

УДК 539.3

## МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ МАГНИТОУПРУГИХ КОЛЕБАНИЙ ТОКОНЕСУЩЕГО МИКРОЭЛЕМЕНТА МАГНИТОМ ПОЛЕ

Индиаминов Р.<sup>1</sup> Шодмонов Ж.<sup>2</sup> Абдуллаев А.<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Самаркандский филиал Ташкентского университета информационных технологий имени Мухаммада ал-Хорезми, Самарканд, Узбекистан

<sup>2</sup>Каттакурганский филиал Самаркандского государственного университета, Самарканд, Узбекистан

<sup>3</sup>Ташкентский университет информационных технологий имени Мухаммада ал-Хорезми, Ташкент, Узбекистан

r\_indiaminov@mail.ru, shodmonovjavohir04@gmail.com, bakir.9191@mail.ru

**Аннотация.** В работе математически моделировано магнитоупругих колебаний токонесущего микроэлемента находящейся под воздействием переменной по времени механической силы и переменного по времени внешнего стороннего электрического тока с учетом электромагнитной анизотропии. Получены численные результаты и проведены анализ электромагнитных эффектов напряженно-деформированного состояния электропроводящей оболочки. Исследовано влияние стороннего электрического тока на напряженное состояние гибкого токонесущего микроэлемента типа оболочек с учетом электромагнитной анизотропии.

**Ключевые слова:** пластин, магнитное поле, анизотропия, магнитоупругость.

### I. ВВЕДЕНИЕ

Электротехнические материалы характеризуются определенными свойствами по отношению к электромагнитному полю и применяются в технике с учетом этих свойств. Среди современных технических средств немало устройств и объектов, работа которых основана на взаимодействии с магнитным полем или в которых последнее используется в качестве управляющей среды.

Между собой микросистемной техники и нанотехнологии тесно связаны: с одной стороны, микроэлектромеханические системы - актюаторы используются как

микроинструменты для манипулирования нанообъектами, микро- и нанороботами и их изучения, с другой стороны, квантовомеханические эффекты, новые материалы, связанные с нано-структурами, практическое применение часто получают в виде изделий микроэлектромеханические системы. Возрастает производство микро-электромеханических систем для пользовательской электроники (мобильных телефонов, планшетов, ноутбуков, мониторов, средств GPS-навигации и др.).

Наиболее эффективными микро-электромеханических систем- компонентами оказались пьезорезистивные датчики давления медицинского

назначения, струйные термо- и пьезопечатающие устройства, емкостные акселерометры, микрозеркальные цифровые устройства.

С каждым годом появляются все большее электротехнических устройств, в которых в качестве элементов конструкции используются тонкие проводящие пластины или оболочки. Находясь в переменном магнитном поле, они потребляют энергию, обусловленную возбужденными в них вихревыми токами, оказывают силовое воздействие на другие токнесущие тела или обеспечивают необходимый экранирующий эффект.

В процессе деформации тела происходит изменение формы его поверхности, что приводит к изменению направления тока, то есть изменяется электромагнитное поле тела, возникают вихревые токи, которые, взаимодействуя с внешним магнитным полем, приводят к появлению сил электромагнитного происхождения. Эти силы изменяют напряженное состояние тела и электромагнитного поля в нем.

Это очень хорошо может быть применено в области радиоэлектроники, электротехники, современных измерительных системах и т.д. Как известно, элементы конструкции измерительной системы из разных материалов в различных отраслях электроники, связи, информационной технологии, приборостроении, энергетики, оптической и космической техники, находятся под действием электромагнитных полей, и обеспечение их устойчивой работы являются исключительно актуальным.

В последние десятилетия значительное внимание в литературе уделяется исследованию процесса деформации электропроводных тел, помещенных во внешнее переменное магнитное поле, под воздействием нестационарных силовых, тепловых и электромагнитных нагрузок. Интерес к исследованиям в этой области связан с важностью количественного изучения и оценки наблюдаемых эффектов взаимосвязи нестационарных механических, тепловых и электромагнитных процессов и их практическим применением в различных областях современной техники при разработке новых технологий, а также в области нанотехнологии и микроэлектроники, а также современных измерительных системах и т.д. [1,2,3,4,5,6,7,8,9,10].

