

158. *Thwaites J.J.* The elastic deformation of a rod with helical anisotropy. – *Int. J. Mech. Sci.*, 1977, 19, 3, p.161-169.

159. *Nenson Wayne.* Analysis of accelerated life test data. Part 1. The Arrhenius model and graphical methods. *JEEE Trans. Elec. Insulant.*, 1971, 6, № 4, p. 165-181.

160. *Ross E. A.* Resilient Foldable woven electrical cable and Method. – *Jnt. Cl. H 01 b 7/06, U.S.Cl.*, p.174-69.

161. *Shechert D. G.* *Rubber Age.* 1954, v. 76, № 3, p. 416-453.

Глава 3

Экспериментальное и эксплуатационное деформирование гибкого кабеля

3.1. Режимы деформирования и соотношения между переменными в формуле сдвигов для стоячей, бегущей и вращающейся волны

Деформация изгиба является наиболее распространенной эксплуатационной деформацией гибкого кабеля. Наиболее часто она реализуется циклически в широком диапазоне частот, как в чистом виде, так и в сочетании с кручением или продольной деформацией. На рис. 3.1 приведены некоторые наиболее часто встречающиеся примеры деформаций в условиях эксплуатации или эксперимента. По схемам (а, б, в) деформируется кабель в грузоподъемных машинах и механизмах, снабженных барабаном, по схемам (г), (в) в подвижных механизмах при волочении кабеля по поверхностям, по схеме (и) при работе электроинструмента. Схемы (д), (к) реализуются в эксперименте с целью определения работоспособности. В описанных схемах, деформация изгиба в различной мере сопровождается другими видами деформации. Отвлекаясь от их влияния, обратим внимание только на деформацию изгиба, и при этом с точки зрения проявления сдвигов спиральных элементов в различных условиях осуществления циклической деформации изгиба. Анализ описанных схем позволяет выделить три основных режима осуществления деформации циклического изгиба, различающихся особенностями основных параметров внешнего изгибного воздействия (ориентацией плоскости изгиба относительно элементов конструкции, положением закрепленного сечения и изменением длины зоны деформации).

3.1.1. Режим циклического изгиба на роликах.

Сечение первоначального касания кабелем ролика можно рассмотреть как закрепленное от сдвигов сечение (схемы д, к), иногда это сечение отодвинуто от точки касания роликов. В течение цикла длина зоны деформации циклически меняется от нуля до некоторого предельного значения,

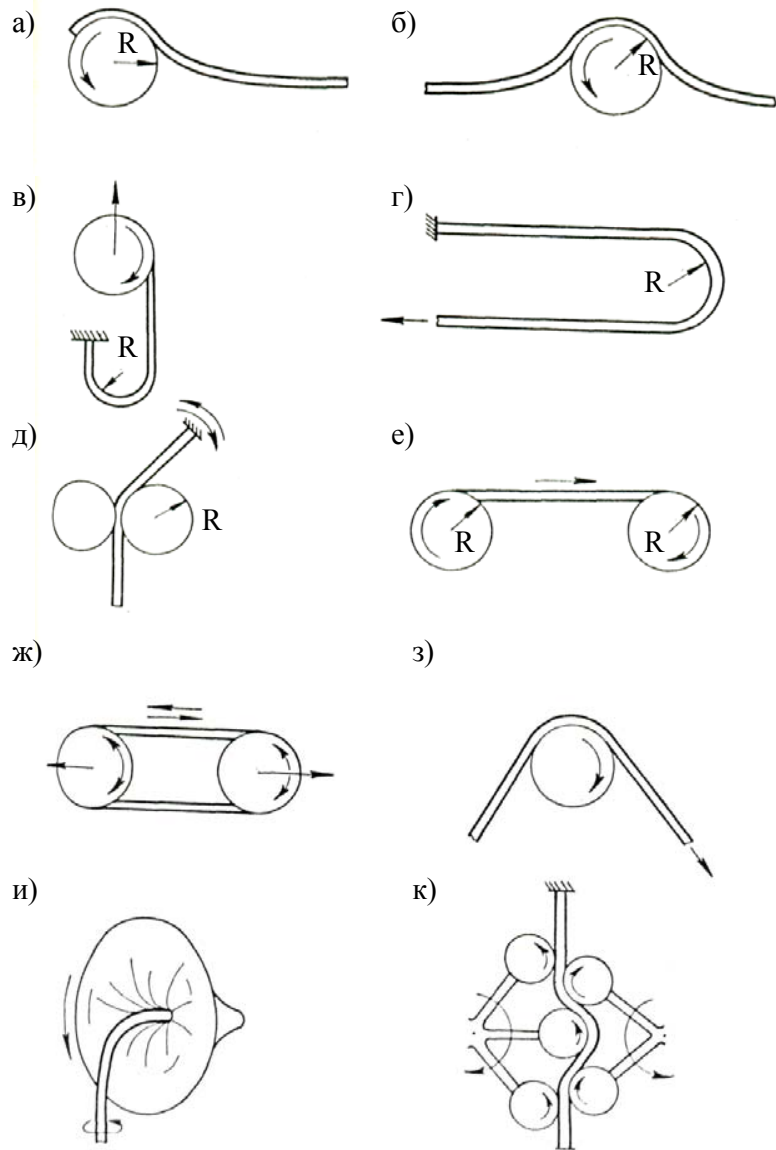


Рис. 3.1. Схема деформирования кабеля в условиях эксплуатации и эксперимента.

то есть она является функцией времени:

$$\lambda = \lambda(t) \quad (3.1)$$

Плоскость деформации в течение цикла остается неподвижной. По мере увеличения длины зоны деформации в концевом свободном от закрепления сечении реализуются сдвиги элементов, распространяющиеся в свободную часть кабеля. Величина этих сдвигов для каждого спирального элемента определяется формулой:

$$\Delta = \Delta_0 F(\varphi_0, \lambda) = \Delta_0 \sin \frac{\pi \lambda(t)}{H} \cos \left[\varphi_0 + \frac{\pi \lambda(t)}{H} \right] \quad (3.2)$$

На рис. 3.2 приведена схема деформации, характеристики цикла и график изменения функции $F(\lambda/H)$ для любого из (например, 12) спиральных элементов повива. Вертикальные линии, проведенные на расстоянии λ/H , отсекают на кривых значения сдвигов соответствующих элементов в соответствующий момент времени. Знаки сдвигов при переходе образца кабеля с ролика на ролик меняются на противоположные, точки экстремальных сдвигов сохраняют свое положение, величины этих сдвигов циклически меняются не превосходя значений определенных начальным центральным углом каждого спирального элемента. Так, например, согласно доказанному ранее распределению сдвигов по длине зоны деформации элемент с центральным углом $\varphi_0 = 0$ имеет наибольший сдвиг, не превышающий Δ_0 .

Таким образом, при циклической деформации поперечного изгиба на роликах, каждый спиральный элемент имеет фиксированный закон распределения сдвигов по длине зоны деформации с фиксированными точками нулевых сдвигов и амплитудой экстремальных сдвигов, определяемой постоянной ориентацией начальных углов спиральных элементов относительно неподвижной плоскости деформации. С учетом последнего, режим целесообразно назвать режимом стоячей волны.

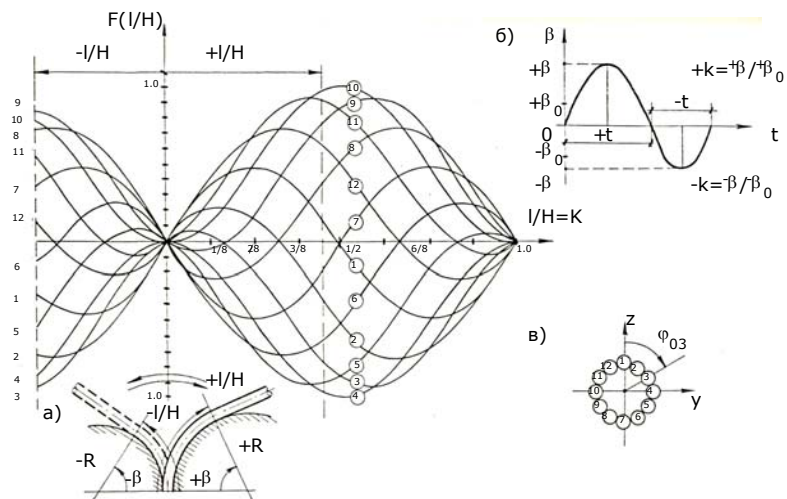


Рис. 3.2. Циклические сдвиги при изгибе на роликах.

3.1.2. Режим циклического изгиба в воронке (3.1-и) чаще всего используется в эксперименте с некоторыми ограничениями, связанными с чистым изгибом, с наложенным кручением. Однако существуют схемы осуществления этого режима, свободные от кручения. Сечение внутри воронки или отодвинутом за воронку можно рассматривать как неподвижно закрепленное сечение. В течение цикла длина зоны деформации остается постоянной, ограниченной предельным углом охвата кабелем поверхности воронки. В конечном свободном и в промежуточных сечениях реализуются сдвиги, определяемые постоянной длиной зоны деформации. Однако, плоскость деформации изгиба оставаясь постоянно ориентированной в пространстве, оказывается циклически вращающейся относительно спиральных элементов, так что начальный центральный угол каждого спирального элемента оказывается циклической функцией времени. Тогда сдвиги:

$$\Delta = \Delta_0 F(\gamma_0, \lambda) = \Delta_0 \sin \frac{\pi \lambda}{H} \cos \left[\varphi_0(t) + \frac{\pi \lambda}{H} \right]. \quad (3.3)$$

На рис. 3.3 изображена характеристика цикла и график изменения функции $F(\varphi_0)$ для каждого из 12 элементов

повива. Этот график таков, что каждый элемент, последовательно поворачиваясь относительно плоскости изгиба, проходит все схемы распределения сдвигов с движущимися нулевыми точками и амплитудами сдвигов, определяемыми экстремумами сдвигов в каждом сечении длины зоны деформации, например, в сечении $\lambda = H/4$ $F(\varphi_0) = 1,41$; в сечении $\lambda = 3H/4$ $F(\varphi_0) = 1,41$ (рис. 2.7).

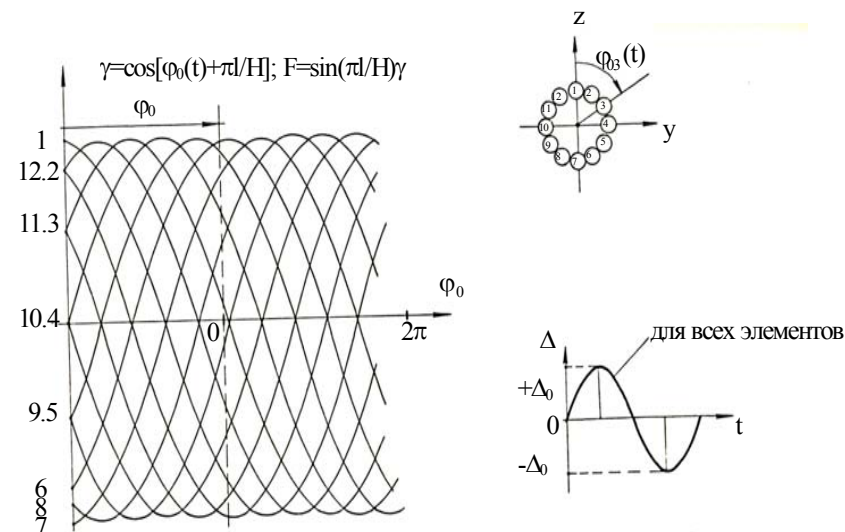


Рис. 3.3. Циклические сдвиги при изгибе в воронке.

С учетом вышесказанного режим изгиба на воронке можно назвать режимом вращающейся волны.

3.1.3. Режим пробег по ролику реализуется по схемам (3.1 е-з) по одностороннему или двустороннему циклу. Плоскость деформации сохраняет свою ориентацию в пространстве.

С начальным неподвижным (закрепленным) сечением здесь имеется некоторая неопределенность. Спиральные элементы, входя на ролик, получают сдвиги, соответствующие расстоянию от начального сечения кабеля до сечения входа на ролик. Величина сдвигов, распространяющаяся в свободную часть кабеля (до входа на ролик), фиксиру-

ется в зоне деформации на ролике и пробегает всю зону, определяемую углом охвата кабелем ролика и высвобождаются при сходе с него. При дальнейшем пробеге на ролике оказывается уложенной некоторая часть длины кабеля, в концевых сечениях которой (сечениях входа и схода с ролика) существуют сдвиги, определяемые длиной зоны деформации, распространяющиеся в свободные части кабеля. На рис. 3.4 показано распределение сдвигов некоторого элемента повива (например, с номером 4 при 12 элементах повива) по длине зоны деформации на ролике в случае кратности (3.4 а) и не кратности (3.4 б, в) длины зоны деформации шагу скрутки элементов повива.

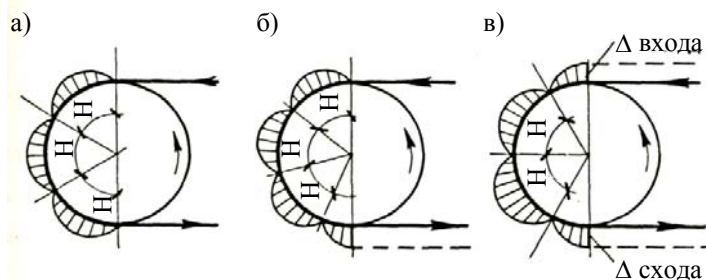


Рис. 3.4. Сдвиги при пробеге по ролику.

Описанная схема распределения сдвигов элементов реализуется и при первоначальном наложении некоторой длины кабеля на ролик, так, что в концевых сечениях появляются соответствующие длине зоны деформации сдвиги, которые циклически меняются в сечениях входа и схода при осуществлении перемотки.

Если режим изгиба на воронке называется режимом вращающейся волны, так как реализуется на одном отрезке кабеля равной длине зоны деформации, то режим пробега по ролику можно назвать режимом бегущей волны, так как в зону деформации входит все новая и новая длина кабеля, а каждый спиральный элемент входит в зону деформации с непрерывно меняющимся начальным центральным углом относительно плоскости деформации.

3.1.4. Режим циклического волочения по поверхности (3.1-г) или подъема петли (3.1-в) аналогичен

пробегу по ролику с той лишь разницей, что радиус кривизны оси кабеля определяется собственным погонным весом кабеля, величиной сил трения и механическими характеристиками кабеля - его жесткостью при изгибе.

Режим циклического изгиба на системе роликов (3.1-к), используемый в эксперименте, идентичен режиму изгиба на роликах. Отличие заключается лишь в том, что для системы роликов сокращено время перехода кабеля с ролика на ролик. Можно рассматривать этот режим как режим бегущей волны, наложенной на ограниченную длину образца кабеля.

Из анализа режимов циклического изгиба следует:

каждый режим имеет свои особенности, определяющие достоинства и недостатки, в свою очередь, определяющие границы их использования;

режим стоячей волны (изгиб на роликах) позволяет провести испытание элементов конструкции кабеля при различных схемах распределения сдвигов по длине зоны деформации и выявить таким образом наиболее жесткую схему, определяющую работоспособность элемента и кабеля в целом. После выявления жесткой схемы (для каждого типа кабеля) испытываемый элемент следует ориентировать относительно плоскости деформации - установить необходимый угол φ_0 элемента - с целью реализации именно этой схемы сдвигов.

Замечание. В проводимых в настоящее время испытаниях [38,39] указанное обстоятельство не оговорено, в результате в наиболее жесткую схему сдвигов попадает случайный элемент или не попадает вовсе, что ведет к значительному дополнительному разбросу результатов определения работоспособности. Режим вращающейся волны позволяет выявить наиболее слабый элемент конструкции кабеля, попавший в зону деформации при режиме сдвигов, отличающимся от режима сдвигов при стоячей волне, тем что в каждом сечении зоны деформации реализуется наибольшая возможная амплитуда сдвигов при изгибе на ролике. Режим бегущей волны (пробег по ролику) позволяет в режиме сдвигов для наиболее напряженного элемента определить наиболее слабое на некоторой длине кабеля сечение, так как все сечения кабеля при перемотке проходят зону экстремальных сдвигов.

