

УДК 517.3(06)

К ВОПРОСУ МАТЕМАТИЧЕСКОГО ОПИСАНИЯ НАТЯЖНЫХ УСТРОЙСТВ, ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ПРИ НАМОТКЕ ИЗДЕЛИЙ ИЗ «МОКРОГО» КОМПОЗИЦИОННОГО МАТЕРИАЛА

А. П. Микитинский

Изделия, изготавливаемые методом «мокрой» намотки из композиционного материала, нашли широкое применение в различных отраслях промышленности. При этом постоянно расширяется ассортимент наматываемых изделий, возрастают требования к их качеству. Во многом качественные характеристики будущих изделий зависят от работы системы регулирования натяжения, в свою очередь работа системы регулирования натяжения определяется используемым натяжным устройством. До настоящего времени натяжное устройство и электродвигатель к нему выбирались без учета специфических особенностей работы намоточного оборудования и наматываемого изделия. Однако, использование в намоточном оборудовании современных средств управления поставил вопрос о рациональном выборе натяжного устройства. Для этого, прежде всего, потребовалось классифицировать используемые при намотке натяжные устройства, произвести их математическое описание, а затем разработать методику выбора натяжного устройства, используемого при намотке композиционных изделий из «мокрой» ленты.

Ключевые слова: намотка изделий, «мокрая» композиционная лента, привод натяжного устройства.

Введение

Изделия, изготавливаемые из композиционных материалов методом «мокрой» намотки, нашли применение во многих отраслях: в космических аппаратах и ракетах, в авиации, в химической промышленности – благодаря своим уникальным микро-механическим характеристикам [1, 2].

Рассмотрим схематически упрощенный тракт намоточного станка, осуществляющего намотку изделий из «мокрой» композиционной ленты (рис. 1).

На шпулярник 1 устанавливаются бобины с материалом 2. Количество бобин зависит от технологического процесса и может изменяться от 6 до 1200 штук. Сухой еще материал 3 проходит через натяжные устройства 4 и на специальной гребенке 5 формируется в ровницу. Далее ровница проходит через ванночку 6 со связующим. Количество связующего контролируется специальным датчиком 7. Избыток связующего удаляется отжимными роликами 8, зазор между которыми изменяется электроприводом 9. Натяжное устройство 10 состоит из неподвижного ролика 11 и ролика 12, перемещающегося вдоль натяжного устройства при помощи электропривода 13. Таким образом, изменяется угол охвата «мокрой» лентой неподвижных роликов 11 и 12 и натяжение самой ленты. Натяжение ленты измеряется измерителем 14. Ролик 15 укладывает ленту на изделие 16 по специальной траектории. Для этого он снабжен механизмами укладки для простоты не показанными на рисунке. Изделие 16 приводится во вращение приводом 17.

Постановка задачи

До настоящего времени натяжное устройство выбиралось без учета специфических особенностей

самого натяжного устройства и геометрии наматываемого изделия. Не было достаточно полно разработано математическое описание натяжных устройств, не исследовано влияние процесса намотки на величину статического момента, возникающего на валу привода, связанного с натяжным устройством. Не определена зависимость угла охвата лентой от угла поворота исполнительного механизма или перемещения ролика этого механизма.

Вопросам выбора натяжного устройства посвящена малочисленная литература. Нам удалось найти только несколько работ на эту тему [3, 4]. Однако во всех работах отсутствует учет специфики намотки композиционных изделий, не приведены математические выражения, позволяющие рассчитать моменты, возникающие на валу привода натяжного устройства, получить передаточные функции натяжного устройства как объекта управления.

Поэтому целью настоящей работы является анализ наиболее распространенных натяжных устройств,

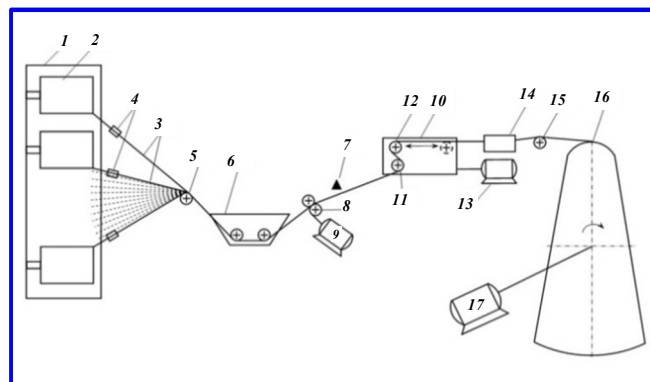


Рис. 1. Намотка изделий «мокрым» методом

используемых при намотке изделий из «мокрого» композиционного материала, разработка их математических моделей, а также формулирование рекомендаций по выбору натяжных устройств.

Теоретическая часть

При намотке изделий «мокрой» композиционной лентой все ролики тракта намотки не вращаются. Лента скользит по направляющим тракта и в соответствии с уравнением Эйлера $S = S_0 e^{f\alpha}$ возрастает натяжение. Очевидно, что натяжение, с которым лента наматывается на изделие, зависит от коэффициента трения f ленты по направляющим тракта станка, суммарного угла охвата лентой всех направляющих тракта α и натяжения S_0 , с которым лента входит в тракт намотки.

Таким образом, натяжные устройства при «мокрой» намотке могут строиться на эффектах изменения коэффициента трения и изменения угла охвата лентой направляющих тракта намотки.

Изменять коэффициент трения f в процессе намотки теоретически возможно [5], но этот процесс очень инерционный.

Наиболее просто регулировать натяжение путем изменения угла охвата лентой α направляющих тракта. Для этого в тракт намотки последовательно устанавливают ролики, при изменении положения которых в пространстве изменяется угол охвата лентой данных роликов, следовательно, натяжение ленты при ее намотке на изделие.

