

ОПТИМИЗАЦИЯ ПЕРЕДАТОЧНОГО ОТНОШЕНИЯ РЕДУКТОРА МОТАЛЬНОГО МЕХАНИЗМА С НАКОПИТЕЛЕМ МАТЕРИАЛА*

OPTIMIZATION OF GEAR RATIOS WINDING MECHANISM DRIVE MATERIAL

П.С. БАЛАБАЕВ
P.S. BALABAEV

(Костромской государственной технологической университет)
(Kostroma State Technological University)

E-mail: balabaev_p@rambler.ru

В статье приведена методика определения передаточного отношения редуктора в наматывающем механизме оптимального по критерию быстрого действия механизма управления натяжением.

The article describes the method of determining the gear ratio in the optimal mechanism is wound by the speed control mechanism tension.

Ключевые слова: мотальный механизм, накопитель материала, частота вращения двигателя, передаточное отношение редуктора.

Keywords: winding mechanism, storage material, engine speed, gear ratio.

В современной полиграфии стали широко применять рулонные полимерные материалы, которые по механическим характеристикам больше напоминают ткань, чем бумагу или картон. Рассматриваемое наматывающее устройство предназначено для намотки бобин диаметром до $D = 550$ мм на шпули диаметром $d = 90$ мм и массой до 200 кг. Скорость наматывания материала может достигать 100 м/мин, а сила натяжения доходить до 200 Н. Близкие параметры имеют наматывающие устройства отделочного производства текстильной промышленности.

В данном наматывающем устройстве вращение бобины осуществляется от асинхронного частотно-регулируемого электродвигателя АД и редуктора с постоянным передаточным отношением (рис. 1 – схема наматывающего устройства с накопителем), а не от двигателя постоянного тока как в [3], что повышает надежность системы.

Назначение накопителя материала заключается в поддержании натяжения материала на заданном уровне при различ-

ных мгновенных изменениях скоростей выпуска и наматывания материала. Наибольшее распространение в наматывающих механизмах для намотки рулонных паков получили накопители, состоящие из группы подвижных и неподвижных роликов, огибаемых материалом. Оси подвижных роликов закреплены на качающейся вокруг неподвижной оси раме. При анализе динамики накопителя в качестве обобщенной координаты x выберем длину материала в накопителе.

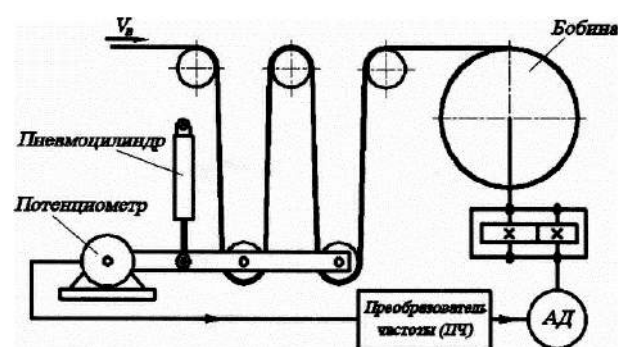


Рис. 1

* Работа выполнена под руководством проф., докт. техн. наук П.Н. Рудовского.

На практике измеряется контактным, например потенциометрическим, или бесконтактным способом перемещение подвижной рамы, по которому и оценивается величина x .

В этом случае основное уравнение динамики накопителя запишется следующим образом:

$$m\ddot{x} = F_0 - F - Cx - k\dot{x} - F \frac{\dot{x}}{|\dot{x}|}, \quad (1)$$

где m – приведенная масса подвижной системы накопителя; F_0 – постоянная составляющая приведенных сил, вызванная, в частности, силами собственного веса подвижной системы; C – приведенная жесткость сил тяжести и упругости системы (при наличии пружинного подвеса); k – приведенный коэффициент вязкого трения перематываемого материала и системы (при наличии масляного демпфера); $F_{\text{тр}}$ – приведенная сила сухого трения.