Имеющиеся недостатки режимов заставляют ставить вопрос о создании режимов и соответствующего технического оснащения, совмещающих достоинства описанных. Целью при этом является создание режима *supremum* - амплитуды сдвигов на всей исследуемой длине кабеля. Наиболее благоприятным здесь будет объединение режимов вращающейся и бегущей волн. Возможно также сочетание вращающейся и стоячей волн, когда сдвиги элементов конструкции гибкого кабеля, оказываются одновременной функцией переменного начального центрального угла и переменной длины зоны деформации:

$$\Delta = \Delta_0 \sin \frac{\pi d(t)}{H} \cos \left[\varphi_0(t) + \frac{\pi d(t)}{H} \right], \quad (3.4)$$

При $\lambda(t) = \lambda_0 \sin(\omega t + p)$; $\varphi_0(t) = \varphi_{00} \sin(\Omega t + q)$

где λ_0 и φ_{00} - амплитудное значение длины зоны деформации и начального центрального угла;

ω и Ω - круговая частота изгиба на роликах и круговая частота вращения кабеля как жесткого тела;

p и q - начальные фазы изгиба и вращения.

Параметры циклов должны быть согласованы так, чтобы за время общего цикла каждый элемент зоны деформации испытал экстремальную деформацию изгиба.

3.2. Критерий работоспособности гибкого кабеля и типы отказов

Под работоспособностью гибкого кабеля понимают [40, 65, 106] время работы или число циклов деформации до момента наступления отказа. В свою очередь, под отказом понимают момент, когда кабель перестает работать по своему функциональному назначению. Опыт эксплуатации гибких кабелей позволяет определить следующие типы отказов:

1. Сокращение поперечного сечения токопроводящих жил вследствие физического разрыва критического количества составляющих его проволок, так как это ведет к значительной токовой перегрузке оставшихся и нарушению температурного режима.

2. Повреждение слоев междужильной изоляции вследствие ее износа при трении, или прокола разрушенными

проводами токопроводящих жил, ведущее к междужильному замыканию.

3. Повреждение защитных экранов, наружной оболочки вследствие износа при трении, прокола разрушенными проводами ТПЖ, так как это ведет к нарушению безопасности эксплуатации.

Проблема обеспечения работоспособности конструкций в условиях циклического деформирования имеет в приложении к гибкому кабелю свои характерные принципиальные особенности.

3.3. Механизмы разрушения

Под механизмом разрушения понимается определенный параметрами конструкции кабеля и режимом деформации процесс циклического силового взаимодействия элементов, который с течением времени приводит к отказу гибкого кабеля. Механизм разрушения может быть предсказан на стадии теоретического анализа и может быть установлен при разборке гибкого кабеля после отказа, или до его наступления по специальной методике, которая имеет задачей установление: положения всех ТПЖ в рабочей зоне образца кабеля, локализацию и степень износа слоев изоляции, координаты сечений излома отдельных проволок и их числа (на поверхности ТПЖ и внутри нее), наличие материалов износа слоев изоляции, экранов и проволок ТПЖ (возможный их перенос и скольжение), характер излома проволок (усталостно-изгибный или усталостно - сжаторастянутый), изменения цвета и блеска, наличие потертостей слоев и т.д. Рассматриваемые ниже описания механизмов разрушения содержат условия их реализации, характер их развития и физические результаты, а также параметры конструкции гибкого кабеля и режима деформации, которые в первую очередь должны присутствовать в критериях работоспособности - аналитических условиях связи числа циклов деформации до наступления отказа с характеристиками цикла, выраженными через эти параметры.

3.2.1. Механизм (1) циклического поперечного изгиба ТПЖ (или других элементов, например, оболочек)

Исходными предпосылками для реализации такого механизма являются: отсутствие или незначительное касательное взаимодействие ТПЖ по поверхности контакта с соседними элементами, сдвиги ТПЖ (относительные) малы или беспрепятственно распространяются в любую сторону. При этих условиях ТПЖ при циклическом изгибе кабеля следует за деформацией изгиба условного винтового канала, в которой она находится, испытывая циклический изгиб с параметрами, определяемыми начальной и конечной его кривизной.

Спирально уложенная в конструкции кабеля токопроводящая жила имеет начальную кривизну:

$$|\bar{K}_{ЖН}| = \frac{r}{r^2 + (H/2\pi)^2}, \quad (3.5)$$

где r - расстояние от оси кабеля до оси ТПЖ;

H - шаг скрутки ТПЖ.

Вектор начальной кривизны оси ТПЖ направлен к оси кабеля (рис.3.5).

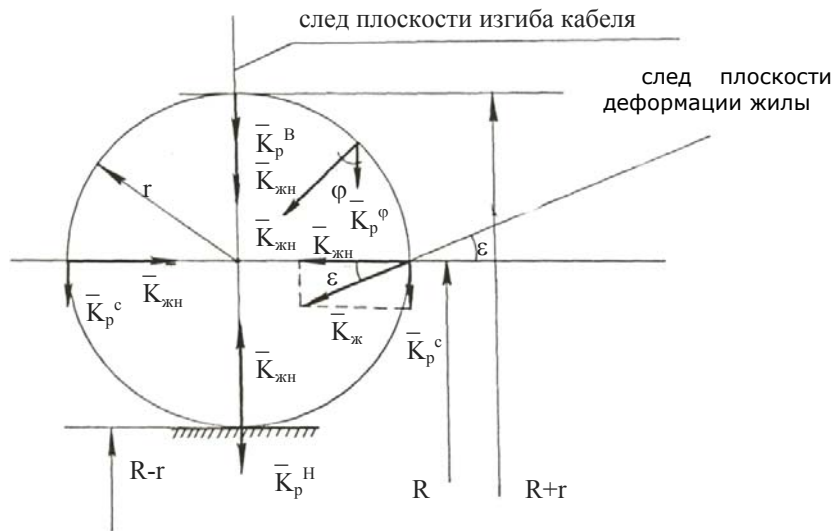


Рис. 3.5. К вычислению параметров цикла деформации ТПЖ.

При циклической деформации изгиба спирали ТПЖ на ролике происходит циклическое изменение кривизны оси кабеля с амплитудой равной двум кривизнам ролика - $2K_p$. При этом каждая из токопроводящих жил испытывает циклическое изменение кривизны, определяемое местом ТПЖ в сечении. Две ТПЖ, располагающиеся в плоскости деформации, испытывают цикл изгиба с изменением кривизны оси от:

$$K_{\max} = K_{ЖН} + K_p^e \text{ до } K_{\min} = K_{ЖН} - K_p^c \quad (\text{рис. 3.6}).$$

Амплитуда изменения кривизны вертикально ориентированных жил в плоскости изгиба:

$$\Delta K^B = \frac{K_{\max} - K_{\min}}{2} = \frac{R}{R^2 - r^2}. \quad (3.6)$$

Амплитуда изменения кривизны горизонтально ориентированных жил:

$$\Delta K^Г = \frac{K_{Ж} - K_{ЖН}}{2} = \frac{(K_{ЖН}^2 + 1/R^2)^{1/2} - K_{ЖН}}{2}. \quad (3.7)$$

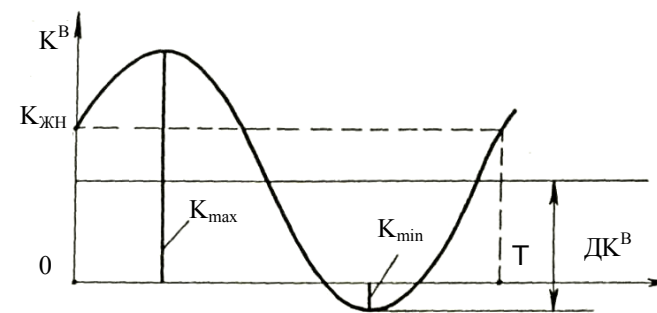


Рис. 3.6. Несимметричный цикл изменения кривизны горизонтально ориентированных жил при симметричном цикле изгиба кабеля.

Рис. 3.6 иллюстрирует несимметричный цикл деформации изгиба спиральной токопроводящей жилы с $\varphi = 0; \pi$ в рабочей зоне деформации изгиба кабеля. Можно убедиться

ся в том, что для всех остальных токопроводящих жил в расчетном сечении цикл изгибной деформации осуществляется с меньшей амплитудой, определяемой не алгебраической, а геометрической суммой кривизны токопроводящей жилы и оси кабеля. Отметим также, что для всех других токопроводящих жил в цикле происходит колебание суммарной кривизны около линий, перпендикулярных плоскости деформации изгиба. Причем наибольший угол поворота плоскости деформации токопроводящей жилы определяется:

$$\varepsilon = \arctg \left[\frac{K_p^c}{K_{ЖН}} \right] = \arctg \frac{r^2 + H/2\pi}{R \cdot r} = \arctg \frac{1}{K_{ЖН} \cdot R}, \quad (3.8)$$

и является амплитудой циклического поворота плоскости изгиба горизонтально ориентированных токопроводящих жил относительно горизонтальной плоскости начальной кривизны.

Таким образом, при симметричном цикле изгиба образца кабеля на роликах с амплитудой $2R$, токопроводящая жила в расчетном сечении испытывает цикл изгиба, определяемый ее положением в сечении - текущим центральным углом φ . Согласно рис. 3.5, угол φ определяет наклон к вертикали вектора кривизны спиральной токопроводящей жилы. При постоянной вертикальной ориентации вектора кривизны кабеля, уложенного на ролик, суммарная кривизна токопроводящей жилы:

$$|\bar{K}_{Ж}| = \left[K_{ЖН}^2 + (K_p^\varphi)^2 - 2 \cos \varphi \cdot K_{ЖН} \cdot K_p^\varphi \right]^{1/2}. \quad (3.9)$$

Здесь, кривизна жилы на ролике:

$$K_p^\varphi = [R = r \cos \varphi]^{-1}. \quad (3.10)$$

Тогда при подстановке (3.9) в (3.0) получим суммарную кривизну жилы, как функцию ее положения в сечении:

$$|\bar{K}_{Ж}| = K(\varphi). \quad (3.11)$$

Анализ подтверждает экстремальность цикла деформации изгиба, характеризуемого (3.6), для жилы, попавшей в плоскость деформации изгиба кабеля на ролике заданного диаметра. Согласно геометрии винтового канала, в рабочей зоне (деформируемой изгибом) образца кабеля сечений испытывающих несимметричной с максимальной амплитудой

цикл изгиба окажется столько, сколько раз каждая из ТПЖ попадает в плоскость изгиба кабеля на ролике (рис. 3.7). Расстояние между такими сечениями также легко определяется как

$$\frac{H}{2n}, \quad (3.12)$$

где n - число токопроводящих жил в повиве.

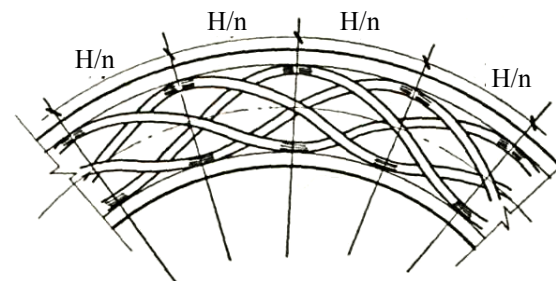


Рис. 3.7. Схема сечений разрушенных ТПЖ по механизму циклического поперечного изгиба.

Результатом реализации механизма циклического поперечного изгиба ТПЖ является четко выраженная система сечений излома токопроводящих жил (с текущим центральным углом $\varphi_i = 0; \pi$), подтверждаемая экспериментом.

На основании всего вышесказанного, оправданной является возможность экспериментального определения работоспособности отдельной ТПЖ (как стандартного элемента конструкции гибкого кабеля) при условии технической реализации несимметричного цикла с параметрами, определяемыми радиусом повива, углом скрутки и диаметром ролика (степенью деформации). Достоинством такого эксперимента является тот факт, что он определит работоспособность токопроводящей жилы, а вместе с тем и работоспособность кабельного изделия, в конструкцию которого эта жила входит, если механизм разрушения кабеля - циклический поперечный изгиб.

Заключая рассмотрение этого механизма разрушения, укажем на возможность управления работоспособностью: изменением угла скрутки, также изменением диаметра

ТПЖ, изменением диаметра и предела прочности материала ее проволок.

3.3.2. Механизм (II) циклического износа слоев изоляции ТПЖ

Механизм циклического износа слоев изоляции ТПЖ может быть реализован, если рассмотренный выше механизм циклического поперечного изгиба ТПЖ протекает с малой интенсивностью, а ТПЖ испытывают свободные циклические сдвиги, взаимодействуя между собой по поверхностям контакта усилиями трения скольжения, т.е. уровень относительных сдвигов ТПЖ превышает уровень упругих сдвигов. Так как закон распределения сдвигов по поверхностям контакта на длине зоны деформации имеет зону экстремальных сдвигов, то механизм циклического износа слоя изоляции локализуется именно в этой зоне (ее положение легко определяется согласно главе 2). Результатом циклического износа является отказ по типу междужильного замыкания вследствие полного износа двойного слоя изоляции соседних ТПЖ. Определяющими работоспособность параметрами цикла являются амплитуда сдвигов и касательных напряжений по поверхности контакта, в свою очередь зависящая от фрикционных свойств материалов слоев изоляции и усилия нормального взаимодействия.

Так как картина механизма достаточно ясна, то он может быть реализован и в отдельном эксперименте по циклическому износу слоев изоляции по поверхности контакта двух токопроводящих жил (рис. 3.8), а результаты (работоспособность) распространены на работу кабеля в целом по этому механизму.

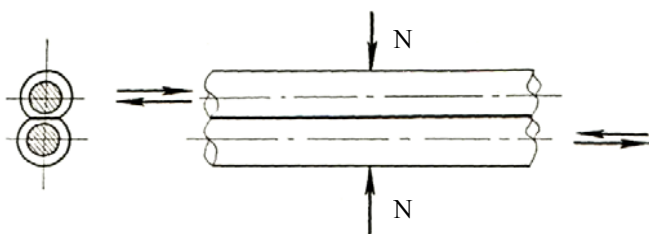


Рис. 3.8. Схема реализации механизма циклического износа изоляции ТПЖ.

3.3.3. Механизм (III) циклического продольного изгиба ТПЖ

Механизм циклического продольного изгиба ТПЖ реализуется, например, при незначительном уровне касательных усилий по поверхности контакта соседних ТПЖ, но для относительных сдвигов обязательно наличие препятствия в виде зажимов испытательной установки или вводов в подвижный потребитель электроэнергии, так что образующееся превышение длины нерастяжимой и несжимаемой ТПЖ над длиной условного винтового канала приводит к потере устойчивости формы винтовой оси и выпучиванию в направлении наименьшей упругой податливости окружающих (рассматриваемую ТПЖ) элементов.

Наиболее распространенными направлениями выпучивания являются радиальные для оболочки, заполняющей впадины между ТПЖ, и тангенциальное для промежуточных повивов и наружного повива с трубчатой оболочкой, так как в первом случае тангенциальный сдвиг ограничен зубчатыми ребрами, а податливость определяется радиальной податливостью оболочки (рис. 3.9 а), а во втором случае податливость определяется сопротивлением соседних ТПЖ в тангенциальном направлении (рис. 3.9 б).

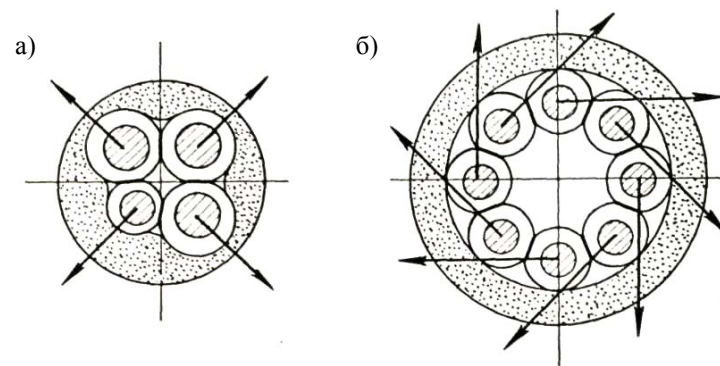


Рис. 3.9. Направление выпучивания ТПЖ.

Известно (глава 2), что на шаговой длине ТПЖ может существовать и вторая зона (где нерастяжимая ТПЖ короче длины канала), где ТПЖ испытывает деформацию растяжения, вызывающую давление ТПЖ на внутренние повивы и

сердечник. Так как при циклической деформации изгиба кабеля направление изгиба циклически меняется, то соответственно зоны выпучивания растяжения периодически сменяют друг друга на одной и той же длине ТПЖ в зоне деформации. Тогда механизм циклического продольного изгиба состоит из двух полуциклов с разным видом деформации в каждом. Реализация такого механизма разрушения возможна, пожалуй, только в натуральной конструкции кабеля. Описываемый механизм - это циклический изгиб сечений ТПЖ в опасных сечениях, образуемых формой потери устойчивости ТПЖ в упругой среде согласно (рис. 3.10).