Существует несколько конструкций натяжных устройств, используемых в промышленности. На рис. 2 – 4 приведены конструкции наиболее часто используемых натяжных устройств [1, 3, 4].

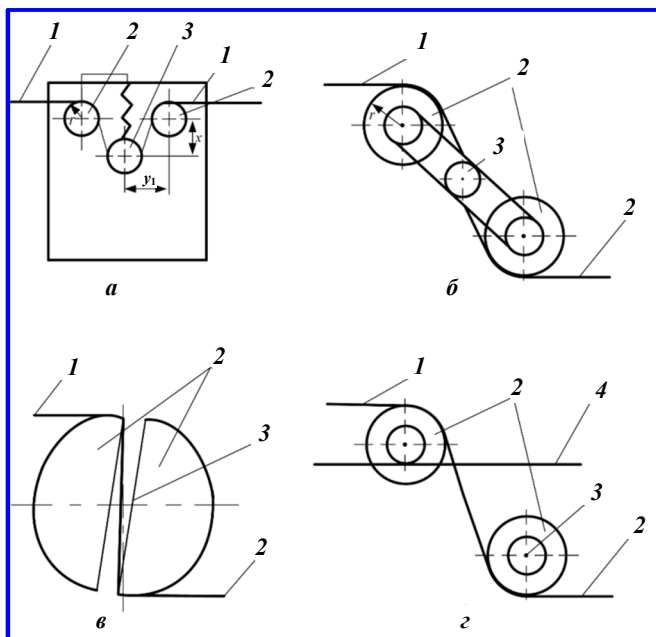


Рис. 2. Конструкции натяжных устройств для «мокрой» намотки

Мокрая лента 1 (рис. 2, а) проходит через не вращающиеся ролики 2 и 3. Причем ролики 2 неподвижные, а ролик 3 может перемещаться с помощью специального устройства вверх или вниз. При этом изменяется угол охвата лентой роликов 2, 3 и, следовательно, натяжение на выходе устройства. В конструкциях, приведенных на рис. 2, б – в, не вращающиеся ролики 2 изменяют свое положение в пространстве, вращаясь вдоль оси 3. Изменение положения роликов в пространстве изменяет угол охвата их лентой 1 и, следовательно, натяжение на выходе устройства. В натяжном устройстве, изображенном на рис. 2, г, нижний ролик 2 жестко закреплен в пространстве, а верхний ролик 2 перемещается вдоль натяжного устройства по направляющей 4.

Исполнительные устройства а и г назовем исполнительными устройствами с «линейным перемещением» ролика, а исполнительные устройства б и в – с «угловым перемещением» ролика или роликов.

Для уменьшения момента на валу двигателя, вызванного действием натяжения ленты, используются так называемая «сложная» конструкция, состоящая из двух, связанных между собой «восьмерок» (рис. 3), или натяжное устройство с комбинированным приводом (электрическим двигателем и другим приводом, например, пневматическим) (рис. 4).

На рис. 3 обозначены: 1 – упругая лента; 2 – невращающиеся ролики; 3 – центр вращения восьмерок; 4 – три связанные шестерни; 5 – ось вращения ведущей шестерни.

В данном устройстве усилия от натяжения, создаваемого упругой лентой при прохождении верхних роликов 2, вычитаются, что позволяет существенно уменьшить мощность двигателя, осуществляющего перемещение роликов.

На рис. 4 приведена конструкция натяжного устройства с «линейным перемещением» ролика и дополнительным пневматическим приводом. Здесь обозначены: 1 – упругая лента; 2, 3 – натяжные ролики; 4 – редуктор; 5 – электродвигатель; 6 – шток пневмоцилиндра; 7 – шестерня, связанная с редуктором; 8 – зубчатая рейка, по которой перемещается шестерня 7.

Сформулируем основные требования, предъявляемые к натяжным устройствам:

- обеспечение заданного диапазона создаваемых натяжений на выходе натяжного устройства, который зависит от его конструктивных особенностей;
- поддержание необходимой скорости перемещения роликов натяжного устройства (в том числе из одного крайнего положения в другое);

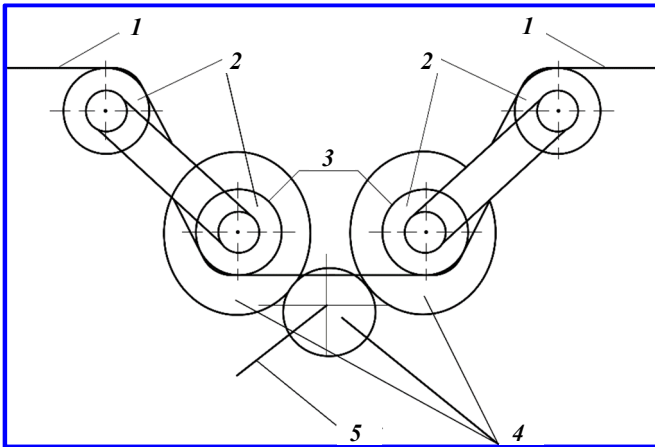


Рис. 3. Конструкция натяжного устройства, состоящего из двух связанных между собой «восьмерок» с «угловым перемещением роликов»

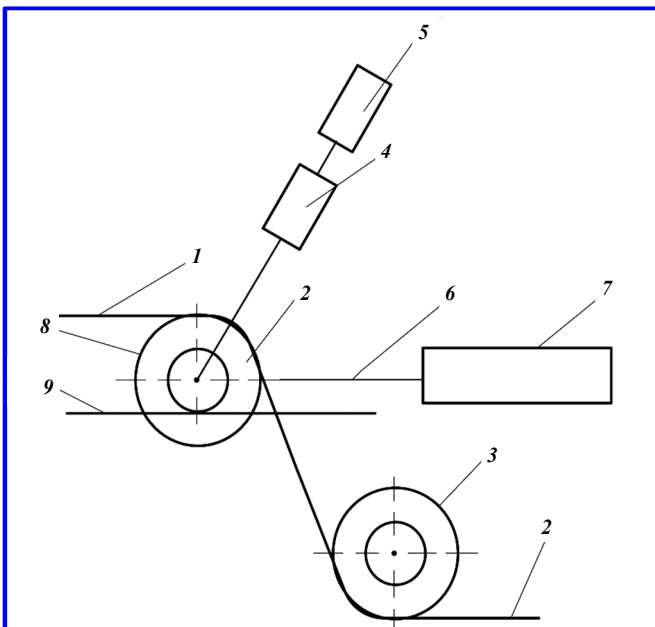


Рис. 4. Конструкция натяжного устройства с «линейным перемещением» ролика и дополнительным пневматическим приводом

