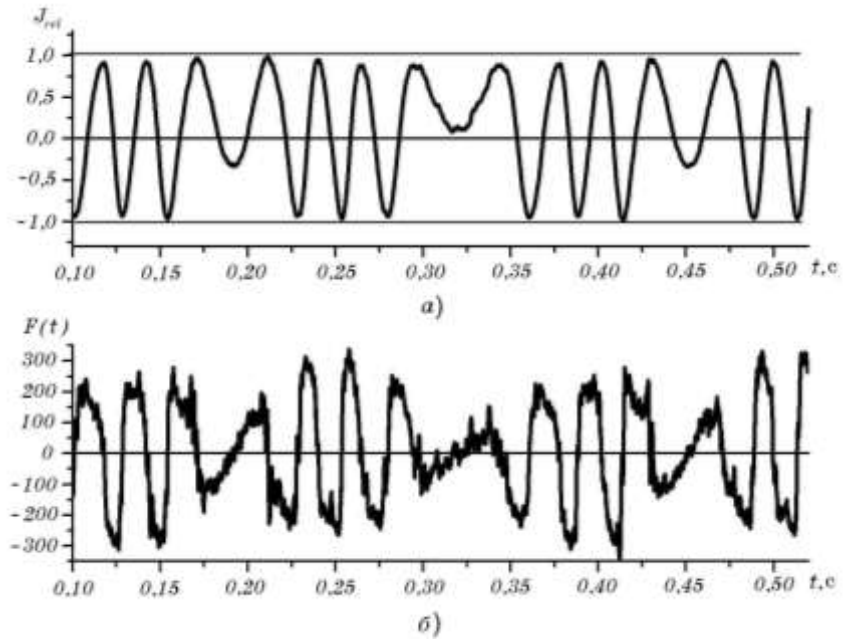


Рис. 3

Как видно из рис. 3,а, зависимость $J_{rel}(t)$ имеет много узких экстремумов, близких к ± 1 , и небольшое количество более широких экстремумов, отличных от ± 1 . В точках узких экстремумов функции $J_{rel}(t)$ у функции $F(t) = \dot{J}_{rel}(t) / \sqrt{1 - J_{rel}^2(t)}$ четко просматриваются резкие скачки, симметричные относительно нуля. В соответствии со сказанным выше, это говорит о том, что в данном случае все близкие к ± 1 узкие экстремумы возникают в силу физического ограничения на амплитуду стоячей волны и не имеют отношения к реальным экстремумам величины перемещения металлического диска. В более широких же экстремумах, отличных от ± 1 , функция $F(t)$ скачков не имеет и обращается в ноль. В соответствии с (2) это означает, что в этих экстремумах обращается в ноль скорость диска, т.е. они соответствуют реальным экстремумам величины перемещения диска.

На рис. 4 приведена временная зависимость относительного перемещения металлического диска $\Delta x(t) = x(t) - x(0)$, полученная из измеренной зависимости $J_{det}(t)$ (сплошная кривая). Из рисунка видно, что эта зависимость имеет вид периодической функции с периодом $T_{vib} = 0,26$ с, что соответствует частоте колебаний диска (частоте вращения электродвигателя) $f_{vib} = 1/T_{vib} = 3,83$ Гц. Сравнение с рис. 3 показывает, что более широкие экстремумы на рис. 3 действительно соответствуют экстремумам относительного перемещения. Для найденной из рис. 4 частоты колебаний диска f_{vib} по формуле (7) было рассчитано истинное относительное перемещение диска. Результаты расчета также представлены на рис. 4 (штриховая кривая). Как видно из рисунка, измеренное относительное перемещение диска находится в хорошем соответствии с истинным (сплошная и штриховая кривые фактически совпадают). Найденный из графика размах измеренной величины ΔX составляет около 5,15 см, в то время как истинный размах

колебаний диска равен 5,0 см. Таким образом, относительная погрешность определения величины размаха относительного перемещения в этом случае составляет около 3%.