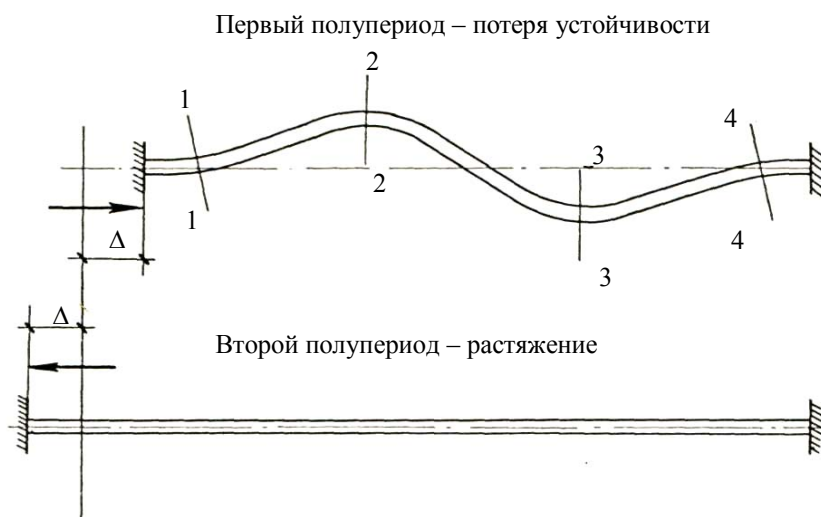


Рис. 3.10. Схема механизма продольного изгиба с растяжением-сжатием (спиральный элемент условно выпрямлен).

Параметрами, определяющими работоспособность кабеля по этому механизму, являются: уровень абсолютного сдвига в отношении к длине зоны потери устойчивости и отношение изгибной жесткости ТПЖ к коэффициентам податливости окружающих элементов, так как именно они отвечают за форму изогнутой оси (кривизна оси ТПЖ и количество опасных сечений изгиба) и уровень растягивающих усилий.

3.3.4. Механизм (IV) продольного циклического изгиба проволоч ТПЖ

Механизм продольного циклического изгиба проволоч ТПЖ реализуется, например, в случае передачи движения (с учетом трения) от оболочки – изоляции к токопроводящим жилам. В этом случае проволока наружного повива ТПЖ оказывается под воздействием касательных усилий сцепления или трения почти по полному периметру сечения, так что часть проволоки перед движущимся участком изоляции может потерять устойчивость и выпучиться в направлении наименьшей податливости слоя изоляции. За участком сдвигающейся вместе с проволокой изоляции проволока может испытывать значительные продольные усилия. Этот эффект локализуется на длине проволоки, определяемой соотношением собственных жесткостей и податливостей соседних элементов. Механизм (IV) подобен механизму (III) (рис. 3.10), только осуществляются они на разных конструктивных элементах: ТПЖ и проволоке ТПЖ. За своеобразие взаимодействия слоя изоляции с поверхностью ТПЖ этот механизм может быть назван "ластик"-эффектом по аналогии с картиной взаимодействия стирающей резинки с тонким листом бумаги. Своеобразие этого механизма состоит в том, что именно ему следует отдать предпочтение в причинах возникновения отказа по типу прокола изоляции ТПЖ и замыкания между ними, так как оборванная или обломанная проволока имеет нужную ориентацию и нужное направление сдвигающих усилий для прокола изоляции. Основным параметром, определяющим работоспособность кабеля по этому механизму, является диаметр проволоки ТПЖ и соотношение ее жесткости и податливости окружающих элементов. Рассмотренные выше механизмы разрушения не исчерпывают всех возможных их типов. Они условно могут считаться упрощенными. Сочетание одновременно протекающих механизмов может привести как к уменьшению, так и к увеличению скорости движения к отказу. Именно ее увеличение является важным. Проследивая возможные сочетания механизмов, назовем лишь два:

V - циклический поперечный изгиб элементов с влиянием циклической продольной силы, как суммарное влияние сил трения по поверхности элементов;

VI - циклический продольный изгиб при значительном влиянии циклического поперечного изгиба.

Совершенно очевидно, что такие сочетания требуют совпадения каждого механизма по месту и времени и требуют дополнительного анализа, кроме того в процессе деформации один механизм может переходить в другой (например, при износе слоев изоляции могут меняться силы трения, конструкция кабеля, разуплотняется и меняются коэффициенты податливости элементов и т.д.). Приведенное описание связи механизмов разрушения с типом отказа требует достаточного обоснования. Единственной возможностью их идентификации должен быть спланированный эксперимент по независимой реализации механизмов и их сочетаний. Теоретическая возможность разделения механизмов существует, есть пути реализации некоторых упрощенных механизмов разрушения, которые требуют создания принципиально новых методов и установок.

3.4. Работоспособность при реализации различных механизмов разрушения и ее многокритериальное представление

Существующие конструкции гибких кабелей при испытаниях и работе в условиях эксплуатации демонстрируют большой разброс работоспособности в результате реализации различных механизмов разрушения. Понимаемое под работоспособностью число циклов деформации до отказа необходимо связывать с реализующимися отдельными механизмами или их сочетанием. Если установлена работоспособность кабеля по каждому механизму N_i или их сочетанию N_{i+j} , то минимальная работоспособность кабеля в условиях эксплуатации не будет превышать минимальной из них. С одной стороны, это открывает возможность сознательного управления параметрами конструкции гибкого кабеля, так как из всей совокупности этих параметров могут быть изменены только те, которые определяют реализацию механизма с минимальной работоспособностью. С другой, очевидно, что рациональными критериями проектирования являются такие, которые позволяют закладывать в конструкцию параметры, при которых кабель в заданных условиях эксплуатации по всем механизмам разрушения будет

равнопрочным. Оптимальное конструирование для целей повышения технического уровня вообще и с учетом конкретных условий эксплуатации заключается в том, чтобы регулировать только те параметры, которые определяют реализацию механизма разрушения с минимальной и максимальной работоспособностью для повышения, с одной стороны минимальной, а с другой, уменьшения максимальной для устранения лишнего резерва работоспособности по этому механизму. Однако, следует иметь в виду, что такое вмешательство в один механизм может инициировать переход на отказ кабеля на другой механизм разрушения, что, как будет показано ниже, совершенно не учитывается в методике и устройствах для экспериментального определения работоспособности.

Из вышеизложенного следует, что формулировка обобщенного критерия работоспособности для кабелей не имеет смысла и необходимо многокритериальное представление работоспособности. При разработке критериев работоспособности, представляющих аналитическую связь количества циклов до наступления отказа с параметрами циклической деформации [74,93], в них в первую очередь, необходимо вводить параметры реализуемых механизмов разрушения, выраженных через параметры конструкции и режима деформирования. В качестве примеров приведем возможные, строго ограниченные рамками понятия о механизме разрушения мероприятия по регулированию работоспособности гибкого кабеля.

Например, для изменения (в известных пределах) работоспособности по циклическому поперечному изгибу ТПЖ следует изменить диаметр проволоки ТПЖ и систему скрутки ее, оставив неизменными все остальные параметры конструкции кабеля в целом. Далее, для повышения работоспособности кабеля по износу слоя изоляции ТПЖ следует изменить (уменьшить) коэффициент трения и сцепления материалов изоляции по поверхности их контакта, или с другой стороны заняться регулированием абсолютного и относительного сдвига ТПЖ в пределах разумного, с учетом, как и в первом случае, требований трудоемкости изготовления и материалоемкости.

Для изменения работоспособности по "ластик" - эффекту следует менять диаметр проволоки ТПЖ и характер и уровень сцепления слоя изоляции с поверхностью ТПЖ.

Если невозможно исключить механизм разрушения до отказа в виде прокола слоя изоляции, то единственной мерой повышения работоспособности будет наложение на изоляцию (или под нее) стойкой к проколам прослойки.

Детальное изучение механизмов разрушения позволяет ставить вопрос об оптимальном проектировании работоспособности гибкого кабеля для заданного режима деформации его в эксплуатационных условиях.

3.5. Требования к эксперименту и соотношения эксплуатационных и экспериментальных параметров режимов деформирования

Любые методы испытаний гибких кабелей для прогнозирования их срока службы в условиях эксплуатации должны основываться на предварительном всестороннем изучении условий и режимов деформирования в этих условиях. В эксперименте принципиально необходимо реализовать прежде всего такие условия, которые определяют реализацию механизмов разрушения приводящих в условиях эксплуатации к отказу гибкого кабеля работать по прямому назначению.

К этим условиям относятся:

- 1) сохранение в эксперименте определенного соотношения шага скрутки исследуемого повива к длине зоны деформации и расстоянию между захватами;
- 2) условия обжата в захватах;
- 3) закономерности изменения длины зоны деформации и соответствующего изменения рабочей длины образца в течение цикла;
- 4) определенной ориентировки токопроводящих жил в сечениях образца относительно плоскости деформации и изменение ее в течение цикла;
- 5) степень деформации, углы и радиусы изгиба должны соответствовать этим параметрам режима деформации в условиях эксплуатации.

3.5.1. Испытание, эквивалентное относительно сдвигов, требования к устройству и методикам испытаний

Соотношение D/d , где: D - диаметр деформирующего ролика; d - наружный диаметр кабеля, согласно ГОСТ [38, 39] в стандартных методиках принимается за меру деформации кабеля, сохранение которой при испытаниях кабелей разного диаметра в принципе не обеспечивает идентичность условий сравнительных испытаний и сопоставимость результатов.

Покажем это на следующих примерах.

1. Согласно теории относительных упруго-фрикционных сдвигов степенью деформации изгиба следует считать отношение:

$$R/r = C \quad (3.13)$$

где r - радиус испытываемого повива ТПЖ, а не наружный диаметр кабеля;

R - радиус изгиба по оси кабеля, равный: $R = R_0 + r_K$,

где R_0 - радиус ролика по дну канавки: $2r_K = d_K$ - наружный диаметр кабеля.

При данном соотношении сравним сдвиги элементов повива с одним центральным углом φ_0 , в одном и том же сечении кабеля двух размеров одного и того же типа. Если сечением сравнения

взять: $\lambda_1 = H_{1/2}$; $\lambda_2 = H_2 / 2$, то в формуле сдвигов (2.14)

$$\sin \frac{\pi \lambda_1}{H_1} = \sin \frac{\pi \lambda_2}{H_2} = 1; \quad \cos(\varphi_0 + \frac{\pi \lambda_2}{H_2}) = -\sin \varphi_0,$$

а соответствующие сдвиги

$$\begin{aligned} \Delta_1 &= r_1 H_1 \cos \alpha_1 \sin \varphi_0 / \pi R_1; \\ \Delta_2 &= r_2 H_2 \cos \alpha_2 \sin \varphi_0 / \pi R_2; \end{aligned} \quad (3.14)$$

Преобразуем эти формулы к виду:

$$\frac{\Delta_1}{H_1 \cos \alpha_1} = \frac{r_1}{\pi R_1} \sin \varphi_0; \quad \frac{\Delta_2}{H_2 \cos \alpha_2} = \frac{r_2}{\pi R_2} \sin \varphi_0,$$

и запишем их отношение:

$$\frac{\Delta_2 \cos \alpha_1 H_1}{\Delta_1 \cos \alpha_2 H_2} = \frac{r_2 R_1}{R_2 r_1} \quad (3.15)$$

тогда в правой части образуется отношение степеней деформации двух разных кабелей. Так как $c_1 = c_2$, то

$$\frac{\Delta_2 \cos \alpha_1 H_1}{\Delta_1 \cos \alpha_2 H_2} = \frac{\Delta_2}{L_2 \cos^2 \alpha_2} \times \frac{L_1 \cos^2 \alpha_1}{\Delta_1} = 1 \quad (3.16)$$

которое после преобразования:

$$\frac{\Delta_2}{L_2 \cos^2 \alpha_2} = \frac{\Delta_1}{L_1 \cos^2 \alpha_1} ; \quad \frac{\Delta_2}{\cos \alpha_2 H_2} = \frac{\Delta_1}{\cos \alpha_1 H_1} \quad (3.17)$$

Таким образом, с точки зрения оценки сдвигов, сохранение отношений диаметров ролика и кабеля эквивалентно сохранению отношения сдвига элемента к его шаговой длине, умноженной на косинус угла скрутки.

2. Указанное соотношение в настоящее время в стандартных методиках не соблюдается. Анализ показал, что в устройстве для циклического изгиба на ролике [12] режим деформирования кабеля при незаконном расположении ТПЖ в начальном сечении деформации (между роликами) ставит токопроводящие жилы в образцах в неравноценные условия по параметрам цикла механизма разрушения и приводит к дополнительному разбросу результатов испытаний. Вытекающее отсюда требование к эксперименту заключается в строгой идентичной ориентировке известной ТПЖ относительно плоскости изгиба на роликах.

3. При изменении степени деформации одного и того же кабеля (при изменении диаметра ролика) для получения сопоставимых результатов, следует сохранять соотношение:

$$\lambda / H = k, \quad (3.18)$$

где λ - длина зоны деформации кабеля на ролике;

H - шаг скрутки повива. Если β - угол охвата ролика кабелем, то

$$\lambda = R\beta, k = \beta / \beta_H,$$

где β_H - угол охвата ролика шаговой длиной. Из условия (3.17) вытекает условие сохранения длины зоны деформации:

$$\beta_2 = \beta_1 \cdot R_1 / R_2. \quad (3.19)$$

что означает: при переходе на другой ролик должен быть изменен угол охвата.

4. Имеющееся в некоторых конструкциях устройств продергивание образца кабеля в зоне деформации должно быть исключено.

5. При изменении степени деформации должно быть изменено расстояние от конца зоны деформации до зажима на рычаге устройства.

Это требование связано с необходимостью соотносить величину абсолютных сдвигов ТПЖ с расстоянием до сечения, где сдвиги невозможны с целью сохранения условия:

$$\frac{\Delta_1}{L_1} = \frac{\Delta_2}{L_2} \quad (3.20)$$

которое после преобразований имеет вид:

$$\frac{L_1}{L_2} = \frac{C_2}{C_1} \quad (3.21)$$

и носит название условия пропорциональности степени деформации и расстояния до зажима.

Сформулированные в п.1-5 требования к устройству и методике являются условиями корректности испытаний и позволяют определять работоспособность в функции единственного параметра степени деформации изгиба независимо от всех других параметров конструкции и режима деформации - при сохранении механизма разрушения.

Аналогичным образом может быть построена методика выявления влияния и некоторых других параметров на работоспособность известного кабеля. Кривые работоспособности, построенные для разных сечений одного и того же типа кабеля, в этом случае оказываются сопоставимыми.

Глава 4

Ускоренное экспериментальное исследование работоспособности гибких кабелей на «шаговых» образцах

Решение проблемы скорейшего создания высоконадежных и безопасных при эксплуатации гибких кабелей и их оптимальное проектирование возможно лишь при прогнозировании сроков службы этих конструкций за более короткое время и при лабораторных испытаниях меньшего количества образцов.

Существующие испытательные методы и средства не позволяют осуществлять корректные с точки зрения механики деформируемого гибкого кабеля экспериментальные исследования. Базой для разработки новых экспериментальных методов и устройств могут служить положения разработанной теории упругофрикционного взаимодействия элементов конструкции при деформациях изгиба гибкого кабеля и представления о механизмах его разрушения.

4.1. Анализ существующих методов и оборудования, норм на эксперимент

Анализ существующих экспериментальных методов и средств определения работоспособности гибкого кабеля с позиции разработанной теории показал, что состояние вопроса определяется следующими моментами.

Испытательное оборудование построено на двух принципах. **Первый** заключается в полном или почти полном моделировании условий эксплуатации кабельного изделия. Определенное таким образом количество циклов деформации до установленного нормами отказа считается работоспособностью кабеля. Трудности с технической стороны реализации в эксперименте всех эксплуатационных факторов при их моделировании в условиях испытаний приводят к множеству схем с разными параметрами и режимами деформирования, включающие все виды деформаций - изгиб, кручение, растяжение с разнообразным их сочетанием.

Для обеспечения ГОСТ 12182-80 и сходных требований нормативных документов к методам оценки циклической прочности за рубежом [101, 119] необходимо до 10 испытательных стендов.

Второй принцип заключается в реализации при эксперименте определяющих видов деформации кабеля в эксплуатационных условиях (для гибких кабелей - циклический изгиб). Определенная в таком эксперименте работоспособность является условной и при переносе на реальные условия считается оценкой действительной работоспособности.

Эксперимент в том и другом случае происходит почти в реальном масштабе времени, характеризуется длительностью вследствие малой производительности установок, осложняется перерывами в эксперименте, так как предельная частота циклов изгибной деформации, реализуемая в существующих испытательных стендах, не превышает 6-20 в минуту. Для испытаний одного образца при $10^4 - 10^5$ циклах деформации изгиба необходимо до месяца при двухсменной работе оборудования. Основная причина этого заключается в трудностях с технической стороны создания циклического режима воздействия на кабель с повышенными частотами при больших амплитудах его параметров, характерных для условий эксплуатации гибкого кабеля. В области эксплуатационных параметров деформации, моделируемых в условиях эксперимента (большие размеры образцов - 1,2 - 2,5 м, значительные амплитуды циклических деформаций и связанных с ними больших перемещений исполнительных механизмов) существующие конструктивные решения, реализуемых схем деформирования в установках исчерпали все возможности повышения частоты циклов. Значительные инерционные силы в элементах привода, передачи и самом образце ведут к резкому утяжелению и росту габаритов установок, значительному расходу энергии преодоления этих сил и влиянию дополнительных динамических усилий на работу образца, искажению картины и потере вида деформации, а следствием этого является снижение точности испытаний.

