

Исследование резонансных частот при поперечных колебаниях рулонов магнитных лент

Э. С. Уманский, Н. С. Шидловский, В. В. Крючков, Д. Г. Кофто (Киев)

В эксплуатационных условиях механизмы транспортировки ленты могут испытывать весьма значительные вибрации (с ускорениями до 40 g) [1], которые передаются на рулоны магнитной ленты, используемые при записи в качестве накопителей информации. В случае совпадения частоты колебаний аппаратуры магнитной записи и собственной частоты поперечных колебаний рулонов, т. е. при резонансе, поперечные перемещения (прогибы) могут превысить допустимые с точки зрения кинематических условий движения ленты и привести к нарушению целостности рулона.

В связи с этим возникла необходимость установить диапазоны изменения собственных частот поперечных колебаний рулонов магнитной ленты в зависимости от таких факторов, как величина натяжения ленты при намотке рулонов, температура и угловая скорость вращения.

Исследованию подвергали рулоны магнитной ленты типа И-4406-6 на полиэтилентерефталатной (ПЭТФ) основе, нашедшей в настоящее время широкое применение в различных областях техники. Намотку рулонов производили при постоянном натяжении H в диапазоне усилий от 0,5 до 2 Н. Кроме того, исследовали зависимость резонансных частот от геометрических размеров рулона, т. е. определяли резонансные частоты поперечных колебаний рулона при разных величинах наружного радиуса рулона, намотанного на сердечник диаметром 90 мм.

Значения резонансных частот поперечных колебаний рулонов магнитных лент определяли на специальной установке, созданной на основе электродинамического стенда ВЭДС-100Б (рис. 1).

Колебательная система установки состоит из вибратора 1, на рабочем столе 2 которого закреплен исследуемый объект — рулон ПЭТФ магнитной ленты 3, намотанный на сердечник 4. Возбуждение колебаний рабочего стола 2 осуществляется с помощью электронной системы, состоящей из генератора синусоидальных колебаний 5, блока автоматического поддержания параметров вибрации 6, усилителя мощности 7 и блока питания катушки подмагничивания 8. Частота колебаний контролируется цифровым частотомером ЧЗ-33, подключенным к генератору 5.

Процесс поддержания постоянной амплитуды перемещения w или эффективного ускорения

колебаний $a_{эф}$ рабочего стола при изменении частоты колебаний осуществляется блоком 6 совместно с пьезокерамическим датчиком 9. Второй пьезокерамический датчик 10 подключен к блоку измерения параметров вибрации 11. Оба датчика неподвижно закреплены на рабочем столе вибрационного стенда.

Значение резонансной частоты, соответствующее максимальной амплитуде перемещения края рулона, определяли двумя методами. В первом методе в качестве датчика электрического сигнала служил электродинамический микрофон 12, закрепленный над краем рулона и подключенный к осциллографу С1-19Б. Второй метод предусматривает использование индукционного датчика, состоящего из катушки-датчика 13, катушки-приемника 14, сердечника 15, выполненного из электромагнитной стали, и блока питания Б5-8.

В обоих методах, плавно изменяя частоту вынуждающей силы, с помощью осциллографа С1-19Б фиксировали максимальное значение амплитуды перемещения края исследуемого рулона и соответствующую ему резонансную частоту. При этом эффективное значение ускорения колебаний сердечника 4 поддерживалось постоянным $a_{эф} = 10 \text{ м/с}^2$ во всем исследуемом частотном диапазоне.