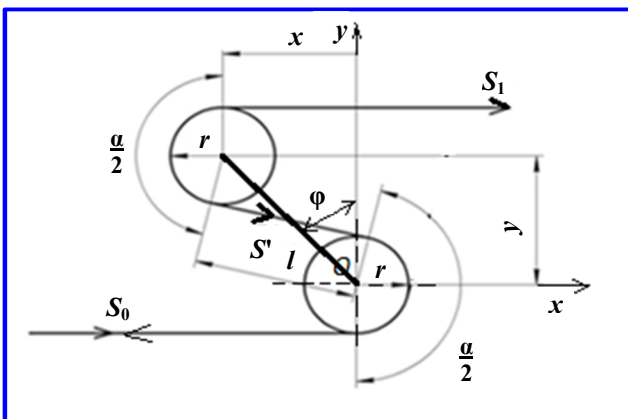


Рис. 5. Натяжное устройство с двумя роликами

- по возможности, наиболее линейная регулировочная характеристика натяжного устройства;
- простота конструкции, ее стоимость;
- минимальная мощность привода натяжного устройства.

Рассмотрим приведенные выше натяжные устройства с учетом сформулированных требований к ним. Получим зависимости угла охвата двух роликов натяжного устройства от их положения в пространстве. Схематическое расположение роликов приведено на рис. 5.

Для данного натяжного устройства аналитическое выражение, связывающее угол охвата лентой роликов α от взаимного положения роликов, имеет вид [6, 7]:

$$\frac{\alpha}{2}(x) = \arccos \left[-\frac{2ry}{x^2 + y^2} \left(1 \pm \sqrt{1 - \frac{(x^2 + y^2)(4r^2 - x^2)}{4r^2 y^2}} \right) \right], \quad (1)$$

где r – радиусы роликов; x, y – координаты положения роликов.

Знак в формуле (1) зависит от взаимного расположения роликов.

Следует рассмотреть два наиболее характерных случая изменения взаимного положения натяжных роликов.

Первый случай: ролики жестко связаны между собой и вращаются около некоторой оси O («угловое перемещение» ролика, рис. 5).

Обозначим угол между линией, соединяющей ролики и осью u через φ . Очевидно, что:

$$\left. \begin{aligned} y &= L \cos \varphi; \\ x &= L \sin \varphi. \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

Подставив выражения (2) в (1), получим:

$$\frac{\alpha}{2}(\varphi) = \begin{cases} \arccos \left\{ -\frac{2r \cos \varphi}{L} \left(1 + \sqrt{1 - \frac{4r^2 - L^2 \sin^2 \varphi}{4r^2 \cos^2 \varphi}} \right) \right\}, \varphi \leq 0; \\ \arccos \left\{ -\frac{2r \cos \varphi}{L} \left(1 - \sqrt{1 - \frac{4r^2 - L^2 \sin^2 \varphi}{4r^2 \cos^2 \varphi}} \right) \right\}, \varphi > 0. \end{cases} \quad (3)$$

Угол φ , при котором в выражении (3) происходит переход с одного уравнения на другое, равен нулю.

Линеаризуем полученное выражение:

$$\Delta \alpha(t) = k_{\text{нр}} \Delta \varphi(t), \quad (4)$$

где $k_{\alpha\varphi} = \left(\frac{\alpha}{\varphi} \right)^*$, φ^* – переменные, определяющие

положение верхнего ролика, в котором производится линеаризация.

Линеаризуем функцию $\alpha(\varphi)$ в окрестности точки $\varphi^* = 0$. Для этого воспользуемся рядом Тейлора, его двумя первыми членами:

$$\frac{\alpha}{2}(\varphi) \approx \alpha^* + \frac{(\alpha^*)'}{1!} \varphi.$$

В свою очередь, α^* равно:

$$\left. \begin{aligned} \alpha^* &= \arccos\left(-\frac{2r}{L}\right); \\ (\alpha^*)' &= \frac{1}{L}. \end{aligned} \right\}$$

Окончательно имеем:

$$\Delta\alpha(\varphi) \approx \frac{2}{L} \Delta\varphi. \tag{5}$$

На рис. 6 пунктирной линией показан график изменения угла α от угла φ . Данный график получен при $L = 0,25$ м, $r = 30$ мм.

Отметим, что такие натяжные устройства обладают практически линейной зависимостью угла охвата лентой натяжных роликов от угла поворота роликов. Пределы изменения угла охвата лентой роликов натяжного устройства составляют от 0,5 до 6 рад при изменении положения оси, соединяющей ролики от $-1,5$ до $1,5$ рад.

