

Влияние свойств сервопривода шпинделя на динамику сверления глубоких отверстий малого диаметра*

В. П. Лапшин, И. А. Туркин

(Донской государственный технический университет)

Рассматриваются вопросы моделирования формообразующих движений при сверлении глубоких отверстий с учётом динамической связи, возникающей в процессе резания. Приведены результаты моделирования в среде Matlab траекторий изменения частоты вращения шпинделя в зависимости от параметров серводвигателя и характеристик процесса. Впервые проведено моделирование процессов обработки металлов сверлением с учётом постоянно увеличивающегося момента сопротивления, обусловленного стружкообразованием. Представлен пример фазовой траектории, описывающей динамику формообразующих движений при сверлении глубоких отверстий с учётом увеличивающегося момента, связанного со стружкообразованием. Показано преобразование фазовых портретов в зависимости от параметров серводвигателя и процесса обработки. Приведены рекомендации по выбору параметров двигателя. Они зависят от динамической характеристики процесса обработки и влияния момента, обусловленного стружкообразованием.

Ключевые слова: сверление глубоких отверстий, момент сопротивления, модель, привод подачи, стружка.

Введение. В процессе обработки глубоких отверстий при каждом единичном заглублении стружка накапливается в стружкоотводящих канавках. Таким образом изменяется момент резания по пути сверления. Это следует учитывать при создании оборудования для сверления глубоких отверстий. В процессе обработки приходится периодически выводить инструмент из зоны резания, чтобы очистить его от стружки и улучшить доступ смазочно-охлаждающей жидкости (СОЖ) в зону обработки. Это особенно актуально при сверлении глубоких отверстий малого диаметра. В этом случае действующий на сверло возрастающий момент достаточно быстро достигает значений, при которых инструмент ломается. Ограничение максимального значения момента обусловлено также тем, что по мере накопления стружки возрастает возмущение, действующее на сверло. По этой причине направление движения инструмента отклоняется от заданного — соответственно, отклоняется ось сверления. Накоплением стружки обусловлены и погрешности поперечного сечения отверстия.

Известные работы, посвящённые управлению процессом сверления [1, 2, 3], не принимали во внимание следующее. Сервопривод вращения инструмента за счёт динамической связи, формируемой процессом обработки, изменяет свои динамические характеристики. Изменения зависят как от динамической связи, так и от параметров двигателя. Они влияют также на эффективность системы управления процессом. Рассмотрим динамическую модель серводвигателя во взаимосвязи с процессом обработки.

Динамическая модель двигателя вращения шпинделя с учётом реакции со стороны процесса обработки. Сверление глубоких отверстий малого диаметра выполняется на силовых сверлильных головках с управляемыми приводами подачи и вращения шпинделя [1]. Схема сверлильной установки приведена на рис. 1.

Вначале рассмотрим случай, когда скорость подачи V остаётся неизменной и реакцией со стороны процесса резания на привод подачи можно пренебречь. Отсутствие реакции в данном случае объясняется тем, что между пинолью перемещения шпинделя и сервоприводом подачи

* Работа выполнена в рамках инициативной НИР.

стоит редуктор с большим передаточным отношением. Тогда, учитывая реакцию со стороны процесса обработки, уравнение двигателя постоянного тока с якорным управлением можно представить в виде

$$\begin{aligned} U - c_e \omega &= L \frac{di}{dt} + Ri, \\ c_m i &= J \frac{d\omega}{dt} + M(\omega), \end{aligned} \quad (1)$$

где U — напряжение, подаваемое на якорь двигателя; i — ток якорной цепи двигателя; R, L — параметры электрической части двигателя; J — момент инерции ротора двигателя вместе со шпинделем; ω — частота вращения ротора двигателя; $M(\omega)$ — момент сопротивления, представленный в координате состояния системы; c_m, c_e — механическая и электрическая постоянные двигателя.