## II. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ.

### 2.1. Модели магнитоупругости

Пусть тело находится в магнитном поле, создаваемым как электрическим током в самом теле, так и источником, находящимся вдали от тела. Примем также, что тело служит проводником электрического тока (токнесущее тело), который подводится к торцам тела от внешнего источника. Предполагается, что сторонний электрический ток в невозмущенном состоянии равномерно распределен по телу (плотность тока не зависит от координат). Тело обладает конечной анизотропной электропроводностью и не обладает свойством самовольной поляризации и намагничиваемости.

Определим величины и запишем уравнения, которые характеризуют свойства электромагнитных полей.

Пусть электромагнитное поле тела в эйлеровой системе координат характеризуется вектором напряженности электрического поля  $\vec{e}$ , вектором напряженности магнитного поля  $\vec{h}$ , вектором электрической индукции  $\vec{d}$  и вектором магнитной индукции  $\vec{b}$ , а в лагранжевой системе координат характеризуется соответственно  $\vec{E}, \vec{H}, \vec{D}$  и  $\vec{B}$ .

Анализ электромагнитных эффектов возможен на основе системы уравнений Максвелла, совместно с материальными уравнениями, связывающими между собой векторы  $\vec{d}$  и  $\vec{e}$ ,  $\vec{b}$  и  $\vec{h}$ ,  $\vec{j}$  и  $\vec{e}$ , которые в случае линейных изотропных сред имеют вид [1,2,3]:

$$\vec{d} = \varepsilon_{\alpha} \vec{e}, \quad \vec{b} = \mu_{\alpha} \vec{h}, \quad \vec{j} = \sigma \vec{e}$$

где  $\varepsilon_{\alpha}, \mu_{\alpha}$  - называются соответственно электрической и магнитной проницаемостями,  $\sigma$  - электрической проводимостью среды. Свойства сред характеризуются параметрами  $\varepsilon_{\alpha}, \mu_{\alpha}$  и  $\sigma$ .

В зависимости от свойств параметров  $\varepsilon_{\alpha}, \mu_{\alpha}$  и  $\sigma$  различают следующие среды: линейные, в которых параметры  $\varepsilon_{\alpha}, \mu_{\alpha}$  и  $\sigma$  не зависят от величины электрического и магнитного полей, и нелинейные, в которых параметры  $\varepsilon_{\alpha}, \mu_{\alpha}$  и  $\sigma$  (или хотя бы один из них) зависят от величины электрического или магнитного поля.

Все реальные среды, по существу, являются нелинейными.

Однако при не очень сильных полях во многих случаях можно пренебречь зависимостью  $\varepsilon_{\alpha}, \mu_{\alpha}$  и  $\sigma$  от величины электрического и магнитного полей и

считать, что рассматриваемая среда линейна.

В свою очередь, линейные среды делятся на однородные и неоднородные, изотропные и анизотропные.

Однородными называют среды, параметры  $\varepsilon_{\alpha}, \mu_{\alpha}$  и  $\sigma$  которых не зависят от координат, т.е. свойства среды одинаковы во всех ее точках.

Среды, у которых хотя бы один из параметров  $\varepsilon_{\alpha}, \mu_{\alpha}$  и  $\sigma$  является функцией координат, называют неоднородными. Если свойства среды одинаковы по разным направлениям, то среду называют изотропной. Соответственно среды, свойства которых различны по разным направлениям, называют анизотропными.

В изотропных средах векторы  $\vec{d}$  и  $\vec{e}$ , а также  $\vec{b}$  и  $\vec{h}$  параллельны, в анизотропных средах они могут быть не параллельными.

