УДК 621.88.002.72
DOI: 10.21209/2308-8761-2017-12-4-38-44

Сергей Яковлевич Березин,
доктор технических наук, профессор,
Забайкальский государственный университет
(672039, Россия г. Чита, ул. Александро-Заводская, 30),
e-mail: Berlog_ berezin2011@mail.ru

Параметрический анализ структуры мехатронного привода завинчивающих автоматов

В статье обоснована необходимость создания сборочных машин с развитой информационной системой. Представлена методика обоснования структуры привода резьбозавинчивающей электромеханической машины на основе решения исходной теоретической модели состояния её технологической системы. Методика обеспечивает возможность построения высокоточных систем управления процессом сборки резьбовых соединений с максимальным контролем его параметров и условий реализации.

Ключевые слова: сборка, завинчивание, автоматическое управление, резьбовые соединения, винт, шпилька, мехатроника, привод, датчик, обратная связь, подача, шаговый двигатель, сборочная головка

Разнообразие резьбосборочного оборудования значительно усложняет создание автоматизированных машин и требует системного подхода к анализу рабочих процессов, происходящих в их технологических системах. Оснащение машин развитыми системами очувствления и многоконтурного управления повышает качество операций и снижает их бракоопасность. Отсутствие методик систематизации элементов сборочных машин и методов их структурных описаний приводит к высоким затратам на переоснащение производства, снижает показатели гибкости и возможности создания машин агрегатно-модульного типа.

Технологическая система автоматической завинчивающей машины должна обеспечить все необходимые условия гарантированного сопряжения собираемых деталей в её координатной системе. Кроме того, её структура должна строиться не только с учётом конструктивно-технологических параметров операции, но и на основе анализа всех переходов её выполнения, которые можно свести к следующему перечню:

– точное позиционирование рабочего стола для совмещения осей собираемых деталей;

– автоматическая подача крепёжной детали в завинчивающую головку;

– осевое перемещение детали до совмещения с кромкой отверстия;

– совокупность движений для совмещения ниток резьбы гнезда и крепёжной детали в случае посадки в резьбовое гнездо;

– в случае посадки в гладкое отверстие или в отверстие листового материала необходимо обеспечить надёжное удержание крепёжной детали для начального этапа резьбоформирования;

– выполнение перехода окончательного завинчивания с необходимой затяжкой в конце;

– освобождение крепёжной детали и возврат завинчивающих устройств в исходное положение.

 © Березин С. Я., 2017

Рассмотрим характер изменения скорости и моментов завинчивания при разных условиях (рис. 1).

При любом сборочном процессе можно выделить четыре основных перехода, включая наживление, завинчивание, затяжку и освобождение головной части крепёжного элемента. Каждый из переходов имеет определённые характер изменения угловой скорости ω и крутящего момента M.

Понятно, что при такой сложной картине изменения указанных параметров возникает задача управления ходом завинчивающего процесса.

Рассмотрим структуру приводов главного движения и осевой подачи без учёта приводов позиционирования рабочего стола с приспособлением, а также манипуляционных устройств подачи крепёжной детали в завинчивающую головку.

Для решения поставленной задачи наилучшим образом подходят мехатронные приводы с шаговыми электродвигателями, имеющие минимум механических передач и электронное управление.

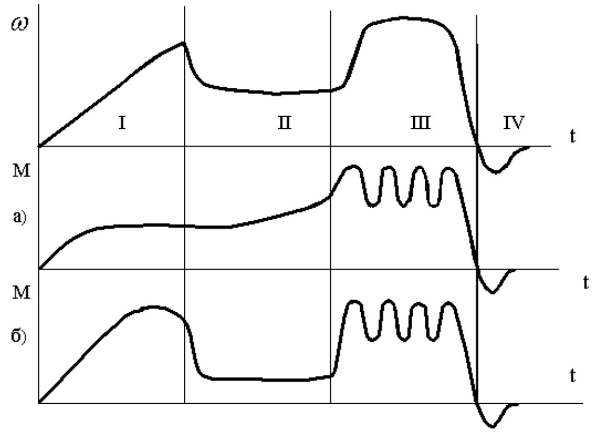

Рис. 1. Спектры изменения скорости завинчивания ω и момента M при редкоударной затяжке на III переходе: а) при завинчивании винта в гладкое отверстие; б) при завинчивании самонарезающего винта в лист