Чем меньше m , C , k и $F_{\text{тр}}$, тем стабильнее сила натяжения материала. Конструктивными мерами можно добиться, чтобы приведенная жесткость C имела малое значение. Изменять натяжение в процессе наматывания можно, например, за счет изменения давления воздуха в пневмоцилиндре. Масляный демпфер не потребуется, если и при его отсутствии переходный процесс будет затухающим. Влияние силы сухого трения подробно рассмотрено в [1]. Здесь лишь стоит отметить, что в реальных конструкциях силу сухого трения стараются уменьшить, применяя, например, специальные пневмоцилиндры малого трения. В этом случае силу натяжения материала можно определить из выражения:

$$F = F_0 - m\ddot{x}. \quad (2)$$

В [4] показано, при каких условиях такое допущение справедливо. Приближенное математическое моделирование асинхронного электродвигателя можно выполнить по уравнению из [2]:

$$\omega_d = \omega_c - \frac{M_d + T_d \dot{M}_d}{K_d}, \quad (3)$$

где ω_d – угловая частота вращения ротора; ω_c – синхронная частота (частота вращения магнитного поля статора); M_d – электромагнитический момент на валу двигателя; T_d – электромагнитная постоянная времени; $K_d = \frac{\partial M_d}{\partial \omega_d}$ – жесткость статической механической характеристики двигателя.

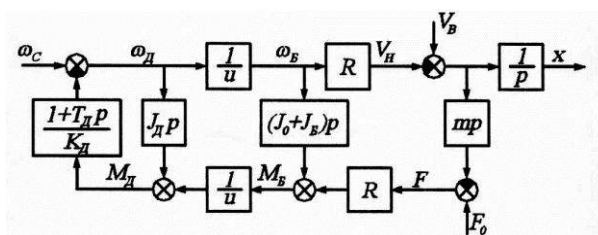


Рис. 2

На рис.2 приведена исходная структурная схема наматывающего механизма как объекта управления. На ней обозначены следующие параметры: u – передаточное отношение редуктора; R – текущий радиус наматывания; J_d – момент инерции вала двигателя и входного вала редуктора; J_B – момент инерции бобины; J_0 – момент инерции выходного вала редуктора и вала бобины; ω_b – угловая частота вращения бобины; M_B – крутящий момент на валу бобины; V_H – линейная скорость наматывания материала; V_B – линейная скорость подачи материала в намотку (скорость выпуска); p – оператор Лапласа.

После преобразования данной схемы была получена передаточная функция по управлению:

$$W = \frac{R/u}{(1+T_B p)(1+T_d p)}, \quad (4)$$

где T_B – электромагнитическая постоянная времени бобины:

$$T_B = \frac{(J_d u^2 + J_0 + J_B + mR^2)}{K_d u^2}. \quad (5)$$

На машине был установлен асинхронный электродвигатель АИР90L4, для кото-

рого $K_d=1,3 \text{ Н}\cdot\text{м}\cdot\text{с}$, и редуктор с передаточным отношением 3,8. По оценочным расчетам $J_d=0,01 \text{ кг}\cdot\text{м}^2$, $J_0=0,05 \text{ кг}\cdot\text{м}^2$, $J_B=8,1 \text{ кг}\cdot\text{м}^2$, $m=6 \text{ кг}$. В этом случае электромеханическая постоянная времени составит $T_B=0,47 \text{ с}$.

Так как в нашем случае $T_B \gg T_d$, то моделировать объект управления можно последовательным соединением интегрирующего и апериодического звена первого порядка, а не второго порядка, как в [5]. В этом случае передаточная функция упростится и примет вид:

$$W = \frac{R/u}{(1+T_B p)} \quad (6)$$

В качестве регулятора, поддерживающего среднее значение количества материала в накопителе на заданном уровне, решено было применить ПИ-регулятор, встроенный в преобразователь частоты, управляющий асинхронным двигателем (рис. 1). Запишем передаточную функцию регулятора в следующем виде:

$$W_p = K_{\Pi} \left(1 + \frac{1}{T_{\text{и}} p} \right), \quad (7)$$

где K_{Π} – коэффициент усиления пропорциональной составляющей; $T_{\text{и}}$ – время интегрирования.

