

УДК 681.7.068

Манько О.О., д.т.н.; Скубак О.М., к.т.н. (Державний університет телекомунікацій)

РІВНЯННЯ ЗБУРЕНОГО СТАНУ ОСЕРДЯ ОПТИЧНОГО ВОЛОКНА МЕРЕЖ ДОСТУПУ

Манько О.О., Скубак О.М. Рівняння збуреного стану осердя оптичного волокна мереж доступу. В статті розглядаються оптичні волокна мереж доступу. Аналіз показує, що на сучасному етапі найбільш перспективними вважаються мережі ФТТН. В даних мережах застосовуються оптичні кабелі з осердям стрічкового типу. Дані осердя являються закрученими. Для дослідження поведінки таких осердь під дією зовнішніх механічних факторів можна застосовувати теорію закручених стержнів. На основі цієї теорії отримано рівняння збуреного руху. Ці рівняння дозволяють дослідити механізм втрати стійкості осердя під дією стискаючих зусиль.

Ключові слова: оптичне волокно, осердя стрічкового типу, закручений стержень, рівняння руху, рівняння збуреного стану, мережа доступу

Манько А.А., Скубак А.Н. Уравнения возмущенного состояния сердечника оптического кабеля сетей доступа. В статье рассматриваются оптические волокна сетей доступа. Анализ показывает, что на современном этапе наиболее перспективными считаются сети ФТТН. В данных сетях применяются оптические кабели с сердечником ленточного типа. Данные сердечники являются закрученными. Для исследования поведения таких сердечников под действием внешних механических факторов можно применить теорию закрученных стержней. На основе этой теории получены уравнения возмущенного состояния. Эти уравнения позволяют исследовать механизм потери устойчивости сердечника под действием сжимающих усилий.

Ключевые слова: оптическое волокно, сердечник ленточного типа, закрученный стержень, уравнения движения, уравнения возмущенного состояния, сеть доступа

Manko O.O., Skubak O.M. Equations of the perturbed state of the access networks optical cable core. The article deals with optical fibre access networks. The analysis shows that at the present stage are considered the most promising networks FTTH. In networks use optical cables with a core of strip type. There are twisted cores. To study the behaviour of such cores under external mechanical factors can apply the theory of twisted rods. On the basis of this theory are produced the equations of disturbed state. These equations allow to investigate the mechanism of buckling of the core under the compressive forces.

Keywords: optical fibre, core ribbon type, twisted rod, equations of motion, perturbation equations of state, access networks

Вступ. Постановка задачі. Мережі доступу грають основну роль в процесі розподілення інформації між абонентами та доставки її до кінцевого обладнання користувача.

Мережа доступу – це сукупність технічних засобів між кінцевими абонентськими пристроями, встановленими в приміщеннях користувача та комутаційним обладнанням, в план нумерації (або адресації) якого входять термінали, що підключаються до телекомунікаційної системи [1, 2].

Головною складовою мережі доступу проводових систем зв'язку являється абонентська лінія (АЛ). Основною задачею АЛ можна вважати організацію зв'язку абонентського терміналу зі “своїм” вузлом зв'язку. По мірі створення мережі орендованих ліній (“прямих провідників”) АЛ стали підключатись до диспетчерських комутаторів або просто з'єднувати два абоненти. В подальшому з'явилися інші комутаційні мережі – абонентського телеграфування, передачі даних і т.п., що привело до використання АЛ для зв'язку відповідних терміналів з комутаційними станціями інших (відмінних від телефонних) вторинних мереж. Сукупність АЛ – для існуючої системи проводового електровз'язку – являє собою мережу доступу. З цієї причини функції АЛ та мережі доступу співпадають.