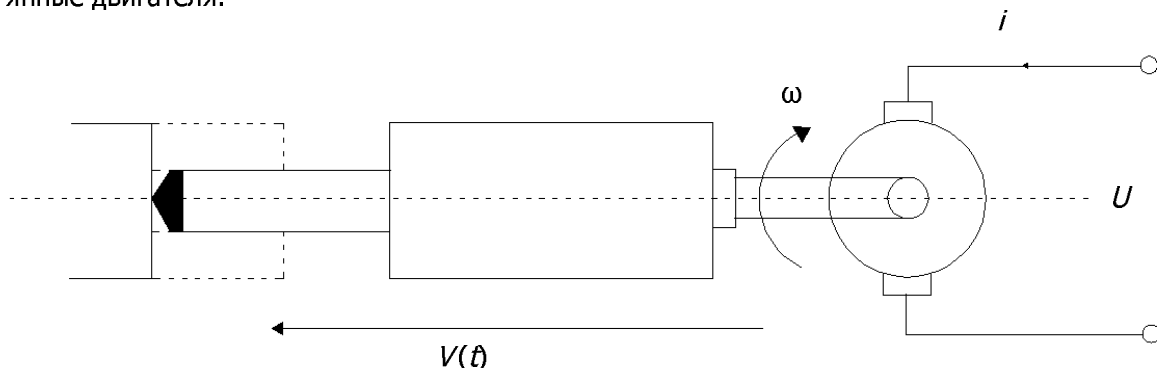


Рис. 1. Схема, изображающая процесс сверления

Для конкретизации уравнения (1) необходимо раскрыть функцию $M(\omega)$. Если не учитывать накопление стружки в стружкоотводящих канавках, а также силы, действующие на заднюю грань инструмента, то момент, формируемый в зоне резания, можно считать пропорциональным величине подачи на оборот S :

$$F = \rho DS, \quad (2)$$

где D — диаметр сверла; ρ — коэффициент, имеющий смысл среднего давления стружки на переднюю поверхность инструмента. Величина S может быть представлена в следующем виде:

$$S = \int_{t-T}^t V(t) dt, \quad (3)$$

где $T = 1 / \omega$ — время одного оборота (величина, обратная частоте в с^{-1}).

Тогда уточнённое уравнение динамики двигателя с учётом реакции со стороны процесса обработки

$$\begin{aligned} U - c_e \omega &= L \frac{di}{dt} + Ri, \\ c_m i &= J \frac{d\omega}{dt} + \frac{KV}{\omega}, \end{aligned} \quad (4)$$

где $K = \rho D$ — коэффициент, характеризующий свойства сверла и заготовки.

Проведём предварительный анализ системы (4). Во-первых, от традиционного уравнения двигателя постоянного тока с якорным управлением систему (4) принципиально отличает наличие нелинейного члена. Во-вторых, влияние момента, действующего со стороны процесса резания, возрастает по мере уменьшения частоты вращения шпинделя. Это связано с тем, что в принятой модели скорость подачи $V = \text{const}$. Очевидно, что свойства системы (4) принципиально за-

висят от точки равновесия ω_0 , и поведение системы анализируется относительно данной точки. Для вычисления точки равновесия можно воспользоваться следующим уравнением статики:

$$\begin{aligned} U - c_e \omega &= Ri, \\ c_m i &= \frac{KV}{\omega}. \end{aligned} \quad (5)$$

Выражение (5) показывает, что в зависимости от управления и скорости подачи имеет место ветвление точек равновесия. Причём каждому управлению соответствуют две точки равновесия $\omega_{1,0}$, $\omega_{2,0}$, определяемые из выражения

$$\omega_{1,0}, \omega_{2,0} = \frac{Uc_m \pm \sqrt{(Uc_m)^2 - 4KRVc_e c_m}}{2c_e c_m}. \quad (6)$$

При $(Uc_m)^2 < 4KRVc_e c_m$ точки равновесия в системе отсутствуют. Если $(Uc_m)^2 > 4KRVc_e c_m$, то по мере увеличения управления, как нетрудно показать, верхней ветви смещения равновесия соответствует устойчивое поведение системы в малом. Нижней ветви соответствует неустойчивое поведение системы.

Для изучения динамических свойств систему (4) удобно представить в виде следующего уравнения динамики:

$$\omega^{(0)} - \omega^{(M)} = T_{\text{эм}} T_{\text{э}} \frac{d^2 \omega}{dt^2} + T_{\text{эм}} \frac{d\omega}{dt} + \omega, \quad (7)$$

где $T_{\text{эм}}$, $T_{\text{э}}$ — соответственно электрохимическая и электрическая постоянные времени;

$\omega^{(0)} = U/c_e$ — установившееся значение частоты холостого хода; $\omega^{(M)}$ — приведённое к частоте вращения ротора двигателя значение момента, действующего на него со стороны процесса резания. Это значение равно

$$\omega^{(M)} = K_{\omega} \frac{1}{\omega} \left(1 - \frac{T_{\text{э}}}{\omega} \frac{d\omega}{dt} \right). \quad (8)$$

Здесь $K_{\omega} = \frac{KRV}{c_e c_m}$ — коэффициент изменения частоты вращения двигателя в единицу времени с^{-2} .

Это основной обобщённый параметр, раскрывающий влияние нагрузки на частоту вращения двигателя. Он увеличивается по мере возрастания скорости подачи и давления стружки на переднюю поверхность сверла, то есть учитываются свойства инструмента и физико-механические характеристики обрабатываемого материала.