Для нахождения оптимальных параметров регулятора воспользуемся методом логарифмических амплитудно-частотных характеристик. В первом приближении частота среза системы определяется выражением:

$$\omega_p = K_{\Pi} \frac{R}{u}. \quad (8)$$

Из последнего выражения видно, что по мере наматывания частота среза системы увеличивается, достигая максимального значения при максимальном диаметре бобины. Из условия устойчивости системы при максимальном диаметре бобины найдем пропорциональный коэффициент регулятора:

$$K_{\Pi} = \frac{2u}{DT_B K_{\text{зап}}}, \quad (9)$$

где коэффициент запаса $K_{\text{зап}}$ рекомендуется выбирать в пределах 2..3.

Из рассмотрения устойчивости при минимальном диаметре бобины можно найти значение времени интегрирования:

$$T_{\text{и}} = \frac{2uK_{\text{зап}}}{dK_{\Pi}} = K_{\text{зап}}^2 K_d T_B, \quad (10)$$

где $K_d = D/d$.

Испытания показали, что система управления с указанными выше настройками регулятора является устойчивой. Однако эксперименты, а затем и моделирование показали, что если плавный пуск машины до максимальной скорости выпуска материала проводить быстрее 20 с, подвижная система накопителя отклоняется в крайнее положение, сила натяжения материала падает до нуля, нарушая технологический процесс. На размотке натяжение наоборот увеличивается, что, как показано в [6], повышает вероятность обрыва материала. В рассматриваемом случае для исключения наложения первых листов картона друг на друга время плавного пуска должно быть не более 7 с. Этого можно достичь, увеличив емкость накопителя за счет увеличения его размеров или уменьшив постоянную времени T_B .

Было принято решение уменьшить постоянную времени T_B за счет увеличения передаточного отношения u редуктора. Что приведет к росту частоты вращения двигателя. Исходно передаточное отношение было выбрано так, чтобы частота вращения двигателя не превышала номинальную. Если же частота тока превысит номинальные 50 Гц, то из-за невозможности увеличить напряжение выше номинального ток в обмотках двигателя будет уменьшаться из-за роста их индуктивного сопротивления. Ток в обмотке ротора при прочих равных условиях также будет уменьшаться, так как индуцируется током статорной обмотки. А так как сила взаимодействия двух витков с током пропор-

циональна произведению тока в них, то жесткость механической характеристики будет уменьшаться по уравнению:

$$K_D = K_{D0} \begin{cases} 1 & \text{при } \omega_C \leq \omega_0, \\ \left(\frac{\omega_0}{\omega_C}\right) & \text{при } \omega_C > \omega_0, \end{cases} \quad (11)$$

где ω_0 – номинальная синхронная частота вращения (для рассматриваемого двигателя 157 рад/с); K_{D0} – жесткость механической характеристики при номинальной частоте.

Максимальная синхронная частота двигателя будет при наматывании материала на пустую шпулю с максимальной скоростью:

$$\omega_{Cmax} \approx \omega_{max} = \frac{2uV_{max}}{d}. \quad (12)$$

Подставляя (12) в (11), а затем в (5), получим электромеханическую постоянную

$$J_D = \left(\frac{2V_{max}}{\omega_0 d}\right)^2 u^4 + \left(\left(J_0 + m\left(\frac{d}{2}\right)^2\right)\left(\frac{2V_{max}}{\omega_0 d}\right)^2 - J_D\right) u^2 - \left(J_0 + J_B + m\left(\frac{D}{2}\right)^2\right) = 0. \quad (15)$$

Для нашего примера решение дает $u < 11,3$. С другой стороны, при максимальном диаметре бобины частота вращения не должна превышать номинальную, то есть:

$$u < \frac{\omega_0 D}{2V_{max}}. \quad (16)$$

Иначе постоянная времени будет больше, чем рассчитана по формуле (14). Для нашего примера это ограничение примет вид $u < 25$. Кроме того, следует учитывать, что с ростом частоты тока мощность асинхронного двигателя падает.

