

то он используется для диагностики и контроля, он помогает визуализировать рабочую область, а также использоваться в оптических методах контроля

Таким образом, усовершенствованная конструкция ударно-волнового генератора с лазерной системой расширяет терапевтические возможности метода, улучшая его эффективность и безопасность.

Принцип работы устройства.

Работа системы строится на цикле:

– Установка исходного положения объектива или мишени.

– Фокусировка лазера в предполагаемой зоне генерации.

– Регистрация фактической точки фокусировки средствами визуального контроля.

– Сравнение реального положения с заданным и формирование корректирующего сигнала.

– Автоматическая подстройка координат с обеспечением совпадения оптической оси и рабочей зоны.

– Генерация лазерного импульса и формирование ударной волны.

Разработанное устройство позиционирования является ключевым элементом ударно-волнового

генератора, использующего лазерный источник света. Его применение обеспечивает точный контроль зоны фокусировки, что приводит к стабильному и воспроизводимому формированию ударного акустического импульса.

Перспективы дальнейших исследований связаны с интеграцией систем адаптивной оптики и интеллектуальных алгоритмов машинного зрения, что позволит повысить эффективность и расширить области применения ударно-волновых технологий.

Литература

1. Васильев, А. Ю. Экстракорпоральная ударно-волновая терапия в лечении травм и заболеваний опорно-двигательного аппарата / А. Ю. Васильев, Е. А. Егорова. – М.: Медицина, 2005. – 93 с.
2. Vogel, A. Mechanisms of pulsed laser ablation of biological tissues / A. Vogel, V. Venugopalan // Chemical Reviews. – 2003. – Vol. 103, № 2. – P. 577–644.
3. Минкин, Р. Б. Лазерно-индуцированные ударные волны: физика и приложения / Р. Б. Минкин, В. Н. Глазков. – М.: Наука, 2017. – 320 с.
4. Lauterborn, W. Physics of bubble oscillations and cavitation / W. Lauterborn, T. Kurz // Reports on Progress in Physics. – 2010. – Vol. 73, № 10. – Art. 106501.

УДК 517.9

ИЗМЕНЕНИЕ ПЕРИОДИЧНОСТИ МОНОХРОМАТИЧЕСКИХ ВОЛН ВСЛЕДСТВИЕ НЕЛИНЕЙНОСТИ УРАВНЕНИЙ ДВИЖЕНИЯ

Князев М. А., Блинкова Н. Г.

Белорусский национальный технический университет, Минск, Беларусь

Аннотация. Рассмотрены волновые процессы, возникающих при изменении квадрупольного момента массивного источника, излучающего гравитационную волну. Особое внимание уделено поляризации волн. Показано, что, если в начальный момент времени волна является монохроматической и плоской, то в случае, когда в уравнениях Эйнштейна учитываются только линейные малые поправки к метрическому тензору, существует только одна составляющая поляризации. Однако, если учесть поправки второго порядка, то появляются две компоненты поляризации и они оказываются зависящими друг от друга. Это можно объяснить криволинейным характером пространства-времени. С математической точки зрения такое поведение поляризации обусловлено нелинейностью обыкновенного дифференциального уравнения, описывающего новую компоненту. Ранее высказывалось предположение о том, что в квадратичном приближении эта компонента теряет свойство периодичности. Точное аналитическое решение рассматриваемого нелинейного уравнения показывает, что, хотя амплитуда колебаний уменьшается, тем не менее колебательный характер функций, описывающих обе компоненты поляризации, сохраняется.

Ключевые слова: гравитационная волна, поляризация, квадратичное приближение, нелинейность.

VARIATION OF THE PERIODICITY FOR MONOCHROMATIC WAVES DUE TO NONLINEARITY OF EQUATIONS OF MOTION

Knyazev M. A., Blinkova N. G.

Belarusian National Technical University, Minsk, Belarus

Abstract. Wave processes due to a violation of quadrupole momentum of massive source are considered. A special attention is paid to the problem of wave polarization. It is shown that if at initial time a wave is plane and monochromatic then there is only one component of polarization. This polarization appears as a result of accounting the linear corrections to the metrics in the Einstein equations. If one account the second-order corrections, the two components of polarization are appeared. Such situation may be explained by nonlinear character of space-time. From mathematical point of view, it may be explained by nonlinearity of the ordinary differential equation for the new second component. Early it was mentioned that an accounting of the second-order corrections leads to the lost of the periodicity of polarization. An exact analytical solution of the equation under consideration demonstrates that the periodical character of polarization takes a place but an amplitude of oscillations is becoming less.

Keywords: gravity wave, polarization, second-order approximation, nonlinearity.

