

УДК 681.58.62-83

## К ВОПРОСУ ВЫБОРА МОЩНОСТИ ДВИГАТЕЛЯ НАТЯЖНЫХ УСТРОЙСТВ ПРИ НАМОТКЕ КОМПОЗИЦИОННЫХ ИЗДЕЛИЙ ИЗ «СУХОГО» МАТЕРИАЛА

А. П. Микитинский

*Изделия, изготавливаемые методом намотки из композиционных материалов, 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 свойств системы регулирования натяжения композиционного материала. Работа системы, в свою очередь, определяется как видом и настройками регуляторов, так и мощностью привода натяжных устройств. До настоящего времени электродвигатель натяжного устройства выбирался из условия обеспечения заданного максимального натяжения композиционной ленты без учета специфических особенностей наматываемого изделия. Однако, при намотке изделия сложной геометрической формы в электроприводе возникают динамические моменты, вызывающие дополнительный нагрев двигателя. В работе предлагается методика выбора мощности привода натяжных устройств, учитывающая особенности намотки композиционных изделий сложной формы. Классифицированы изделия по форме в зависимости от динамического момента, развиваемого приводом при намотке данного изделия.*

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

### Введение

Изделия, изготавливаемые из композиционных материалов методом намотки, нашли применение во многих отраслях: в космических аппаратах и ракетах, в авиации, в химической промышленности, – благодаря своим уникальным химико-механическим характеристикам [1, 2]. Существуют два метода намотки изделий: «сухой» и «мокрый», – оба метода широко используются.

Рассмотрим намотку изделий из «сухой» ленты, упрощенный тракт намотки приведен на рис. 1.

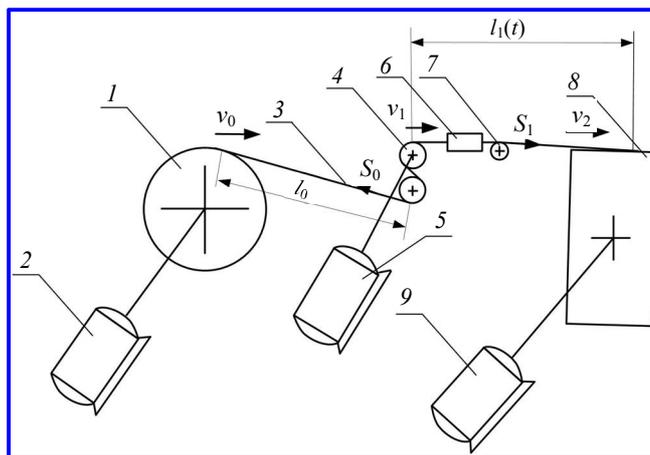
Натяжение  $S_1$  на участке намотки поддерживается на заданном уровне путем изменения момента на валу привода 5. С бобины 1 материал сходит с некоторым натяжением  $S_0$ . Это натяжение определяется моментом на валу тормозного устройства 2 и радиусом бобины  $l$ .

В связи с совершенствованием технологии процесса намотки к системам управления стали предъявляться более жесткие требования к быстродействию приводов, учету изменяющихся режимов работы, к возможности адаптации при изменении режимов намотки [3 – 13].

### Постановка задачи

Мощность привода натяжных устройств до настоящего времени определялась из условия нагрева по классической теории методом эквивалентного тока, момента, мощности или по эмпирическим выражениям без учета особенностей наматываемого изделия. При этом предполагалось, что двигатель должен обеспечить заданное максимальное значение натяжения при максимальной скорости намотки. Однако, в

зависимости от формы наматываемого изделия, в электроприводе возникают динамические моменты. Динамические моменты вызывают нагрев двигателя и до настоящего времени при выборе электродвигателя натяжных устройств не учитывались. Проверку выбранного привода на соответствие процессу намотки можно было осуществить лишь на одной из последних стадий проектирования – при моделировании системы регулирования натяжения. В случае, если привод был выбран неправильно, необходимо было повторить весь расчет заново.



**Рис. 1. Тракт намотки изделий из «сухой» ленты:** 1 – бобина с «сухой» лентой; 2 – тормозное устройство, подтормаживающее бобину с лентой; 3 – «сухая» лента; 4 – тормозные обрешиненные ролики натяжного устройства; 5 – привод натяжного устройства; 6 – измеритель натяжения ленты; 7 – вращающийся ролик тракта намотки станка; 8 – наматываемое изделие; 9 – привод, вращающий наматываемое изделие

Вопросам выбора мощности электропривода натяжных устройств посвящена довольно обширная литература [14 – 18]. Однако во всех работах отсутствует учет специфики намотки композиционных изделий, так при намотке изделия сложной геометрической формы в электроприводе не учитываются динамические моменты, вызывающие дополнительный нагрев двигателя.

### Теоретическая часть

Для учета специфических особенностей при выборе электродвигателя натяжного устройства предлагается методика выбора мощности привода натяжных устройств при «сухой» намотке изделий. Процесс выбора мощности предлагается производить в следующей последовательности:

- рассчитать мощность привода, исходя из наилучших статических условий намотки изделия при максимальном натяжении ленты при намотке и минимальном предварительном натяжении, максимальной линейной скорости намотки;

- для процесса намотки наиболее сложного изделия на данном намоточном оборудовании найти эквивалентный момент, создаваемый двигателем и проверить, обеспечит ли выбранный двигатель условия нагрева. Если нет, то выбирается двигатель с большей мощностью.

Поскольку условием выбора двигателя является нагрев, в качестве эквивалентного момента целесообразно выбрать среднеквадратическое значение момента за один рабочий цикл, определяемое по нагрузочной диаграмме.

Рассмотрим последовательно оба этапа предложенной методики.