Рассмотрим натяжное устройство с «угловым перемещением» двух пар роликов, приведенное на рис. 3. Очевидно, что кинематически оно представляет из себя два последовательных натяжных устройства, имеющих по два ролика. Поэтому, из (3) и (5) имеем:

$$\alpha(\varphi) = \begin{cases} \arccos\left\{-\frac{2r \cos \varphi}{L} \left(1 + \sqrt{1 - \frac{4r^2 - L^2 \sin^2 \varphi}{4r^2 \cos^2 \varphi}}\right)\right\}, \varphi \leq 0; \\ \arccos\left\{-\frac{2r \cos \varphi}{L} \left(1 - \sqrt{1 - \frac{4r^2 - L^2 \sin^2 \varphi}{4r^2 \cos^2 \varphi}}\right)\right\}, \varphi > 0, \end{cases} \tag{6}$$

$$\Delta\alpha(\varphi) \approx \frac{4}{L} \Delta\varphi. \tag{7}$$

На рис. 6 сплошной линией показан график изменения угла α от угла φ . Данный график получен при $L = 0,25$ м, $r = 30$ мм.

Отметим, что такие натяжные устройства, как и рассмотренное ранее, обладают практически линейной зависимостью угла охвата лентой натяжных роликов от угла поворота роликов. Пределы изменения угла охвата лентой роликов натяжного устройства составляют от 1 до 12 рад при изменении положения оси, соединяющей ролики от $-1,5$ до $1,5$ рад.

Второй случай: натяжное устройство с «линейным перемещением» ролика (рис. 2, з; 4). В этих устройствах один ролик неподвижен, а другой перемещается по направляющим вдоль оси x . Данное натяжное устройство изображено на рис. 7.

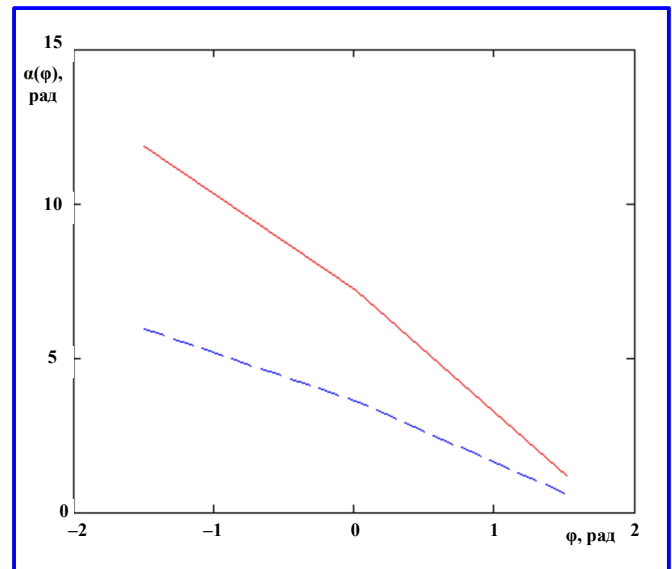


Рис. 6. График зависимости угла охвата лентой роликов натяжного устройства с «угловым перемещением» от угла поворота φ

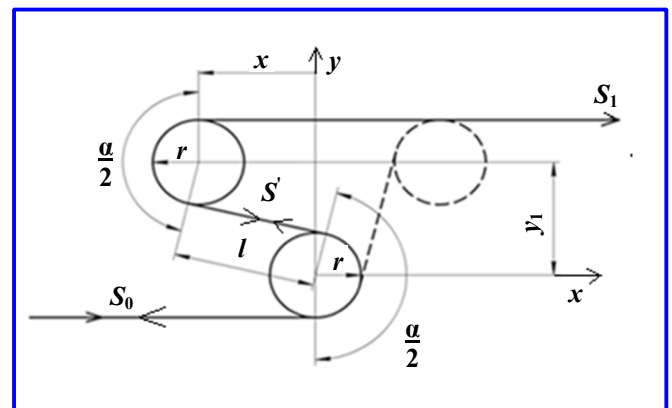


Рис. 7. Натяжное устройство с «линейным перемещением» ролика вдоль оси x

Из выражения (1) получим:

$$\frac{\alpha}{2}(x) = \begin{cases} \arccos\left\{\frac{2y_1}{x^2+y_1^2}\left(1+\sqrt{1-\frac{(x^2+y_1^2)(4r^2-x^2)}{4r^2y_1^2}}\right)\right\}, x \leq 0; \\ \arccos\left\{\frac{2y_1}{x^2+y_1^2}\left(1-\sqrt{1-\frac{(x^2+y_1^2)(4r^2-x^2)}{4r^2y_1^2}}\right)\right\}, x > 0. \end{cases} \quad (8)$$

Линеаризуем полученные выражения (8):

$$\Delta\alpha(t) = k_{\text{мх}} \Delta x(t), \quad (9)$$

где $k_{\text{мх}} = \left(\frac{\partial\alpha}{\partial x^*}\right)^*$, x^* – значение положения подвижного ролика, в котором производится линеаризация.

Линеаризуем функцию $\alpha(x)$ в окрестности точки $x^* = 0$. Для этого воспользуемся рядом Тейлора, его двумя первыми членами:

$$\frac{\alpha}{2}(x) \approx \alpha^* + \frac{(\alpha^*)'}{1!}x.$$

В свою очередь, α^* равно:

$$\left. \begin{aligned} \alpha^* &= \arccos\left(-\frac{2r}{y_1}\right); \\ (\alpha^*)' &= \frac{1}{y_1}. \end{aligned} \right\}$$

Окончательно имеем:

$$\Delta\alpha(x) \approx \frac{2}{y_1} \Delta x. \quad (10)$$

На рис. 8 показан график изменения угла α от перемещения ролика x на 0,25 м относительно неподвижного ролика. Результаты получены при $y_1 = 0,15$ м, $r = 30$ мм.

Отметим, что данное натяжное устройство имеет также практически линейную зависимость угла охвата лентой натяжных роликов от их перемещения x . Так, угол охвата натяжных роликов изменяется от 1,5 до 5,5 рад при изменении положения подвижного ролика на 0,2 м относительно нулевого положения.

Рассчитаем усилия и моменты, возникающие в натяжном устройстве на подвижном ролике.