Адрес для переписки: Князев М. А., пр. Независимости, 65, г. Минск 220113, Республика Беларусь
e-mail: maknyazev@bntu.by

В работе построено общее решение нелинейного обыкновенного дифференциального уравнения (ОДУ) вида

$$2yy'' + y'^2 = M \cos^2(kt) - N, \quad (1)$$

где M и N – положительные константы, определяемые моделью рассматриваемой задачи, $k = 2\pi/\lambda$, λ – длина волны, штрих обозначает дифференцирование по времени.

Уравнения такого вида возникают при изучении распространения гравитационных волн в классической ОТО [1].

Если рассмотреть уравнение движения для гравитационной волны в двух измерениях (x, t) , то соответствующее уравнение Эйнштейна допускает, что поляризация гравитационной волны, обусловленной изменением составляющих квадрупольного момента источника, излучающего такую волну, в линейном приближении по малым поправкам к метрическому тензору может быть представлена в виде суммы двух независимых составляющих [2].

Обе эти составляющие являются линейными и периодическими функциями времени. Однако уже в квадратичном приближении по вышеупомянутым малым поправкам к метрическому тензору, предположение о независимости обеих составляющих поляризации не выполняется [3]. Это выражается в появлении некоторого нелинейного дифференциального соотношения достаточно сложного вида, которое описывает взаимную связь между двумя компонентами поляризации.

Предполагая, что в начальный момент времени испущенная волна является монохроматической и плоской, получаем, что она имеет только одну составляющую поляризации.

Учет квадратичного приближения как раз и приводит к уравнению (1), которое описывает поведение другой компоненты поляризации (мы обозначаем ее через y), появляющейся вследствие учета поправок второго порядка. Существует предположение, что учет этой второй составляющей поляризации гравитационных волн будет способствовать их более эффективному детектированию.

Уравнение (1) описывает поведение одной из компонент поляризации в квадратичном приближении. Это уравнение является нелинейным ОДУ второго порядка. Чтобы проанализировать его решение, перепишем это уравнение в виде

$$yy'' + \frac{y'^2}{2} = \frac{M}{2} \cos^2(kt) - \frac{N}{2}. \quad (2)$$

Тогда, если ввести замену зависимой переменной вида вида [4]

$$y^{3/2} = w, \quad (3)$$

уравнение (2) можно записать следующим образом

$$w'' = \frac{M}{2} \cos^2(kt) - \frac{N}{2}. \quad (4)$$

Данное уравнение допускает разделение переменных и его можно проинтегрировать явным образом [5]. В результате двукратного интегрирования получается следующее выражение для функции w :

$$w = \left(\frac{M}{8} - \frac{N}{2}\right)t^2 + C_1 t - \frac{M}{8k^2} \cos(2kt) - \frac{MC_2}{2k^2}. \quad (5)$$

Здесь C_1 и C_2 – постоянные интегрирования, которые определяются начальными условиями задачи. Полученное выражение позволяет найти явный вид искомой функции y :

$$y = \left[\left(\frac{M}{8} - \frac{N}{2}\right)t^2 + C_1 t - \frac{M}{8k^2} \cos(2kt) - \frac{MC_2}{2k^2}\right]^{2/3}. \quad (6)$$

Ясно, что полученное соотношение (6) представляет собой общее решение уравнения (1), поскольку оно содержит две независимые постоянные. Наличие иррациональности в этом решении естественным образом объясняется нелинейным характером исходного уравнения. При этом, поскольку извлекается корень третьей степени, подкоренное выражение может быть как больше, так и меньше нуля.

Однако, поскольку это подкоренное выражение представляет собой квадратичную функцию, знак не имеет принципиального значения.

Было высказано предположение, что учет поправок второго порядка приводит к тому, что возникающая составляющая поляризации перестанет быть периодической функцией времени, несмотря на периодичность в поведении квадрупольного момента источника излучения [1].

Однако, как следует из полученного точного решения (6), хотя амплитуда колебаний уменьшается, так как растет параметр k , тем не менее полностью периодический характер зависимости поляризации от времени не исчезает. Можно предположить, что учет поправок еще более высокого порядка к метрическому тензору усилит эффект сглаживания колебаний.

Литература

1. Poplawski, N. J. On the polarization of nonlinear gravitational waves / N. J. Poplawski // arXiv:1110.005 [gr-qc]. – 2011. – 3 p.
2. Ландау, Л. Д. Теория поля / Л. Д. Ландау, Е. М. Лифшиц. – М.: Наука, 1973. – 504 с.
3. Poplawski, N. J. Michelson interferometer in the field of a plane gravitational wave / N. J. Poplawski // Journal of Mathematical Physics. – 2006. – Vol. 47, № 7. – P. 072501.