Для определения мощности привода 5 (рис. 1) в статическом режиме работы воспользуемся выражениями [1, 16 – 18], связывающими момент на валу натяжного устройства в установившемся режиме и его частоту вращения:

$$\left. \begin{aligned} M_{c1} &= \frac{r_1 \eta_1}{i_1} (S_1 - S_0); \\ \Omega_1 &= \frac{i_1}{r_1} v_1, \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

где  $M_{c1}$  – статический момент на валу привода натяжного устройства;  $v_1$  – линейная скорость входа материала в зону деформации;  $r_1$  – радиус ролика тормозного устройства;  $\eta_1$  – КПД редуктора;  $i_1$  – передаточное отношение редуктора, который находится между роликами натяжного

устройства и приводом (на рис. 1 редуктор условно не показан);  $S_1$  – значение натяжения, с которым лента наматывается на изделие;  $S_0$  – натяжение, с которым лента сматывается с бобины;  $\Omega_1$  – угловая скорость вращения привода натяжного устройства.

Очевидно, что мощность привода натяжного устройства в статическом режиме равна:

$$P_1 = M_{c1} \Omega_1 = (S_{1max} - S_{0min}) v_{1max} \eta_1, \quad (2)$$

где  $S_{1max}$  – максимальное значение натяжения, с которым лента наматывается на изделие (точнее, максимальное значение натяжения, на которое рассчитан данный намоточный станок);  $S_{0min}$  – минимальное значение натяжения, с которым лента сматывается с бобины;  $v_{1max}$  – максимальное значение скорости ленты.

Полученные выражения (1) и (2) позволяют рассчитать мощность привода натяжного устройства в статическом режиме, максимальный момент на валу привода, но не учитывают вопросы его динамики.

На втором этапе осуществляем проверку выбранного двигателя, используя метод эквивалентного момента. Очевидно, что момент, развиваемый двигателем натяжного устройства, будет складываться из статического момента, который можно рассчитать, используя выражение (2) и динамического момента, связанного с изменением линейной скорости намотки материала. Из (2) получаем выражение для расчета статического момента привода:

$$M_{c1} = \frac{(S_{1max} - S_{0min}) r_1 \eta_1}{i_1}. \quad (3)$$

Проведенный анализ конструкций изделий, изготавливаемых методом намотки с точки зрения развиваемого приводом динамического момента, показал, что все разнообразие изготавливаемых изделий можно объединить в три класса.

К первому классу относятся изделия, при изготовлении которых диаметр намотки изменяется незначительно и можно считать, что линейная скорость намотки остается постоянной. Назовем эти изделия «Цилиндр» (рис. 2, а). Динамические моменты привод при намотке развивает очень редко, только при пуске оборудования. Оборудование останавливается для смены бобин ленты или каких-то непредвиденных обстоятельства. Такие ситуации возникают, как правило один раз в несколько часов. Поэтому их учитывать не будем.

Таким образом, условием выбора двигателя по нагреву является:

$$M_{дв} \geq M_{эКВ} = M_{с1} = \frac{(S_{1max} - S_{0min})r_1\eta_1}{i_1}, \quad (4)$$

где  $M_{эКВ}$  – эквивалентный момент двигателя.

Ко второму классу относятся цилиндрические изделия, при намотке которых диаметр изменяется значительно (рис. 2, б) до трех раз и более за один проход – «Конус». На рис. 3 приведена тахограмма работы привода при намотке такого изделия при условии, что частота вращения оправки постоянная.

Каретка станка перемещается вдоль изделия со скоростью  $v_{кар}$ . Время намотки участка длиной  $L_i$

равно  $t_i = L_i/v_{кар}$ . На участках  $L_1$  и  $L_3$  скорость движения ленты постоянна, а на  $L_2$  увеличивается при движении каретки вправо и уменьшается при движении каретки влево. Скорость движения ленты на различных участках изделия:

$$\left. \begin{aligned} v_{лин\_min} &= \Omega_{опр} h_{2min}; \\ v_{лин} &= \Omega_{опр} \left[ h_{2min} + \frac{h_{2max} - h_{2min}}{L_2} v_{кар} (t - t_1) \right]; \\ v_{лин\_max} &= \Omega_{опр} h_{2max}, \end{aligned} \right\} (5)$$

где  $\Omega_{опр}$  – угловая скорость вращения оправки.