Отметим, что определение связей между величинами  $\vec{e}$  и  $\vec{d}$ , а также  $\vec{h}$  и  $\vec{b}$  конкретизирует модель среды.

Упругие среда являются таковыми, что начальные относительные положения частиц влияют на внутренние усилия (как механического, так и магнитного происхождения) всюду в теле в более поздние моменты времени. Поэтому при исследовании таких объектов удобно применять начальные координаты каждой частицы, т.е. лагранжевы координаты.

Осуществим переход от эйлеровой системы координат  $\vec{x}$  к лагранжевой  $\vec{\xi}$  с помощью зависимостей [2,3,4]:

$$\varepsilon_{ijk} \frac{\partial h_k}{\partial \xi_p} \frac{\partial \xi_p}{\partial x_j} = j_i + \frac{\partial d_i}{\partial t}; \quad \varepsilon_{ijk} \frac{\partial e_k}{\partial \xi_p} \frac{\partial \xi_p}{\partial x_j} = -\frac{\partial b_i}{\partial t}; \quad \frac{\partial b_i}{\partial \xi_p} \frac{\partial \xi_p}{\partial x_i} = 0; \quad \frac{\partial d_i}{\partial \xi_p} \frac{\partial \xi_p}{\partial x_i} = \rho_e \quad (1)$$

где через  $\rho_e$  —обозначена объемная плотность электрических зарядов.

Опуская промежуточные преобразования, уравнения Максвелла в лагранжевых переменных принимают вид:

$$\varepsilon_{ijm} \frac{\partial H_m}{\partial \xi_p} = J_p + \frac{\partial D_r}{\partial t}; \quad \varepsilon_{ijm} \frac{\partial E_m}{\partial \xi_p} = -\frac{\partial B_p}{\partial t}; \quad \frac{\partial B_p}{\partial \xi_p} = 0; \quad \frac{\partial D_p}{\partial \xi_p} = R_e, \quad (2)$$

где

$$\begin{aligned} H_m &= h_k \frac{\partial x_k}{\partial \xi_m}; \quad E_m = e_k \frac{\partial x_k}{\partial \xi_m}; \\ B_p &= \Gamma b_i \frac{\partial \xi_p}{\partial x_i}; \quad D_r = \Gamma d_i \frac{\partial \xi_r}{\partial x_i}; \\ J_r &= \Gamma j_i \frac{\partial \xi_r}{\partial x_i}; \quad R_e = \Gamma \rho_e; \quad \Gamma = \det \left| \frac{\partial x_i}{\partial \xi_j} \right| \quad (3) \end{aligned}$$

Уравнения движения материального тела, которые описывают их

взаимодействие с электромагнитным полем, имеют вид [3]:

$$\frac{\partial}{\partial \xi_k} \left( \Gamma t_{ij} \frac{\partial \xi_k}{\partial x_j} \right) + \rho_0 (F_i + F_i^\wedge) = \rho_0 \frac{\partial^2 u_i}{\partial t^2}, \quad (4)$$

где  $t_{ij}$  —компоненты тензора напряжений Эйлера;  $\rho_0 = \Gamma \rho$  —плотность материала в недеформированном состоянии.

Таким образом, уравнения магнитоупругости в конечном виде запишем так:

$$\begin{aligned} \operatorname{div} S + \rho_0 (\vec{F} + \vec{F}^\wedge) &= \rho_0 \frac{\partial^2 \vec{u}}{\partial t^2}, \\ \operatorname{rot} \vec{E} &= -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}, \quad \operatorname{rot} \vec{H} = \vec{J}, \quad \operatorname{div} \vec{B} = 0; \quad \operatorname{div} \vec{D} = 0; \\ \rho \vec{F}^\wedge &= \sigma \Gamma^{-1} F^{-1} [(\vec{E} + \vec{V} \times \vec{B}) \times \vec{B}]; \quad \vec{J} = \sigma \Gamma F^T F^{-1} [\vec{E} + \vec{V} \times \vec{B}]. \end{aligned} \quad (5)$$

Система уравнений (5) должна быть дополнена начальными условиями, граничными условиями и условиями на бесконечности [1,3].

