

УДК 621.315.2:62:52.01.04

Л.М. Мамаев, профессор, канд. техн. наук,

А.М. Кабаков, доцент, канд. техн. наук,

А.И. Пабат, доцент, канд. техн. наук

Днепродзержинский государственный технический университет

ул. Днепростроевская, 2, г. Днепродзержинск, Украина, 51318

E-mail: G.Valentina 61@ mail.ru

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ГЕОМЕТРИЧЕСКОЙ УСТОЙЧИВОСТИ КАБЕЛЕЙ УПРАВЛЕНИЯ

Разработана методика, изготовлена экспериментальная установка, позволяющая оценить влияние оболочек покрытия на напряжения элементов кабелей управления, механизм потери геометрической устойчивости, разработаны мероприятия по повышению надежности и долговечности подобных конструкций.

Ключевые слова: *кабели управления, оболочка, напряжение, геометрическая устойчивость.*

Отличительной особенностью кабелей управления от стального каната является наличие оболочек покрытия для изоляции токоведущих жил и защиты их от механических воздействий. При изгибе кабеля на приводных барабанах происходит смещение проволок друг относительно друга, в результате чего в винтовых элементах накапливаются дефекты известные в научной литературе как «штопор», что приводит к потере геометрической устойчивости и снижению их надежности и работоспособности. Теоретические исследования изложены в работах [1–7].

Постановка и решение задачи. В Днепродзержинском государственном техническом университете проведены экспериментальные исследования влияния оболочек покрытия на напряженное состояние элементов кабелей управления, что позволило более полно оценить явление потери геометрической устойчивости и разработать конкретные мероприятия по повышению надежности и долговечности подобных конструкций. Разработана лабораторная установка, состоящая из: электропривода, измерительного комплекса и механической части.

Механическая часть состоит из приемного узла, неподвижного блока, барабана, приводного шнура, направляющей, рычага. Приемный узел состоит из цилиндра диаметром 469 мм, высотой 630 мм, имеющего в нижней части отверстие для прохода кабеля. Внутри находится второй цилиндр диаметром 300 мм, имеющий конусную верхнюю часть и нижней, приваренную к основанию таким образом, чтобы между наружным и внутренним цилиндрами образовался кольцевой зазор, в который спиралью укладывается кабель с одинаковым радиусом изгиба. Направляющая и рычаг служат для удержания в одной плоскости верхнего конца кабеля во время подъема и опускания его в приемное устройство. При подъеме кабеля получает осевое закручивание, равное количеству витков в приемном устройстве.

Для подъема и опускания кабеля использовали электропривод Тульского завода «Электропривод»: тип А, $M_{кр} = 8 \text{ кг} \cdot \text{см}$, $n = 12 \text{ кг}$. Двигатель привода АОЛ12/4, $n = 1400 \text{ об/мин}$, $N = 180 \text{ Вт}$ включали в сеть с помощью реверсивного электромагнитного пускателя, управление которым производилось автоматически конечным выключателем, связанным с приводным шнуром через двуплечий рычаг, одновременно служащий для привода счетчика количества циклов. На валу электропривода закреплен барабан диаметром 350 мм, на который навивается шнур во время подъема и опускания кабеля.

Измерительный комплекс состоит из блока питания, измерительного прибора, индуктивного датчика, счетчика количества циклов.

Экспериментальная установка работает при подаче напряжения на магнитный пускатель. При этом электродвигатель через планетарный редуктор вращает барабан с закрепленным на нем шнуром. Шнур, переброшенный через неподвижный блок, закрепленный на потолковой балке, поднимает кабель из приемного устройства до тех пор, пока узел на шнуре не достигнет двуплечевого рычага. В этот момент конечный выключатель реверсирует магнитный пускатель, двигатель начинает вращаться в обратную сторону и опускает кабель в приемное устройство. Достигнув исходного положения, конечный выключатель срабатывает и цикл повторяется. Эта работа происходит автоматически до тех пор пока оператор не отключит установку с помощью пакетного выключателя. Одновременно работает счетчик количества циклов, связанный с двуплечим рычагом привода конечного выключателя.

С целью получения сопоставимых результатов сохраняли одинаковыми условия испытаний кабелей различных конструкций. Длина образца для всех испытуемых кабелей составлял 7,56 м, жилу запитывали током $I = 2 \text{ А}$ промышленной частоты. Скорость и высота подъема строго постоянна и составляла 43 м/сек. Для измерения углов свивки использовали специально разработанный прибор с

индуктивным датчиком. Для уменьшения наводок и помех, измерение углов свивки производили в неподвижной части кабеля, выведенного через отверстие в приемном устройстве. Для увеличения точности измерений индуктивный датчик фиксировали в трех точках кабеля с 4-х кратным повторением измерений в каждой точке. Перевод токовых показаний прибора в значения углов свивки кабеля производили по градуированным графикам, полученным на специально изготовленном стенде. Он состоит из основания, двух регулировочных кернов, транспортира, двух стоек крепления жилы. Подготовка стенда к работе заключается в закреплении жилы на стойках продетой через катушку индуктивного датчика.