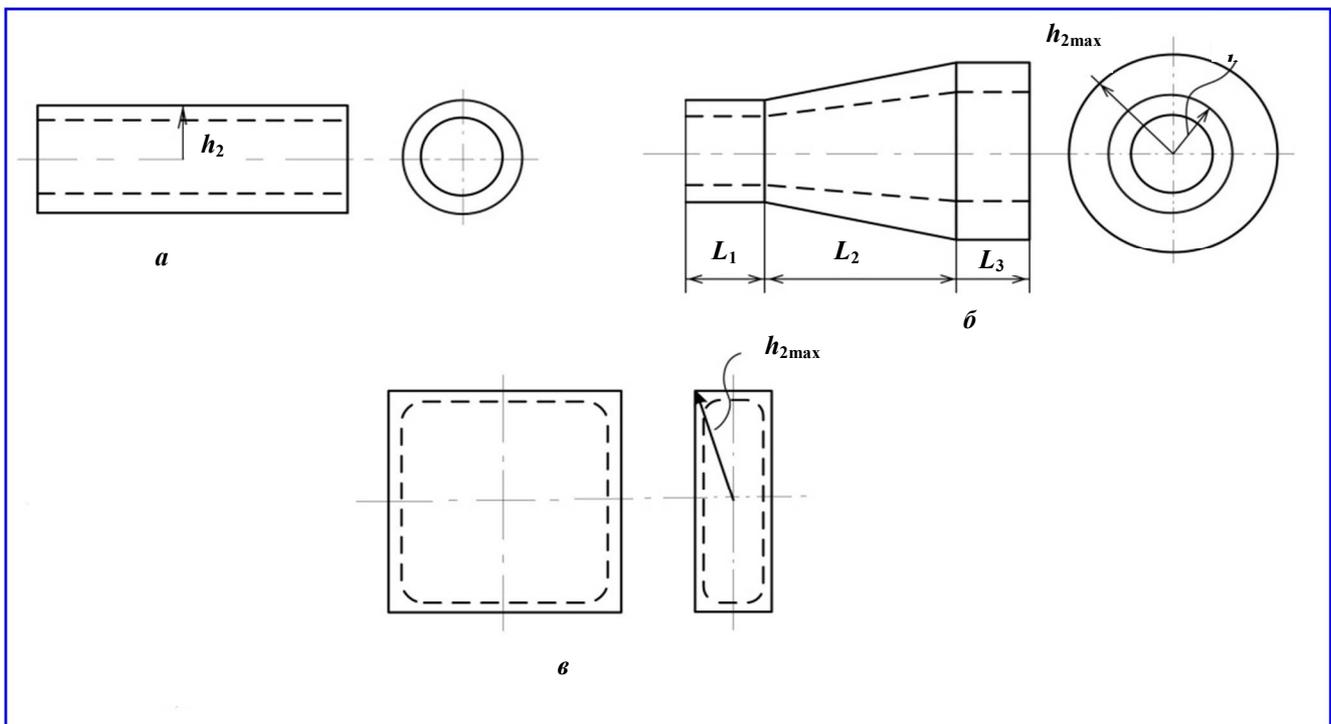


Рис. 2. Форма некоторых изделий, изготавливаемых методом намотки

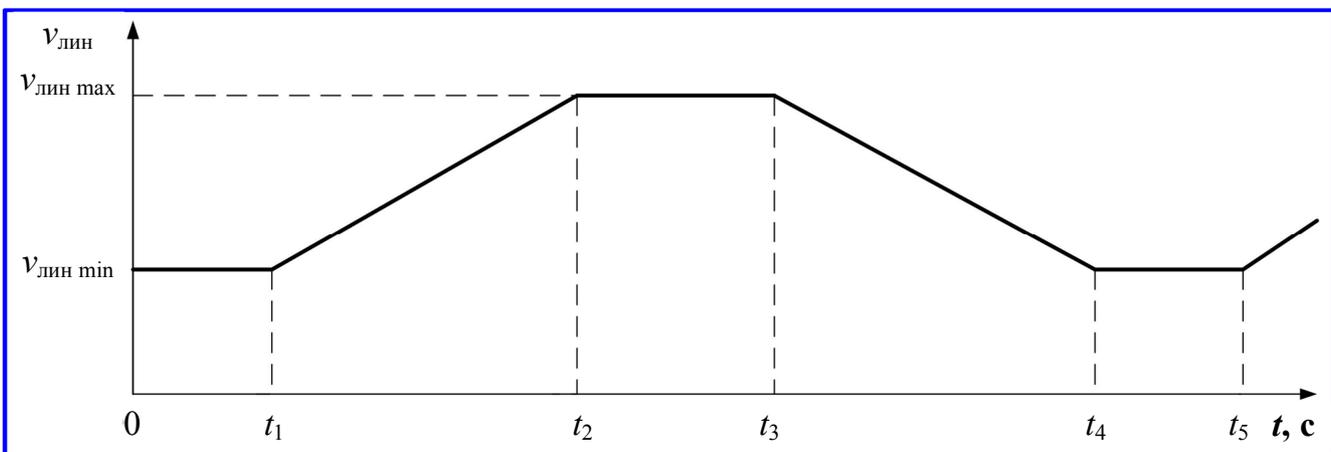


Рис. 3. Линейная скорость движения ленты при намотке цилиндрических изделий типа б

Рассчитаем момент привода на всех участках катушки с учетом основного уравнения динамики привода  $M - M_c = J_1 \frac{d\Omega}{dt}$ . Тогда отдельно на каждом участке получим:

– на первом участке от 0 до  $t_1$  он равен:

$$M_{c1} = \frac{(S_{1max} - S_{0min})r_1\eta_1}{i_1};$$

– на втором участке от  $t_1$  до  $t_2$  заменим производную на приращение:

$$M_{c2} = J_1 \frac{(v_{лин\_max} - v_{лин\_min})i_1}{(t_2 - t_1)r_1} + \frac{(S_{1max} - S_{0min})r_1\eta_1}{i_1};$$

– на третьем участке от  $t_2$  до  $t_3$ :

$$M_{c3} = \frac{(S_{1max} - S_{0min})r_1\eta_1}{i_1}.$$

Отсюда имеем:

$$M_{дв} \geq M_{эКВ} = \sqrt{\frac{M_{c1}^2 t_1 + M_{c2}^2 (t_2 - t_1) + M_{c3}^2 (t_3 - t_2)}{t_4}}. \quad (6)$$

К третьему классу относятся изделия типа «Призма» (рис. 2, в). В этом случае параметры изменяются быстро, в том числе скачком.

Рассмотрим процесс намотки изделия, имеющего форму прямоугольной призмы (рис. 4), со сторонами равными  $a$  и  $b$ , расстояние между осью вращения изделия и точкой схода материала  $OO_1$  [19, 20].

Определим зависимость длины ленты  $l_1$  и скорости  $v_2$  от угла поворота  $\Psi$ . Из треугольника  $ОАО_1$  имеем:

$$l_1(\psi) = \sqrt{r^2 + L^2 - 2Lr \cos(\psi)},$$

где  $r = \sqrt{a^2 + b^2}$ ;  $OO_1 = L$ .