Fig. 1. Spectra of the velocity change of the column W and the moment M when low speed tightening at the third transition: a) when screwing the screw into a smooth hole; b) when screwing self -0 tapping screws into sheet

Работа таких устройств требует разработки определённого алгоритма управления ходом процесса сборки и соответствующей информационной структуры системы, а также выполнения ряда условий, вытекающих из установления функциональных взаимосвязей между управляющими и управляемыми параметрами [1].

Для анализа хода сборочного процесса установим координатные оси технологической системы: Z – центральная ось машины (ось шпинделя); Y – поперечная или радиальная ось.

Ход завинчивающего процесса, поведение крепёжной детали и ведущего наконечника можно описать следующей системой дифференциальных уравнений:

$$\begin{cases} J\dot{\omega} = M_g - K_m P\dot{\omega}; \\ m\ddot{Y} = P_u - J_n Y; \\ m\ddot{Z} = (H - Z)c - kP \cdot Z, \end{cases} \tag{1}$$

где J – суммарный момент инерции приводных элементов шпиндельной части;

$\dot{\omega}$ – угловая скорость вращения шпинделя;

Mg – крутящий момент на валу электродвигателя главного движения;
Km – коэффициент пропорциональности;
P – шаг резьбы;
m – масса винта и приводных частей завинчивающей головки;
Y, Z – поперечная и продольная координаты соответственно;
P_u — изгибающее усилие, возникающее в начальный момент наживления;
J_n – жёсткость центральной части завинчивающей головки в радиальном направлении;
H – величина сжатия пружины наживления в завинчивающей головке;
C – жёсткость пружины наживления;
kP – обобщённая сила сопротивления осевому перемещению винта;
k – коэффициент пропорциональности.

Приводной момент главного электродвигателя связан со следующими параметрами

$$M_g = K_n \frac{J_p \cdot f \cdot \hat{I}}{p_1}, \tag{2}$$

где K_n – коэффициент пропорциональности, $\left[\frac{\text{рад}}{A \cdot c}\right]$;

J_p – момент инерции ротора, $\left[\frac{H \cdot \text{м} \cdot c^2}{\text{рад}}\right]$;

f – частота импульсов тока;

$\hat{I}$ – амплитудное значение импульса, $[A]$;

p_1 – число полюсов двигателя.

Приняв частоту вращения ротора пропорциональной частоте следования импульсов $w = K_K \cdot f$, получим

$$M_g = \frac{K_n}{K_K} \cdot \frac{J_p \cdot \omega \cdot \hat{I}}{p_1},$$

где K_K – коэффициент с размерностью [рад].

Перепишем первое уравнение системы (1) в виде

$$J\dot{\omega} + K_M P\dot{w} = \frac{K_n}{K_K} \cdot \frac{J_p \cdot \hat{I}}{p_1} \cdot \omega$$

и приведём его к следующей форме:

$$\frac{d\omega}{dt} = a\omega, \tag{3}$$

где a – величина, равная $a = \frac{K_n}{K_K} \cdot \frac{J_p \cdot \hat{I}}{p_1(J + K_n P)}$.

Решение уравнения (3) будет представлено в виде

$$t_{\text{н}} \frac{1}{a} \ln|\omega| + c,$$

где $t_{\text{н}}$ – время, необходимое для внедрения заходного витка;

c – постоянная, связанная с начальными условиями $t_H = 0$; $\ln|\omega| = 1$. Тогда $c = -\frac{1}{a}$, и, следовательно, $t_H = \frac{1}{a}\ln|\omega| - \frac{1}{a} = \frac{1}{a}(\ln|\omega| = 1)$.

Расчётное время внедрения заходного витка равно

$$t_{p\text{н}} = \frac{(d - d_0) \cdot 2000}{2 \operatorname{tg}\varphi \cdot \operatorname{tg}\psi \cdot \omega \cdot d}, \tag{4}$$

где d, d_0 – наружный диаметр резьбы винта и диаметр отверстия, соответственно;

φ – угол фаски на торце стержня винта;

ψ – угол подъёма резьбы.