С другой стороны, причиной длительности экспериментального определения работоспособности является значительное полное время испытаний, вследствие низкой воспроизводимости, сходимости и сопоставимости результатов. Это связано с недостатками методов и схем деформирования, не позволяющих реализовать в эксперименте идентичные и эквивалентные условия испытаний образцов (гл. 3).

Существующие методики исследований, устанавливающие частную связь прочностных и механических характеристик отдельных элементов конструкций с одним или несколькими параметрами нагрузки, а так же методики экспериментального определения работоспособности, изучающие однофакторное и многофакторное влияние того или иного параметра конструкции или деформации, или однофакторного влияния воздействующих параметров на конечную ее работоспособность и ориентированы на долговременный эксперимент и связаны со значительными затратами, так как рассчитаны на существующее оборудование; они некорректны, так как воздействующие факторы не являются независимыми вследствие взаимодействия элементов конструкции и связи параметров конструкции и деформации, интегрально выраженной в механизмах разрушения, приводящих к отказам гибких кабелей; они, в принципе не позволяют изучать механизмы разрушения, исследовать их влияние на работоспособность при совместной и независимой их реализации и устанавливать связь типов отказа кабеля с тем или иным механизмом разрушения; они, не содержат требований к установкам и условиям идентичности и эквивалентности испытаний.

К недостаткам экспериментальных средств относится так же то, что эти устройства являются не универсальными, так как испытывают образцы с узким диапазоном геометрических размеров - длиной, диаметром и в узком диапазоне параметров деформаций, не обеспечивая бесступенчатую их регулировку в требуемом диапазоне, а так же задание циклов изгиба образца с различными коэффициентами асимметрии циклов, имеющих место в условиях эксплуатации.

Все перечисленные недостатки приводят к содержанию большого парка испытательных машин, к неравномерной их загрузке, длительным испытаниям, большим затратам энергии, времени и расходу кабеля, а так же к тому, что исследования на их основе оказываются некорректными.

4.2. Установка ЦИКЛ-2

Поиск подходящей схемы ускоренной реализации циклического изгиба для конструктивного воплощения в устройстве с учетом вышеперечисленных требований привел к

схеме изгиба короткого образца циклическим поворотом его концов в захватах в одной плоскости, реализованной в установке ЦЖЛ-2, устройство которой защищено авторским свидетельством [118].

Схема циклического деформирования поворотом концов образца достаточно известна и применяется для испытаний при циклическом изгибе металлов и композитов с большой частотой циклов при незначительных амплитудах углов поворота, при которых не предусмотрено смещение захватов в плоскости изгиба [59, 70, 80, 81, 123, 160]. Такие условия испытаний обусловлены характерными для этих материалов условиями эксплуатации и требованиями к уменьшению влияния концевых эффектов, связанных со смятием концевых частей образца

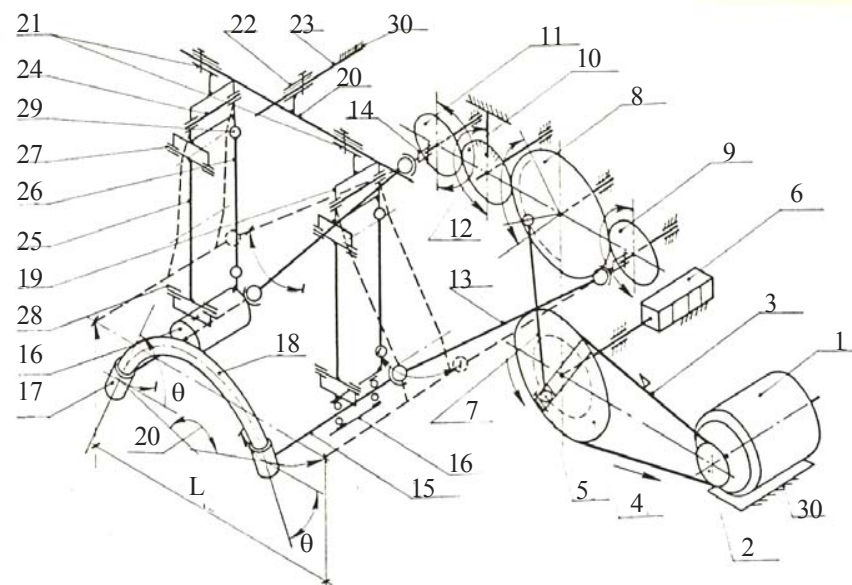


Рис. 4.1. Устройство для испытаний гибких кабелей на циклический изгиб - ЦИКЛ-2.

у захватов, вследствие значительной жесткости к изгибу этих материалов и приводят к тому, что при больших углах поворотов испытывается не сам образец между захватами, а его концевые части непосредственно у захватов. Кроме

того, указанный эффект связан обратно пропорциональной зависимостью с эксцентриситетом захватов осей их поворота.

На рис. 4.1 показана кинематическая схема устройства в аксонометрии. Устройство содержит станину 30 с горизонтальной консолью 23, кривошипно-шатунный возбудитель циклических нагрузок, включающий кривошип постоянного радиуса 8, соединенный через шатун 7 с кривошипом с регулируемым радиусом 5, связанный с электродвигателем I через шкив 2 на его валу ременной передачей 3, механизм передачи из четырех сцепленных в горизонтальный ряд в вертикальной плоскости цилиндрических зубчатых колес, одного большего диаметра 8, объединенного с кривошипом 8, и трех малых одинакового диаметра 9, 10, II, образующих три пары качательного вращения, узел изгиба в виде двух горизонтальных параллельных друг другу подвижных валов изгиба 15 с захватами для крепления 17 образца 18. Валы изгиба связаны с механизмом передачи посредством карданных валов 13 со съёмными зажимами 14, устанавливаемых на валах одной из пар колес: 9 и 10, II - 10 или 9 и II с возможностью установочного поворота относительно них. Валы изгиба снабжены подвеской в виде двух одинаковых параллелограммов 19 с регулируемым при установке расстоянием между их верхними сторонами за счет закрепления на горизонтальном стержне 20 с помощью зажимов 21. Стержень 20 закреплен на консоли 23 с помощью зажима 22 с возможностью установочного перемещения по ней. Установка работает следующим образом. Электродвигатель I через механизм привода и передачи приводит в качательное вращение валы 15 с возможностью бесступенчатого регулирования амплитуды их качательного вращения за счет плавного изменения при установке требуемого радиуса кривошипа 5. Валы 15 циклически поворачивают концы образца в захватах 17 на углы, отсчитываемые по лимбу 10, который может устанавливаться на одном из малых колес и неподвижной стрелке 12, закрепленной на станине 30.

При повороте концов образца 18 на одинаковые углы в одну сторону (вверх или вниз) образец циклически изгибается и смещает валы 15 в подшипниковых обоймах 16, которые за счет связи с карданными валами 13 и конструкции параллелограммов 19 качаются только в двух взаимно перпендикулярных направлениях - вдоль своих осей за

счет преломления боковых сторон 25 и 26 параллелограммов 19 на валах 27, 28 и шарнирах 29, и перпендикулярно осям валов 15 за счет качания параллелограммов относительно верхних сторон в виде валов 24. При этом валы изгиба 15 остаются горизонтальными и параллельными друг другу. В результате образец 18 циклически изгибается по дуге окружности в вертикальной плоскости, радиус которой задается величиной углов поворота концов образца, а захваты 17 циклически смещаются и поворачиваются только в плоскости изгиба с амплитудой, задаваемой амплитудой параметров изгиба самого образца 18.

За один полный оборот шкива 4, объединенного с кривошипом 5, колеса 8, 9, 10, 11 совершают один цикл качательного вращения, а образец 18 один цикл изгиба выпуклостью вверх и вниз.

Количество циклов изгиба фиксирует счетчик 6, связанный со шкивом 4, который автоматически отключает электродвигатель после задания требуемого количества циклов.

4.3. Анализ и обоснование схемы изгиба и перехода к "шаговому" образцу

При изгибе кабельной конструкции, представляющей упругофрикционный составной стержень, поворотом концов в захватах, элементы которой взаимодействуют между собой за счет сил упругого сцепления и сил трения, при длине зоны деформации, равной шагу скрутки, закономерности распределения сдвигов элементов имеют следующие особенности.

Сдвиги по концам зоны деформации отсутствуют, а в середине образца абсолютная сумма сдвигов всех элементов является максимальной. Так как жесткость сечения образца функционально зависит от величин сдвигов и силового взаимодействия элементов в этом сечении, а форма изогнутой оси образца зависит от его жесткости в каждом сечении по длине зоны деформации, то образец при его изгибе поворотом концов принимает форму несколько отличающуюся от круговой с наименьшим радиусом кривизны в середине зоны и максимальным у захватов. Таким образом образец представляет собой стержень с плавно уменьшающейся кривизной оси от середины к концам у захватов, вследст-

вие чего влияние указанного в 4.3 концевое эффекта является несущественным.

Для выполнения требования эквивалентности испытаний, заключающегося в постоянстве ориентации плоскости изгиба относительно положения токопроводящих жил в сечениях образца, захваты в установке ЦИКЛ-2 смещаются и поворачиваются только в плоскости изгиба. В результате появления дополнительных вторичных силовых эффектов, приводящих к дополнительным деформациям, при таких жестких граничных условиях, ось образца в середине зоны деформации депланирует из плоскости изгиба. Для коротких образцов эффект выпучивания из плоскости изгиба незначителен и условие эквивалентности выполняется достаточно точно.

Установка ЦИКЛ-2 осуществляет ускоренное регулярное нагружение образца с постоянной амплитудой углов поворота его концов, при циклическом изменении радиуса изгиба, постоянной ориентации плоскости изгиба и постоянной длине зоны деформации в течение цикла.

Режим деформирования с точки зрения закономерностей распределения сдвигов токопроводящих жил назван режимом "пульсирующей волны". Сдвиги жил в каждом сечении образца изменяются в течение цикла изгиба от 0 до величины Δ , зависящей от ориентации жил в каждом сечении и расположения этих сечений по длине зоны деформации:

$$\Delta(t) = -\frac{rH \cos \alpha}{\pi R(t)} \sin \frac{\pi \lambda}{H} \cos\left(\varphi_0 + \frac{\pi \lambda}{H}\right),$$

где $R(t)$ - радиус изгиба изменяется в течение цикла от ∞ до конечного радиуса R . Как показано в гл. 2, упруго-фрикционное взаимодействие и закономерности распространения сдвигов токопроводящих жил при изгибе кабеля на ролике имеют период, равный шагу скрутки их повива.

В гл. 3 показано, что все механизмы нагружения токопроводящих жил и механизмы разрушения конструкции кабелей, имеющие место в условиях эксплуатации могут быть смоделированы и реализованы при испытаниях коротких образцов при соответствующих внешних условиях деформирования.

Для схемы изгиба поворотом концов, при расстоянии между захватами z , кратный шагу скрутки исследуемого

повива токопроводящих жил, сдвиги по концам зоны деформации отсутствуют в течение всего цикла изгиба. В этом случае условия обжатия в захватах не вносят помех в сдвиги токопроводящих жил и упруго-фрикционное взаимодействие, а условия их работы не отличаются от работы такого же отрезка внутри достаточно длинного кабеля при его изгибе. При этом независимо от обжатия концов образца в захватах, реализуется механизм циклического поперечного изгиба токопроводящих жил повива с шагом скрутки H .

При $z = 0,5 H; 1,5 H$ и при условии полного обжатия концов образца в обоих захватках, препятствующего сдвигам элементов в них, реализуется механизм циклического продольного изгиба токопроводящих жил с шагом скрутки H .

При $z = 0,5 H; 1,5 H$ при закреплении одного конца образца в захвате без обжатия токопроводящих жил, не препятствующего их сдвигам, реализуется циклический износ слоев изоляции токопроводящих жил, оболочки и проволок в жилах.

Работоспособность гибкого кабеля в указанных условиях будет определяться соответствующими механизмами разрушения его конструкции, и будет являться оценкой действительной работоспособности в условиях эксплуатации. Проблема влияния на конечную работоспособность значительного увеличения частоты циклов изгиба, связанного с динамическими процессами взаимодействия элементов и приводящих к разогреву образца при таких условиях испытаний требует дополнительных исследований.

4.4. Технические характеристики и технологические возможности установки ЦИКЛ-2

Технические характеристики сведены в табл. 4.1.

Установка ЦИКЛ-2 унифицирует испытания гибких кабелей при ускоренном циклическом изгибе, так как она позволяет:

- 1) привести все испытания гибких кабелей при изгибе к одной схеме циклического деформирования;
- 2) задавать параметры деформирования во всем требуемом диапазоне с бесступенчатой их регулировкой для мо-

делирования условий эксплуатации в условиях эксперимента;

Таблица 4.1

Технические характеристики	
Наименование единиц измерения	«Установка ЦИКЛ-2»
1. Максимальный диапазон бесступенчатого регулирования угла изгиба, рад.	от 0 до $\frac{5}{4}\pi$
2. Пределы ступенчатого регулирования частоты циклов, цикл/мин.	от 60 до 200
3. Вид циклической деформации изгиба.	Симметричный, кососимметричный, ассиметричный с любым коэффициентом асимметрии
4. Длина образца между захватами (длина зоны деформации), м	от 0,04 до 0,4
5. Диаметр испытываемых образцов, мм	от 0,5 до 25

3) испытывать гибкие кабели с широким диапазоном параметров их конструкции, без ее переналадки;

4) реализовать корректные методики испытаний по определению работоспособности выбранной конструкции при заданных условиях циклического нагружения, сравнительные испытания нескольких готовых конструкций, исследовать влияние на работоспособность параметров нагружения (степени деформации, асимметрии циклов, условий окружающей среды, частоты циклов, ориентировки ТПЖ по отношению к плоскости изгиба), корректное исследование многофакторного влияния на работоспособность параметров конструкции и влияния соотношения длины зоны деформации, шага скрутки элементов конструкции и расстояния между захватами, в сочетании с различными условиями обжатия концов образца в захватах;

5) определять работоспособность одной жилы при ее циклическом изгибе поворотом ее концов в одной плоскости.

Устройство ЦИКЛ-2 позволяет увеличить частоту циклов изгиба на порядок по сравнению с существующими установками, с одновременным повышением точности и сопоставимости результатов испытаний за счет возможности реализовать при испытаниях условия эквивалентности и корректности.

4.5. Методика испытаний

Испытания гибких кабелей на работоспособность при циклических деформациях являются косвенными испытаниями, в которых критическое число циклов нагружения до наступления, заданной нормативной документацией, степени разрушения конструкции определяется на основе экспериментальной кривой работоспособности, построенной по представительному объему экспериментальных точек и представляющей зависимость степени разрушения конструкции от количества циклов нагружения серии образцов, испытанных в идентичных условиях с заданием различного числа циклов для каждого образца или их групп. Специфика испытаний связана: 1) со значительным разбросом результатов испытаний, вызванных большим числом факторов, не поддающихся устранению; 2) с отсутствием надежных методов слежения с достаточной точностью за степенью разрушения конструктивных элементов в процессе испытаний без разборки образца.

В предыдущих главах установлено, что для реализации идентичных условий испытаний серии образцов одной конструкции гибкого кабеля для построения кривой работоспособности необходимо выполнение следующих требований. Все образцы данной серии должны быть испытаны:

- 1) с одинаковой степенью деформации ε ;
- 2) при одинаковой ориентировке токопроводящих жил в сечениях образца по отношению к плоскости изгиба;
- 3) при реализации одного и того же механизма нагружения токопроводящих жил.

При выполнении этих требований, при прочих одинаковых условиях испытаний, дисперсия результатов минимальна и обусловлена только факторами, отражающими непостоянство параметров конструкции и свойств материалов, а так же факторами колебания параметров технологического процесса изготовления гибких кабелей. Методика испытаний, учитывающая эти требования, является корректной, так как учитывает механизмы разрушения конструкций.

Многочисленные испытания гибких кабелей, проведенные на установке ЦИКЛ-2, при реализации в эксперименте механизма циклического поперечного изгиба токопроводящих жил, исследуемого повива при симметричном цикле изгиба образца и выполнении условий эквивалентности ис-

пытаний показали, что экспериментальная зависимость числа разрушенных проволок в максимально разрушенной жиле от числа циклов изгиба n имеет вид, представленный на рис. 4.2. Заштрихованная область показывает рассеяние экспериментальных точек вокруг осредненной кривой работоспособности - 1.