Подавая на токоведущую жилу напряжение переменного тока, обеспечивающее его величину $2a$, соответствующую измерениям на кабеле, поворачивали катушку на углы: 5, 10, 15, 20, 25, 30 градусов и фиксировали показания приборов соответствующие этим углам. Полученные градуированные графики использовали для перевода токовых показаний прибора в угловые ориентации жилы относительно катушки индуктивного датчика. Для второго тура экспериментов градуировку прибора производили не отдельной жилой, а кабелем, продетым через катушку, со снятой направляющей трубой. Таким образом, повышалась точность и упрощалась настройка стенда. Для повышения точности 2-й тур испытаний проводили без передвижения катушки вдоль оси кабеля, так как незначительная ошибка в установке катушки давала разброс показаний прибора, соизмеримый с отклонением углов свивки кабеля в результате подвижной эксплуатации.

Подготовка образцов к испытаниям заключалась в отрезке мерной длины (8 метров) кабеля образца, разделке концов, подключению одной жилы наружного повива к блоку питания и подаче напряжения переменного тока величиной $2a$. Концы кабеля-образца зажимали: верхний вместе с направляющим рычагом, а нижний специальными скобами таким образом, чтобы не допустить перемещения их относительно друг друга и относительно оболочки. Укладывали кабель в приемное устройство кольцами и выводили нижний конец через отверстие наружу. На наружном метровом участке кабеля установили индуктивный датчик прибора: для первого тура фиксировали его в 3-х определенных положениях против меток, расположенных на расстоянии 10 см друг относительно друга. Для второго тура испытаний датчик закрепляли неподвижно относительно кабеля-образца и тщательно экранировали его от возможных наводок переменным полем извне.

Первый тур испытаний проводили с образцами кабелей: КУПВ 52×1,0; КУПВ 48×0,5; КУПВ 19×0,5. Через каждые 30 циклов подъема производили остановку электропривода и переставляли индуктивный датчик в 3 (фиксированные метки а, б, в) точки кабеля, производили замеры углов свивки. С одной остановки такие замеры повторяли 4 раза при верхнем, среднем и нижнем положении образца относительно приемного устройства. Среднее арифметическое значение токовых показаний прибора, относящееся к определенному положению индуктивного датчика на кабеле, с помощью градуированного графика, полученного на стенде, переводили в углы свивки для положения «а», «б», «в». Такую работу проводили без остановки до 240–260 циклов с каждым образцом. Всего в первом туре было испытано 4 образца.

Второй тур испытаний отличался от первого тем, что индуктивный датчик на протяжении всего времени работы оставался неподвижным относительно оболочки кабеля, замеры производили в течении каждого цикла дважды (при верхнем и нижнем положении кабеля-образца) и количество циклов было сокращено до 150.

Во втором туре также было испытано 4 образца кабелей таких как в первом туре со строгим сохранением одинаковых условий испытаний (направление свивки в приемном устройстве, одинаковое количество оборотов осевого закручивания, скорость подъема и т.д.).

Для измерения напряжений в кабелях управления использовалось явление тензоэффекта, заключающееся в изменении сопротивления проводников при их механической деформации. Относительное изменение сопротивления при деформации резистора определяется как

$$\varepsilon_R = \frac{\Delta R}{R} = \frac{\Delta \rho}{\rho} + \frac{\Delta \ell}{\ell} + \frac{\Delta S}{S}, \quad (1)$$

Поскольку в твердом теле в зоне упругих деформаций величины поперечных и продольных деформаций связаны через коэффициент Пуассона μ :

$$\varepsilon_\sigma = \frac{\Delta \sigma}{\sigma} = -\mu \frac{\Delta \ell}{\ell} = -\mu \cdot \varepsilon_\ell, \quad (2)$$

где σ – поперечный размер, ℓ – длина, то

$$\varepsilon_R = \frac{\Delta \rho}{\rho} + (1 + 2\mu)\varepsilon_\ell. \quad (3)$$

В металлах удельное сопротивление зависит от напряжения растяжения или сжатия и не зависит от сдвиговых напряжений. Поэтому:

$$\rho = \rho_0 [1 + \pi_{11}\sigma_1 + \pi_{12}(\sigma_2 + \sigma_3)], \quad (4)$$

где $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ – механические напряжения; π_{11} и π_{12} – продольные и поперечные тензорезистивные коэффициенты (измерение ρ – вдоль напряжения σ_1).