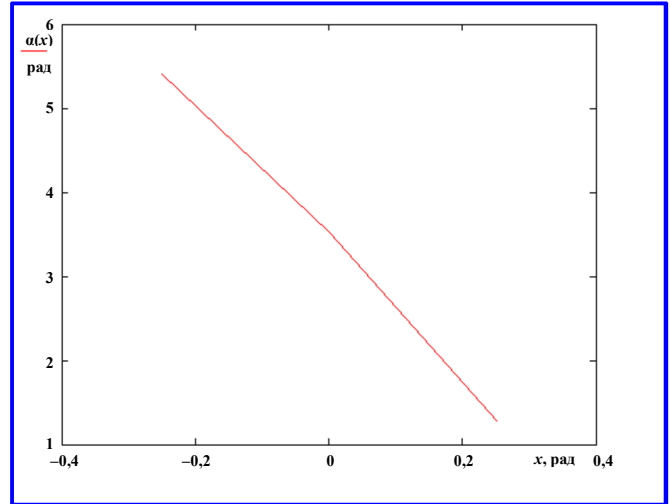


Рис. 8. График изменения угла α от перемещения ролика x

Для натяжного устройства с «угловым перемещением» ролика это усилия, которые создаются натяжениями S_1 и S' (рис. 5). Отметим, что $S' = S_0 e^{\alpha f/2}$. Тогда усилие на ролик равно:

$$\Sigma S = S_1 + S_0 e^{\alpha f/2} \cos(\pi - \alpha/2). \quad (11)$$

Момент на валу двигателя, вызванный приложенными к роликам усилиями, будет равен:

$$M_C = \frac{\Sigma S(y+r)}{k_M} + M_{\text{ТР}}, \quad (12)$$

где k_M – передаточное отношение редуктора, установленного между двигателем и роликами натяжного устройства; $M_{\text{ТР}}$ – приведенный к валу двигателя момент трения в механической части натяжного устройства.

Величина $M_{\text{ТР}}$ определяется, в основном, моментами трения, возникающими в редукторе [8, 9]. В натяжных устройствах могут использоваться два вида редукторов: червячные, самотормозящиеся и планетарные.

Из выражения (12) получим:

$$M_C = \begin{cases} \frac{[S_1 + S_0 e^{\frac{\alpha(\varphi)f}{2}} \cos(\pi - \frac{\alpha(\varphi)}{2})](L \cos \varphi + r)}{k_M} + M_{\text{ТР}}, & \text{если } \varphi < 0; \\ \frac{[S_1 - S_0 e^{\frac{\alpha(\varphi)f}{2}} \cos(\pi - \frac{\alpha(\varphi)}{2})](L \cos \varphi + r)}{k_M} + M_{\text{ТР}}, & \text{если } \varphi \geq 0. \end{cases} \quad (13)$$

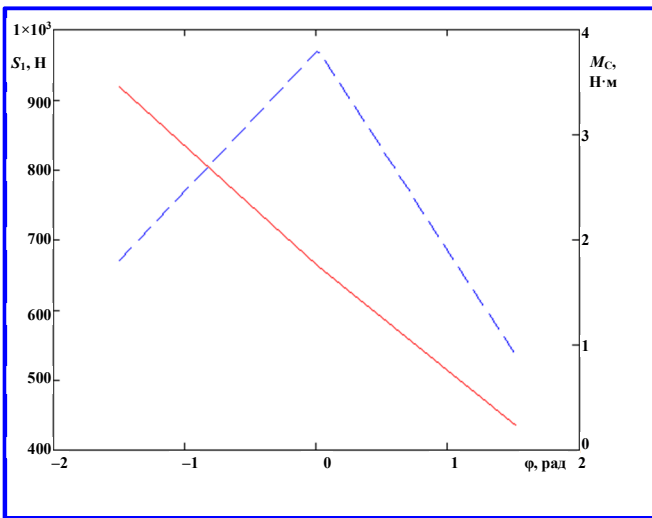


Рис. 9. График зависимости момента на валу двигателя исполнительного механизма с «угловым перемещением» и натяжения S_1 от угла поворота φ

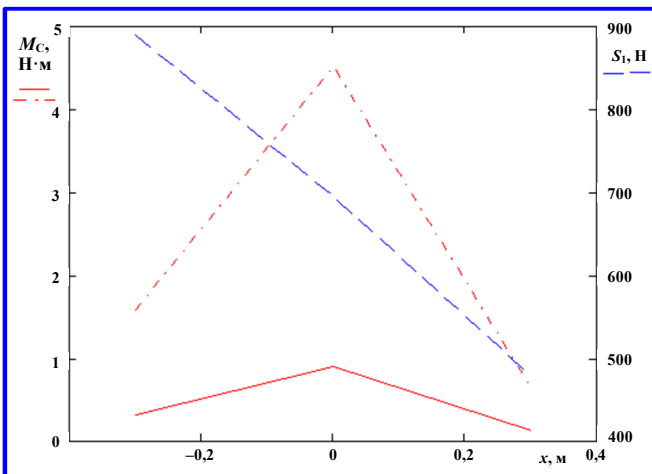


Рис. 10. Зависимость момента на валу двигателя от положения натяжного ролика и передаточного отношения редуктора $k_m = 40$ (сплошная кривая), $k_m = 8$ (штрихпунктирная кривая) и зависимость натяжения S_1 на выходе натяжного устройства (пунктирная линия)

На рис. 9 показаны графики зависимости M_C и натяжения S_1 от угла поворота φ . Графики получены при $S_0 = 400$ Н, $f = 0,14$, $k_m = 40$, $M_{TP} = 0$. На первых стадиях исследования моменты трения не учитываем.

Нелинейная зависимость момента M_C объясняется особенностью конструкции натяжного устройства. Во-первых, при перемещении роликов из одного крайнего положения в другое изменяется величина u от малого значения до максимального, а потом опять до малого значения. Во-вторых, при перемещении исполнительного механизма усилия S_1 и S' на одном участке складываются, на другом –

вычитаются. Натяжение на выходе исполнительного механизма изменяется линейно относительно его угла поворота.