При задании одного числа циклов нагружения для серии образцов, рассеяние случайной величины p , удовлетворительно описывается усеченным логарифмически нормальным законом, так как он учитывает асимптотические свойства функции распределения характеристик работоспособности, например, наличие верхней и нижней границ рассеяния числа разрушенных проволок в одной жиле.

Дисперсия случайной величины p зависит от особенностей конструкции кабеля, а так же от уровня разрушенных проволок в жилах. Кривая - I (рис. 4.2) из трех участков, каждый из

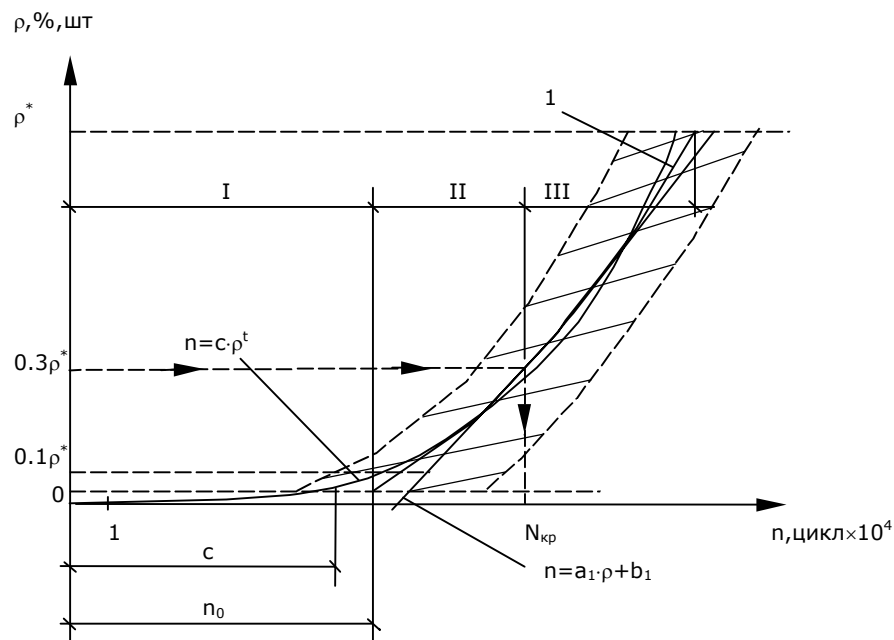


Рис. 4.2. Область экспериментальных точек вокруг осреднённой кривой работоспособности - I.

которых обладает своими феноменологическими и физическими закономерностями развития механизмов разрушения и характеризуется разной интенсивностью накопления числа разрушенных проволок.

Характеристиками кривой являются так же величины:

$N_{кр}$ - число циклов изгиба до разрушения 30 % ($0,3 p^*$) проволок в максимально разрушенной жиле, от общего их числа в этой жиле p^* . Эту величину принято называть работоспособностью кабеля при циклическом изгибе, а соответствующий процент разрушения является критерием работоспособности;

n_0 - число циклов изгиба до момента разрушения одной проволоки в кабеле;

n_{max} число циклов изгиба до момента разрушения всех проволок в максимально разрушенной жиле.

Обработка экспериментальных данных методами математической статистики [120] показала, что для описания закономерностей развития механизма разрушения на участках кривой II и III (рис. 4.2) наиболее приемлемой моделью является степенная функция вида:

$$n = c p^t \quad (4.1)$$

Кривая работоспособности на участке III удовлетворительно аппроксимируется линейной функцией вида:

$$n = a p + b \quad (4.2)$$

Выбор границ интервала варьирования числа циклов нагружения n при испытаниях должен обеспечивать попадание экспериментальных точек на соответствующие модели (4.1) и (4.2) участки кривой работоспособности, то есть определяется границами изменения величины p

Для модели (4.1) интервал варьирования должен задаваться таким образом, чтобы величина p попадала в интервал с границами $p \in [0,03 p^*; p^*]$, для модели (2) - $p \in [0,2 p^*; p]$ Определение значений n , требуемых для получения экспериментальных точек, соответствующих этим условиям, проводилось методом последовательных ориентированных оценок, который является наиболее при-

емлемым и надежным в условиях отсутствия простых и надежных методов неразрушающего контроля степени разрушения проволок в жилах в процессе испытаний без разборки образцов. Этот метод дает большой процент неудач, до 30-50 % при определении требуемого числа циклов для первого образца. Проблема "первого образца" может быть решена разработкой метода слежения за падением динамической жесткости в процессе испытаний с ростом числа циклов на основе осцилографирования концевых моментов по концам образца при постоянных углах их поворотов. Так как процесс разрушения проволок в жилах приводит к падению жесткости, то задача сводится к нахождению связи падения изгибающего момента в процентах к первоначальному с ростом числа разрушенных проволок в жилах.

Исследования показали, что при определении значения $N_{кр}$ по уравнению эмпирической кривой регрессии модели (4.1) для того, чтобы относительная ошибка такой оценки работоспособности с вероятностью $P = 0,95$ не превышала 5-15 % достаточно испытать 15-20 образцов кабеля в идентичных условиях с равномерным варьированием числа циклов нагружения внутри соответствующих этой модели границ.

При определении значения $N_{кр}$ по уравнению модели (4.2) для того, чтобы ошибка такой оценки с вероятностью $P = 0,95$ не превышала 15-30 % достаточно испытать 5-8 образцов с заданием числа циклов нагружения внутри интервала варьирования, соответствующего этой модели. Для исследования закономерностей развития механизма разрушения кабеля и отыскания аналитической связи их с параметрами конструкции и параметрами деформации необходимо использовать модель (4.1), так как она позволяет с достаточной для этой цели точностью оценивать характеристики теоретической кривой работоспособности.

При сравнительных испытаниях гибких кабелей по работоспособности достаточным является использование модели (4.2), что позволяет снизить полное время и стоимость испытаний примерно в 3 раза по сравнению с методикой, использующей модель (4.1).

4.5.1. Подготовка образцов

По длине гибкого кабеля, прошедшего приемосдаточные испытания, вырезается требуемое количество образцов одинаковой длины: $L = z + 2a$, где a - длина для закрепления одного конца образца в захвате, z - длина зоны деформации, равная расстоянию между захватами, выбирается равной Н, 0,5 Н, 1,5 Н, 2 Н в зависимости от выбранного для реализации в эксперименте механизма нагружения исследуемого повива токопроводящих жил с шагом скрутки Н.

На оболочку каждого образца наносится разметка концов образца длиной a и линия вдоль оси образца, связанная с ориентировкой положения токопроводящих жил в сечениях образца.

Образец вставляется в захваты и закрепляется в них с учетом требуемых условий обжатия для реализации выбранного механизма нагружения токопроводящих жил исследуемого повива. Расстояние между захватами должно быть равно z и линия ориентировки в зависимости от принятых условий испытаний должна находиться под определенным углом к плоскости изгиба образца или совпадать с ней.

4.5.2. Задание параметров циклического изгиба образца

Для моделирования при испытаниях определенных условий эксплуатации или исходя из других требований к испытаниям выбирается степень деформации изгиба образца C и коэффициент асимметрии K . Степень деформации должна задаваться по формуле: $c = r/R$ и выбираться в пределах: $I/C = (1/10 - 1/40)$, под коэффициентом асимметрии понимается отношение максимального угла поворота конца образца от горизонтального положения к минимальному $K = \theta_{\max} / \theta_{\min}$, где углы θ считаются отрицательными при изгибе образца выпуклостью вниз и положительными при его изгибе выпуклостью вверх.

По выбранной степени деформации вычисляется требуемый радиус изгиба $R = r/C$, угол изгиба $2\theta = z/R$ и угол поворота концов образца θ , (рад).

Требуемая при этом амплитуда углов поворота концов образца определяется по формуле:

$\Delta\theta = 1/2(\theta_{\max} - \theta_{\min}) = 1/2(\theta - \kappa\theta)$, а размах углов поворота равен $2\Delta\theta$.

Требуемый размах углов поворота концов образца в течение цикла устанавливается подбором соответствующей длины регулируемого кривошипа при закрепленном в захваты образце для выборки люфтов в механизмах привода и передачи. Углы поворота отсчитываются по лимбу, закрепленному на подшипниковой обойме и стрелке, установленной на захвате по оси образца.

Для задания симметричных циклов изгиба, при $K = -1$, установочным поворотом захватов относительно валов изгиба устанавливаются одинаковые углы поворота концов образца вверх и вниз относительно горизонтальной линии, соединяющей оси поворотов захватов.

Для задания циклического изгиба образца с заданным коэффициентом асимметрии K установочным поворотом захватов относительно валов изгиба устанавливается начальный угол изгиба образца:

$$\theta_H = \Delta\theta (K + 1)/(K - 1) \quad (4.3)$$

при этом: $\theta_{\max} = \theta_H + \Delta\theta$, $\theta_{\min} = \theta_H - \Delta\theta$

Расстояние между верхними сторонами параллелограммов 19 с помощью зажимов 21 устанавливаются таким образом, чтобы при изгибе образца заданной длины при заданной амплитуде углов поворотов, параллелограммы 19 отклонялись от вертикального положения в обе стороны на одинаковые углы в течение цикла.

Заданием определенных эксцентриситетов вращения захватов относительно валов изгиба возможно обеспечить неподвижность валов изгиба или неподвижность середины образца в одной точке плоскости изгиба в течение цикла.

После задания требуемого количества циклов изгиба образец вынимается из захватов и подвергается разборке.

4.5.3. Составление паспорта испытаний

В местах разрушения конструкции кабеля вычерчивается поперечное сечение с указанием: параметров деформации и числа циклов, ориентировки токопроводящих жил относительно плоскости изгиба, положения рассматриваемого сечения по длине зоны деформации, количества изломанных проволок в каждой жиле, мест и координат других разрушений: потертостей, проколов изоляции, оболочки, количества изломанных проволок в максимально разрушенной жиле.

4.5.4. Обработка экспериментальных данных

После испытаний образца при заданном числе циклов нагружения n , разборки, подсчета количества разрушенных проволок и заполнения паспорта испытаний определяется требуемое количество циклов для испытания следующего образца, таким образом, чтобы величина p попадала в требуемый для выбранной модели (4.1) или (4.2) интервал.

Для исключения грубых ошибок использовался метод браковки подозрительной пары (n, p) по сравнению с другими парами в момент получения аномального наблюдения и последующим повторным испытанием другого образца с заданием того же числа циклов.

Параметры постулируемых моделей (4.1) или (4.2) определялись с помощью метода наименьших квадратов. Для модели (4.1) параметры c и t эмпирической кривой определялись с использованием аппарата линейного регрессионного анализа, после логарифмирования уравнения (4.1) и замены переменных для приведения степенной функции к линейной.

Для проверки пригодности моделей для описания кривой работоспособности, проверялась адекватность моделей по F -критерию Фишера, проверка значимости параметров линий регрессии: c , t , и a , b проводилась по t -критерию Стьюдента [20].

В качестве оценки для дисперсии результатов испытаний использовалась дисперсия вокруг эмпирической линии регрессии.

После определения коэффициентов уравнений эмпирических линий регрессии (4.1) или (4.2) подсчитывалось по этим формулам значение $N_{кр}^i$ или определялось графически по кривым работоспособности построенных в координатах (n, p) или $(\lg n, \lg p)$ (рис. 4.2, 4.3).

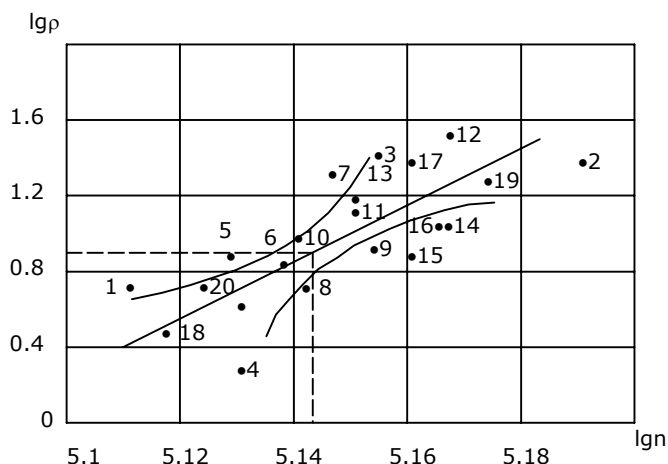


Рис.4.3. Эмпирическая линия регрессии, $\lg n = 0,063 \lg p + 5,087$, и границы 95% доверительной области для 2-го варианта.

Для оценки точности определения характеристик работоспособности по эмпирическим линиям регрессии соответствующих моделям (4.1) или (4.2) рассчитывались границы 95 % доверительной области для теоретических линий регрессии. Сравнивались значения $N_{кр}^i$, рассчитанные по уравнениям этих моделей со значениями на границах соответствующих доверительных областей и определялись абсолютные и относительные ошибки значений в сравнении с возможными фактическими значениями соответствующих теоретическим линиям регрессии.

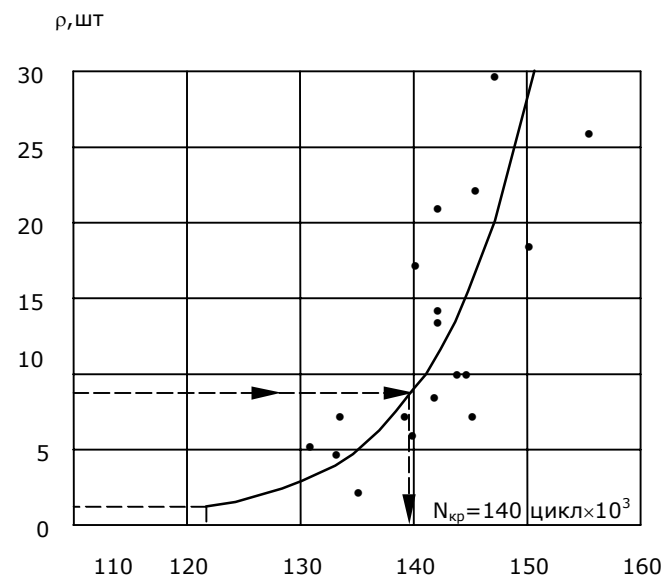


Рис. 4.4. Эмпирическая кривая работоспособности кабеля, $n = 122180 \rho^{0,063}$, для 2-го варианта.

4.6. Результаты сравнительных испытаний гибких кабелей для роботизированных комплексов на установке ЦИКЛ-2

По разработанной методике на установке ЦИКЛ-2 проведены лабораторные сравнительные испытания 13 опытных вариантов гибких кабелей для роботизированных комплексов (табл. 4.2), изготовленных в ТомНИКИ. Все варианты кабелей одного типа $КГ \times 1,5 \text{ мм}^2$ изоляция и оболочка ПВХ, с токопроводящими жилами одинаковой конструкции, содержащей 30 медных проволок в одной жиле с пучковой скруткой проволок в жилу с одинаковым шагом.

Целью испытаний являлось исследование комплексного влияния конструктивных особенностей вариантов на их работоспособность при циклическом симметричном изгибе и определение наиболее работоспособной из них.

Все варианты кабелей испытывались в эквивалентных условиях:

- 1 - при одинаковых климатических условиях, нормальной влажности и температуре 18-20 °С;
- 2 - симметричном цикле изгиба;
- 3 - с частотой циклов: 180 цикл/мин.;
- 4 - в условиях реализации циклического поперечного изгиба токопроводящих жил.

Расстояние между захватами: $z_i = H_i$; где H_i - шаг скрутки жил варианта кабеля - i . Длина образца варианта кабеля:

$L_i = H_i + 2a$, где $a = 30$ мм - длина одного захвата. Обжатие в захватах полное.

5 - степень деформации и $\zeta = r_i / R_i = const$ и равнялась $\zeta = 0,039(\frac{l}{\zeta} = 25.6)$, что соответствует $\zeta' = D_2 / d_2 \approx 11$

Минимальные радиусы изгиба образцов и амплитуда углов поворота концов образца $\beta/2$ сведена в табл. 4.1;

6 - ориентировка токопроводящих жил в сечениях образцов всех вариантов по длине зоны деформации одинаковая: две жилы в сечении $l_i = H_i / 2$ совпадают с вертикальной плоскостью изгиба образца, две другие горизонтально ориентированы относительно ее.

На каждый вариант кабеля испытывалось по 20 образцов в идентичных условиях с заданием разного числа циклов в пределах варьирования, соответствующих модели (4.1).

После статистической обработки результатов испытаний построены эмпирические кривые работоспособности в координатах p, n , где p - количество разрушенных проволок в максимально разрушенной жиле, n - количество циклов изгиба образца.