Система (7) с учётом (8) имеет ясное физическое представление. Во-первых, уравнение (7) показывает, что частота вращения двигателя определяется законом изменения напряжения якоря и моментом сопротивления, зависящим от частоты. Во-вторых, если $\omega^{(0)} < \omega^{(M)}$, то двигатель начинает работать как генератор. Причём вращение двигателя шпинделя определяется приводом подачи. Условие $\omega^{(0)} < \omega^{(M)}$ физически невыполнимо.

Полученный результат связан с тем, что в модели формирования сил резания при сверлении область определения параметров и координат состояния ограничена. При малых частотах вращения шпинделя за счёт дополнительных сил, формируемых в области задней грани инструмента, существенно изменяется характеристика сил, представленных в координатах состояния.

Закон изменения сил в модели (7) будет рассмотрен ниже. Здесь же проанализируем фазовые траектории, соответствующие (7). Для этого введём в рассмотрение фазовые координаты $(\omega, a = d\omega / dt)$. Тогда система уравнений относительно фазовых координат будет

$$\begin{cases} \frac{d\omega}{dt} = a; \\ \frac{da}{dt} = \frac{\omega^{(0)} - T_{ЭМ}a - \omega - \frac{K_{\omega}(\omega - T_{Э}a)}{\omega^2}}{T_{ЭМ}T_{Э}}, \end{cases} \quad (9)$$

или уравнение в фазовой плоскости (рис. 2)

$$\frac{da}{d\omega} = \frac{\omega^{(0)} - T_{ЭМ}a - \omega - \frac{K_{\omega}(\omega - T_{Э}a)}{\omega^2}}{T_{ЭМ}T_{Э}a}. \quad (10)$$

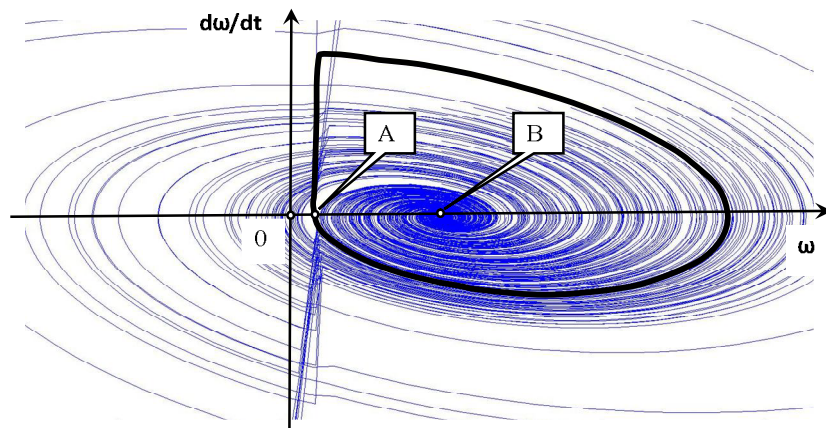


Рис. 2. Пример фазового портрета системы

Главная особенность фазовых траекторий (10) — существование в фазовой плоскости $(\omega, d\omega/dt)$ замкнутой фазовой траектории, являющейся сепаратрисой. Она ограничивает область притяжений асимптотически устойчивой точки равновесия системы. Приведём примеры фазового портрета системы (рис. 2) для двигателя фирмы Sanyo Denki MDH-B ($c_e = 2,6$; $c_m = 2,6$; $R = 0,85$ Ом; $L = 1,6$ мГн; $J = 3,5$ кг·м²) [3], используемого при создании силовой сверлильной головки. Коэффициент K был определён экспериментально и приближённо равен 150. Радиус сверла $R = 4,0$ мм.

Как видно, сепаратриса, ограничивающая область притяжения точки равновесия B , проходит через точку равновесия A . Причём конфигурация области притяжения точки равновесия B при неизменных параметрах двигателя зависит от коэффициента влияния процесса резания K_{ω} на вращение ротора двигателя шпинделя и от внешнего управления $\omega^{(0)}$. По мере уменьшения $\omega^{(0)}$ точки равновесия A и B сближаются и область притяжения точки равновесия B уменьшается и вырождается. Величина области притяжения имеет принципиальное значение для работоспособности системы управления процессом сверления, так как реальная система является возмущённой. Кроме этого необходимо учитывать, что существуют ограничения на вектор управления.