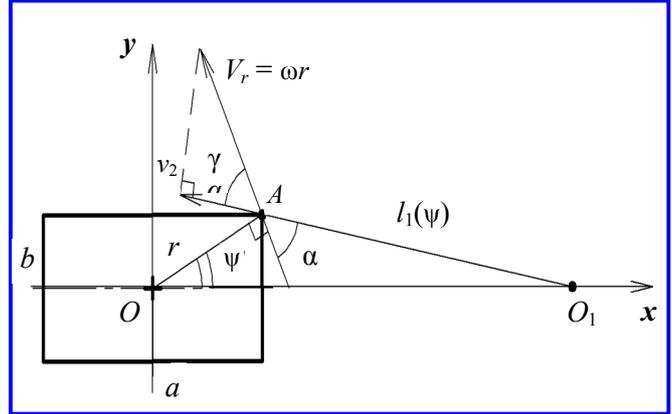


Рис. 4. Геометрическое представление процесса намотки «Призмы»

Скорость  $v_2$  найдем как производную  $l_1$ :

$$v_2(\Psi) = \frac{dl_1(\Psi)}{dt} = \frac{\Omega_{опр} Lr \sin(\Psi)}{\sqrt{r^2 + L^2 - 2Lr \cos(\Psi)}}. \quad (7)$$

Определим углы, при которых осуществляется переход ленты с одного ребра на другое:

$$\left. \begin{aligned} \Psi_1 &= \arccos\left(\frac{a^2 + b\sqrt{L^2 - a^2}}{Lr}\right); \\ \Psi_2 &= \arccos\left(\frac{b^2 + a\sqrt{L^2 - a^2}}{Lr}\right); \\ \Psi_3 &= \arccos\left(\frac{b^2 + a\sqrt{L^2 - a^2}}{Lr}\right); \\ \Psi_4 &= \arccos\left(\frac{a^2 + b\sqrt{L^2 - a^2}}{Lr}\right). \end{aligned} \right\}$$

Для определения эквивалентного момента про дифференцируем выражение (7):

$$\frac{dv_2(\Psi)}{d\Psi} = \frac{2\Omega_{опр} Lr(r^2 + L^2) \cos(\Psi) - 4\Omega_{опр} L^2 r^2 + 3\Omega_{опр} Lr(\cos(\Psi))^2}{r^2 + L^2 - 2Lr \cos(\Psi)}. \quad (8)$$

Подставив полученное выражение в основное уравнение динамики, получим в интегральном виде:

$$M_{эКВ} = \sqrt{\int_0^{t_{цик}} \left[ \left( \frac{(S_{1max} - S_{0min})r_1\eta_1}{i_1} + J_1 \frac{i_1}{r_1} \left( \frac{2\Omega_{опр} Lr(r^2 + L^2) \cos(\Omega_{опр}t) - 4\Omega_{опр} L^2 r^2 + 3\Omega_{опр} Lr(\cos(\Omega_{опр}t))^2}{r^2 + L^2 - 2Lr \cos(\Omega_{опр}t)} \right) \right)^2 dt \right]}. \quad (9)$$

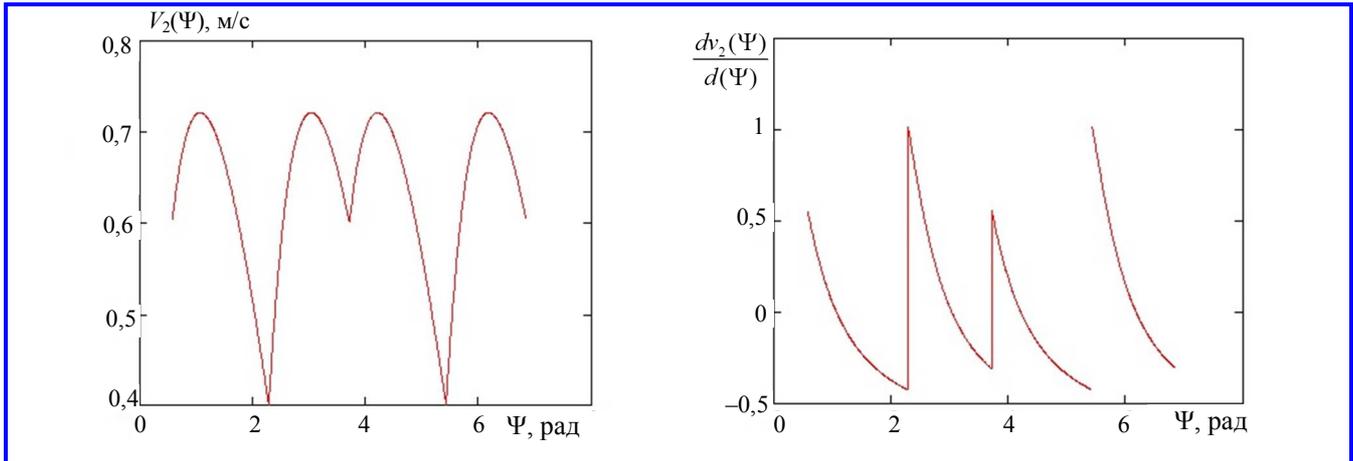


Рис. 5. Графики зависимости скорости намотки и ее производной от угла поворота изделия

На рис. 5 показаны графики изменения  $v_2(\Psi)$  и  $\frac{dv_2(\Psi)}{d(\Psi)}$ , рассчитанные по (7) и (8). График получен для изделия, имеющего  $a = 1$  м;  $b = 0,5$  м;  $OO_1 = 1,5$  м при  $\Omega_{\text{опр}} = 1$  рад/с.

Условием правильного выбора мощности привода является:

$$M_{\text{дв}} \geq M_{\text{экв}}.$$

Очевидно, что эквивалентный момент двигателя зависит от размеров и формы наматываемого изделия, габаритов станка, угловой скорости вращения оправки. Поэтому при синтезе системы регулирования натяжения необходимо проанализировать весь спектр наматываемых изделий, выбрать изделия, при намотке которых динамические моменты двигателя будут максимальными и для этого изделия произвести расчет эквивалентного момента двигателя.