Отметим, что  $\operatorname{div}$  и  $\operatorname{rot}$  - операторы дивергенции ротора относительного неподвижного декартового базиса;  $\sigma$  - электрическая проводимость.

Систему уравнений магнитоупругости необходимо замкнуть соотношениями, связывающими векторы напряженности и индукции электромагнитного поля, а также законам Ома, определяющим плотность тока проводимости в подвижной среде.

Если анизотропное тело линейно относительно магнитных и электрических свойств, то определяющие уравнения для электромагнитных характеристик поля и кинематические уравнение для электропроводности, а также выражения для сила Лоренца, с учетом стороннего тока  $\vec{J}_{cm}$  в переменных Лагранжа запишутся соответственно в виде [2,3,4]:

$$\vec{B} = \mu_{ij} \vec{H}, \quad \vec{D} = \varepsilon_{ij} \vec{E},$$

$$\vec{J} = \sigma_{ij} \Gamma F^T F^{-1} [\vec{J}_{cm} + \vec{E} + \vec{v} \times \vec{B}] \quad (6)$$

$$\rho \vec{F}^{\wedge} = \Gamma^{-1} F^{-1} [\vec{J}_{cm} \times \vec{B} + \sigma_{ij} (\vec{E} + \vec{v} \times \vec{B}) \times \vec{B}]$$

Отметим, что в уравнениях Максвелла пренебрегаем токами смещения, вектором электрической индукции и объемной плотностью электрических зарядов (квазистатическое поле);  $\sigma_{ij}, \varepsilon_{ij}, \mu_{ij}$ -соответственно тензоры электрической проводимости, диэлектрической и магнитной проницаемости.

## 2.2. Методика решения связанной задачи

Разработанный методики к численному решению связанных нелинейных задач магнитоупругости анизотропных оболочек обладающих электромагнитной анизотропией, основан на последовательном применении конечноразностной схемы Ньюмарка, метода линеаризации и

дискретной ортогонализации [2-8, 10-15].

## 2.3. Числовой пример. Анализ результатов

Рассматриваем нелинейное поведение анизотропной токопроводящей оболочки переменной толщины  $h = 5 \cdot 10^{-4} (1 - 0.5 \frac{s}{s_N})$  м. Считаем, что оболочка из бериллия находится под воздействием механической силы  $P_z = 5 \cdot 10^3 \sin \omega t \text{ Н/м}^2$ , стороннего электрического тока  $J_{\theta CT} = 5 \cdot 10^5 \sin \omega t \text{ А/м}^2$ , и внешнего магнитного поля  $B_{S0} = 0.1 \text{ Тл}$ .

Электромагнитные же свойства материала характеризуются тензорами электрической проводимости  $\sigma_{ij}$ , магнитной проницаемости  $\mu_{ij}$ , диэлектрической проницаемости  $\varepsilon_{ij}$ .

Сторонний электрический ток в невозмущенном состоянии равномерно распределен по оболочке, т.е. плотность стороннего тока не зависит от координат.

В этом случае на оболочку действует комбинированное нагружение, состоящее из стороннего электрического тока пондеромоторной силы Лоренца и механической силы.

Исследуем поведение анизотропной оболочки переменной толщины в зависимости от изменения стороннего электрического тока, который изменяется следующим образом (5 вариантов):

$$1. J_{\theta CT} = 5 \cdot 10^5 \sin \omega t;$$

$$2. J_{\theta CT} = 5 \cdot 10^7 \sin \omega t;$$

$$3. J_{\theta CT} = -5 \cdot 10^7 \sin \omega t ;$$

$$5. J_{\theta CT} = -1 \cdot 10^8 \sin \omega t .;$$

$$4. J_{\theta CT} = -8 \cdot 10^5 \sin \omega t ;$$

Граничные условия:

$$u = 0, \quad w = 0, \quad M_s = 0, \quad B_\zeta = 0.3 \sin \omega t \text{ (шарнир) при } s = s_0 = 0,$$

$$w = 0, \quad \theta_s = 0, \quad N_s = 0, \quad B_\zeta = 0 \text{ (скользящее) при } s = s_N = 0.5 \text{ м.}$$