Для константы, которая использовалась в данной работе для изготовления тензодатчиков, $\pi_{11} = 1,5 \cdot 10^{-12} \text{ Па}^{-1}$.

При линейнонапряженном состоянии $\sigma_1 = \sigma$, $\sigma_2 = \sigma_3 = 0$ и $\frac{\Delta\rho}{\rho} = \pi_{11}\sigma$, следовательно

$$\varepsilon_R = \pi_{11}\sigma + (1 + 2\mu)\varepsilon_e. \quad (5)$$

Поскольку в зоне упругих деформаций справедлив закон Гука: $\sigma = E \cdot \varepsilon_e$, то, следовательно,

$$\sum R = [\pi_{11}E + (1 + 2\mu)]\varepsilon_e, \quad (6)$$

где E – модуль упругости (для константана $E = 1,6 \cdot 10^{11} \text{ Па}$). Отношение $\frac{\varepsilon_R}{\varepsilon_e} = K_T$ – коэффициент тензочувствительности, который для константана равен 2, т.е. $\varepsilon_r = 2\varepsilon_e$. Измерив величину относительного изменения сопротивления $\frac{\Delta R}{R}$, можно вычислить механическое напряжение

$$\sigma = E \frac{\varepsilon_R}{2} = 0,8 \cdot 10^9 \varepsilon_R.$$

Можно оценить порядок величины ε_R . Если полагать, что σ лежит в пределах $10^5 - 10^6 \text{ Па}$, то величина $\varepsilon_R = -10^{-6} - 10^{-5}$.

Для измерений использовалась мостовая схема подключения тензодатчиков, что позволяет осуществлять коррекцию температурных погрешностей нуля и чувствительности. Для понижения температурной погрешности нуля применялось дифференциальное включение тензорезисторов в два соседних плеча моста. Таким способом можно снизить температурную погрешность нуля примерно на порядок по сравнению с температурной погрешностью тензорезистора. Поскольку $\varepsilon_R \ll 1$, то нелинейностями, вносимыми мостовой схемой, можно пренебречь. Однако, вследствие малого изменения сопротивления рабочих плеч моста, требуется особое внимание уделить уравниванию мостовой цепи. Простые оценки показывают, что для измерения величины ε_R на уровне 10^{-5} с погрешностью 1% требуется изменить сопротивление нерабочего плеча с порогом 10^{-7} его полного сопротивления. Стабильность сопротивлений плеч моста в этом случае должна быть обеспечена в пределах $\pm 10^{-8}$. Это означает, что эти сопротивления должны быть термостабилизированы с точностью менее $\pm 10^{-3} \text{ К}$, что трудно осуществимо практически. Эти трудности отчасти удастся избежать, если воспользоваться для измерений схемы квазиуравновешенного моста. В этом случае выходной ток тензомоста уравнивается током дополнительного источника, т.е. выходное напряжение моста $U_{\text{вых}} = 0$. Измеряемой величиной является уравнивающий ток.

Питание моста осуществляется от стабилизатора тока ИТ. Операционный усилитель ДУ1, охваченный цепью параллельной отрицательной обратной связи, уравнивает мост за счет подачи тока $I_{\text{вых}}$ в узел (а) выходной диагонали моста. Дополнительный усилитель УС 2 реализует «плавающее» питание моста таким образом, что потенциал узла «в» оказывается близкими к нулю. В этом случае выходное напряжение $U_{\text{вых}} = I_{\text{вых}} \cdot R_5$ и при $\varepsilon_R \ll 1$ $I_{\text{вых}} \sim \varepsilon_R$. Резисторы R_6 и R_7 служат для установки начального уровня. Данная схема позволяет снизить влияние сопротивления проводов линий связи с датчиком. Практически сказывается влияние сопротивления проводов, по которому протекает ток $I_{\text{вых}}$, но поскольку $r \ll R_5$ этим влиянием можно пренебречь.

В качестве дифференциальных усилителей были использованы К140 УД6 с коэффициентом усиления 30000. Это позволило получить выходной сигнал на уровне нескольких десятков милливольт.