На сьогоднішній день одним з питань є побудова сучасних широкосмугових абонентських мереж, які охоплюють житлові зони кварталів, районів міст або сільської місцевості [3]. Для розв'язання подібних даних задач розроблено декілька концепцій, що

враховують споживчі характеристики та платіжоспроможність абонентів. Практично усі вони використовують в тій чи іншій мірі волоконно-оптичні лінії зв'язку, які значно збільшують пропускну здатність та дозволяють впроваджувати нові широкополосні служби. Найбільш широке поширення отримала концепція “волокно в квартиру” (FTTH – fiber to the home).

Концепція “волокно в квартиру” FTTH є самою перспективною, оскільки вона забезпечує найбільшу полосу пропускання, масове обслуговування абонентів на відстані до 20 км від вузла зв'язку, швидкість доступу для абонента до кількох гігабіт в секунду [3]. На цей час має місце широке впровадження технологій FTTH в США та Японії. В Японії над втіленням державної програми впровадження даної технології. В даній концепції волокно від головного вузла направляється безпосередньо в квартиру абонента.

Головною складовою частиною мережі FTTH є оптичне волокно стрічкового типу. Кабель з осердям стрічкового типу характеризується правильним розташуванням світловодів в вузлах прямокутної решітки. Осердя закручується по гвинтовій лінії для гнучкості та збереження форми оптичного кабелю (ОК) [4...6].

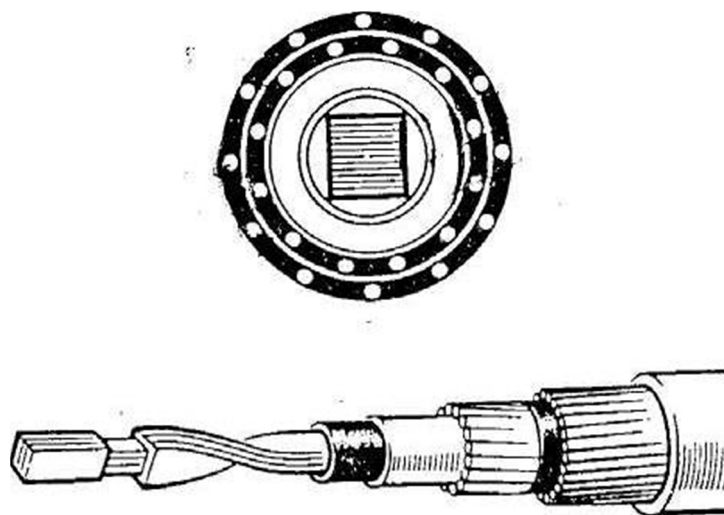


Рис. 1. Поперечний переріз та загальний вид ОК з осердям стрічкового типу.

Тому для дослідження механічних характеристик даного типу кабелю та отримання рівнянь збуреного стану скористаємось методами нелінійної теорії закручених стержнів.

Отримання рівнянь збуреного стану. В роботі [7] отримано рівняння руху для закручених стержнів в зусиллях та моментах, які з урахуванням кінематичних співвідношень можна представити у вигляді:

$$\begin{aligned}
 & EF\alpha \frac{\partial A}{\partial s} - EJ_2\alpha C \frac{\partial^2 \chi_2}{\partial s^2} + EJ_3\alpha B \frac{\partial^2 \chi_3}{\partial s^2} - GJ_p \left(B \frac{\partial C}{\partial s} - C \frac{\partial B}{\partial s} \right) \frac{\partial \chi_{23}}{\partial s} - \\
 & - GJ_p \left(B \frac{\partial^2 C}{\partial s^2} - C \frac{\partial^2 B}{\partial s^2} \right) \chi_{23} - EJ_2\alpha \left(\frac{\partial B}{\partial s} \frac{\partial b_3}{\partial s} + B \frac{\partial^2 b_3}{\partial s^2} \right) \chi_2 + \\
 & + EJ_3\alpha \left(\frac{\partial C}{\partial s} \frac{\partial b_3}{\partial s} + C \frac{\partial^2 b_3}{\partial s^2} \right) \chi_3 - Bf_2^* - Cf_3^* = m \frac{\partial^2 u_0}{\partial t^2};
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 & EJ_3\alpha \frac{\partial^2 \chi_3}{\partial s^2} + GJ_p C \frac{\partial^2 \chi_{23}}{\partial s^2} + EJ_2\alpha b_3 \frac{\partial^2 \chi_2}{\partial s^2} + GJ_p \frac{\partial^2 C}{\partial s^2} \chi_{23} + \\
 & EJ_3\alpha \frac{\partial^2 \chi_3}{\partial s^2} + GJ_p C \frac{\partial^2 \chi_{23}}{\partial s^2} + EJ_2\alpha b_3 \frac{\partial^2 \chi_2}{\partial s^2} + GJ_p \frac{\partial^2 C}{\partial s^2} \chi_{23} + \\
 & EJ_2\alpha \frac{\partial^2 \chi_2}{\partial s^2} - GJ_p B \frac{\partial^2 \chi_{23}}{\partial s^2} - EJ_3\alpha b_3 \frac{\partial^2 \chi_3}{\partial s^2} - GJ_p \frac{\partial^2 B}{\partial s^2} \chi_{23} - \\
 & - EJ_3\alpha \frac{\partial^2 b_3}{\partial s^2} \chi_3 + EF\alpha C \frac{\partial A}{\partial s} + EF\alpha A_0 \frac{\partial C}{\partial s} - b_3 f_2^* + f_3^* = m \frac{\partial^2 w_0}{\partial t^2}; \\
 & GJ_p \frac{\partial \chi_{23}}{\partial s} + GJ_p \frac{\partial A}{\partial s} \chi_{23} + EJ_2\alpha \frac{\partial B}{\partial s} \chi_2 - EJ_3\alpha \frac{\partial C}{\partial s} \chi_3 = \rho J_p \frac{\partial^2 b_3}{\partial t^2}.
 \end{aligned}$$

Для приведення рівнянь руху до безрозмірного виду введемо наступні безрозмірні величини:

$$\begin{aligned}
 \bar{s} &= \frac{s}{l}; \quad \bar{u}_0 = \frac{u_0}{l}; \quad \bar{v}_0 = \frac{v_0}{l}; \quad \bar{w}_0 = \frac{w_0}{l}; \\
 \bar{\chi}_{23} &= l\chi_{23}; \quad \bar{\chi}_2 = l\chi_2; \quad \bar{\chi}_3 = l\chi_3; \quad \bar{t} = \frac{t}{t_0},
 \end{aligned}$$

де l – довжина стержня.

Величина b_3 – безрозмірна величина.

Неважно впевнитись, що

$$A = 1 + A_0; \quad A_0 = \frac{du_0}{ds} - v_0 r_1 + w_0 q_1; \quad B = \frac{dv_0}{ds} + u_0 r_1 - p_1 w_0; \quad C = \frac{dw_0}{ds} - u_0 q_1 + v_0 p_1$$

– теж безрозмірні величини.

Введемо також наступні безрозмірні параметри:

$$\alpha_1 = \frac{J_2}{Fl^2}; \quad \alpha_2 = \frac{J_3}{Fl^2}; \quad \alpha_3 = \frac{GJ_p}{EFl^2\alpha}; \quad \alpha_4 = \frac{\rho l d}{E\alpha t_0};$$

$$\beta_1 = \frac{GJ_p}{EJ_3\alpha}; \quad \beta_2 = \frac{J_2}{J_3}; \quad \beta_3 = \frac{Fl^2}{J_3}; \quad \beta_4 = \frac{\rho Fl^3 d}{EJ_3\alpha t_0^2};$$

$$\gamma_1 = \frac{GJ_p}{EJ_2\alpha}; \quad \gamma_2 = \frac{J_3}{J_2}; \quad \gamma_3 = \frac{Fl^2}{J_2}; \quad \gamma_4 = \frac{\rho Fl^3 d}{EJ_2\alpha t_0^2};$$

$$\delta_1 = \frac{EJ_2\alpha}{GJ_p}; \quad \delta_2 = \frac{EJ_3\alpha}{GJ_p}; \quad \delta_3 = \frac{\rho l^2}{Gt_0^2}.$$