Предварительные эксперименты, заключающиеся в измерении перемещений точек различных радиусов при колебаниях, показали, что

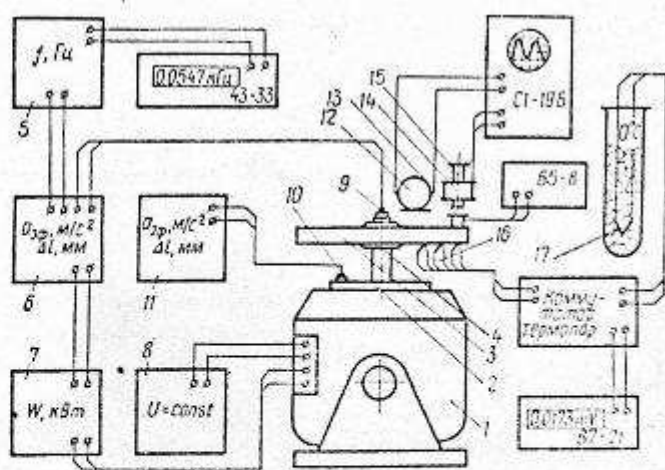


Рис. 1. Электромеханическая схема стенда для исследования динамических характеристик рулонов магнитных лент при поперечных колебаниях.

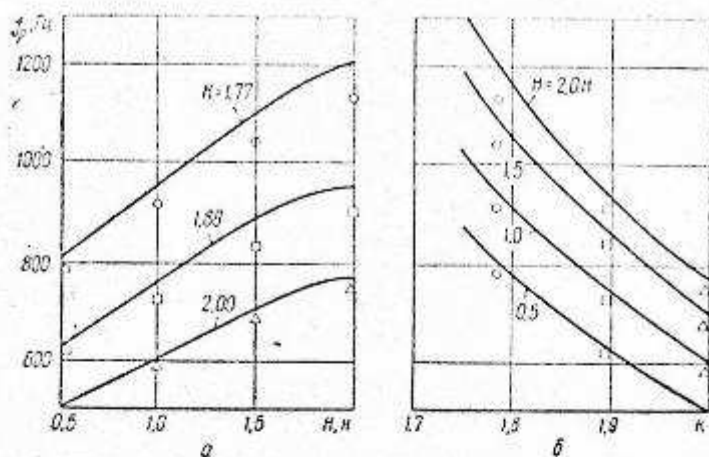


Рис. 2. Зависимости первой резонансной частоты поперечных колебаний рулонов магнитной ленты от усилия натяжения при намотке (а) и от наружного относительного радиуса рулона (б).

возмущения, вносимые катушкой-датчиком δ как сосредоточенной массой (вес катушки не превышает 10^{-2} Н), весьма невелики и ими можно пренебречь.

Использование предварительно оттарированного индукционного датчика позволяет непосредственно измерять перемещения различных точек плоскости рулона, что особенно важно при исследовании форм колебаний и построении резонансных кривых поперечных колебаний.

Для устранения влияния эффекта саморазогрева на резонансную частоту колебаний в установке применена специальная вентиляционная система. Температуру рулона в процессе проведения экспериментов контролировали с помощью медь-константановых термопар 16, один из спаев которых введен в тело намотки, а второй находится в термостате 17 при температуре 0°C . Напряжения между спаями измеряли цифровым милливольтметром В7-21 с использованием коммутатора термопар.

Результаты экспериментов, проведенных по вышеизложенной методике, показаны на рис. 2 точками.

Характер зависимости первой резонансной частоты f_p от натяжения ленты (рис. 2, а) определяется двумя факторами. С одной стороны, повышение натяжения ленты ведет к увеличению радиальной жесткости рулона (уплотнение), что определяет во всем исследуемом диапазоне рост резонансной частоты колебаний. С другой стороны, с ростом натяжения увеличиваются радиальные сжимающие усилия в срединной плоскости, что приводит к уменьшению резонансной частоты. В интервале натяжения $H=0,5 \dots 0,15$ Н проявляется первый фактор — имеет место практически линейная зависимость между резонансной частотой и натяжением. При дальнейшем увеличении натяжения уплотнение рулона стабилизируется и в большей сте-

пени проявляется роль второго фактора — отмечается существенное снижение роста частоты поперечных колебаний рулона.

Следует полагать, что с дальнейшим повышением усилия натяжения при намотке в результате влияния радиальных сжимающих усилий произойдет уменьшение резонансной частоты поперечных колебаний.