Для исполнительного механизма с «линейным перемещением» ролика, изображенного на рис. 3, 4, момент на валу двигателя будет равен:

$$M_C = \frac{\sum S r_{III}}{k_m} + M_{TP}, \quad (14)$$

где r_{III} – радиус шестерни реечного передаточного механизма.

Тогда имеем:

$$M_C = \begin{cases} \frac{[S_1 + S_0 e^{\frac{f\alpha(x)}{2}} \cos(\pi - \frac{\alpha(x)}{2})] r_{III}}{k_m} + M_{TP}, & \text{если } x < 0; \\ \frac{[S_1 - S_0 e^{\frac{f\alpha(x)}{2}} \cos(\pi - \frac{\alpha(x)}{2})] r_{III}}{k_m} M_{TP}, & \text{если } x \geq 0. \end{cases} \quad (15)$$

На рис. 10 изображены зависимость момента на валу двигателя при перемещении ролика натяжного устройства на $\pm 0,2$ м относительно нейтрального положения при передаточном отношении редуктора k_m соответственно 40 (сплошная линия) и 8 (штрихпунктирная линия) и зависимость S_1 (пунктирная линия). Здесь значение r_{III} равно 0,04 м, $M_{TP} = 0$.

Отметим, что графики, изображённые на рис. 10, получены при одинаковых значениях натяжения, диаметрах роликов натяжных устройств, основных габаритных размерах, передаточном отношении редуктора. Однако, величина момента на валу двигателя натяжного устройства с «угловым перемещением» ролика существенно ниже момента, полученного для натяжного устройства с «линейным перемещением» ролика.

Диапазон же изменения натяжения на выходе обоих натяжных устройств практически одинаков.

Сравним скорости изменения углов α от частоты вращения электродвигателя Ω_d для этих двух натяжных устройств.

Для устройства с «угловым перемещением» ролика:

$$\alpha = k_1 k_m \int \Omega_d dt = k_1 k_m \Omega_d t. \quad (16)$$

Для устройства с «линейным перемещением» ролика:

$$\alpha = k_1 k_m r_{III} \int \Omega_d dt = k_1 k_m r_{III} \Omega_d t. \quad (17)$$

Сравним полученные выражения (16) и (17). При одинаковых:

- передаточном отношении редуктора k_M ;
- коэффициентах k_1 ($L = y_1$, хотя реально $L > y_1$);
- частотах вращения двигателя Ω_D .

Отметим, что уравнения (16) и (17) отличаются только тем, что в последнее в качестве множителя входит радиус шестерни $r_{ш}$, величина которого существенно меньше 1 м. Таким образом, при прочих равных условиях второе натяжное устройство в 25 раз медленнее изменяет угол охвата лентой натяжных роликов, но почти в 5 раз требует от двигателя меньшего момента на валу. При уменьшении передаточного отношения редуктора в 5 раз второе натяжное устройство становится быстро-

действующим, но и возрастает момент на валу двигателя.

Однако, с точки зрения энергетических характеристик еще более интересным является использование натяжного устройства с «угловым перемещением» роликов, изображенного на рис. 3. В этом случае усилия, возникающие в устройстве, вычитаются:

$$\Sigma S = S_1 - S_0 + S_0 e^{\frac{3f\alpha(\varphi)}{2}} \cos\left(\pi - \frac{3}{2}\alpha(\varphi)\right) - S_0 e^{\frac{f\alpha(\varphi)}{2}} \cos\left(\pi - \alpha(\varphi)/2\right). \quad (18)$$

С учетом выражения (12) получим:

$$M_C = \begin{cases} \frac{[S_1 - S_0 + S_0 e^{\frac{3f\alpha(\varphi)}{2}} \cos(\pi - \frac{3}{2}\alpha(\varphi)) - S_0 e^{\frac{f\alpha(\varphi)}{2}} \cos(\pi - \frac{\alpha(\varphi)}{2})](L \cos \varphi + r)}{k_M} + M_{ТР}, & \text{если } \varphi < 0; \\ \frac{[S_1 - S_0 + S_0 e^{\frac{3f\alpha(\varphi)}{2}} \cos(\pi - \frac{3}{2}\alpha(\varphi)) - S_0 e^{\frac{f\alpha(\varphi)}{2}} \cos(\pi - \frac{\alpha(\varphi)}{2})](L \cos \varphi + r)}{k_M} + M_{ТР}, & \text{если } \varphi \geq 0. \end{cases} \quad (19)$$

На рис. 11 показаны графики зависимости M_C и натяжения S_1 от угла поворота φ . Графики получены, как и графики, изображенные на рис. 12, при $S_0 = 400$ Н, $f = 0,14$, $k_M = 40$, $M_{ТР} = 0$.

Анализ полученных результатов приведен в табл. 1. Данные получены при $M_{ТР} = 0$, $S_0 = 400$ Н.