Воспользовавшись коэффициентом K_K, определим необходимую частоту следования импульсов, а на основании зависимости (4) получим значение амплитуды тока в импульсе

$$\begin{cases} f = \dfrac{1}{K_K} e^{at_H+1}; \\ \hat{I} = \dfrac{(\ln w - 1) \cdot K_K \cdot P_1(J + K_M P)}{t_p \cdot K_{p\text{н}} \cdot J_p}. \end{cases} \tag{5}$$

Энергетические параметры привода подачи можно рассчитывать, решив два оставшихся уравнения системы (1). Однако, предварительно необходимо рассмотреть электромеханическую схему завинчивающей головки и её рабочие координаты, представленные на рис. 2*а*.

Главное движение осуществляет электродвигатель ШД$_1$, а движение подач – ШД$_2$. Датчики Д$_1$ и Д$_1'$ контролируют значение тока в импульсах, а датчики Д$_2$ и Д$_2'$ — частоту следования импульсов. Информацию с датчиков получает и обрабатывает устройство управления УУ на базе АЦП L-CARD и компьютера. Устройство УУ содержит также блок питания с распределителями импульсов для работы электродвигателей. Исполнительные двигатели ИД (ШД$_1$ и ШД$_2$) приводят в движение объекты управления (ОУ), в качестве которых выступают ходовой винт и шпиндель с завинчивающей головкой. Датчики Д$_3$ и Д$_3'$ контролируют частоты вращения двигателей ШД$_1$ и ШД$_2$. Движение подач включается электромагнитной муфтой М$_2$ и вращение передаётся ходовой шарико-винтовой передаче. Значение осевой силы контролирует датчик Д$_5$, а крутящий момент – Д$_4$.

При этом завинчивающий наконечник сопрягается с головкой предварительно установленного винта, происходит сжатие пружины на величину H, создание осевого усилия P_0, после чего включается электродвигатель ШД$_1$ и производится завинчивание на величину l_3 с окружной скоростью, изменяющейся по закону, который необходимо установить.

Для этого, на основании решения второго уравнения системы (1) определим значение времени допустимого смещения винта по координате OY

$$t_Y = \left(\frac{\sqrt{J_n}}{m}\right)^{-1} \cdot arccos\left(1 - \frac{2L \cdot tg[\gamma] \cdot J_n}{P_0 \cdot d_o}\right), \tag{6}$$

где L – длина винта и подвески завинчивающей головки;

$[\gamma]$ – допустимый угол переноса винта;

P_0 – требуемая величина осевого усилия, необходимого для обеспечения поперечной устойчивости винта.

Приравняв выражения (4) и (6), определим значения требуемой осевой силы подачи

$$P_0 \geq \frac{2L \cdot tg[\gamma] \cdot J_n}{\left[1 - cos\left(\sqrt{\dfrac{J_n}{m}} \cdot t_p\right)\right] \cdot d_0}. \tag{7}$$

Аналогичным образом решаем третье уравнение системы (1) и получаем значение нормированного времени внедрения заходного витка по координате OZ

$$t_Z = \left(\sqrt{\frac{c + kP}{m}}\right)^{-1} arccos\left[1 - \frac{(d - d_0) \cdot (c + kP)}{2tg\varphi \cdot H \cdot c}\right]. \tag{8}$$

Если длина заходного витка винта в соответствии с величиной припуска равна

$l_3 = \dfrac{d - d_0}{2tg\varphi}$, то число оборотов для его внедрения $z_0 = \dfrac{l_3}{P_B}$, где P_B – шаг ходового винта осевой подачи, показанного на рис. 2*а* справа от муфты М_1.

Следовательно, окружная скорость вращения ходового винта будет равна

$$\omega_z = \frac{2\pi \cdot l_3}{P_B \cdot t_Z},$$

а частота следования импульсов шагового двигателя осевой подачи будет соответствовать значению

$$f_Z = \frac{\pi(d - d_0)}{K_K \cdot t_Z \cdot P_B \cdot tg\varphi}.$$

Приняв время наживления винта t_H к выражению (8), получим необходимую окружную скорость привода главного движения в конце наживления

$$\omega = e^{at_z+1}. \tag{9}$$

Зная реактивный момент сопротивления вращению ходового винта, можно определить амплитуду импульсов шагового электродвигателя подачи аналогично приводу главного движения.