**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 (изделия типа «Цилиндр»). Общий вид изделия изображен на рис. 2 (изделие  $b$ ). Линейная скорость движения ленты при намотке данного изменяется так, как показано на рис. 3. Натяжение, с которым наматывается изделие  $S_1$ , равно 4000 Н; натяжение  $S_0$  равно 200 Н; производство  $EF$  равно 10 000 Н; радиус роликов натяжного устройства равен 0,09 м; передаточное отношение редуктора 30; КПД редуктора 0,8. При намотке данного изделия реализуются следующие технологические параметры процесса намотки:

$v_{2 \text{ лин min}} = 0,15$  м/с;  $v_{2 \text{ лин max}} = 0,4$  м/с;  $t_1 = 240$  с;  $t_2 = 900$  с;  $t_3 = 300$  с;  $t_4 = 900$  с;  $t_5 = 240$  с.

По выражению (2) находим мощность привода натяжного устройства:

$$P_1 = (S_{1\text{max}} - S_{0\text{min}})v_{1\text{max}}\eta_1 = (4000 - 200) \cdot 0,4 \cdot 0,8 = 1216 \text{ Вт}.$$

Максимальная частота вращения двигателя равна:

$$\Omega_{\text{дв max}} = \frac{i_1}{r_1} v_{\text{лин max}} = \frac{30}{0,09} \cdot 0,3 = 100,0 \text{ рад/с}.$$

Предварительно выбираем синхронный двигатель с постоянными магнитами фирмы Siemens 1FK7060 со следующими номинальными данными: мощность двигателя 1,48 кВт; номинальный ток 3,7 А; номинальный момент 4,7 Н·м; номинальная частота вращения 3000 об/мин; момент инерции двигателя  $J_{\text{дв}} = 0,000795$  кг·м<sup>2</sup>. С учетом дополнительных вращающихся частей имеем:

$$J_1 = 1,1J_{\text{дв}}.$$

Используя выражение (6), найдем эквивалентный момент при намотке цилиндрического изделия для двигателя Siemens 1FK7060:

$$M_{\text{экв}} = 7,6 \text{ Н·м}.$$

Так как номинальный момент двигателя равен 4,7 Н·м, то следует выбрать больший двигатель. В данном случае, на намоточном станке СНП 36 было принято решение использовать два натяжных ролика, каждый оснащенный двигателем 1FK7060. Таким образом, общий момент, развиваемый двигателями составил 9,4, что больше  $M_{\text{ЭКВ}}$ .

Рассмотрим намотку изделия типа «Призма». Параметры изделия и станка:  $a = 1,2$  м;  $b = 0,8$  м;  $\Omega_{\text{ОПР}} = 1,5$  рад/с;  $OO_1 = 1,5$  м. Натяжение, с которым наматывается изделие  $S_1$ , равно 3000 Н; натяжение  $S_0$  равно 200 Н; скорость намотки ленты на изделие равна 0,3 м/с; произведение  $EF$  равно 10 000 Н; радиус роликов натяжного устройства равен 0,09 м; передаточное отношение редуктора 50; КПД редуктора 0,8.

По выражению (8) рассчитываем эквивалентный момент, он равен:

$$M_{\text{ЭКВ}} = 4,66 \text{ Н}\cdot\text{м}.$$

Данный момент больше номинального момента двигателя, равного 3,7 Н·м. Таким образом, неравенство (8) не выполняется и требуется выбрать двигатель бóльшей мощности.

Выбираем синхронный двигатель с постоянными магнитами фирмы Siemens 1FT6062 со следующими номинальными данными: мощность двигателя 1,1 кВт; номинальный ток 2,6 А; номинальный момент 5,2 Н·м; номинальная частота вращения 2000 об/мин, момент инерции двигателя 0,00085 кг·м<sup>2</sup>.

Эквивалентный момент в этом случае равен:

$$M_{\text{ЭКВ}} = 5,38 \text{ Н}\cdot\text{м}.$$

Данный момент больше номинального момента двигателя, равного 5,2 Н·м. Таким образом, неравенство (8) не выполняется и требуется выбрать двигатель еще бóльшей мощности.

Выбираем синхронный двигатель с постоянными магнитами фирмы Siemens 1FT6064 со следующими номинальными данными: мощность двигателя 1,7 кВт; номинальный ток 3,8 А; номинальный момент 8,0 Н·м; номинальная частота вращения 2000 об/мин; момент инерции двигателя 0,0013 кг·м<sup>2</sup>.

Эквивалентный момент в этом случае равен:

$$M_{\text{ЭКВ}} = 6,48 \text{ Н}\cdot\text{м}.$$

Данный момент меньше номинального момента двигателя, равного 8,0 Н·м. Таким образом, неравенство (8) выполняется. Двигатель выбран правильно и обеспечит нормальный процесс намотки изделия. Увеличение  $M_{\text{ЭКВ}}$  при выборе более мощного двигателя объясняется увеличением габаритных размеров двигателя и, как следствие, увеличением момента инерции ротора.

Исследуем влияние габаритных размеров наматываемого изделия на эквивалентный момент двигателя. На рис. 6 показана зависимость  $M_{\text{ЭКВ}}$  от размеров ребра  $a$ , на рис. 7 – от размеров ребра  $b$ , на рис. 8 – от длины тракта намотки  $OO_1$ , а на рис. 9 – от угловой скорости вращения изделия  $\Omega_{\text{ОПР}}$ .