На рис. 2, б показаны зависимости резонансных частот поперечных колебаний рулона от величины относительного наружного радиуса намотки $k=R_b/R_a$ (R_b — наружный радиус рулона; R_a — радиус сердечника).

Как и следовало ожидать, с ростом наружного радиуса значение резонансной частоты уменьшается, причем в рассматриваемом диапазоне размеров и усилий скорость изменения частоты практически не зависит от усилия натяжения ленты при ее намотке в рулон.

Аналитическое определение первой резонансной частоты поперечных колебаний рулонов полиэтилентерефталатных магнитных лент, намотанных на жесткий сердечник, производили методом Релея. Рулон рассматривали как круглую, цилиндрически ортотропную пластину, жестко закрепленную по внутреннему контуру, свободную на внешнем контуре и нагруженную радиальными усилиями, действующими в срединной плоскости. Согласно методу Релея квадрат первой частоты указанной системы можно определить следующим образом:

$$f_p^2 = \frac{1}{4\pi^2} \left\{ \frac{1}{2} \int_{R_a}^{R_b} N(r) \left(\frac{\partial w}{\partial r} \right)^2 r dr + \int_{R_a}^{R_b} \tilde{D}(r) E_r(r) \times \right. \\ \left. \times \left[r \left(\frac{\partial^2 w}{\partial r^2} \right)^2 + 2\nu_{\theta r} \frac{\partial w}{\partial r} \frac{\partial^2 w}{\partial r^2} + \frac{\psi(r)}{r} \left(\frac{\partial w}{\partial r} \right)^2 \right] dr \right\} \times \\ \times \left(\frac{\nu h}{g} \int_{R_a}^{R_b} \omega^2 r dr \right)^{-1}, \quad (1)$$

где $\tilde{D}(r) = \frac{\psi h^3}{12(\psi - \nu_{\theta r}^2)}$ — приведенная изгибная жесткость рулона; $N(r)$ — усилие, действующее в срединной плоскости; $w(r)$ — функция прогиба; $\psi(r) = E_{\theta} / E_r(\sigma_r)$ — функция анизотропии; R_a , R_b — внутренний и наружный радиусы рулона соответственно; E_{θ} , $E_r(\sigma_r)$ — модули упругости в окружном и радиальном направлениях соответственно; σ_r — радиальное сжимающее напряжение; r — текущий радиус; h — толщина рулона; $\nu_{\theta r}$ — коэффициент Пуассона.

Эксперименты по сжатию пакета, вырезанного непосредственно из сформированного рулона, показали, что радиальный модуль упругости существенно зависит от радиального напряжения σ_r , причем указанная зависимость с доста-

точной степенью точности может быть аппроксимирована линейной функцией.

Значение модуля упругости E_0 определяли динамическим методом вынужденных продольных колебаний образца магнитной ленты с добавочной массой [2, 3].

В качестве формы колебаний принята функция прогиба круглой кольцевой пластинки, находящейся под действием статической равномерно распределенной нагрузки:

$$\omega(r) = W_0 [\eta^4 - R^4 + 2(R^2 - \alpha - 2)(R^2 - \eta^2) - 4\alpha R^2 \ln \eta/R - 8\eta^2 \ln \eta/R], \quad (2)$$

где

$$\alpha = \frac{1 - \nu_{0r} + (1 + \nu_{0r})(R^2 - 4 \ln R)}{1 + \nu_{0r} + (1 - \nu_{0r})R^2};$$

$$R = R_a/R_b; \quad \eta = r/R_b.$$

На рис. 3 представлена форма прогиба, рассчитанная по формуле (2), а также результаты экспериментов по определению перемещений различных точек относительного радиуса рулонов $\rho = r/R_a$, намотанных с постоянным усилием натяжений. Наблюдается вполне удовлетворительное совпадение результатов расчета с экспериментальными данными, что свидетельствует о применимости данной формы прогибов к решению ряда динамических задач.

Вследствие громоздкости аналитических расчетов по формуле (1) их проводили численными методами.