Начальные условия

$$\vec{N}(s, t) \big|_{t=0} = 0, \quad \dot{u}(s, t) \big|_{t=0} = 0, \quad \dot{w}(s, t) \big|_{t=0} = 0,$$

Параметры оболочки и материала принимаем следующими:

$$s_0 = 0, \quad s_N = 0.5 \text{ м}, \quad h = 5 \cdot 10^{-4} (1 - 0.5 \frac{s}{s_N}), \quad r = r_0 + s \cos \varphi; \quad r_0 = 0.5 \text{ м},$$

$$\omega = 314.16 \text{ с}^{-1}, \quad \rho = 2300 \text{ кг/м}^3, \quad B_s^+ = B_s^- = 0.1 \text{ Тл}, \quad \varphi = \pi/30, \quad B_{s0} = 0.1 \text{ Тл},$$

$$\mu = 1.256 \cdot 10^{-6} \text{ Гн/м}, \quad J_{\theta CT} = 5 \cdot 10^5 \sin \omega t \text{ А/м}^2, \quad \sigma_1 = 0.279 \cdot 10^8 (\text{Ом} \cdot \text{м})^{-1},$$

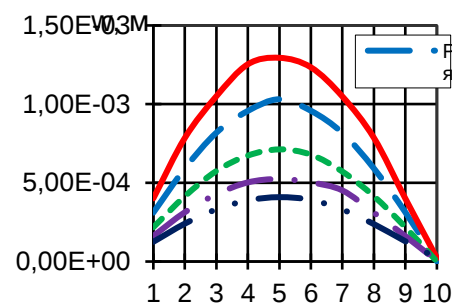
$$\sigma_2 = 0.321 \cdot 10^8 (\text{Ом} \cdot \text{м})^{-1}, \quad \sigma_3 = 1.136 \cdot 10^8 (\text{Ом} \cdot \text{м})^{-1}, \quad \nu_s = 0.03, \quad \nu_\theta = 0.09,$$

$$P_\zeta = 5 \cdot 10^3 \sin \omega t \text{ Н/м}^2, \quad e_s = 28.8 \cdot 10^{10} \frac{\text{Н}}{\text{м}^2}, \quad e_\theta = 33.53 \cdot 10^{10} \frac{\text{Н}}{\text{м}^2}$$

Решение задачи определено на интервале времени  $\tau = 10^{-2} \text{ с}$ , шаг интегрирования по времени принять равным:  $\Delta t = 1 \cdot 10^{-3} \text{ с}$  при ста точках интегрирования по длине оболочки. Максимальные значения получены при шаге по времени  $t = 5 \cdot 10^{-3} \text{ с}$ . Отметим, что в рассматриваемом случае анизотропия удельного электрического сопротивления равно  $\eta_3/\eta_1 = 4.07$ .

На рис.1 приведено изменение прогиба оболочки в зависимости от времени при  $s = 0.4 \text{ м}$  для всех вариантов изменения стороннего электрического тока  $J_{\theta CT}$ .

Из рис.1 следует, что увеличение значения стороннего электрического тока приводит к увеличению значения прогиба оболочки.



**Рис. 1.** Изменение прогиба оболочки в зависимости от времени при  $s = 0.4 \text{ м}$  для всех вариантов изменения стороннего электрического тока  $J_{\theta CT}$ .