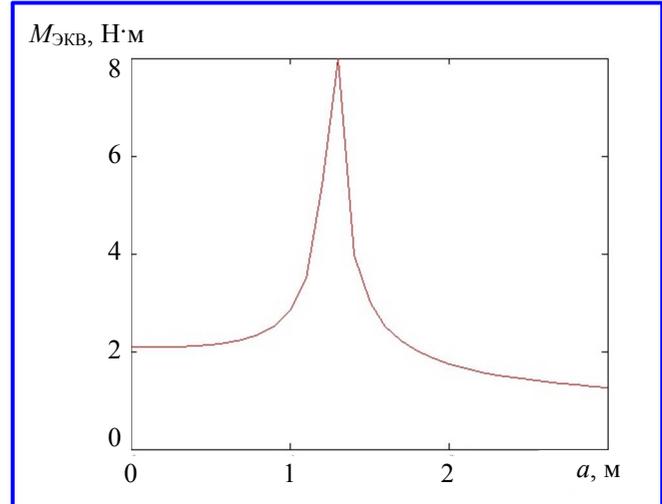


Рис. 6. Зависимость эквивалентного момента от габарита  $a$  изделия

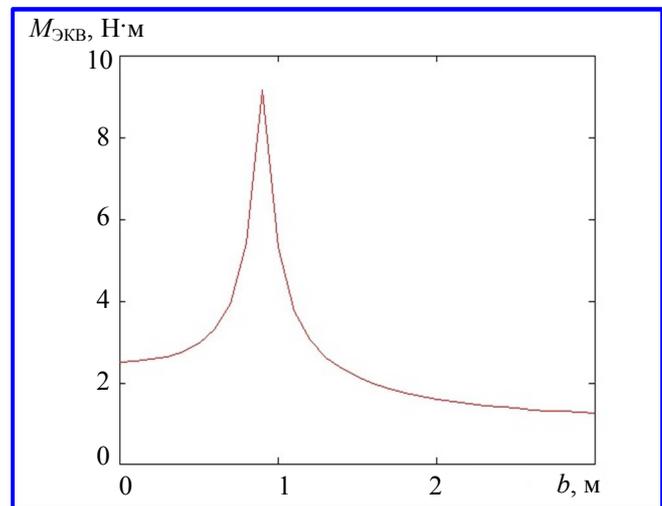


Рис. 7. Зависимость эквивалентного момента от габарита  $b$  изделия

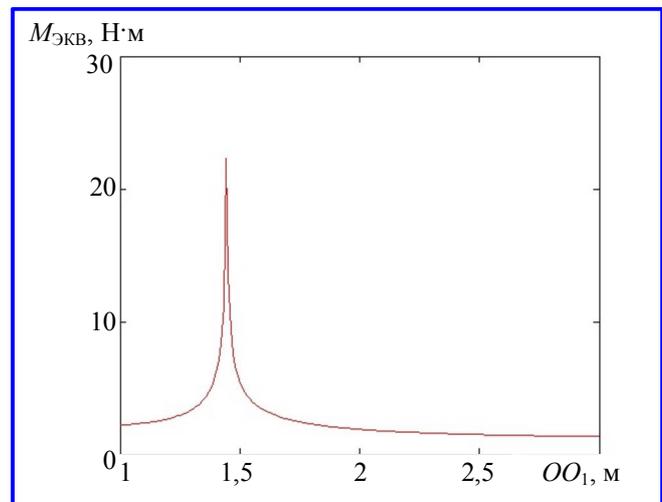


Рис. 8. Зависимость эквивалентного момента от длины тракта намотки  $OO_1$

Следует отметить, что выбор синхронных двигателей с постоянными магнитами фирмы Siemens обусловлен требованиями заказчика. В настоящее время ряд предприятий России выпускает аналогичные двигатели небольшой мощности. Это ЗАО «Завод механических изделий», г. Солнечногорск, АО «Чебоксарский электроаппаратный завод», НТЦ «Редуктор» г. Санкт-Петербург, НПП ЗАО «Электротехнические системы» г. Санкт-Петербург. В рамках совершенствования уже разработанных систем и импортозамещения в дальнейшем будет целесообразно использовать отечественные двигатели.

### Заключение

Выявлены недостатки подхода к выбору мощности привода натяжных устройств, учитывающих только статический момент намотки, приводящие к перегреву двигателя.

1. Предложена новая методика выбора мощности привода натяжных устройств, учитывающая динамический момент, связанный с изменением линейной скорости намотки композиционных изделий.

2. Предложена классификация наматываемых изделий по форме в зависимости от динамических моментов, возникающих в электроприводе при их намотке.

3. Установлено, что для предотвращения перегрева двигателя натяжного устройства при намотке изделий сложной формы, мощность привода, определяемая с использованием предложенной методики, в 2,5 раза должна превышать мощность привода, определенную с учетом только статической нагрузки.

### 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. 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. Математическая модель лентопротяжного тракта станка для намотки изделий из композиционных материалов / А. П. Микитинский // Изв. вузов. Электромеханика. – 2016. – № 1. – С. 62 – 66.
4. Математическая модель лентопротяжного тракта станка для «мокрой» намотки изделий из композиционных материалов / А. П. Микитинский // Труды IX Международной (XX Всероссийской) конференции по автоматизированному электроприводе АЭП-2016. – Пермь : Изд-во Пермского ун-та, 2016. – С. 447 – 450.
5. Электроприводы механизмов намотки изделий из композиционных материалов / А. П. Микитинский,

А. Б. Бекин, Л. Л. Алтунян // Труды VII Международной (XIX Всероссийской) конференции по автоматизированному электроприводе АЭП-2014. – Саранск : Изд-во Мордов. ун-та, 2014. – Т. 2. – С. 516 – 521.

6. Система регулирования натяжения при намотке изделий из композиционных материалов / О. А. Кравченко, А. П. Микитинский // Интеграция науки и практики как механизм развития отечественных наукоемких технологий и производств : сб. науч. ст. по материалам IV Всерос. науч.-практ. конф. ; г. Каменск-Шахтинский, 12 ноября 2014 г. ; Юж.-Рос. Гос. техн. ун-т (НПИ). – Новочеркасск : Лик, 2015. – С. 130 – 132.