Определены значения для каждого варианта кабеля соответствующего 30 % разрушению проволок в максимально разрушенной жиле (рис. 4.3), (рис. 4.4).

Таблица 4.2
 Параметры конструкции кабелей марки КГ4 x 1,5 мм², изоляция и оболочка ПВХ, и параметры изгиба на установке ЦИКЛ-2

п/п	№ вар	Диаметр кабеля, мм	Шаг скрутки жил, Н мм	Радиус повиваг, мм	Радиус изгиба, R, мм	Угол изгиба, β град.	Конструктивные особенности
I	I	10,2	75	2,0	51,2	42	Без особенностей
2	1a	10,2	75	2,0	51,2	42	По общей скрутке смазка кремнеорганической жидкостью
3	2	11,6	67	2,5	64	30	Комбинированная оплетка из медной проволоки и лавсана по изоляции жил
4	3	10,5	75	2,0	51,2	42	По общей скрутке оплетка из медной проволоки
5	4	10,5	75	2,0	51,2	42	По общей скрутке комбинированная оплетка из медной проволоки и лавсана
6	5	12,5	75	2,0	51,2	42	Комбинированная оплетка из медной луженой проволоки и лавсана между двумя оболочками
7	6	10,5	75	2,0	51,2	42	По общей скрутке жил обмотка пленкой ПЭТ-Э
8	7	10,6	75	1,6	41	52	По общей скрутке обмотка металлизированной лентой, одна жила без изоляции
9	8	11,6	75	1,6	41	52	По общей скрутке обмотка пластификатором ПДФ с наполнителем шлифпорошком
10	8a	10,8	75	2,5	64	34	Двузлойная изоляция жил ПВХ-ПЭ
11	10	10,0	72	1,6	41	50	Одна жила без изоляции
12	11	9,5	84	2,0	51	42	Без особенностей
13	11a	9,5	75	2,0	51	47	Без особенностей

Тип отказа всех вариантов: усталостный физический разрыв критического количества проволок в токопроводящих жилах в результате: 1 - циклического изменения кривизны токопроводящих жил; 2 - суммарного влияния усилий трения и сцепления по поверхности контакта элементов в результате их циклических сдвигов. Параметры механизма циклического нагружения токопроводящих жил в сечениях вычислены по (3.4), (3.5), (3.6), (3.7) и приведены в табл. 4.3.

При сравнении вариантов кабелей с одинаковыми параметрами конструкции H_i и r_i , параметры механизма циклического нагружения токопроводящих жил во всех сечениях образца совпадают, а критическое число циклов N_{kp}^i - является функцией одного обобщенного параметра ζ - условий на поверхности контакта жил между собой и оболочкой. Для этих вариантов исследовано влияние этого параметра на работоспособность кабеля при циклическом симметричном изгибе.

При сравнении вариантов, отличающихся по параметрам конструкции H_i и r_i, N_{kp}^i - является функцией параметров $N_{kp}^i = F(\Delta, \Delta\bar{K}, \zeta, \varepsilon)$ и исследовано комплексное влияние их на работоспособность конструкции.

В процессе испытаний наблюдался разогрев образцов в середине зоны деформации до 35-40 °С.

4.6.1. Выводы и заключения по результатам испытаний

В результате испытаний установлено следующее:

1) проволоки в жилах разрушаются преимущественно в середине образца, что связано с наличием в этом сечении максимальных сдвигов элементов и максимальной кривизны оси образца и следовательно максимальной амплитуды циклических нагрузок на проволоки;

2) горизонтально ориентированные, жилы, имеющие максимальный сдвиг в сечении по середине образца и амплитуду изменения кривизны их оси меньшую на порядок амплитуды изменения кривизны оси вертикально ориенти-

рованных жил, разрушаются более интенсивно, чем последние, не сдвигающиеся в этом сечении, что связано с влиянием на интенсивность разрушения усилий трения и сцепления по всем поверхностям контакта элементов;

3) установлено, что работоспособность вариантов полностью коррелирует с величиной сдвигов, амплитудой изменения кривизны осей токопроводящих жил (табл. 4.2), зависящих от параметров конструкции, и величиной усилий выдергивания элементов из образца, которая в свою очередь, зависит от особенностей конструкции вариантов: обжатия токопроводящих жил наружными слоями, площади контакта элементов, строения поверхности контакта, свойств контактирующих материалов и других факторов, определяющих величину усилий трения и сцепления на всех уровнях, где возможны сдвиги элементов. Чем меньше величины этих характеристик в совокупности, тем выше работоспособность варианта;

4) кривые работоспособности, построенные для всех вариантов имеют вид степенной функции $n_i = c_i p^{t_i}$ и являются сопоставимыми, с коэффициентами подобия c_i и t_i , определенными в эксперименте (рис.4.4);

5) испытания подтвердили теоретический вывод о том, что в зависимости от величины усилий сцепления на разных поверхностях контакта сдвиги элементов конструкции могут реализовываться на разных уровнях: 1 на уровне контакта токопроводящей жилы с соседними элементами по изоляции жил; 2) на уровне контакта проволок с изоляцией токопроводящих жил.

По следам потертостей элементов на этих уровнях наиболее отчетливо удалось проследить реализацию сдвигов: для варианта 5, 8 только на 2 м уровне; II(I), I - одновременно на двух уровнях; 2, 8 а, 7 - только на I м уровне;

6) испытания вариантов выявили влияние на работоспособность факторов, связанных с несовершенством технологического процесса изготовления вариантов, не позволяющие получить конструкции с требуемыми параметрами и характеристиками по поверхностям контакта элементов. Так, например, для варианта 8 а, для всех испытываемых образцов одна из токопроводящих жил не имела возможности свободно сдвигаться внутри трубки из полиэтилена.

Это нашло свое отражение в конечной работоспособности конструкции, оказавшейся в два раза меньше, чем у 2-ого варианта, каждая токопроводящая жила которого заключе-

Таблица 4.3
 Параметры деформации токопроводящих жил в сечении $l = H/2$
 кабелей

№ вар.	Отно сит. сдвиг жил, δ мм $l/2$	Амплитуда изменения кривизны ТПЖ, мм		Начальная кривизна жил, $K_{ЖН}$ мм	Амплитуда угла поворота плоскости деф. горизонт жил, град. ϵ	Количество циклов до разрушения 30% проволок в максимально разрушенной жиле – работоспособность кабелей - $N_{кр}^i$
		горизонт. жил, $\Delta K^Г$	вертик. жил, $\Delta K^В$			
1	0,92	0,005	0,019	0,014	54,4	17000
1a	0,92	0,005	0,019	0,021	54,6	35000
2	0,81	0,003	0,016	0,014	36,6	140000
3	0,92	0,005	0,019	0,014	54,4	40000
4	0,92	0,005	0,019	0,014	54,4	16000
5	0,92	0,005	0,019	0,014	54,4	17000
6	0,92	0,005	0,019	0,014	54,4	16000
7	0,92	0,008	0,024	0,011	65,7	75000
8	0,92	0,008	0,024	0,011	65,7	17000
8a	0,91	0,003	0,016	0,017	42,6	70000
10	0,72	0,007	0,024	0,012	63,8	90000
11	1,03	0,005	0,019	0,011	54,4	32000
11a	0,92	0,005	0,019	0,014	60,6	15000

на в индивидуальной комбинированный экран из медной проволоки и лавсана;

7) работоспособность конструкции определяется работоспособностью комплектующей токопроводящей жилы. Усилия взаимодействия ТПЖ по поверхностям контакта вследствие сдвигов только понижает их работоспособность, проявляющуюся в идентичных условиях их деформаций при условии полного отсутствия усилий сцепления и трения по поверхностям контакта с другими элементами. Так как полностью влияние усилий взаимодействия элементов в реальной конструкции не удастся устранить, для дальнейшего повышения работоспособности необходимо иметь токопроводящую жилу соответствующей работоспособности.

Для обеспечения этого, параметры конструкции токопроводящей жилы, необходимо изменить в следующих направлениях:

1) увеличить стойкость при изгибе проволок за счет их отжига и уменьшения диаметра;

2) упорядочить и облегчить работу проволок путем применения стренговой или правильной их скрутки при уменьшении и согласовании шага скрутки проволок и стренг в жилу с шагом скрутки токопроводящих жил таким образом, чтобы эти шаги были кратными;

8) при использовании токопроводящих жил определенной конструкции и стойкости к изгибу для повышения работоспособности конструкции кабеля в целом в данных условиях деформирования необходимыми направлениями регулирования параметров конструкции являются:

- уменьшение величины абсолютных сдвигов элементов путем уменьшения шага скрутки токопроводящих жил в повив и уменьшения шага скрутки токопроводящих жил в повив и уменьшения радиуса повива, в результате последнего уменьшится и амплитуда изменения кривизны осей токопроводящих жил;

- уменьшение величины относительных сдвигов токопроводящих жил между собой по поверхностям контакта, за счет увеличения числа токопроводящих жил в повиве, путем дробления каждой жилы на несколько жил;

- оболочка или слои поверх повива должны обеспечивать постоянство геометрических параметров спиральной формы ТПЖ, для исключения дополнительных деформаций их осей;

- для уменьшения влияния на напряженное состояние проволок в жилах усилий трения и сцепления по поверхностям контакта ТПЖ с соседними элементами, по всем поверхностям контакта каждой ТПЖ должна быть обеспечена максимальная их подвижность.

Литература к главам 3,4

1. Акерберг В.Т. Метод ускоренной оценки надежности проволочной брони грузонесущих кабелей.- Э.П., Сер. Кабельная техника, 1976, вып. 3 (133), С.9-11.

2. Акерберг В.Т., Аристов А.И., Голуб Б.Н. Ускоренная оценка долговечности кабелей с проволочной броней, ра-

ботающих при перемотках. - Э.П., Сер. Кабельная техника, 1982, вып. 5 (207), С. 3-5.

3. *Амбарцумян С.А.* Общая теория анизотропии оболочек.- М.: Наука, 1974. - 324 С.

4. *Андреева Л.Е.* Упругие элементы приборов.- М.: Машгиз, 1962, 455 С.

5. *Анисимов А.А., Ларин Ю.Т., Муравьев В.И., Орлова Т.И.* Ленточные кабели и материалы для их изготовления.- Э.П., Сер. Кабельная техника, 1972, вып. 6 (88), С.18.

6. *Айнбиндер СБ., Тюнина Э.А.* Введение в теорию трения полимеров. - Рига, Зинатне, 1978, 224 С.

7. *Багелис Д.С., Белорусов Н.И., Саакян А.Е.* Электрические кабели, провода и шнуры. - М.: Энергия, 1971, 704 С.

8. *Бекерский В.И.* Применение канатов на судах и в портах.-М.: Транспорт, 1986, 152 С.

9. *Белоус П.А.* Сравнительная пригодность теорий течения и старения для оценки релаксации напряжений в стальных канатах.-Одесса, 1985, рукопись деп. ВИНТИ, 730-УК-85 Деп., 36 С.

10. *Берт И.* Механические испытания композитов. В кн. Ком~ позитные материалы. Под ред. Браутман Л., Крок Р., т.8, ч.2. Анализ и проектирование конструкций. Ред. Чамис К.-"Мир", 1978, С.81-138.

11. *Бидерман В.Л., Шитиков В.Н.* Растяжение и кручение ленточных цилиндрических пружин при больших перемещениях. Изв.

АН СССР, М.Т.Т., № I, 1972, С.76.

12. *Бикбаев Р.С.* Расчет на прочность при растяжении элементов многопроволочных жил и многожильных кабелей.- Э.П., Сер. Кабельная техника, 1974, вып. 7 (ИЗ), С.5 .

13. *Бирюкова И.А.* О деформациях внутреннего проводника в кабелях с пластмассовой изоляцией под действием внутренних напряжений. - Э.П., Сер. Кабельная техника, 1969, вып.57, С.8.

14. *Биргер И.А.* Остаточные напряжения.- М., 1963, 232 С.

15. *Благонадежин В.Л., Воронцов А.Н., Баранов А.В.* Метод удаляемых элементов для экспериментального исследования остаточных напряжений в оболочках вращения из композитных материалов. Механика полимеров, 1978, №6, С.III2-III5.

16. *Блехман И.И.* Метод прямого разделения движений в задачах о действии вибраций на нелинейные механические системы.-Изв. АН СССР , Сер. Механика твердого тела, № 6, 1976, С.13-17.

17. *Боев М.А., Брагинский Р.П.* Методика определения долговечности и сохраняемости кабелей и проводов.- Э.П. Общеотраслевые вопросы, 1982, № 10 (521), С.10-12.

18. *Болотин В.В., Гольденблат И.И., Смирнов А.Ф.* Строительная механика. Современное состояние и перспективы развития. Изд. лит. по стр-ву.- М., 1972, 192 С.

19. *Болотин В.В., Воронцов А.Н., Мурзаханов Р.Х.* Анализ технологических напряжений в намоточных изделиях из композитных материалов на протяжении всего процесса изготовления.- Механика композитных материалов, № 3, 1980, С.500-505.

20. *Брагинский Р.П., Моисеев Ю.В.* О роли физических процессов при старении полиэтилена,- ДАН СССР, 1984, т.271, № 5.

21. *Брагинский Р.П., Дашевская С.С, Пешков И.Б.* Прогнозирование долговечности проводов и кабелей.- Электротехника, 1982, № 2, С.53-56.

22. *Ванюков В.И., Раров А.Н., Фролов В.Г., Якушин Ю.В.* Исследование сил натяжения, возникающих в токопроводящих жилах кабелей управления.- Э.П., Сер. Кабельная техника, 1980, вып.6 (184), С.2-4.

23. *Венковский М.Н., Стратенков Л.И., Тюрин А.В.* О рациональном конструировании токопроводящих жил силовых кабелей,- Э.П., Сер.Кабельная техника, 1978, вып.1 (131), С.4-6.

24. *Вильган В.Н., Коршунов В.Н., Ляхов Ю.В., Пекел Е.С.,* Механические характеристики гибких экранированных проводов.-Э.П., Сер. Кабельная техника, 1976, вып. 7, С.I.

25. *Ву Э.* Феноменологические критерии разрушения анизотропных тел.- В кн.: Композиционные материалы.Под ред. Браутман Л., Крок Р., Т.2. Механика композиционных материалов. Ред. Сендецкий Дне.- М.: Мир, 1978, С.401-491.

26. *Ганусевич Е.К.* Оценка долговечности гибких кабелей.-- Э.П., Сер. Кабельная техника, 1972, вып.3 (83), С.22-23.

27. Ганусевич Е.К. Методика расчета интеграла разрушения проволочных конструкций.-Электротехника, М.:Энергоатомиздат, 1983, № 7, С.74-75.

28. Ганусевич Е.К., Медведский Э.М. Прибор для определения жесткости гибких кабелей. - Э.П., Сер. Кабельная техника, 1968, вып.52, С.13.

29. Ганусевич Е.К., Реут Л.В. Статические и усталостные свойства проволоки из цветных металлов.- Труды ТомНИН КП, Т.1, М.: Энергия, 1969, 339 С.

30. Городецкий С.С., Лакерпик Р.М. Испытания кабелей и проводов. - М.: Энергия, 1971, 272 С.1

31. Глушко М.Ф. Стальные подъемные канаты.- Киев, Техника, 1966, 136 С.

32. Глушко М.Ф., Чурюкин В.А. Статистическое моделирование упруго-пластического деформирования и разрушения канатов,- Челябинск, 1985, рук. депонирована в ВИНТИ, № 7276-85 деп., 20 С.

33. Глушко М.Ф., Малиновский В.А. Дополнительные усилия в элементах стального каната при набегании на блок,- Магнитогорск, 1984, 2796-1984, Деп. в ВИНТИ, 31 С.

34. Глушко М.Ф., Малиновский В.А., Шигарина Л.И., Канонен-ко Л.А. Нелинейные уравнения равновесия прямого каната.- Прикл. механика, 1979, № 12, С.127-129.

35. Гончаров В.Н., Коваленко Б.И., Кучеров Л.М. и др. Устройство для передачи коммуникаций от неподвижного к перемещающемуся объекту. Авт. свид. № 242997, Бюлл, № 273, опубл. 5.06.6Э.

36. ГОСТ 13497-77. Кабели силовые гибкие на напряжение 660 В. Технические условия.

37. ГОСТ 10694-78. Кабели шахтные гибкие экранированные марки ГРШЭ.

38. ГОСТ I2I82.0-80-I2I482.8-80. Кабели, провода, шнуры. Методы проверки стойкости к механическим воздействиям.

39. ГОСТ 16962-71. Изделия электронной техники и электротехники. Механические и климатические воздействия. Требования и методы испытаний.

40. ГОСТ 27.002-83. Надежность в технике. Термины и определения.