### III. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе проведен анализ напряженного состояния гибкой оболочки, находящейся под действием переменной по времени механической силы и переменного по времени внешнего стороннего электрического тока, с учетом механической и электро-

магнитной анизотропии. Показано что, увеличение значения стороннего электрического тока приводит к увеличению значения прогиба оболочки. Выбирая направленность и величину плотности стороннего электрического тока, можно добиться минимального прогиба оболочки и соответственно оптимизировать напряженное состояние оболочки. Полученные результаты дают возможность оценить влияние на оболочку внешнего электрического тока и магнитной индукции, а также их комбинированное воздействие. Исходя, из приведенных результатов можно судить о влиянии стороннего электрического тока на напряженное состояние анизотропной оболочки.

## ЛИТЕРАТУРА

- [1] A. Ambartsumyan, G.E. Bagdasaryan, and M.V. Belubekyan, *Magnetoelasticity of Thin Shells and Plates* [in Russian], Nauka, Moscow (1977).
- [2] Y. M. Grigorenko and L. V. Mol'chenko, *Fundamentals of the Theory of Plates and Shells with Elements of Magnetoelasticity* (Textbook) (IPTs, 2010).
- [3] L. V. Mol'chenko, I. I. Loos, and R. S. Indiaminov, "Determining the stress state of flexible orthotropic shells of revolution in magnetic field," *Int. Appl. Mech* 44, 882–891(2008). <https://doi.org/10.1007/s10778-008-0102-6>
- [4] L. V. Mol'chenko, I. I. Loos, and R. S. Indiaminov, "Stress-strain state of flexible ring plates of variable stiffness in a magnetic field," *Int. Appl. Mech.* 45, 1236–1242 (2009). <https://doi.org/10.1007/s10778-010-0264-x>
- [5] R. Indiaminov, "On the absence of the tangential projection of the lorenz force on the axsymmetrical stressed state of current-carrying conic shells," *Int. Jour.Comp. Techn.* 13, 65–77 (2008).
- [6] L. V. Mol'chenko and I. I. Loos, "The stress state of a flexible orthotropic spherical shell subject to external current and mechanical force in a magnetic field," *Int. Appl. Mech.* 49, 528–533 (2013). <https://doi.org/10.1007/s10778-013-0587-5>
- [7] Javohir Shodmonov., Abdubakir Abdullaev., "Tok o'tkazuvchi mikroelementning magnitoelastik tebranishi" *International Scientific Journal of "Science and Innovation"*. UIF-2022: 8.2. ISSN: 2181-3337. Volume 1, Issue 4. P. 52-55. <https://doi.org/10.5281/zenodo.6873133>
- [8] Y. H. Bian and H. T. Zhao, "Analysis of thermal-magnetic-elastic stresses and strains in a thin current-carrying cylindrical shell," *Int. Appl. Mech.*, 52, No. 4, 437–448 (2016).
- [9] R. S. Indiaminov and R. Butaev, *et al.*, "Nonlinear integro-differential equations of bending of physically nonlinear viscoelastic plates," *IOP Publishing. Conf. Series: Materials Science and Engineering*, 7 (2020), <https://doi.org/10.1088/1757-899X/869/5/052048>.
- [10] R. Sh. Indiaminov, "Magneto-elastic deformation of a current-carrying orthotropic conical shell with an orthotropy of conductive properties," *Bulletin of the University of Kiev* 5, 81–86 (2015).
- [11] Indiaminov R., Narkulov A., Butaev, R. "Magnetoelastic strain of flexible shells in nonlinear statement", *AIP Conference Proceedings*, 2021, 2365, 02 0002. <https://doi.org/10.1063/5.0056840>
- [12] Indiaminov, R., Butaev, R., Narkulov, A. "Nonlinear deformation of a current shell in a