Выходное напряжение $U_{\text{вых}}$ пропорционально величине ε_R т.е. $U_{\text{вых}} = K\varepsilon_R$. Коэффициент K – зависит от параметров схемы и коэффициента усиления ДУ1. В нашем случае $K = 1,5 \cdot 10^4 \text{ В}$. Поскольку

$\sigma = 0,8 \cdot 10^{11}$ и $\varepsilon_R = \frac{U_{\text{ввлх}}}{1,5 \cdot 10^4}$, то $\sigma = \frac{U_{\text{ввлх}}}{2} 10^7$ (U – в Вольтах, σ – в Паскалях). Следует отметить, что

величина σ на уровне 10^5 Па (что соответствует $\varepsilon_R \sim 10^{-6}$) является пределом чувствительности схемы.

Поэтому при $\varepsilon_R = 10^{-5}$ относительная ошибка составляет $\sim 10\%$.

Кабели, на которых производились измерения, имели внешний диаметр 12 мм и содержали в себе 52 многожильных медных провода, расположенные в четырех слоях, изолированных друг от друга фторопластовой пленкой и представляли собой спираль из 5-10 витков диаметром 15-20 см, от 2,5 до 10 см, т.е. длина спирали изменялась в четыре раза.

Измерительная аппаратура позволяла регистрировать величину пропорциональную напряжению, возникающему во внутренней жиле кабеля, а также ее изменение в процессе механической нагрузки. Абсолютная погрешность при измерениях составляла 20% от механической измеряемой величины, которая наблюдалась во внутреннем (первом) слое кабеля.

В результате измерений оказалось, что во внутреннем слое механические напряжения в 3-5 раз больше, чем внешних слоев.

Выводы. 1. Проведенные эксперименты позволяют в короткие сроки создавать дефекты кабеля типа «штопор» и с помощью измерительной аппаратуры продлить зарождение дефекта во времени.

2. Испытания показали различную стойкость кабелей различных конструкций к механическим воздействиям.

3. Разработана методика расчета кабелей повышенного удлинения, новый метод исследования геометрической устойчивости кабелей при подвижной эксплуатации.

Библиографический список использованной литературы

1. Мамаев Л.М. К расчету кабелей управления в условиях подвижной эксплуатации / Л.М. Мамаев, Д.С. Самойленко // Математические проблемы технической механики: тезисы докладов Третьей Всеукраинской конференции. — Днепродзержинск, 2003. — С. 94.

2. Мамаев Л.М. К расчету кабелей повышенной деформации / Л.М. Мамаев, Д.С. Самойленко // Сб. научных трудов ДГТУ. — Днепродзержинск, 2001. — С. 101–105.

3. Мамаев Л.М. Расчет геометрических параметров кабелей повышенного удлинения / Л.М. Мамаев, В.А. Костюченко, Д.С. Самойленко // Подъемно-транспортная техника: научно-технический журнал. — Днепропетровск, 2003. — № 4. — С. 86–89.

4. Мамаев Л.М. К расчету оптимальных параметров токоведущих жил бронированных кабелей / Л.М. Мамаев, А.М. Кабаков, Д.С. Самойленко // Сб. науч. тр. Керченского морского технологического института. — Керчь, 2003. — Вып. 5. — С. 118–126.

5. Мамаев Л.М. Выбор критерия геометрической устойчивости кабелей / Л.М. Мамаев, А.С. Михайлусь // Математические проблемы технической механики: матер. Международной науч. конф. — Днепропетровск, 2006. — С. 192–193.

6. Мамаев Л.М. К расчету кабелей повышенного удлинения / Л.М. Мамаев, А.С. Михайлусь, Д.С. Самойленко // Эффективность реализации научного, ресурсного и промышленного потенциала в современных условиях: матер. седьмой международной промышленной конференции. — Славск, 2007. — С. 121–123.

7. Мамаев Л.М. Расчет кабель-канатов с учетом поперечной податливости его сечения / Л.М. Мамаев, С.Е. Понизов // Математическое моделирование: науч. журнал. — 2007. — № 2 (17). — С. 59–60.

Поступила в редакцию 19.03.2013 г.

Мамаев Л.М., Кабаков А.М., Пабат А.І. Експериментальні дослідження геометричної стійкості кабелів управління

Розроблена методика, виготовлена експериментальна установка, дозволяюча оцінити вплив оболонки покриття на напруження елементів кабелів управління, механізм втрати геометричної стійкості подібних конструкцій, розроблені заходи по підвищенню надійності та довговічності подібних конструкцій.

Ключеві слова: кабелі управління, оболонка, напруга, геометрична стійкість.

Mamaev L.M., Kabakov A.M., Pabat A.I. Experimental study of geometric stability of control cables

The technique is developed, an experimental setup for evaluating the effect on the membranes covering the cell on control cable voltage is produced; measures have been developed to improve the reliability and durability of such structures.

Keywords: control cables, the shell, the stress, the geometric stability.