41. ГОСТ 269-62. Определение прочности связи резины с металлом.

42. ГОСТ 12182.1-ГОСТ I2I82.8-7I. Методы проверки стойкости к механическим воздействиям кабеля и проволок для подвижных электроустановок.

43. Гузь А.Н. К теории композитных материалов с начальными напряжениями.- В сб. "Механика деформируемых тел и конструкций", М.: Машиностроение, 1975, С.140-148.

44. Деранже А.М., Кротов В.П., Повеличенко А.П. Определение степени неуравновешенности кабелей для геофизических исследований. Э.П., Сер. Кабельная техника, вып.5 (I7D, 1979, С.4-6.

45. Деранже А.М., Повеличенко А.П. Определение допустимого износа грузонесущих кабелей.- Электротехника, Энергоатомиздат, 1984, № 12, С.32-34.

46. Деранже А.М., Кротов В.П., Повеличенко А.П., Рясцов Ю.А. Расчет натяжения грузонесущих кабелей для геофизических исследований.- Э.П., Сер. Кабельная техника, 1976, вып.5(135\С.3-6.

47. Деранже А.М., Повеличенко А.П. Условия работоспособности несущей части грузонесущих кабелей.- М.: Электротехника, 1985, № I, С.47-50.

48. Динник А.Н. Новости по подъемным машинам. - В кн.: Статьи по горному делу. М.: Углетехиздат, 1957.

49. Ефремов И.Н., Мамаев Л.М., Раров В.Н., Фролов В.Г. Расчет механических напряжений в кабелях, покрытых упругими оболочками. - Э.П., Сер. Кабельная техника, 1960, вып.7 (185), С.2-3.

50. Ефремов И.Н., Мамаев М.М., Ропай В.А., Фролов В.Г. Расчет конструкций растягивающихся кабелей.- Э.П., Сер. Кабельная техника, 1979, вып. 8 (174), С.6-7.

51. Золотарев И.О. Исследование кручения канатов при растяжении.- Исследования по строительной механике и строительным конструкциям. Челябинск, 1985, I07-III, РЖ, 16, Механика, № 8, 1986.

52. Ивановский В.М., Мостовой О.Г.- К вопросу о кручении каната-кабеля. Инст-т геотехн. механики, АН СССР, Днепропетровск, 1985, 8 с. Деп. 29.05.85, № 3740-85. Деп. в ВИНТИ.

53. Кабели для башенных кранов,- Э.П., Сер. 7, Кабельная техника, 1974, вып. 10 (116), С.21.

54. Кабели шахтные для бурильного инструмента,- Э.П., Сер. Кабельная техника, 1974, вып. 20 (116), С.21.

55. Кабели для ручного электроинструмента.- Э.П., Сер. Кабельная техника, 1978, вып. I (155), С.6.

56. *Калиниченко П.М., Козовый СИ.* Методика определения параметров вторичной деформации проволок при свивке нераскручи-вающихся спиральных канатов.- Стальные канаты, вып. 9, Техника, 1972, С.150-153.

57. *Караваев Ю.А.* Определение усилий, необходимых для изгиба и последующего выпрямления силового кабеля.- Э.П., Сер, Кабельная техника, 1976, вып.3(133), С.1-5.

58. *Качанов Л.М.* Основы механики разрушения.-М.: Наука, 1974, 312 С.

59. *Карпинос Д.М., Тучинский М.И., Вишняков Л.Р.* Новые композиционные материалы.-Киев, Виша школа, 1977, 312 С.

60. *Кевролева К.М., Иванишинов П., Олеар М.Г., Таразано-ва Т.П.* Новые конструкции гибких кабелей управления. Труды ТомНИИ КП, вып. I, М.: Энергия, 1960, С.120-126.

61. *Качаев В.П., Махутов Н.А., Гусенков А.П.* Расчеты деталей машин и конструкций на прочность и долговечность.- Справочник. М.: Машиностроение, 1985, 224 С.

62. *Ковешников М.П.* Технический уровень отечественных кабельных изделий бытового назначения, пути и перспективы его повышения. Труды ТомНИИ КП, вып. I, М.: Энергия, 1969, С.95-112.

63. Композиционные материалы. Разрушение и усталость.-М.: Мир, 1978, 483 С.

64. *Коффин Л.Ф.* Циклические деформации и усталость металлов.- Пер. с англ.- М.: Изд-во иностр.лит., 1963, С.257-272.

65. *Крагельский И.В., Добычин М.Н., Камбалов В.С.* Основы расчетов на трение и износ- М.: Машиностроение, 1977, 257 С.

66. *Кранифелд Л.И., Рязанов И.Б.* Теория, расчет и конструирование кабелей и проводов.- М.: Высшая школа, 1972, 384 С.

67. *Кремнез А.С., Рязанов И.Б.* Расчет механических напряжений и деформаций в оптических волокнах, вызванных внешними воздействиями.- Э.П., Сер. Кабельная техника, 1982, вып.2 (204), С.7-10.

68. *Лавендел Э.Э.* Расчет резинотехнических изделий.- М.: Машиностроение, 1976, 232 С.

69. *Ларин Ю.Т., Лисицын СБ., Семенов Н.А., Сучков В.Ф.* Деформация при изгибе осесимметричного оптического кабеля с закрепленными в демпфере световодами.-Сб. науч.тр. Исследование кабельных изделий и технология их производства. Новые материалы для изоляции проводов и кабелей.- М.: Энергоатомиздат, 1984, С.35-39.

70. *Лепетов В.А., Юрьев Л.Н.* Расчеты и конструирование резиновых изделий. - Л.: Химия, 1977, 408 С.

71. *Лехницкий С.Г.* Теория упругости анизотропного тела.- М.: Наука, 1977, 4Г6 С.

72. *Максак В.И.* Предварительное смещение и жесткость механического контакта,- М.: Наука, 1975, 60 С.

73. *Мамаев Л.М., Ропай В.А., Фролов В.Г., Яшенко В.П.* Продольная жесткость растягивающихся кабелей. - Э.П., Кабельная техника, 1979, вып. 9 (175), С.1-2.

74. *Махутов Н.А.* Деформационные критерии разрушения и расчет конструкций на прочность.- М.: Машиностроение, 1981, 272 С.

75. *Месенжик Я.З.* Проблемы увеличения срока службы и улучшения электрических параметров передачи грузонесущих геофизических кабелей,- Труды ВНИИ КП, 198Г, вып. 23, С.99-ИЗ.

76. *Махутов Н.А., Бурак М.И., Гаденин М.М. и др.* Механика малоциклового разрушения. - М.: Наука, 1986, 88 С.

77. *Мокряк С.Я.* Анализ напряженного состояния спирально-анизотропных конструкций при растяжении.- В сб. Вопросы механики и прикладной математики. Томск, изд-во Томск, ун-та, 198I,С.17-2С

78. *Мокряк С.Я.* Исследование напряженно-деформированного состояния спирально-анизотропных стержней. - Автореф. дис. канд. техн. наук. Рига, 1981, 19 С.

79. *Москвитин Б.В.* Циклические нагружения элементов конструкций.- М.: Наука, Главная редакция физико-математ.лит-ры, 1981, 344 С.

80. *Мусалимов В.М., Соханев Б.В., Дворников В.А.* Некоторые вопросы механики кабельных конструкций,- В кн.: Исследования по строительным конструкциям и фундаментам. Изд. ТГУ, Томск, 1979, С.58-66.

81. Мусалимов В.М., Соханев Б.В., Мокряк С.Я. Элементы механики кабельных конструкций.-Томск:Изд-во Томск.ун-та, 1981,120 С

82. Мусалимов В.М., Соханев Б.В. Механические испытания гибких кабелей.-Томск:Изд-во Томск, ун-та, 1984, 63 С.

83. Шиянов В.Д., Соханев Б.В., Мусалимов М.М., Соханев М.Б. Методы и устройства оценки работоспособности гибких кабелей. Тезисы докладов. УП национальная научно-техническая конференция "Элизот-кабель'68": НРБ, Варна, 1988.- С.104-106.

84. Мусалимов В.М., Мокряк С.Я., Соханев Б.В., Шиянов В.Д. Определение упругих характеристик гибких кабелей на основе модели спирально-анизотропного тела.- Механика композиционных материалов. 1984, № I, С.136-141.

85. Мусалимов В.М., Соханев Б.В., Шиянов В.Д. Устройство для испытания гибких образцов на усталость. - А.С. (СССР) № 1278671, опубл. в Ш., 1986, № 46.

86. Мусалимов В.М., Соханев Б.В. Исследование конструкционного демпфирования в кабелях.- Э.П., 1984, вып.4 (230), С.13-14.

87. Мусалимов В.М., Смолина И.Ю., Швецов М.А. Некорректные задачи определения упругих характеристик тел с криволинейной анизотропией. - 1984, Тбилиси, П Всесоюзн. конференция по теории упругости. Тезисы докладов, С.198-199.

88. Мухелишвили Н.И. Некоторые основные задачи математической теории упругости. - М.: Наука, 1966, 708 С.

89. Надежность кабелей и проводов для радиоэлектронной аппаратуры. Под ред. Л.И.Кранихфельда и И.Б.Пешкова. - М.: Энергоиздат, 1982, 200 С.

90. Нехтман А.А. Расчет судовых кабелей. - Э.П., Сер. Кабельная техника, 1974, вып. 5 (III), С.3.

91. Нехтман А.А. Расчет числа проволок в пряже оплетки герметизированных кабелей,- Э.П., Сер. Кабельная техника, 1976, вып. 2 (132), С.1.

92. Нехтман А.А. Определение допустимого радиуса изгиба герметизированного кабеля.- Э.П., Сер. Кабельная техника, 1978, вып. 3 (157), С.1.

93. Новожилов В.В., Рыбакина О.Г. О перспективах построения критерия прочности при сложном нагружении.-

Докл. на Ш совещании по механическим вопросам усталости.- М.: АН СССР, 1966.

94. Отчет о НИР. Исследование напряженного состояния многожильных кабелей в условиях эксплуатации. Днепро-дзержинск, Индустриальный институт, 1981, № гос. ре-гистр. 750150030.

95. Пешков И.Б. Новые направления в разработке методов определения ресурса кабелей и проводов.- Электричество. Энерго-атомиздат, 1985, 24, С.8-Ю.

96. Пономарев С.Д. Расчет и конструкция витых пружин.-М.: ОНТИ, 1978, 350 С.

97. Пономарев С.Д., Андреева Л.Е. Расчет упругих элементов машин и приборов. - П.: Машиностроение, 1980, 326 С.

98. Попов Е.П. Теория и расчет гибких упругих стержней.-М.: Наука, Гл. ред. физ.-мат.лит., 1986, 296 С.

99. Попов Е.П. Методы проектирования витых пружин с криволинейной характеристикой. - В сб. Динамика и прочность пружин.-М.: Изд. АН СССР, 1950, С.129-187.

100. Прочность, устойчивость, колебания. Под общ.ред. А.И.Биргера и Я.Г.Пановко. Справочник в 3-х томах.- М.: Машиностроение, 1968.

101. Публикация МЭК № 540.

102. Работнов Ю.Н. Элементы наследственной механики твердых тел. - М.: Наука, 1977, 180 С.

103. РД 16.009-83. Кабели силовые гибкие на напряжение 660 В. Методика прогнозирования срока службы по результатам ускоренных испытаний на изгиб.

104. Реут Л.З. Исследование циклической прочности жил при кручении сложных конструкций. - Труды ТомНИИКП, вып.1,-М.: Энергия, 1968, 317 С.

105. Реут Л.З. Некоторые вопросы теории скрутки гибких кабелей. Труды ТомНИИКП, вып. 2.-М.: Энергия, 1969, С.5-25.

106. Реут Л.З. Влияние шагов скрутки жил на их циклическую прочность при кручении кабеля. Труды ТомНИИКП,- М.: Энергия,1979.

107. Ржаницын А.Р. Теория ползучести.- М.: Стройиздат, 1967, 418 С.

108. Ржаницын А.Р. Теория составных стержней строительных конструкций.-М.:Стройиздат, 1948, 192 С.

109. *Ржаницын А.Р.* Основы теории упруго-вязких моделей.-В сб. Строительная механика.- М.: Изд-во лит-ры по стр-ву, 1966, С.345-354.

110. *Ржаницын А.Р.* Теория ползучести. -М.: Стройиздат, 1967, 418 С.

111. *Рюдзи Канэкс.* Срок службы кабелей высокого напряжения.-От Дэнка дзасси, 1979, 60, № 5, С.65-69.

112. *Сергеев С.Г.* Стальные канаты.-Техника,1974,328 С.

113. *Соханев Б.В.* Исследование процесса активного упругого спиралеобразного гибкого кабеля.- Дис.канд. техн.наук. Новосибирск, СО АН СССР, 1982, 171 С.

114. *Соханев Б.В., Соханев М.Б., Мусалимов В.М.* Упруго-фрикционное взаимодействие элементов конструкции гибкого кабеля. Том. инж.-строит, ин-т.- Томск,1986, 102 С. Деп. в ВИНТИ 16.12Л № 8569-В.

115. *Соханев Б.В., Шиянов В.Д.* Параметры скрутки и механизмы разрушения. - Э.П., Изделия, материалы, технология. Отечественный производственный опыт.Экспресс-информ.,М.,1987, вып.3(15) С.11-12.

116. *Соханев Б.В., Шиянов В.Д., Соханев М.Б.* Об эквивалентности испытаний кабелей на изгиб относительно сдвигов.ТомНИЖП-Томск, 1986, 5 С. Деп. в Информэлектро, 30 октября 1986, № 560-ЭТ, 1987, № 2, 19 С.

117. *Соханев М.Б.* Работа усилий трения по поверхности контакта элементов одноповивного гибкого кабеля при деформациях изгиба. В сб. Исследования по строительной механике и строительным конструкциям, Томск, изд-во Томск, ун-та, 1989, С.120-132.

118. *Соханев Б.В., Соханев М.Б., Мусалимов В.М., Шиянов В.Д.* Устройство для испытаний гибких образцов на циклический изгиб. Решение Госкомитета СМ СССР по делам изобретений и открытий от 28.09.88 по заявке № 4334636 о выдаче авторского свидетельства на изобретение. Приор, от 28.09.87.

119. Стандарт СЭВ 2126-80. Кабели, провода и шнуры. Методы проверки стойкости к многократному перегибу.

120. *Степанов М.Н.* Статистические методы обработки результатов механических испытаний: Справочник.- М.: Машиностроение, 1985, 232 С.

121. *Сычев Л.И., Реут Л.З.* Шахтные гибкие кабели. - М.: Недра, 1971, 192 С.

122. Сэцуя Иссико, Кандзу Кимура, Мицир Ивата. Расчет срока службы кабелей.- ОМ. Дэнка дзасси. 1973, 60, № 5, С.60-64.

123. *Тернер С.* Механические испытания пластмасс. М.: Машиностроение, 1975, 176 С.

124. *Ферри Дж.* Вязкоупругие свойства полимеров.- М.: ИЛ, 1963, 107 С.

125. *Филатов В.Г.* Шахтные испытания автоматического укладчика АК-1.-"Уголь Украины", 1966, № 2, С.15.

126. *Филин А.П.* Алгоритм построения матрицы при расчете произвольных пространственных рамных с жесткими контурами систем методом сил. - В сб.: Строительная механика. М., изд-во лит. по строит., 1966, С.181-187.

127. *Филин А.П.* Расчет пространственных конструкций на прочность и жесткость. - Сб. статей. Под общ.ред. А.П.Филина, Л., Стройиздат, Ленингр. отделение, 1973, ЛИИЖТ, 258 С.

128. *Филин А.П.* Алгоритмы построения разрешающих уравнений механики стержневых систем. Филин А.П., Танайко О.Д., Чернева И.М Шварц М.А. - Под ред. А.П.Филина.- Л.: Стройиздат, Ленингр. отдела ние, 1983, 232 С.

129. *Фудзии Т., Дзако М.* Механика разрушения композитных материалов. - Пер. с японск,- М.: 1982, 232 С.

130. *Фукабори Е.* Механика разрушения резин и других высокомолекулярных материалов. - Нехон Гому Кёкайси, 1977, Т.50, № 6, С.66-79.

131. *Черепанов Г.П.* Механика разрушения композитных материалов.- М.: Наука, 1983, 296 С.

132. *Чернин И.В.* Колебания и демпфирующие свойства гибких кабелей. Автореф. дис. канд. техн.наук.- Томск: Том.политехи, ин-т, 1987, С.18.

133. *Шахназарян Э.А.* Растяжение и кручение витых проводочных систем ВПС- Докл. АН СССР, Т.286, № 6, 1986, С.1337-1340.