Изложенная методика позволяет оценить первую резонансную частоту поперечных колебаний кольцевых рулонов с учетом влияния таких факторов, как температура тела намотки, центробежные нагрузки и релаксация остаточных напряжений. Входящее в выражение (1) радиальное сжимающее усилие $N(r)$ находят в результате решения краевой задачи об определении остаточных напряжений при намотке диска.

В настоящее время разработаны достаточно надежные методы расчета остаточных радиальных и окружных напряжений, возникающих непосредственно в процессе намотки [4—7], а также расчета дополнительных напряжений, образующихся вследствие влияния температуры и скорости вращения дисков, полученных намоткой тонких пленок на сердечник [5, 6, 8, 9]. С этой целью можно также воспользоваться известными экспериментальными методами определения остаточных напряжений, в частности методом предварительного введения в тело намотки тонких измерительных пластинок [7].

Таким образом, решению задачи определения резонансной частоты предшествует расчет полей остаточных напряжений, зависящих от перечисленных факторов.

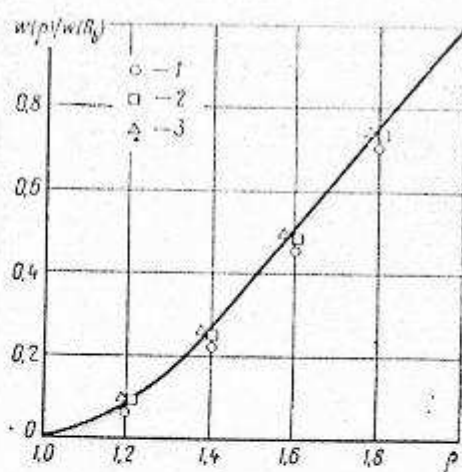


Рис. 3. Форма поперечных колебаний рулона магнитной ленты: 1 — $H=0,65$ Н; 2 — $H=1,25$ Н; 3 — $H=2,00$ Н. (Точки — эксперимент, сплошная линия — расчет по формуле (2) при $\nu_{0r}=0,3$.)

Рассмотрим методику вычисления первой резонансной частоты рулона магнитной ленты на ПЭТФ-основе при различных температурах и угловых скоростях вращения рулона*.

Учитывая малость толщины витка магнитной ленты по сравнению с внешним радиусом рулона и полагая тело намотки сплошной средой, обладающей цилиндрической анизотропией с переменным модулем упругости в радиальном направлении, получим дифференциальное уравнение относительно радиального перемещения:

$$\begin{aligned} \frac{d^2 u}{dr^2} + \frac{du}{dr} \frac{1}{r} \left(1 - \frac{r}{\psi - \nu_{0r}^2} \frac{d\psi}{dr} \right) - u \frac{1}{r^2} \left(\psi + \right. \\ \left. + \nu_{0r} \frac{r}{\psi - \nu_{0r}^2} \frac{d\psi}{dr} \right) = \frac{\nu_{0r} H}{E_0 F} \left(- \frac{dH}{dr} \frac{1}{H} + \right. \\ \left. + \frac{1}{\psi - \nu_{0r}^2} \frac{d\psi}{dr} - \frac{4}{r} + \frac{\psi}{\nu_{0r}} \frac{1}{r} \right) - \\ - \frac{\gamma \omega^2}{g E_0} (\psi - \nu_{0r}^2) r + \frac{\tilde{T} (\alpha_r + \nu_{0r} \alpha_0)}{r} \left(1 - \frac{d\psi}{dr} \frac{r}{\psi - \nu_{0r}^2} - \right. \\ \left. - \frac{\psi \alpha_0 + \nu_{0r} \alpha_r}{\alpha_r + \nu_{0r} \alpha_0} + \frac{d\tilde{T}}{dr} \frac{r}{\tilde{T}} \right), \quad (3) \end{aligned}$$

где u — радиальное перемещение; H — усилие натяжения, зависящее от радиуса; F — площадь поперечного сечения ленты; α_0, α_r — коэффициенты линейного расширения рулона в окружном и радиальном направлениях соответственно; γ — удельный вес материала тела намотки; ω — угловая скорость вращения рулона; \tilde{T} — изменение температуры сформированного рулона по сравнению с температурой ленты при намотке.