З урахуванням вище сказаного, опустивши ризику над безрозмірними величинами та для зручності позначивши через $\gamma = \epsilon_3$, одержимо наступну замкнену систему рівнянь руху в безрозмірному вигляді:

$$\frac{\partial A}{\partial s} - \alpha_3 \left(B \frac{\partial C}{\partial s} - C \frac{\partial B}{\partial s} \right) \frac{\partial \chi_{23}}{\partial s} - \alpha_3 \left(B \frac{\partial^2 C}{\partial s^2} - C \frac{\partial^2 B}{\partial s^2} \right) \chi_{23} - B f_2^* - C f_3^* = \alpha_4 \frac{\partial^2 u_0}{\partial t^2};$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial^2 \chi_3}{\partial s^2} + \beta_1 C \frac{\partial^2 \chi_{23}}{\partial s^2} + \beta_2 \gamma \frac{\partial^2 \chi_2}{\partial s^2} + \beta_1 \frac{\partial^2 C}{\partial s^2} \chi_{23} + \beta_2 \frac{\partial^2 \gamma}{\partial s^2} \chi_2 + \beta_3 B \frac{\partial A_0}{\partial s} + \beta_3 A_0 \frac{\partial B}{\partial s} + \\ + \beta_3 f_2^* + \beta_3 \gamma f_3^* = \beta_4 \frac{\partial^2 v_0}{\partial t^2}; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial^2 \chi_2}{\partial s^2} - \gamma_1 B \frac{\partial^2 \chi_{23}}{\partial s^2} - \gamma_2 \gamma \frac{\partial^2 \chi_3}{\partial s^2} - \gamma_1 \frac{\partial^2 B}{\partial s^2} \chi_{23} - \gamma_2 \frac{\partial^2 \gamma}{\partial s^2} \chi_3 + \gamma_3 C \frac{\partial A_0}{\partial s} + \gamma_3 A_0 \frac{\partial C}{\partial s} - \\ - \gamma_3 \gamma f_2^* + \gamma_3 f_3^* = \gamma_4 \frac{\partial^2 w_0}{\partial t^2}; \end{aligned}$$

$$\frac{\partial \chi_{23}}{\partial s} + \frac{\partial A}{\partial s} \chi_{23} + \delta_1 \frac{\partial B}{\partial s} \chi_2 - \delta_2 \frac{\partial C}{\partial s} \chi_3 = \delta_3 \frac{\partial^2 \gamma}{\partial t^2}.$$

Нехай

$$\chi_2 = \chi_2' = \tilde{\chi}_2, \quad A = A' + \tilde{A}, \quad B = B' + \tilde{B}, \quad C = C' + \tilde{C}, \quad (A_0 \approx A),$$

де величини

$$u_0', v_0', \dots, \chi_{23}', \dots \text{ відповідають стану рівноваги;}$$

$$\tilde{u}_0, \tilde{v}_0, \dots, \tilde{\chi}_{23}, \dots \text{ – збуреному стану.}$$