134. *Шахназарян Э.А., Мамаев Л.М.* К вопросу о геометрических уравнениях деформации прямого кабеля каната.- В сб. Стальные канаты, № 6, Киев, Техника, 1968, С.6-10.

135. *Шиянов В.Д.* Методика и устройства ускоренной оценки долговечности гибких кабелей. Автореф. дис.канд.техн.наук.-Томск: Том.политехи, ин-т, 1987, 16 С.

136. *Шиянов В.Д., Мусалимов В.М., Соханев Б.В.* Непрерывный контроль жесткостных характеристик как фактор оптимизации технологического процесса изготовления гибких шланговых кабелей.- В кн.: Новое технологическое оборудование, современные средства автомат, каб. пр-ва, Бердянск, 1984, С.23-29.

137. *Шиянов В.Д., Соханев Б.В., Бахмутова Л.А., Соханев М.Б., Мусалимов В.М.* Устройство для испытаний на изгиб образцов кабельных изделий. - А.С. (СССР) № 1397796, опубл. в Б.И., 1988, № 19.

138. *Эпштейн СМ.* Конструкционная вязкость и устойчивость систем сопряженных стержней под действием переменных сил. Автореф дис.канд.техн.наук.- Томск: Том.политехи, ин-т, 1987, 19 С.

139. *Bazzaro Enrico.* Note Sulproblema della determi. - nazione del modulo elastico di fune trefoli. H. Progtista industriale, 1985, №1, p.40-48.

140. *Blanarik Miroslav.* Uplur dlzky skrutuzilo kabli na zivotnost drotov jadier pri cyklicom ohybovom namahani kablov. - Elektroizol a kabl techn., 1985, 38, №1-2,105-114.

141. *Drucker D.C., Tachau H.A.* A new dezing criterion for wife rope. - Journal of Applied Mechanico, 1945, Mardi, p. a 34-a 38.

142. *Franke L.* Lebens daner vocaussage bei Betriebsbeanspruchungen mit Hilfe konstanter Ersatz - schwingbreitch. - Bainingenieur, 1986, 61, №3, s141-143, a8

143. *Gabriel K.* On the fatigue strenght of wires in spiral ropes. - Trans. ASME: J. Energy Resour Technol., 1985,107, №1, p. 107-112.

144. *Huang N. C.* Finile Extension of an Elastic strand with a Central Core. - ASME Journal Applied Mechanics, vol.12, 1978, p.852-857.

145. *Hearle J. W. S. and Konopasik M.* on unified approaches to twisted yarn Mechanics. - Appl. Roly. Sump., 1975, 27, 253-257-273.

146. *Hearle J. W. S., Grosborg P. and Bocker.* Struktural Mechanics of fibers. - Garns and Fabrics, v.1, chapter 4. Willy New York, 1969.

147. *Heid, Klays - Ditel.* Zur Bestimmung der Krafte in Litzen - drahten. - Draht, 1982,33,5,p.398-401.

148. *Hahn Gerald J., Nelson Wayne.* Graphical analysis of incomplete accelerated life test data. - Insul. Circuits, 1971, 17, № 10, p.70-84.

149. *Hueng N. E.* Finite extension of an elastic with a central core. - Journal of Applied Mechanics, 1978,December, v.45, p.852-858.

150. *Jones N.* Elastic - plastio and viscoalastic behaoior of a continuos filament yarn. - Int. J. Mech. Sci.,1974, 16,9, p. 679-678.

151. *Kelly A.* The strengthening of metal by dispersed particles - Prac. Roy. Soc.,1964, ser. a, v. 282, p. 63.

152. *Kelly A.* Interface effects and the work of fracture of a fibrous composite. - Proc. Roy. Soc., 1970, ser. A., v.319, p. 95.

153. *Kunch T., Lcech C. M.* Curvature effect on contact position of wire strends.- Int. J.Mech. Sci.,1985.

154. *Levy Robert.* Mechanical analysis of pipe tipe cable under TMB. - JEEE Transaction on Power Apparatus and Systems, 1982, v. pas-101, № 7, p. 1349-1854.

155. *Lyle R., Kirkland J. W.* An accelerated life test for evalyating pover cable insulation. JEEE Trans. Power Appar. And Syst. Discuss., 1981, 100, № 8, p. 3764-3772, p. 3773-3774.

156. *Leuches O.* Wickelbestandigkeit von PVS - unhullten Adern und Leitungen in der Kalte. - GAK 4/1981, Jahrgang 34, p. 212-218.

157. *Lanteigne J.* Theoretical estimation of the response of helically armored cables to tension, torsion and bending. - Tran-s ASME: J. Appl. Mech., 1985, 52, № 2, p.423-432.

158. *Thwaites J.J.* The elastic deformation of a rod with helical anisotropy. - Int. J. Mech. Sci., 1977, 19, 3, p.161-169.

159. *Nenson Wayne.* Analysis of accelerated life test data. Part 1. The Archenius model and graphical methods. JEEE Trans. Elec. Insulant., 1971, 6, № 4, p. 165-181.

160. *Ross E. A.* Resilient Foldable woven electrical cable and Mehod. - Jnt. Cl. H 01 b 7/06, U.S.Cl., p.174-69.

161. *Shechert D. G.* Rubber Age. 1954, v. 76, № 3, p. 416-453.

Настоящая монография отражает одно из направлений работ кафедры мехатроники, связанных с проектированием чувствительных упругих элементов приборов и оценкой их долговечности. Так, например, на основе теории спирально-анизотропных стержней были даны рекомендации по повышению чувствительности упругих подвесов магнитометров (2002-2003 г.г.). Был также определен ресурс упругих подвесов микромеханических гироскопов (2001 г.). Была развита экспериментальная база по механическим испытаниям гибких элементов конструкций, получены десятки авторских свидетельств. В 2005 г. был получен патент на установку, которую по праву можно назвать мехатронной, так как она создана на базе мехатронных технологий: она оснащена оптико-механическими датчиками, пакетом прикладных программ, позволяющим вводить в компьютер экспериментальные данные и в реальном режиме времени вести обработку этих данных. Более того, эта установка используется в учебных целях. Здесь речь идет об установке «Трибал», которая предназначена для исследования контактного фрикционного взаимодействия гибких упругих элементов конструкций. Эта установка построена силами студентов и аспирантов кафедры. Назову их имена: Бордиловский Сергей, Аникеенко Алексей, Ларичкин Михаил. Новейшее оснащение позволило уже получить нетривиальные результаты, - был, например, установлен бифуркационный характер фрикционного контактного взаимодействия гибких элементов конструкций. Эти результаты были представлены на Международном конгрессе по теоретической и прикладной механике (Варшава, Польша, 2004 г.) и Международной конференции по нелинейной динамике (Абердин, Великобритания, 2005 г.). Обстоятельный доклад о результатах был сделан на кафедре мехатроники Технического университета Ильменау (Германия) в 2004 году. Ряд фрагментов работы был доложен в ИПМаш РАН и СПбГУ ИТМО.

Темы дипломных работ, а также квалификационных работ бакалавров и магистров кафедры во многом определялись рамками направления темы монографии и направлением подготовки специалистов высшей квалификации по специальностям: динамика, прочность машин, приборов и аппаратуры; механика деформируемого твердого тела. В том, что кафедра мехатроники ведет подготовку специалистов и по данному направлению, нет ничего противоестественного. Ведь история кафедры начиналась с механиков.

Первое упоминание о прародительнице кафедры МТ содержится в приказе № 18 от 03.10.1930 г. по Учебному комбинату точной механики и оптики: доцент Замыцкий Н.Н. назначен с 1.10.1930г. зав. кафедрой «Детали машин» института точной механики и оптики. Сведения о зав. кафедрой деталей машин Замыцком Николае Николаевиче (1890-1953) весьма скудны. Он окончил Петроградский технологический институт имени Императора Николая I со званием инженера-технолога в 1917 г. Преподавал в Ленинградском индустриальном техникуме и Техникуме точной механики и оптики (1926-1930). В ЛИТМО Николай Николаевич заведует кафедрой деталей машин (1930-1943). Согласно приказу № 12 от 15.02.1931 г. по Учебному комбинату ТМиО в связи с реорганизацией института объявлен новый штат преподавателей: Н.Н. Замыцкий назначен и.о. профессора кафедры сопротивления материалов и деталей машин. Даты объединения кафедр установить не удалось, однако в 1932/1933 уч. году на кафедре

работали преподаватели Танский А.В. и Зильберман В.Л. Объединение кафедры деталей машин и кафедры сопротивления материалов было недолговечным. Согласно приказу № 96 от 01.07.1934 г. кафедра сопротивления материалов и деталей машин снова разделяется на две. При этом зав. кафедрой сопротивления материалов назначен проф. Ягн Ю.И. (1895-1977), а и.о. зав. кафедрой деталей машин проф. Замыцкий Н.Н. Эта информация представляется вдвойне важной. Во-первых, среди первых основателей оказывается крупный специалист в области сопротивления материалов и строительной механики Ю.И. Ягн, известный многочисленными научными трудами и многолетней плодотворной учебно-педагогической работой. Ю.И. Ягн был автором ряда изобретений, касающихся методов испытания материалов, связанных с изменением объема без изменения формы в процессе деформации. Во-вторых, что гораздо важнее, в процессе слияния и разделения кафедр, в 30-х годах уже была в нашем институте кафедра, занимавшаяся деталями и узлами машин в тесной связи с проблемами прочности, теориями и критериями разрушения, - именно эта исходная связь во многом привела нас к мехатронике. Итак, в начале 30-х годов мы видим первый всплеск интеграции учебных и научных дисциплин на одной кафедре.

Нельзя не упомянуть о работе в ЛИТМО крупнейшего ученого в области механики Николая Иоасафовича Колчина (1894-1975). В 1944-1945 годах он был профессором кафедры технологии приборостроения, а в 1945-1947 годах - заведующим кафедрой деталей машин. Важнейшее обстоятельство, обусловившее сильнейшее влияние Н.И. Колчина на деятельность той кафедры, что ныне является кафедрой мехатроники, заключается в том, что три заведующих кафедрой в последующие годы - Ф.Л. Литвин (1964-1977), К.И. Гуляев (1978-1988) и Б.П. Тимофеев (с 1989 по настоящее время) были учениками или сотрудниками Н.И. Колчина на кафедре ТММ ЛПИ, причем Ф.Л. Литвин был профессором кафедры, а К.И. Гуляев - заместителем заведующего, т.е. Н.И. Колчина. Н.И. Колчин оказал большое влияние на развитие механики как своими трудами, так и через своих учеников и последователей.

На роль основателя кафедры более всего подходит кандидатура Л.П. Рифтина (1902-1963). Чтобы обосновать дату, условия образования и смысл этой кафедры, ее особенности, сохраняемые и сегодня, проследим его научную и педагогическую деятельность, начиная с 30-х годов прошлого века. Научная деятельность Л.П. Рифтина начинается во Всесоюзном институте механизации и электрификации сельскохозяйственных машин (ВИМЭСХ). За время работы там (1930-1934) он опубликовал ряд работ по теории и экспериментальному исследованию сельскохозяйственных машин и механизмов. Одновременно там же начинается его педагогическая деятельность, а с 01.04.1932 он работает в ЛИТМО доцентом по кафедре теоретической и прикладной механики. В 30-х годах Л.П. Рифтин ведет курсы "Теория механизмов и машин», «Теоретическая механика». В 1934 году утвержден в ученом звании доцента по кафедре теоретической и прикладной механики, в 1940 году защитил диссертацию на соискание ученой степени к.т.н. на тему «Теория фотозатворов». Основная работа Л.П. Рифтина, начиная с 1932 года, протекает в ЛИТМО в качестве доцента - руководителя курса «Теория механизмов и машин», и.о. зав. кафедрой теоретической и прикладной механики, декана факультета точной

механики, и.о. зам. директора по научной и учебной работе (1941-1943), и.о. зав. кафедрой теории механизмов и машин (с 1949 г.).

06.03.1951 г. Л.П. Рифтин стал зав. кафедрой теории механизмов и машин и деталей машин. Именно от этой даты ранее было принято отсчитывать историю кафедры, ибо, казалось, именно в этот момент кафедра приобрела черты синтетической научной дисциплины, где выбор схем машины, прибора, устройства сопровождался не только геометрико-кинематическим, но и прочностным расчетом, т.е. обучение проектированию и конструированию происходило комплексно, хотя отдельные части – привод, механизмы, управление проектировались еще последовательно, а не параллельно, как это делается сегодня.

В 1958 году ему была присуждена ученая степень доктора технических наук. Он защитил докторскую диссертацию "Аналитическая теория коноидов", и в 1959 году Л.П. Рифтин утвержден ВАКом СССР в ученном звании профессора по кафедре теории механизмов и машин и деталей машин. Среди его трудов легко выделить три направления, соответствующие различным периодам деятельности. Первое – сельхозмашины, вязальный аппарат, льнотеребильная машина, машина для сортировки картофеля. Второе, уже сугубо ЛИТМОВское – механизмы фотозатворов. Третье связано со счетно-решающими приборами, особенно кулачковыми (в частности, коноидными) механизмами. Все это свидетельствует о широком круге научных интересов и эрудиции Л.П. Рифтина.

Л.П. Рифтин умер в 1963 году, а с 01.01.1964 г. согласно приказу № 670 от 09.12.1963 г. Литвин Ф.Л. принят на должность зав. кафедрой теории механизмов и машин и деталей машин. Дадим слово официальному документу: «Ректорат и Совет ЛИТМО поручили проф. Ф.Л. Литвину провести реорганизацию кафедры теории механизмов и деталей машин в кафедру приборостроительного типа, закладывающую основы конструкторской подготовки специалистов, выпускаемых ЛИТМО. Проф. Ф.Л. Литвин и возглавляемый им коллектив кафедры теории механизмов и деталей приборов успешно решил поставленную задачу. Создана лабораторная база с оригинальными лабораторными установками, написаны многочисленные методические пособия, разработаны и изготовлены щиты, стенды, действующие модели, прозрачные модели, отвечающие современным требованиям учебного процесса в высшей школе. Программа по курсу «Теория механизмов и детали приборов» была признана Методическим советом Министерства типовой программой по аналогичным курсам».

В сегодняшнем составе кафедры всего три человека, не прошедшие школу Ф.Л. Литвина. В.Д. Брицкий, М.А. Ноздрин, В.А. Мурашев, Б.П. Тимофеев, Е.В. Шалобаев – были аспирантами либо сотрудниками Ф.Л. Литвина (некоторые последовательно аспирантами, затем сотрудниками), а В.В. Симанков задолго до Ф.Л. Литвина работал на кафедре. У него, вообще, единственное место работы – ЛИТМО, как поступил в 1947 году учиться, так и работает до сих пор. В настоящее время это ведущий инженер, которому кафедра обязана работоспособностью лабораторных установок. Алла Михайловна Блинова пришла к Ф.Л. Литвину в качестве секретаря кафедры восемнадцатилетней девушкой, а ныне круг ее обязанностей столь широк, что далеко выходит за рамки официальной должности зав. лабораторией. С 01.04.1988 г. к заведыванию кафедрой теории механизмов и деталей приборов (ТМ и ДП) приступил профессор Тимофеев Б.П. При нем осуществилось преобразование общеинженерной кафедры в вы-

пускающую и завершилось в 1991 году преобразованием кафедры ТМ и ДП в кафедру мехатроники.

Автор монографии вошел в этот коллектив в декабре 1989 года-я прошел по конкурсу на должность профессора после 10-летнего заведования кафедрой теоретической механики Томского инженерно-строительного института. Сначала я занимался вопросами синтеза точности механических систем и расчетами на прочность, а затем круг задач расширился до решения проблемных вопросов МЭМС-техники. Сейчас это одно из перспективных направлений кафедры мехатроники – МЭМС-приборостроение. Создан международный коллектив (СПбГУ ИТМО, СПбТУ, СПбФИЗМИРАН, ТУ Ильменау) в целях разработки МЭМС-магнитометров для идентификации аномалий магнитных полей. Опыт создания подобных систем отражен в статьях, дипломных работах студентов, темах диссертационных работ аспирантов

В заключение следует сказать, что и в истории механики кабеля имеется много поучительного. Но это тема другой книги. И я еще напишу ее. А может быть ее напишет кто-нибудь из моих учеников или кто-нибудь из читателей. Ведь у автора «Механики деформируемого кабеля» всегда была поддержка тех, к кому он до сих пор испытывает теплое чувство благодарности: к С.Г. Лехницкому, И.А. Биргеру, Б.Д. Аннину, Э.Э. Лавенделу, Н.А. Махутову, Л.С. Ляховичу.

Хочу отметить, что при изложении истории кафедры мехатроники я использовал материалы, подготовленные к 70-летию юбилею ее сотрудниками и систематизированные заведующим кафедрой д.т.н. профессором Тимофеевым Б.П.