- magnetic field”, AIP Conference Proceedings, 2021, 2365, 02 0001. <https://doi.org/10.1063/5.0056839>
- [13] Ravshan Indiaminov and Nuriddin Yusupov, "Mathematical Modeling of Magnetoelastic Vibrations of Current Conductive Shells in the Non Stationary Magnetic Field," 2021 International Conference on Information Science and Communications Technologies (ICISCT), 2021, pp. 1-4.
- [14] Ravshan Indiaminov, Abdubakir Abdullaev, et al., “Nonlinear Strain of a Current-Conducting Annular Plate in a Magnetic Field”, Journal: AIP Conference Proceedings 2467, 060026 (2022). <https://doi.org/10.1063/5.0092485>
- [15] Ravshan Indiaminov, Nuriddin Yusupov, et al., “Nonlinear Oscillations of a Current-Carrying Shell in Magnetic Field”, Journal: AIP Conference Proceedings 2467, 020013 (2022); <https://doi.org/10.1063/5.0092465>

Поступила в редакцию 9.09.2022

**Цитирование:** Индиаминов Р.Ш., Шодмонов Ж., Абдуллаев А., Математическое моделирование магнитоупругих колебаний токонесущего микроэлемента магнитом поле // Международный журнал теоретических и прикладных вопросов цифровых технологий. – 2022. – №1(1). – С. 71-79.

## MATHEMATICAL MODELING OF MAGNETOELASTIC OSCILLATIONS OF A CURRENT-CARRYING MICROELEMENT MAGNETIC FIELD

Indiaminov R.Sh.<sup>1</sup> Shodmonov J.<sup>2</sup> Abdullaev A.<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Samarkand branch of Tashkent University of information technologies named after Muhammad al-Khwarizmi, Samarkand, Uzbekistan

<sup>2</sup> Kattakurgan branch of Samarkand State University, Samarkand, Uzbekistan

<sup>3</sup> Tashkent University of information technologies named after Muhammad al-Khwarizmi, Tashkent, Uzbekistan

r\_indiaminov@mail.ru, shodmonovjavohir04@gmail.com, bakir.9191@mail.ru

**Abstract.** *The work mathematically simulates the magnetoelastic oscillations of a current-carrying microelement under the influence of a time-varying mechanical force and a time-varying external external electric current, taking into account electromagnetic anisotropy. Numerical results are obtained and an analysis of the electromagnetic effects of the stress-strain state of an electrically conductive shells is carried out. The influence of an external electric current on the stressed state of a flexible current-carrying microelement of the shell types is studied taking into account the electromagnetic anisotropy.*

**Keywords:** *plates, magnetic field, anisotropy, magnetoelasticity.*

## MAGNIT MAYDONIDA TOK TASHUVCHI MIKROELEMENTNING MAGNITOELASTIK TEBRANISHINI MATEMATIK MODELLASHTIRISH

Indiaminov R.Sh.<sup>1</sup> Shodmonov J.<sup>2</sup> Abdullayev A.<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Muhammad al-Xorazmiy nomidagi Toshkent axborot texnologiyalari universiteti  
Samarqand filiali, Samarqand, O'zbekiston

<sup>2</sup> Samarqand davlat universiteti Kattaqo'rg'on filiali, Samarqand, O'zbekiston

<sup>3</sup> Muhammad al-Xorazmiy nomidagi Toshkent axborot texnologiyalari universiteti,  
Toshkent, O'zbekiston

r\_indiaminov@mail.ru, shodmonovjavohir04@gmail.com, bakir.9191@mail.ru

**Annotatsiya.** Maqolada elektromagnit anizotropiyani hisobga olgan holda vaqt bo'yicha o'zgaruvchan mexanik kuchlar va tashqi begona elektromagnit toki ta'sirlarida bo'lgan tok o'tkazuvchi mikroelementning magnitoelastik tebranishi matematik modellashirilgan. Sonli natijalar olingan va elektr o'tkazuvchi qobiq kuchlanganlik deformatsiyalangan holati va elektromagnit effektlar tahlili o'tkazilgan. Tashqi begona tokning yupqa qobiq shaklidagi mikroelementning kuchlanganlik holatiga ta'siri tadqiq qilingan.

**Kalit so'zlar:** plastina, qobiq, magnit maydoni, anizotropiya, magnitoelastik.