Підставивши відповідні вирази в систему рівнянь руху в безрозмірному вигляді, нехтуючи квадратами та мішаними добутками величин, що характеризують збурений стан, одержимо наступну систему рівнянь збуреного руху в безрозмірному вигляді:

$$\begin{aligned} \alpha_1 C' \frac{\partial^3 \tilde{C}}{\partial s^3} - \alpha_2 B' \frac{\partial^3 \tilde{B}}{\partial s^3} - (\alpha_1 q_1 C' + \alpha_2 r_1 B') \frac{\partial^2 \tilde{A}}{\partial s^2} + \alpha_1 p_1 C' \frac{\partial^2 \tilde{B}}{\partial s^2} + \alpha_2 p_1 B' \frac{\partial^2 \tilde{C}}{\partial s^2} + 2\alpha_1 \frac{\partial p_1}{\partial s} C' \frac{\partial \tilde{B}}{\partial s} + \\ + (\alpha_1 r_1 C' - \alpha_2 q_1 B') \frac{\partial^2 \tilde{\gamma}}{\partial s^2} + 2\alpha_2 \frac{\partial p_1}{\partial s} B' \frac{\partial \tilde{C}}{\partial s} + 2(\alpha_1 \frac{\partial r_1}{\partial s} C' - \alpha_2 \frac{\partial q_1}{\partial s} B') \frac{\partial \tilde{\gamma}}{\partial s} - \\ - [1 - 2(\alpha_1 \frac{\partial p_1}{\partial s} C' + \alpha_2 \frac{\partial r_1}{\partial s} B')] \frac{\partial \tilde{A}}{\partial s} + -(\alpha_1 \frac{\partial^2 q_1}{\partial s^2} C' + \alpha_2 \frac{\partial^2 r_1}{\partial s^2} B') \tilde{A} + (\alpha_1 \frac{\partial^2 p_1}{\partial s^2} C' + \\ + (\alpha_2 \frac{\partial^2 \chi_3'}{\partial s^2} - f_2) \tilde{B} + (\alpha_2 \frac{\partial^2 p_1}{\partial s^2} B' + \alpha_1 \frac{\partial^2 \chi_2'}{\partial s^2} - f_3) \tilde{C} + (\alpha_1 \frac{\partial^2 r_1}{\partial s^2} C' + \alpha_2 \frac{\partial^2 q_1}{\partial s^2} B') \tilde{\gamma} = \alpha_3 \frac{\partial^2 \tilde{u}_0}{\partial t^2}; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 & -\frac{\partial^3 \tilde{B}}{\partial s^3} - b_2 \gamma' \frac{\partial^3 \tilde{C}}{\partial s^3} + b_1 C' \frac{\partial^3 \tilde{\gamma}}{\partial s^3} + (b_2 \gamma' q_1 - r_1) \frac{\partial^2 \tilde{A}}{\partial s^2} - (b_1 C' q_1 + b_2 \gamma' p_1) \frac{\partial^2 \tilde{B}}{\partial s^2} + \\
 & + (b_1 \chi'_{23} - b_1 C' r_1 + p_1) \frac{\partial^2 \tilde{C}}{\partial s^2} + (b_2 \chi'_2 - b_1 \gamma' r_1 - q_1) \frac{\partial^2 \tilde{\gamma}}{\partial s^2} + [b_3 B' + 2b_2 \gamma' \frac{\partial q_1}{\partial s} - 2 \frac{\partial r_1}{\partial s}] \frac{\partial \tilde{A}}{\partial s} + \\
 & + [b_3 A'_0 - 2(b_1 C' q_1 \frac{\partial q_1}{\partial s} + b_2 \gamma' \frac{\partial p_1}{\partial s})] \frac{\partial \tilde{B}}{\partial s} + (-b_2 \frac{\partial^2 \gamma'}{\partial s^2} - 2b_1 C' \frac{\partial r_1}{\partial s} + 2 \frac{\partial p_1}{\partial s}) \frac{\partial \tilde{C}}{\partial s} + \\
 & + (b_1 \frac{\partial^2 C'}{\partial s^2} - 2b_2 \gamma' \frac{\partial r_1}{\partial s} - 2 \frac{\partial q_1}{\partial s}) \frac{\partial \tilde{\gamma}}{\partial s} + [b_3 \frac{\partial B'}{\partial s} + (b_2 q_1 \frac{\partial^2 \gamma'}{\partial s^2} + b_2 \gamma' \frac{\partial^2 q_1}{\partial s^2} - \frac{\partial^2 r_1}{\partial s^2})] \tilde{A} + \\
 & + (b_3 \frac{\partial A'}{\partial s} - b_1 q_1 \frac{\partial^2 C'}{\partial s^2} - b_2 \gamma' \frac{\partial^2 p_1}{\partial s^2} - b_1 C' \frac{\partial^2 q_1}{\partial s^2} - b_2 p_1 \frac{\partial^2 \gamma'}{\partial s^2}) \tilde{B} + (b_1 \frac{\partial^2 \chi'_{23}}{\partial s^2} + \frac{\partial^2 p_1}{\partial s^2} - b_1 C' \frac{\partial^2 r_1}{\partial s^2} - \\