7. Система регулирования натяжения «мокрого» композиционного материала / А. П. Микитинский, Б. Н. Лобов, П. Г. Колпахчян // Труды 2018 X Международной конференции по автоматизированному электроприводе АЭП 2018. – 03 октября – 06 октября 2018. – С. 81 – 84.

8. The control of dosing pumps by modern electric drive / B. Lobov, A. Mikitinskiy, P. Kolpachshan // 2016 2nd International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM), 19 – 20 May 2016, Chelyabinsk, Russia : электронный журнал. – Chelyabinsk : IEEE, 2017. – URL : <http://ieeexplore.ieee.org/document/7911499/>. – Дата публикации: 27.04.2017.

9. Systems Approach to the Analysis of Electromechanical Processes in the Asynchronous Traction Drive of an Electric Locomotive / P. Kolpakhchyan, A. Zarifian, A. In. Andruschenko [et al] // Rail Transport – Systems Approach. Studies in Systems, Decision and Control ; editor Aleksander Sladkowski. – Cham : Springer, 2017. – Vol. 87. – P. 67 – 134.

10. 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.

11. Synthesis of Adaptive Tension Control System Used in Winding of Some 'Dry' Composite Material Products Proceedings / A. Mikitinskiy, N. Sukhenko // 2019 International Russian Automation Conference (RusAutoCon), 8 – 14 Sept. 2019, Sochi, Russia ; IEEE. – 2019. – № 8867808. – URL : <https://ieeexplore.ieee.org/document/8867808>. – Дата публикации: 14.10.2019.

12. Tension control adaptive system synthesis used in winding of products made of «dry» composite material / A. Mikitinskiy // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering ; XV International Scientific-Technical Conference «Dynamics of Technical Systems». 11 – 13 September 2019, Don State Technical University, Rostov-on-Don, Russian Federation : электронный журнал. – 2019. – Vol. 680 (1). – № 012028. – URL : <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/680/1/012028/pdf>. – Дата публикации: 1.11.2019.

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

14. Дружинин Н. Н. Непрерывные станы как объект автоматизации / Н. Н. Дружинин. – Москва : Metallurgiya, 1975. – 336 с.
15. Ильина С. Т. Разработка и исследование системы автоматического регулирования натяжением основы на ткацких станках : специальность 05.02.13 «Машины, агрегаты и процессы (по отраслям)» : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Ильина Светлана Тимофеевна. – Москва, 1973. – 166 с. : ил.
16. Автоматизированный многодвигательный электропривод постоянного тока / Г. М. Иванов, Г. М. Левин, В. М. Хуторецкий ; под ред. Г. М. Иванова. – Москва : Энергия, 1978. – 160 с.
17. Иванов Г. М., Онищенко Г. Б. Автоматизированный электропривод в химической промышленности / Г. М. Иванов, Г. Б. Онищенко. – Москва : Машиностроение, 1975. – 312 с.
18. Иванов Г. М., Иванов А. Г. Электроприводы в химической и целлюлозно-бумажной отраслях промышленности : монография / Г. М. Иванов, А. Г. Иванов. – Москва : МГИУ, 2008. – 480 с.
19. Математическое описание упругой ленты как объекта управления при намотке тел вращения типа прямоугольник / А. П. Микитинский, Д. Ю. Богданов, К. А. Микитинский [и др.] // Микроэлектронные информационно-управляющие системы и комплексы : сб. тез. и статей Всерос. науч. шк., Новочеркасск, 5 – 7 сентября 2011 г. ; Юж.-Рос. гос. техн. ун-т (НПИ). – Новочеркасск : ЛИК, 2011. – С. 138 – 141.
20. Математическое описание намотки лонжеронов / А. П. Микитинский, К. А. Микитинский, Д. Г. Борзенко // Студенческая научная весна – 2012 : материалы регион. науч.-техн. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых вузов Рост. обл., 24 – 25 мая 2012 г. ; Юж.-Рос. гос. техн. ун-т (НПИ). – Новочеркасск : ЛИК, 2012. – С. 106 – 108.

Поступила в редакцию 24.04.2020

*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).*

## SELECTION OF TENSIONING DEVICE MOTOR POWER FOR WINDING COMPOSITE PRODUCTS MADE OF DRY MATERIAL

A. P. Mikitinskii

*The products made from composite materials by means of winding are broadly used in different branches of industry. The range of wound products constantly widens, and the requirements to their quality grow. The qualitative characteristics of future products strongly depend on the properties of the composite material tension control system. The system operation, in its turn, is determined both by the type and settings of the controller, and power of the tensioning device drive. Until recently, an electric motor of a tensioning device was selected in such a way as to ensure the specified maximum tension of a composite tape without considering specific features of the wound device. However, when a product having a complex geometric shape is wound, dynamic torques that cause additional heating of the motor arise in the electrical drive. A tensioning device drive power selection method taking into account the special aspects of winding composite products of a complex shape is suggested in the article. Products are classified according to their shape, depending on the dynamic torque produced by the drive when winding these products.*