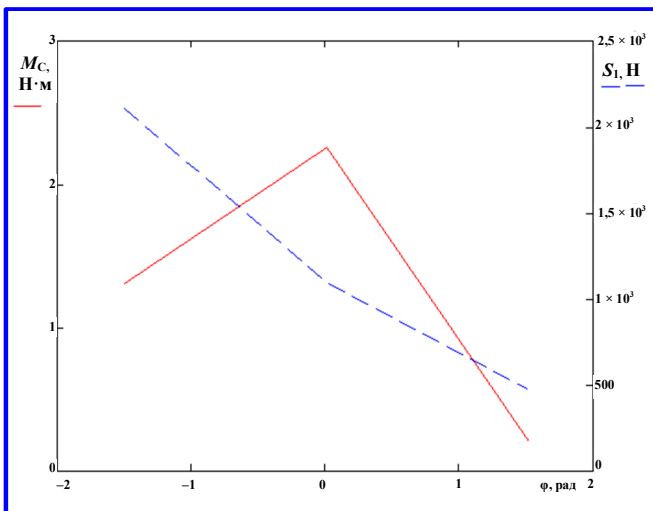


Рис. 11. Зависимость момента на валу двигателя натяжного устройства и натяжения S_1 с «угловым перемещением» роликов и двумя восьмерками от угла поворота φ

Пример расчета. Предлагаемая методика была использована при модернизации электропривода намоточного станка модели СНП 36, разработанного коломенским ООО «Механик», используемого при намотке крупногабаритных корпусов, сопловых раструбов. Данный станок содержит два тракта намотки – «сухой» и «мокрый». В станке используется натяжное устройство с линейным перемещением и дополнительным пневматическим приводом (рис. 4). Передаточное отношение червячного самотормозящегося редуктора $k_M = 40$. Максимальное создаваемое натяжение S_1 равно 3000 Н, а $S_0 = 1500$ Н. Так как максимальный момент на валу двигателя возникает при нулевом положении роликов натяжного устройства $x = 0$, то из (8) получим $\alpha/2 = 1,16$ рад. Данное натяжное устройство имеет следующие параметры: $y_1 = 0,15$ м, $r = 30$ мм, $r_{ш} = 40$ мм. Используя выражение (15), найдем максимальное значение M_C , которое равно 5,8 Н·м при $M_{ТР} = 1$ Н·м [8, 9]. Для данного случая выбран синхронный электродвигатель 1FK7042 со следующими параметрами: номинальная мощность 0,82 кВт, номинальный ток 1,95 А, номинальный момент 2,6 Н·м, номинальная частота вращения 3000 об/мин. Рассчитаем момент, который должен создаваться пневматической системой.

Пневматическая система начнет «помогать» двигателю, если его момент превысит номинальное значение. Разность между моментом M_C и номинальным моментом двигателя составляет $M_{ПЦ} = 3,2$ Н·м. Усилие, которое должны создавать пневматические приводы, равно: $F_{ПЦ} = M_{ПЦ}k_m/r_{ПЦ} = 3,2 \cdot 40/0,04 = 3200$ Н. Графики изменения натяжения «мокрой» композиционной ленты, момента на валу двигателя и сигналы управления клапанами пневматической системы показаны на рис. 12. Здесь клапаны пневмоцилиндров открываются при подаче на них сигнала амплитудой ± 1 . На графиках изображен процесс изменения натяжения с 300 до 2500 Н, поддержания заданного натяжения (2500 Н) в процессе намотки, уменьшения натяжения до 300 Н после завершения намотки. На графиках видно, что при достижении момента двигателя 2,6 Н·м включается в работу пневматическая система, которая «помогает» двигателю.

Выводы

Таким образом, можно сделать следующие выводы:

- для создания натяжения «мокрого» композиционного материала можно использовать различные натяжные устройства;
- разработано математическое описание наиболее распространенных натяжных устройств;
- рассмотренные натяжные устройства имеют практически линейную характеристику между углом охвата роликов лентой и углом поворота роликов натяжного устройства или величиной перемещения ролика;
- использование натяжного устройства с двумя парами связанных роликов уменьшает момент на валу двигателя при прочих равных условиях в 1,34 раза;



Рис. 12. Результаты испытаний электропривода механизма намотки

Таблица 1

Данные натяжных устройств, используемых при намотке изделий «мокрым» способом

Натяжное устройство	С угловым перемещением	С угловым перемещением две восьмерки	С линейным перемещением	
			$k_m = 40$	$k_m = 8$
Диапазон изменения угла охвата лентой роликов, рад	от 1,2 до 5,9	от 1,2 до 12	от 1,2 до 5,5	
Диапазон создаваемого натяжения на выходе устройства, раз относительно S_0	от 1,05 до 2,38	от 1,13 до 5,75	от 1,18 до 2,13	
Максимальное значение момента на валу привода, Н·м (при $S_0 = 400$ Н)	3,9	2,9	0,78	3,8
Максимальное время перемещения роликов из одного крайнего положения в другое, с	0,51	0,51	2,56	0,51

– при использовании натяжного устройства с «линейным перемещением» требуется момент в 3,7 раза меньше при одинаковом передаточном отношении редуктора, но это сильно увеличивает максимальное время перемещения роликов из одного крайнего положения в другое;

– при использовании натяжного устройства с «линейным перемещением» при использовании редуктора, обеспечивающего одинаковое время перемещения роликов из одного крайнего положения в другое, момент на валу двигателя становится одинаковым у данных натяжных устройств;

– диапазон изменения натяжения на выходе устройств изменяется с 1,05 до 2,38 раз (с 420 до 950 Н) для натяжного устройства с угловым перемещением и одной восьмеркой, а для устройства с двумя восьмерками с 1,13 до 5,75 раз (с 450 до 2300 Н). То есть верхний предел натяжения увеличился в 2,4 раза;

– натяжное устройство с линейным перемещением роликов имеет характеристики соизмеримые с натяжным устройством с угловым перемещением и одной восьмеркой;

– с точки зрения создания большого диапазона регулирования натяжения и уменьшения статического момента на валу привода наиболее целесообразно использовать натяжное устройство с угловым перемещением и двумя последовательно включенными восьмерками.

Литература

1. Бондарев Н. И. Электромеханические системы автоматического контроля и управления натяжением ленточных материалов / Н. И. Бондарев, Г. Г. Лисовская, В. В. Михайлов [и др.]. – Москва : Энергия, 1980. – 96 с.

2. Боголюбов В. М. Технология производства изделий и интегральных конструкций из композиционных материалов в машиностроении / В. М. Боголюбов, А. Ю. Братухин, О. С. Сироткин. – Москва : Готика, 2003. – 516 с.