 & - b_1 r_1 \frac{\partial^2 C_1}{\partial s^2}) \tilde{C} + (b_{12} \frac{\partial^2 \chi'_2}{\partial s^2} - \frac{\partial^2 q_1}{\partial s^2} - b_2 \gamma' \frac{\partial^2 r_1}{\partial s^2} - b_2 r_1 \frac{\partial^2 \gamma'}{\partial s^2} + b_3 f_3) \tilde{\gamma} = b_4 \frac{\partial^2 \tilde{v}_0}{\partial t^2};
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 & -\frac{\partial^3 \tilde{C}}{\partial s^3} - c_2 \gamma' \frac{\partial^3 \tilde{B}}{\partial s^3} - c_1 B' \frac{\partial^3 \tilde{\gamma}}{\partial s^3} + (-c_2 \gamma' r_1 + q_1) \frac{\partial^2 \tilde{A}}{\partial s^2} + (-c_1 \chi'_{23} + c_1 B' q_1 - p_1) \frac{\partial^2 \tilde{B}}{\partial s^2} + \\
 & + (c_1 B' r_1 - c_2 \gamma' p_1) \frac{\partial^2 \tilde{C}}{\partial s^2} + (-c_2 \chi'_3 + c_2 \gamma' q_1 - r_1) \frac{\partial^2 \tilde{\gamma}}{\partial s^2} + [c_3 C' + 2c_2 \gamma' \frac{\partial r_1}{\partial s} + 2 \frac{\partial q_1}{\partial s}] \frac{\partial \tilde{A}}{\partial s} + \\
 & + [c_3 A'_0 + 2(c_1 B' \frac{\partial r_1}{\partial s} - c_2 \gamma' \frac{\partial p_1}{\partial s})] \frac{\partial \tilde{C}}{\partial s} + (c_2 \frac{\partial^2 \gamma'}{\partial s^2} + 2c_1 B' \frac{\partial q_1}{\partial s} - 2 \frac{\partial p_1}{\partial s}) \frac{\partial \tilde{B}}{\partial s} + \\
 & + (-c_1 \frac{\partial^2 B'}{\partial s^2} + 2c_2 \gamma' \frac{\partial q_1}{\partial s} - 2 \frac{\partial r_1}{\partial s}) \frac{\partial \tilde{\gamma}}{\partial s} + [c_3 \frac{\partial C'}{\partial s} + (c_2 r_1 \frac{\partial^2 \gamma'}{\partial s^2} + c_2 \gamma' \frac{\partial^2 r_1}{\partial s^2} + \frac{\partial^2 q_1}{\partial s^2})] \tilde{A} + \\
 & + (c_3 \frac{\partial A'}{\partial s} - c_2 p_1 \frac{\partial^2 \gamma'}{\partial s^2} - c_2 \gamma' \frac{\partial^2 p_1}{\partial s^2} + c_1 B' \frac{\partial^2 r_1}{\partial s^2} + b_1 r_1 \frac{\partial^2 B'}{\partial s^2}) \tilde{C} + (-c_1 \frac{\partial^2 \chi'_{23}}{\partial s^2} - \frac{\partial^2 p_1}{\partial s^2} + c_1 B' \frac{\partial^2 q_1}{\partial s^2} + \\
 & + c_1 q_1 \frac{\partial^2 B'}{\partial s^2}) \tilde{B} + (-c_2 \frac{\partial^2 \chi'_2}{\partial s^2} - \frac{\partial^2 r_1}{\partial s^2} + c_2 \gamma' \frac{\partial^2 q_1}{\partial s^2} + c_2 q_1 \frac{\partial^2 \gamma'}{\partial s^2} - c_3 f_2) \tilde{\gamma} = c_4 \frac{\partial^2 \tilde{w}_0}{\partial t^2};
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 & \frac{\partial^2 \tilde{\gamma}}{\partial s^2} + \chi'_{23} \frac{\partial \tilde{A}}{\partial s} + (d_1 \chi'_2 + d_2 \frac{\partial C'}{\partial s} - q_1) \frac{\partial \tilde{B}}{\partial s} - (d_2 \chi'_3 + d_1 \frac{\partial B'}{\partial s} - r_1) \frac{\partial \tilde{C}}{\partial s} + \frac{\partial A'}{\partial s} \frac{\partial \tilde{\gamma}}{\partial s} + \\
 & + (d_1 q_1 \frac{\partial B'}{\partial s} + d_2 r_1 \frac{\partial C'}{\partial s}) \tilde{A} - (\frac{\partial q_1}{\partial s} + q_1 \frac{\partial A'}{\partial s} + d_1 p_1 \frac{\partial B'}{\partial s}) \tilde{B} - (\frac{\partial r_1}{\partial s} + r_1 \frac{\partial A'}{\partial s} + d_2 p_1 \frac{\partial C'}{\partial s}) \tilde{C} + \\
 & + (d_2 q_1 \frac{\partial C'}{\partial s} - d_1 r_1 \frac{\partial B'}{\partial s}) \tilde{\gamma} = d_3 \frac{\partial^2 \tilde{\gamma}}{\partial t^2}.
 \end{aligned}$$