* В расчетах принимали участие Н. В. Скрипник, Ю. Б. Яшмаиов.

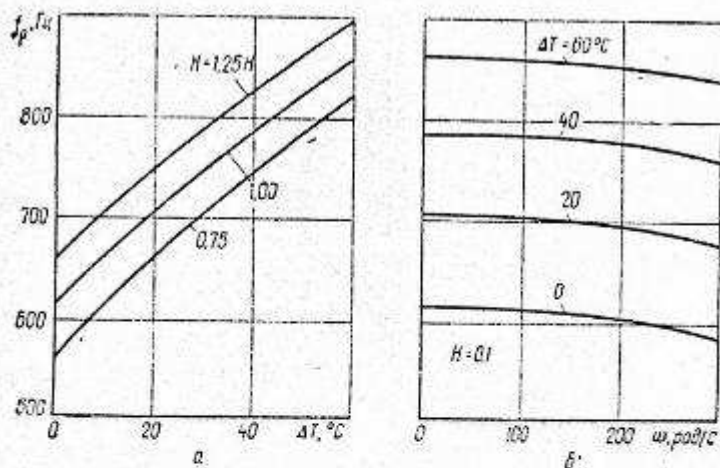


Рис. 4. Зависимости первой резонансной частоты рулонов магнитной ленты от изменения температуры тела намотки (а) и от угловой скорости вращения рулона (б).

Представленное уравнение решали конечно-разностным способом с использованием стандартной процедуры Гаусса. При этом учитывали следующие граничные условия. На внутреннем контуре ($r=R_a$) перемещения рулона равны перемещению сердечника, на внешнем контуре ($r=R_b$) $\sigma_r=0$. Значения напряжений в каждой точке радиуса можно получить из следующих выражений:

$$\sigma_r = \frac{E_0}{\psi - v_{0r}^2} \left[\frac{du}{dr} + v_{0r} \left(\frac{u}{r} + \frac{H}{E_0 r} \right) - \tilde{T} (\alpha_r + v_{0r} + \alpha_0) \right];$$

$$\sigma_\theta = \frac{E_0}{\psi - v_{0r}^2} \left[\frac{du}{dr} v_{0r} + \psi \left(\frac{u}{r} + \frac{H}{E_0 r} \right) - \tilde{T} (\psi \alpha_0 + v_{0r} + \alpha_r) \right]. \quad (4)$$

В качестве нулевого приближения принимали значения напряжений в каждой узловой точке радиуса, полученные решением соответствующей линейной задачи [7] при $E_r = \text{const}$. В первом приближении для каждого узла из соотношения

$$\psi(\sigma_r) = E_0 / (A - B\sigma_r)$$

находили значение функции ψ . Здесь A и B — экспериментально определяемые постоянные.

После этого решали уравнение (3), из соотношений (4) определяли напряжения и процедуру повторяли. Обычно достаточно семи—десяти итераций, чтобы получить решение, мало отличающееся от предыдущего.

Полученное таким образом решение практически не отличается от квазилинейной постановки задачи, в которой зависимость σ_r от ϵ_r аппроксимировалась двумя прямыми линиями. Это решение достаточно хорошо согласуется с данными экспериментов, проведенных с це-

люю определения радиальных напряжений методом введения в тело намотки тонких стальных пластинок [7, 8].

Поля напряжений определяли при следующих геометрических и механических параметрах рулонов: $R_a=45$ мм; $h=6,25$ мм; $F=0,231$ мм²; $E_0=5300$ МПа; $A=620$ МПа; $B=820$; $v_{0r}=0,3$; $\alpha_0=1,3 \cdot 10^{-5}$ град⁻¹; $\alpha_r=5,0 \times 10^{-5}$ град⁻¹; $\gamma=1,41 \cdot 10^{-2}$ МН/м³.