В дальнейшем реализация действий мехатронной головки происходит по схеме, показанной на рис. 2*б*. После окончания времени t_Z сборка подходит к этапу II, из рис. 1. При этом значение скорости главного движения меняется в соответствии с программой, а скорость подачи должна соответствовать соотношению шагов резьбы крепёжного элемента и ходового винта. Но на втором и последующих этапах осевой силы наживления P_0 уже не требуется, и скорость подачи должна соответствовать минимальному значению показаний датчика Д_5.

В начале III этапа осевая подача выключается, а шаговый электродвигатель ШД_1 переходит в режим затяжки. Создаётся необходимый крутящий момент, включается электромагнитная муфта М_2 и редкоударный механизм B. В конце затяжки они выключаются, двигатель ШД_1 останавливается, а ШД_2 реверсируется, и головка освобождает винт. Все устройства возвращаются в исходное положение.

Реализация работы агрегата, представленного на рис. 2, будет возможна на основе разработки подробной идентификации параметров управления. Для этого рассмотрим только цель главного движения завинчивающей машины с электродвигателем ШД_1. Его работа основана на информации о ходе процесса завинчивания, которая поступает из трёх источников:

– от параметрических датчиков;

– от отдельного блока хранения и ввода расчётных заданных, данных в программе компьютера;

– от компьютерной модели процесса, представляющего картину формирования параметров сборки по её этапам (на примере рис. 1).

В блок ввода данных заносятся константы электродвигателя и параметров механических цепей привода. Вал электродвигателя и шпинделя соответственно связан с датчиком угла поворота, сигнал которого после дифференцирования преобразуется в частоту вращения ω и далее в ускорение $\dot{\omega}$.

В модели процесса заложены различные варианты таблично-графических представлений о распределении частоты вращения по длине завинчивания (Z). Информация с датчиков перерабатывается в соответствии с ходом расчётов по формулам (1)–(5). Данные о поднастройке частоты $\pm\Delta f$ и амплитуды импульсов тока $[\pm\Delta I = F(\pm\Delta M)]$ поступают в устройство управления.