По этой причине решено было увеличить передаточное отношение до $u=8$. После увеличения передаточного отношения электромеханическая постоянная времени уменьшилась до величины до 0,11 с. Изменив пропорциональный коэффициент регулятора по уравнению (9), удалось добиться корректной работы наматывающего устройства при времени разгона рабочей

ную времени при минимальном диаметре бобины:

$$T_{Bmin} = \frac{(J_D u^2 + J_0 + m(d/2)^2)}{K_{D0}} \left(\frac{2V_{max}}{\omega_0 d}\right)^2. \quad (13)$$

А при максимальном диаметре:

$$T_{Bmax} = \frac{(J_D u^2 + J_0 + J_B + m(D/2)^2)}{K_{D0} u^2}. \quad (14)$$

С ростом передаточного отношения T_{Bmin} растет, а T_{Bmax} падает. Поскольку в уравнения (9) и (10) необходимо подставлять максимальное значение постоянной времени, оптимальное (по быстродействию) передаточное отношение редуктора можно определить, приравняв $T_{Bmin} = T_{Bmax}$, что требует решения следующего биквадратного уравнения:

машины до максимальной скорости за 6 секунд.

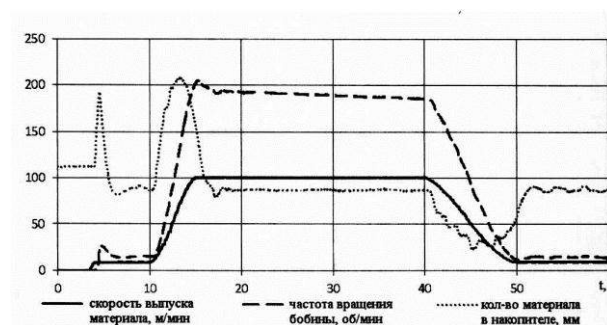


Рис. 3

На рис. 3 приведены экспериментально снятые оциллограммы для модернизированного наматывающего устройства в процессе пуска на малой скорости, увеличения скорости до максимальной и плавного уменьшения скорости.

Выше показано, что существует оптимальное передаточное отношение редуктора осевого привода бобины, при котором

постоянная времени объекта управления имеет наименьшее значение. В ряде случаев выбор оптимального (по быстродействию) передаточного отношения позволяет добиться требуемых показателей качества процесса регулирования натяжения материала при использовании стандартного ПИ-регулятора с постоянными коэффициентами. Такой регулятор реализованный средствами, встроенными в современные преобразователи частоты, исключает необходимость применения специального контроллера натяжения (промышленного компьютера), что уменьшает стоимость вновь создаваемого или модернизируемого наматывающего оборудования.

ЛИТЕРАТУРА

1. Балабаев П. С. Влияние силы трения в опорах лапки рогульки на колебания ее силы прижима в процессе намотки ровницы // Изв. вузов Технология текстильной промышленности. – 2006, №4С.

2. Вейц В.И. Динамика машинных агрегатов. – Л.: Машиностроение, 1969.

3. Глазунов В.Ф., Соломаничев М.А. Моделирование аналоговой системы управления намоткой с учетом изменения радиуса рулона // Изв. вузов Технология текстильной промышленности. – 2006, №1. С. 104...109.

4. Глазунов В.Ф., Куленко М.С. Редуцирование математических моделей петлеобразователей в системе управления натяжением ткани // Изв. вузов Технология текстильной промышленности. – 2008, №5. С. 90...93.

5. Губин В.В., Макаров А.А. Исследование динамических характеристик исполнительного механизма регулятора натяжения основы для ткацких станков // Изв. вузов. Технология текстильной промышленности. – 2007, №3. С. 107...110.

6. Рудовский П.Н., Ишматов А. Б. Изменение натяжения нити в период пуска при сматывании с вращающейся катушки // Изв. вузов. Технология текстильной промышленности. – 2012, №4. С.96...99.

Рекомендована кафедрой инженерной графики, теоретической и прикладной механики. Поступила 17.01.14.