После нахождения уровней радиальных напряжений, а значит и

$$N(r) = \sigma_r(r) h,$$

производили вычисление интегралов (например, методом Симпсона), входящих в выражение (1).

На рис. 2 сплошные линии соответствуют теоретическому расчету, проведенному по изложенной выше методике. Отметим, что расчетное значение первой резонансной частоты превышает экспериментальные не более чем на 8%.

Таким образом, использование достаточно простого энергетического метода позволяет оценивать значения первых резонансных частот поперечных колебаний рулонов магнитных лент с учетом воздействия ряда эксплуатационных факторов.

На рис. 4 показаны зависимости резонансной частоты поперечных колебаний рулона магнитной ленты И-4406-6 от изменения температуры тела намотки и угловой скорости вращения при различных температурах. Как видно, при данном режиме намотки ($H = \text{const}$; $T = 20^\circ\text{C}$) дальнейшее повышение температуры рулона приводит к заметному увеличению резонансной частоты (рис. 4, а). Указанный эффект связан с возникновением добавочных сжимающих напряжений в радиальном направлении и вследствие этого с увеличением жесткости рулона в радиальном направлении.

Увеличение угловой скорости вращения рулона вызывает обратный эффект. В этом случае за счет появления добавочных растягивающих радиальных напряжений жесткость рулона в радиальном направлении уменьшается и соответственно снижается частота поперечных колебаний тела намотки.

Summary

The first resonance frequency of transverse oscillations of polyethylene-terephthalate magnetic tapes was studied experimentally and theoretically as affected by such factors as force regime of winding, the internal-to-external radii ratio, changes in the wind body temperature and the coil rotation rate. Presence of residual radial compressing stresses arising in coil formation as well as the dependence of the coil compliance in a radial direction on the value of compressing stresses was taken into account in the calculations.

Frequency ranges of forced transverse oscillations which are dangerous from the view-point of the loss in integrity are established for the coils of И-4406-6 magnetic tape.

1. *Травников Е. Н.* Механизмы аппаратуры магнитной записи.— Киев: Техника, 1976.— 464 с.
2. *Исследование динамических характеристик магнитных лент и их основ при продольных колебаниях* / Э. С. Уманский, В. В. Крючков, Н. С. Шидловский и др.— Техника средств связи. Сер. ОТ, 1977, вып. 2, с. 74—80.
3. *Уманский Э. С., Крючков В. В., Шидловский Н. С.* Исследование демпфирующей способности магнитных лент и их основ при продольных колебаниях.— В кн.: Рассеяние энергии при колебаниях механических систем. Киев: Наук. думка, 1980, с. 310—314.
4. *Портнов Г. Г., Бейль А. И.* Модель для учета нелинейности свойств полуфабриката при силовом анализе намотки композитов.— Механика полимеров, 1977, № 2, с. 231—240.
5. *Определение остаточных напряжений при изготовлении колец из стеклопластика* / В. Л. Бидерман, И. П. Димитренко, В. И. Поляков, Н. А. Сухова.— Там же, 1969, № 5, с. 892—898.
6. *Николаев В. П., Ниденбаум В. М.* К расчету остаточных напряжений в намоточных изделиях из стеклопластиков.— Там же, 1970, № 6, с. 1026—1030.
7. *Уманский Э. С., Крючков В. В., Раковский В. А.* К вопросу об определении напряженного состояния рулона магнитной ленты.— Пробл. прочности, 1978, № 3, с. 83—85.
8. *Уманский Э. С., Крючков В. В., Шидловский Н. С.* К оценке влияния температурного фактора на иссушающую способность рулона магнитной ленты.— Там же, 1981, № 8, с. 62—65.
9. *Оценка целостности рулона магнитной ленты при работе в старт-стопном режиме* / Э. С. Уманский, В. В. Крючков, Н. С. Шидловский и др.— Техника средств связи. Сер. ОТ, 1980, вып. 2, с. 82—86.

Киевский политехнический институт

Поступила в редакцию 17.11.82 г.