3. Рыбников С. И. Автоматическое управление намоткой / С. И. Рыбников. – Москва : Энергия, 1972. – 112 с.

4. Определение энергетических характеристик натяжителя волокнистого материала на основе расширенной кинематической модели намоточного станка // Д. Н. Князев, Д. С. Андреев, И. Г. Семенченко [и др.] / Известия высших учебных заведений. Электромеханика. – 2017. – № 4. – С. 92 – 99.

5. Патент № 128606 Российская Федерация, МПК В65Н 20/00 (2006.01), В65Н 43/00 (2006.01). Устройство автоматического управления намоткой : № 2012138017/13 ; заявл. 05.09.2012 : опубл. 27.05.2013 / Микитинский А. П., Орлов С. И. – Бюл. № 15. – 14 с.

6. Система регулирования натяжного устройства при намотке изделий из композиционных материалов / А. П. Микитинский, Б. Н. Лобов, П. Г. Колпахчян // Машиностроение: сетевой электронный научный журнал. – 2018. – Т. 6. – № 3. – С. 3 – 8. – URL : <http://www.indust-engineering.ru/issues/2018/2018-3.pdf>. – Дата публикации: 28.09.2018.

7. Control System of Tension Device in Winding Fabrics from Composite Materials / A. Mikitinskiy, B. Lobov, P. Kolpavhshan // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2019. – Vol. 641. – URL : https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-030-39225-3_6. – Дата публикации: 19.02.2020.

8. Артоболевский И. И. Теория механизмов и машин / И. И. Артоболевский. – Москва : Наука, 1975. – 640 с.

9. Определение КПД червячного редуктора по коэффициентам потерь / В. И. Зворыкин, В. В. Зимин, С. Ю. Гончаров [и др.] // Инженерный вестник. Электронный научно-технический журнал; ФГБОУ ВПО «МГТУ им. Н.Э. Баумана». – 2015. – № 09. – С. 70 – 85.

Поступила в редакцию 23.07.2020

*Александр Петрович Микитинский, кандидат технических наук, доцент, e-mail: mialexp@mail.ru.
(ФГБОУ высшего образования «Южно-Российский государственный
политехнический университет (НПИ) им. М.И. Платова», г. Новочеркасск).*

THE QUESTION OF MATHEMATICAL DESCRIPTION OF TENSIONING DEVICES USED AT WINDING PRODUCTS MADE OF «WET» COMPOSITE MATERIAL

A. P. Mikitinskii

The products manufactured from composite material using the method of 'wet' winding are broadly applied in different industries. The range of wound products constantly widens, and the requirements to their quality are raised. The qualitative characteristics of future products mostly depend on the operation of tension control system, and the operation of tension control system in its turn is determined by the used tensioning device. Up to the present the tensioning device and electric motor for it were selected without taking into account specific features of

winding equipment and wound product operation. However, the use of modern control facilities in winding equipment raised the question on the rational selection of a tensioning device. First of all it was required to classify tensioning devices used during winding, make a mathematical description thereof, and, after that, develop the procedure for selection of a tensioning device used during winding of composite products with a 'wet' tape.

Key words: winding of products, 'wet' composite tape, tensioning device drive.

References

1. Bondarev N. I. Electromechanical systems for automatic monitoring and control of tape material tension / N. I. Bondarev, G. G. Lisovskaia, V. V. Mikhailov [et al.]. – Moscow : Energia (Energy), 1980. – 96 p.
2. Bogoliubov V. M. Technology for manufacturing products and integral structures from composite materials in machine engineering / V. M. Bogoliubov, A. Iu. Bratukhin, O. S. Sirotkin. – Moscow : Gotika, 2003. – 516 p.
3. Rybnikov S. I. Automatic control of winding / S.I. Rybnikov. – Moscow : Energia (Energy), 1972. – 112 p.
4. Kniازهv D. N. Determination of energy characteristics of a fiber material tensioning device on the basis of an extended kinematic model of a winding machine // D. N. Kniازهv, D. S. Andreev, I. G. Semenchenko [et al.] / Scientific and Technical Journal 'Russian Electromechanics'. – 2017. – No. 4. – Pp. 92 – 99.
5. Patent No. 128606 Russian Federation, IPC B65H 20/00 (2006.01), B65H 43/00 (2006.01). Automatic winding control device : No. 2012138017/13 ; appl. 05.09.2012 : puble. 27.05.2013 / Mikitinskii A. P., Orlov S. I. – Bul. No. 15.– 14 p.
6. Control system of tensioning device at winding products made of composite materials / A. P. Mikitinskii, B. N. Lobov, P. G. Kolpakhchian // Industrial engineering: scientific electronic journal. – 2018. – V. 6. – No. 3. – Pp. 3 – 8. – URL : <http://www.indust-engineering.ru/issues/2018/2018-3.pdf>. – Publication date: 28.09.2018.
7. Mikitinskiy A. Control System of Tension Device in Winding Fabrics from Composite Materials / A. Mikitinskiy, B. Lobov, P. Kolpavhshan // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2019. – Vol. 641. – URL : https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-030-39225-3_6 – Publication date: 19.02.2020.
8. Artobolevskii I. I. Theory of mechanisms and machines / I. I. Artobolevskii. – Moscow : Nauka (Science), 1975. – 640 p.
9. Zvorykin V. I. Determination of worm-gear reducer efficiency based on loss factors / V. I. Zvorykin, V. V. Zimin, S. Iu. Goncharov [et al.] // Engineering Bulletin. Electronic scientific and technical journal; Bauman Moscow State Technical University. – 2015. – No. 09. – Pp. 70 – 85.

*Aleksandr Petrovich Mikitinskii, Candidate of Technical Sciences (Ph. D.), Associate Professor,
e-mail: mialexp@mail.ru.
(Platov South-Russian State Polytechnic University (NPI), Novocherkassk).*