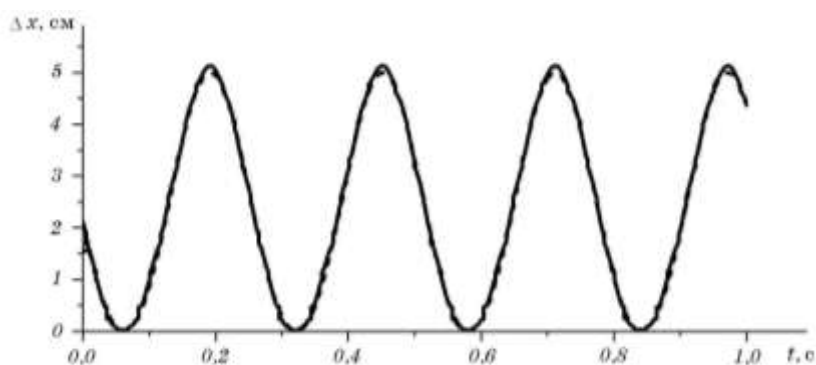


Рис. 4

На рис. 5 приведена измеренная временная зависимость тока детектора при радиусе кривошипа $R=7,5$ см (размах колебаний диска $\Delta x_{\max}=2R=15,0$ см), т.е. для случая, когда размах колебаний диска намного больше длины волны электромагнитного излучения. На рис. 6 в увеличенном масштабе приведен фрагмент зависимостей $J_{rel}(t)$ и $F(t) = J_{rel}(t) / \sqrt{1 - J_{rel}^2(t)}$, полученных из измеренной зависимости $J_{det}(t)$, показанной на рис. 5. Как видно из рисунков, поведение этих зависимостей аналогично рассмотренному выше случаю $\Delta x_{\max}=5$ см, за исключением того, что узкие экстремумы теперь располагаются гораздо плотнее.