**Key words:** winding of products, dry composite tape, tensioning device drive.

### References

1. Bondarev N. I. Electro-mechanical systems for automatic monitoring and control of tape material tension / N. I. Bondarev, G. G. Lisovskaia, V. V. Mikhailov [et al.] – Moscow : Energia, 1980. – 96 p.
2. Technology of manufacturing products and integrated structures from composite materials in machine building industry / V. M. Bogoliubov, A. Iu. Bratukhin, O. S. Sirotkin. – Moscow : Gotika, 2003. – 516 p.
3. Mathematical model of tape path for composite material product winding machine / A.P. Mikitinskii // Russian Electromechanics Journal. – 2016. – No. 1. – Pp. 62 – 66.
4. Mathematical model of wet-filament winding machine tape path / A. P. Mikitinskii // Proceedings of the IX<sup>th</sup> International (XX<sup>th</sup> All-Russian) Conference on Electrical Power Drive Systems ICEPDS-2016. – Perm : Publishing House of the Perm State University, 2016. – Pp. 447 – 450.
5. Electrical drives of composite material product winding mechanisms / A. P. Mikitinskii, A. B. Bekin, L. L. Altunian // Proceedings of the VII<sup>th</sup> International (XIX<sup>th</sup> All-Russian) Conference on Electrical Power Drive Systems ICEPDS-2014. – Saransk : Publishing House of the Mordovia State University, 2014. – Vol. 2. – Pp. 516 – 521.
6. System for tension control at winding composite material products / O.A. Kravchenko, A.P. Mikitinskii // Integration of science and practice as a mechanism for development of national knowledge-intensive technologies and production :

- Collected volume of proceedings of the IV<sup>th</sup> All-Russian Scientific and Practical Conference ; Kamensk-Shakhtinsky, 12 November 2014 ; South-Russian State Polytechnic University (NPI). – Novochoerkassk : LIK, 2015. – Pp. 130 – 132.
7. Wet composite material tension control system / A.P. Mikitinskii, B.N. Lobov, P.G. Kolpakhchian // Proceedings of the X<sup>th</sup> International Conference on Electrical Power Drive Systems ICEPDS-2018. – 03 October – 06 October 2018. – Pp. 81 – 84.
8. The control of dosing pumps by modern electric drive / B. Lobov, A. Mikitinskiy, P. Kolpachshan // 2016 2<sup>nd</sup> International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM), 19 – 20 May 2016, Chelyabinsk, Russia : electronic journal. – Chelyabinsk : IEEE, 2017. – URL : <http://ieeexplore.ieee.org/document/7911499/>. – Publication date: 27.04.2017.
9. Systems Approach to the Analysis of Electromechanical Processes in the Asynchronous Traction Drive of an Electric Locomotive / P. Kolpakhchyan, A. Zarifian, A. In. Andruschenko [et al.] // Rail Transport – Systems Approach. Studies in Systems, Decision and Control ; editor Aleksander Śladkowski. – Cham : Springer, 2017. – Vol. 87. – Pp. 67 – 134.
10. System for tensioning device control at winding composite material products / A. P. Mikitinskii, B. N. Lobov, P. G. Kolpakhchian // Machine building: scientific electronic web-journal. – 2018. – Vol. 6. – No. 3. – Pp. 3 – 8. – URL : <http://www.indust-engineering.ru/issues/2018/2018-3.pdf>. – Publication date: 28.09.2018.
11. Synthesis of Adaptive Tension Control System Used in Winding of Some 'Dry' Composite Material Products Proceedings / A. Mikitinskiy, N. Sukhenko // 2019 International Russian Automation Conference (RusAutoCon), 8 – 14 Sept. 2019, Sochi, Russia ; IEEE. – 2019. – № 8867808. – URL : <https://ieeexplore.ieee.org/document/8867808>. – Publication date: 14.10.2019.
12. Tension control adaptive system synthesis used in winding of products made of «dry» composite material / A. Mikitinskiy // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering ; XV International Scientific-Technical Conference «Dynamics of Technical Systems». 11 – 13 September 2019, Don State Technical University, Rostov-on-Don, Russian Federation : electronic journal. – 2019. – Vol. 680 (1). – No. 012028. – URL : <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/680/1/012028/pdf>. – Publication date: 1.11.2019.
13. Control System of Tension Device in Winding Fabrics from Composite Materials / A. Mikitinskiy, B. Lobov, P. Kolpachshan // IOP Conference Series : Materials Science and Engineering : electronic journal. – 2019. – Vol. 641. – URL : [https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-030-39225-3\\_6](https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-030-39225-3_6) – Publication date: 19.02.2020.
14. Druzhinin N. N. Continuous mills as automation objects / N. N. Druzhinin. – Moscow : Metallurgy, 1975. – 336 p.
15. Ilina S.T. Development and study of automatic warp tension control system of weaving machines : specialty 05.02.13 'Machines, installations and processes' (branch-wise) : Thesis for the Degree of Candidate of Technical Sciences / Ilina Svetlana Timofeevna. – Moscow, 1973. – 166 p. : with figures.
16. Automated multimotor electrical DC drive / G. M. Ivanov, G. M. Levin, V. M. Khutoretskii ; ed. by G. M. Ivanov. – Moscow : Energia, 1978. – 160 p.
17. Ivanov G. M., Onishchenko G. B. Automated electrical drive in chemical industry / G. M. Ivanov, G. B. Onishchenko. – Moscow : Machine engineering, 1975. – 312 p.
18. Ivanov G. M., Ivanov A. G. Electrical drives in chemical and pulp-and-paper industries : monograph / G. M. Ivanov, A. G. Ivanov. – Moscow : Moscow State Industrial University, 2008. – 480 p.
19. Mathematical description of elastic tape as a control object at winding rectangular rotation bodies / A. P. Mikitinskii, D. Iu. Bogdanov, K. A. Mikitinskii [et al.] // Microelectronic information and control systems and complexes : collected volume of abstracts and articles of the All-Russian Scientific School, Novochoerkassk, 5 – 7 September 2011 ; South-Russian State Polytechnic University (NPI). – Novochoerkassk : LIK, 2011. – Pp. 138 – 141.
20. Mathematical description of spar winding / A. P. Mikitinskii, K. A. Mikitinskii, D. G. Borzenko // Student Scientific Spring – 2012 : Proceedings of the Regional Scientific and Technical Conference of students, graduate students and young scientists of higher educational institutions of the Rostov region, 24 – 25 May 2012 ; South-Russian State Polytechnic University (NPI). – Novochoerkassk : LIK, 2012. – Pp. 106 – 108.

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