Висновок. На основі приведених в роботі [7] рівнянь руху для закручених стержнів в зусиллях та моментах з урахуванням кінематичних співвідношень в представленій роботі отримано систему рівнянь збуреного стану для оптичного кабелю мереж доступу. Дані рівняння дозволяють розв'язати задачу втрати стійкості осердя кабелю під дією повздовжніх стискаючих зусиль та під дією власної ваги на ділянці вертикального розташування оптичного кабелю, а також знайти критичні навантаження на осердя оптичного кабелю, при яких відбувається втрата стійкості.

Література

1. Аджемов С.С. Технологии широкополосного доступа: динамика и перспективы развития / С.С. Аджемов, Ю.Ф. Урядников // Электросвязь. – 2011. – №1. – С. 19-23.
2. Урядников Ю.Ф. Сверхширокополосная связь. Теория и применение / Ю.Ф. Урядников, С.С. Аджемов. – М. : СОЛОН-Пресс, 2005. – 368 с.
3. Убайдуллаев Р.Р. Волоконно-оптические сети / Р.Р. Убайдуллаев. – М. : Эко-Трендз, 1998. – 300 с.
4. Скляр О.К. Волоконно-оптические сети и системы связи : учебное пособие / О.К. Скляр. – СПб.: Издательство «Лань», 2010. – 272 с.
5. Mahlke G., Gossing P. Fiber Optic Cables – Fundamentals, Cable Design, System Planning, 4th edition, MCD Corporate Publishing, Munich, 2001. – 302 pp.
6. Agrawal G.P. Fiber-Optic Communication Systems. John Wiley, New York, 1992. – 541 p.
7. Скубак О.М. Поведінка оптичного кабелю мереж доступу під дією зовнішніх факторів / О.М Скубак // Сучасний захист інформації. – 2013. – №1. – С. 39-44.