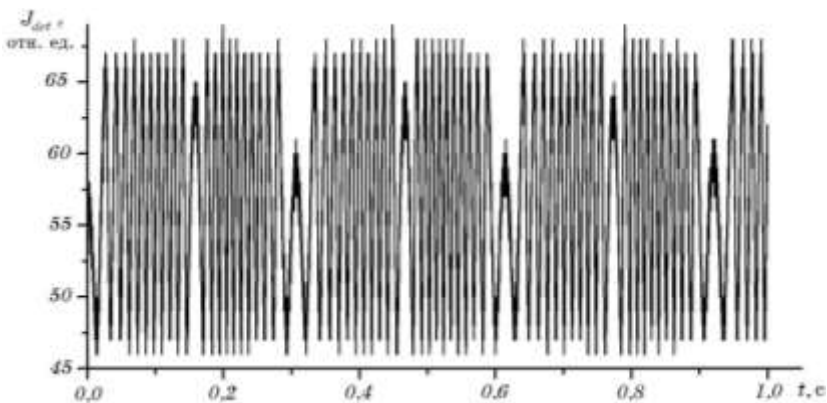


Рис.5

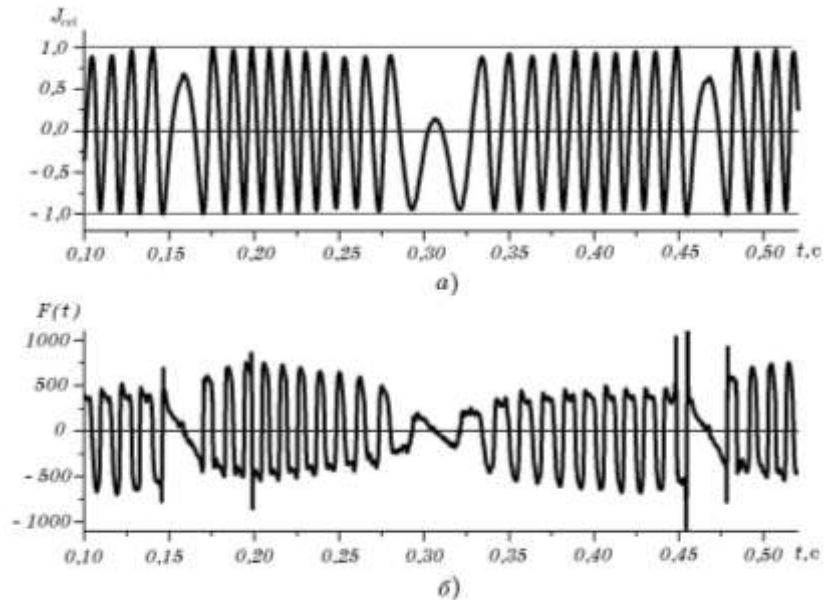


Рис. 6

Полученная из измеренной зависимости $J_{det}(t)$ временная зависимость относительного перемещения металлического диска $\Delta x(t)$ приведена на рис. 7 (сплошная кривая). Из рисунка видно, что эта зависимость также является периодической функцией, период которой $T_{vib} = 0,31$ с, что соответствует частоте колебаний диска $f_{vib} = 1/T_{vib} = 3,23$ Гц. На рисунке также приведено истинное относительное перемещение диска, полученное по формуле (7) для этой частоты колебаний диска (штриховая кривая). В этом случае также можно констатировать хорошее соответствие между измеренным и истинным перемещением. Найденный из графика размах измеренной величины Δx составляет около 15,47 см при истинном размахе 15,0 см, т.е. относительная погрешность определения размаха относительного перемещения также составляет около 3%, хотя в этом случае этот размах примерно в пять раз превышает длину волны электромагнитного излучения (2,90 см).

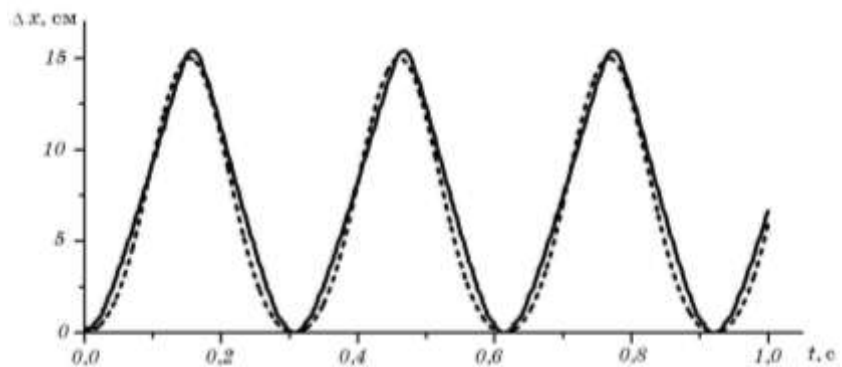


Рис. 7

Таким образом, описанные выше эксперименты подтвердили, что предложенная методика измерений устраняет неопределенности в определении

перемещения движущегося объекта, связанной с многозначностью обратных тригонометрических функций, и позволяет определять параметры колебательного движения элементов механических систем с хорошей точностью даже в случае, когда размах колебаний намного превышает длину волны электромагнитного излучения, используемого при измерениях.

Данная методика обеспечивает бесконтактные измерения, не требует применения дорогостоящих аппаратных средств со специальным программным обеспечением и может быть использована при разработке микроволновых измерителей перемещения для различных классов виброзащитных систем и систем управления технологическими процессами.

1. *Викторов В.А., Лункин Б.В., Совлуков А.С.* Радиоволновые измерения параметров технологических процессов. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 208 с.
2. *Кемпа Я.М., Коба С.И., Наумец Н.А., Рыбак Я.Н., Сенников В.Л.* Микроволновой акселерометр и тахометр // 12-я Международная конференция “СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии”. Севастополь, 9–13 сентября 2002. Материалы конференции. – С.565 – 566.
3. *Руденко Д.Ф., Волковец А.И., Гусинский А.В., Кострикин А.М., Герасименок О.О., Дзисяк А.Б.* Радиоволновой измеритель параметров вибраций // 15-я Международная конференция “СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии”. Севастополь, 12 – 16 сентября 2005. Материалы конференции. – С.829 – 830.
4. *Пилипенко О.В., Горев Н.Б., Запольский Л.Г., Коджеспирова И.Ф., Привалов Е.Н.* Моделирование процесса измерения параметров вибрации // *Техническая механика*. – 2003. – № 2. – С.25 – 32.

Институт технической механики
НАН Украины и НКА Украины,
Днепропетровск

Получено 11.03.08,
в окончательном варианте 20.03.08