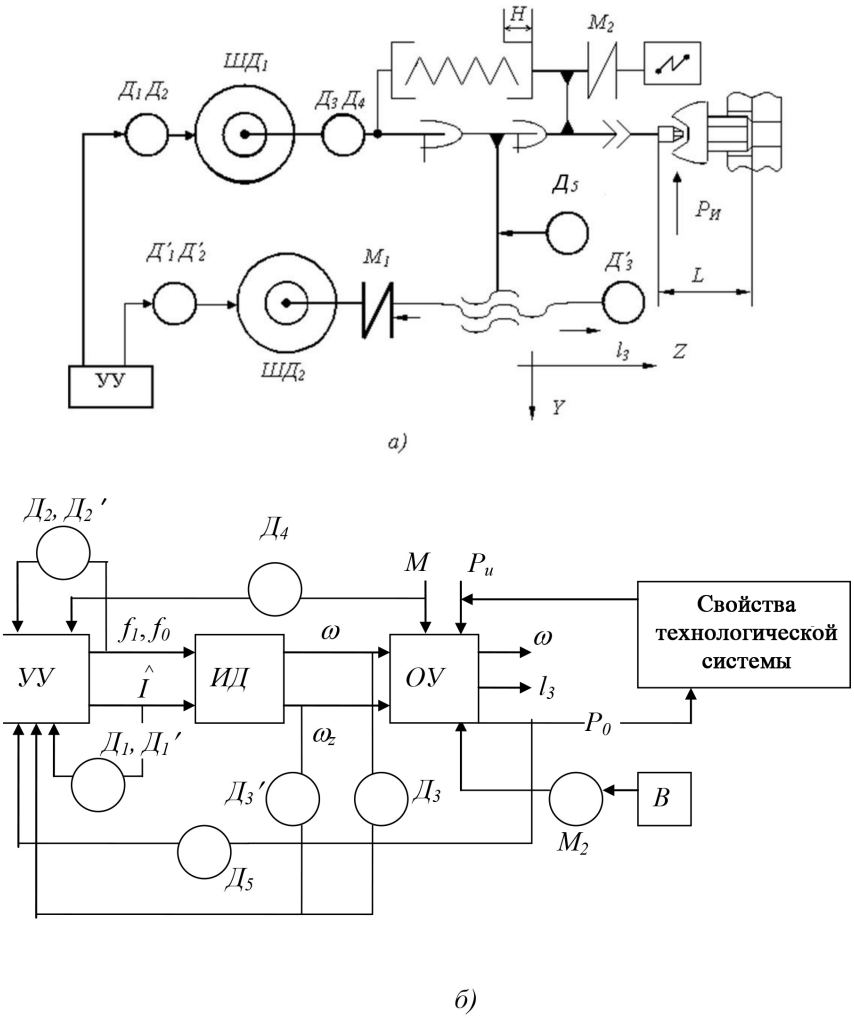

Рис. 2. Структура мехатронного привода:
а) электромеханическая схема; б) структурная схема
Fig. 2. The structure of the mechatronic drive:
a) electromechanical circuit; b) structural scheme

Так учитывается реакция системы на внешние возмущения (по крутящему моменту M) и по электрическим параметрам.

Представленный подход к формированию структуры управляющего процесса, основанный на детальном представлении об его параметрах и ходе протекания, даёт возможность не только создавать системы, основанные на традиционных принципах теории автоматического управления, но и позволяет разрабатывать более совершенные и быстродействующие системы, например, на основе нейрорегуляторов.

Список литературы

1. Березин С. Я. Основы кибернетики и управление в биомедицинских системах: учеб. пособие. Изд. 2-е, дополн. и перераб. Старый Оскол: Изд-во ТНТ, 2015. 270 с.

2. Berezin S. Y., Chumakov R. E. Structured system analysis for assembly automation // Journal of Mechanical Engineering. 2006. Vol. 57, No. 3. P. 180–188.

Статья поступила в редакцию 05.05.2017; принята к публикации 15.05.2017

Библиографическое описание статьи

Березин С. Я. Параметрический анализ структуры мехатронного привода завинчивающих автоматов // Учёные записки Забайкальского государственного университета. Сер. Физика, математика, техника, технология. 2017. Т. 12, № 4. С. 38–44. DOI: 10.21209/2308-8761-2017-12-4-38-44.

Sergey Ya. Berezin,
Doctor of Engineering Science, Professor,
Transbaikal State University
(30 Aleksandro-Zavodskaya st., Chita, 672039, Russia),
e-mail: Berlog_berezin2011@mail.ru

Parametrical Analysis of Mechatronics Drive Structure of the Screwing Automatic Devices

In this article necessity of assembly machines with the developed information system is proved. The technique of a substantiation of structure of screwing electromechanical machines on the basis of the solution of initial theoretical model of a condition of its technological system is presented. The technique provides an opportunity of construction of precision control systems with process of assembly of carving connections with the maximal control of its parameters and conditions for realization.

Keywords: assembly, screwing, automation control, screw joints, fastener, stud, mechatronics, driver, sensor, feedback, axial feed, stepper motor, assembly head

References

1. Berezin S. Ja. Osnovy kibernetiki i upravlenie v biomedicinskih sistemah: ucheb. posobie. Izd. 2-e, dopoln. i pererab. Staryj Oskol: Izd-vo TNT, 2015. 270 s.

2. Berezin S. Y., Chumakov R. E. Structured system analysis for assembly automation // Journal of Mechanical Engineering. 2006. Vol. 57, No. 3. P. 180–188.

Received: May 05, 2017; accepted for publication May 15, 2017

Reference to article

Berezin S. Ya. Parametrical Analysis of Mechatronics Drive Structure of the Screwing Automatic Devices // Scholarly Notes Of Transbaikal State University. Series Physics, Mathematics, Engineering, Technology. 2017. Vol. 12, No 4. PP. 38–44. DOI: 10.21209/2308-8761-2017-12-4-38-44.