4. Зайцев, В. Ф. Справочник по обыкновенным дифференциальным уравнениям / В. Ф. Зайцев, А. Д. Полянин. – М.: Физматлит, 2001. – 576 с.

5. Матвеев, Н. М. Сборник задач и упражнений по обыкновенным дифференциальным уравнениям / Н. М. Матвеев. – Минск: Вышэйшая школа, 1987. – 319 с.

УДК 621.396

ОБЕСПЕЧЕНИЕ ТЕПЛОВЫХ УСЛОВИЙ ЭКСПЛУАТАЦИЙ ГЕРМЕТИЧНЫХ ЭЛЕКТРОННЫХ УСТРОЙСТВ

Книга Н. А., Савелов И. Н.

Белорусский национальный технический университет, Минск, Беларусь

Аннотация. В статье рассматриваются подходы к обеспечению тепловых условий эксплуатации герметичных электронных устройств, работа которых осложняется отсутствием естественной конвекции и ограниченным теплообменом с окружающей средой. Дается характеристика основных методов отвода тепла: теплопроводности корпуса, жидкостного охлаждения, тепловых труб, фазопереходных материалов и активных систем на основе модулей Пельтье и принудительной циркуляции. Отмечаются их преимущества и ограничения, а также особенности применения в условиях повышенных требований к надежности, вибропрочности и температурной стабильности аппаратуры.

Ключевые слова: герметичные устройства, тепловой режим, системы охлаждения, фазопереходные материалы, надежность.

THERMAL MANAGEMENT OF HERMETICALLY SEALED ELECTRONIC DEVICES

Kniga N. A., Savelov I. N.

Belarusian National Technical University, Minsk, Belarusity

Abstract. The article considers approaches to ensuring the thermal conditions of hermetically sealed electronic devices, where the absence of natural convection and limited heat exchange with the environment complicate operation. A characterization of the main cooling methods is provided, including case heat conduction, liquid cooling, heat pipes, phase-change materials, and active systems based on Peltier modules and forced circulation. Their advantages and limitations are outlined, as well as the specific features of application under demanding conditions of reliability, vibration resistance, and temperature stability of electronic equipment.

Keywords: hermetic devices, thermal regime, cooling systems, phase-change materials, reliability.

*Адрес для переписки: Книга Н. А., пр. Независимости, 65, г. Минск 220113, Республика Беларусь
e-mail: catomile281@gmail.com*

Современные радиоэлектронные устройства характеризуются высокой степенью интеграции и ростом плотности размещения элементов, что сопровождается увеличением тепловыделения. Обеспечение оптимального теплового режима является одним из наиболее значимых факторов надежности, поскольку перегрев компонентов приводит к деградации материалов, изменению электрических характеристик и сокращению ресурса эксплуатации. По данным эксплуатационных наблюдений, доля тепловых отказов в сложных системах может достигать 40–50 % [1]. Особенно остро проблема проявляется в герметичных конструкциях, где естественная конвекция исключена, а теплообмен с окружающей средой ограничен. Дополнительную сложность создают тяжелые условия эксплуатации: вибрационные и ударные нагрузки, резкие перепады температуры, воздействие радиации и работа в условиях вакуума. Все это требует от разработчиков решений, обеспечивающих эффективный и устойчивый отвод тепла при сохранении герметичности и общей надежности аппаратуры.

Целью данной работы является оптимизация системы охлаждения герметичных электронных устройств при их функционировании в условиях интенсивного воздействия внешних воздействий.

Одним из самых распространенных технических решений рассеивания выделяемой тепловой

энергии в электронных устройствах является применение кондукции. Как показывает практика, эксплуатации электроники в сложных условиях и в больших радиоэлектронных системах, применяются несущие конструкции и защитные корпуса, выполненные из алюминиевых и медных сплавов, которые выполняют роль естественных теплоотводов, обеспечивая передачу энергии от внутренних источников к внешней поверхности. Достоинствами такого подхода являются простота, отсутствие энергопотребления и высокая надежность. Вместе с тем эффективность метода ограничена тепловыми нагрузками и условиями окружающей среды: при высокой температуре воздуха корпус перестает обеспечивать требуемый уровень охлаждения. Для снижения теплового сопротивления применяются термоинтерфейсные материалы, однако их долговременная стабильность ограничена процессами старения.

Для более мощных устройств применяются жидкостные методы охлаждения. Заполнение герметичного объема диэлектрическими жидкостями позволяет совместить теплопроводность с конвекционным переносом тепла, обеспечивая более равномерное температурное поле. Этот метод востребован в преобразовательных системах, радиочастотных усилителях и энергетических установках, где плотность тепловых потоков особенно высока [2]. Его преимуществом является