Преобразование области притяжения за счёт момента, формируемого стружкой в стружкоотводящих канавках. В (1) момент $M(\omega)$, формируемый процессом обработки, не учитывает влияние стружки, которая накапливается в стружкоотводящих канавках по мере увеличе-

ния заглубления L . Приведём типичный пример изменения момента, действующего на сверло (рис. 3). Суммарное значение момента, действующего на сверло, можно представить в виде суммы

$$M_{\Sigma} = M(\omega) + M_c(L), \quad (11)$$

где $M_c(L) = \begin{cases} 0 & \text{при } L \in (0, L_{0,1}), \\ k_c \int_{L_{0,1}}^{L_{\max}} V(L) dL & \text{при } L \in (L_{0,1}, L_{\max}) \end{cases}$ — момент, определяемый накоплением стружки в

стружкоотводящих канавках. При постоянной скорости подачи $M_c(L)$ пропорционален $L - L_{0,1}$.

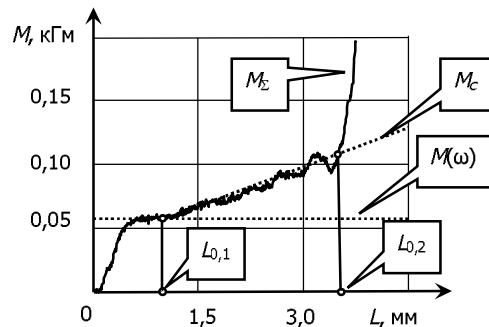


Рис. 3. Пример осциллограммы изменения крутящего момента по мере единичного заглубления при сверлении стали 35Л сверлом из Р6Н5 диаметром 2,15 мм: частота вращения инструмента — 3000 об/мин, величина подачи — 0,015 мм

Если положить $M_c = \text{const}$, то в (10)

$$\omega^{(0)} = \frac{U}{C_e} - \Delta\omega. \quad (12)$$

Здесь $\Delta\omega$ — определяемое моментом стружки приращение внешней силы, приведённой к вращению. Это приращение влияет, во-первых, на точки равновесия системы. Во-вторых, исходя из (10), можно утверждать, что оно уменьшает область притяжения точки равновесия системы и может привести к полному вырождению области асимптотической устойчивости этой точки. Практика показывает (рис. 3), что, начиная с некоторого заглубления $L_{0,2}$, наблюдается непропорционально быстрое возрастание момента, который вскоре достигает критического значения — и инструмент ломается.

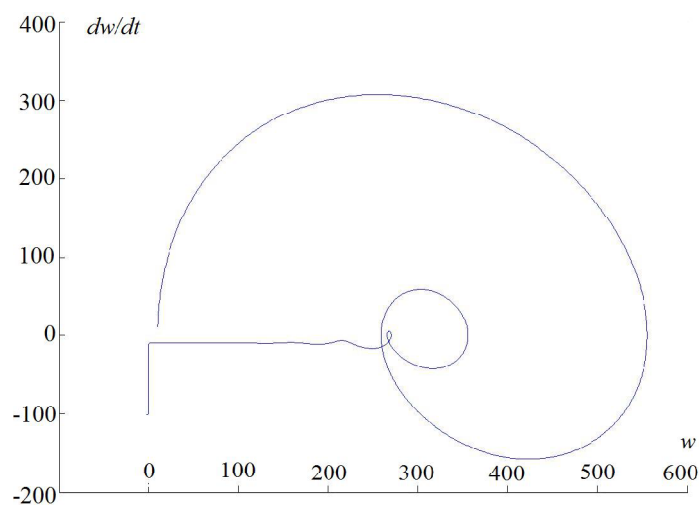


Рис. 4. Фазовая траектория при возрастании момента сопротивления

На рис. 4 представлена экспериментальная фазовая траектория, характеризующая поведение системы при линейном возрастании момента сопротивления. Как видно из рисунка, с воз-

растанием момента уменьшается скорость резания. При некотором (близком к нулю) значении скорости момент сопротивления скачкообразно возрастает. Это приводит к скачкообразному изменению ускорения. В реальных системах в этот момент инструмент заклинивает — и сверло разрушается.

Выводы. Работы, посвящённые динамике процесса сверления [1, 2, 3], позволяют оценить влияние некоторых факторов процесса резания на систему управления. Однако множество проблем и вопросов остаются неисследованными.

Впервые оценивалась динамика системы резания с одновременным учётом следующих условий:

- изменяющийся момент резания;
- действующий на систему момент, возникающий при стружкообразовании.

Как видно из проведённого исследования, разработанная математическая модель вполне адекватно описывает динамику системы в условиях сложной динамической нагрузки.

Библиографический список

1. Заковоротный, В. Л. Система оптимального управления процессом глубокого сверления отверстий малого диаметра / В. Л. Заковоротный, Т. С. Санкар, Е. В. Бордачёв // СТИН. — 1994. — № 12. — С. 9–15.
2. Заковоротный, В. Л. Система оптимального управления процессом глубокого сверления отверстий малого диаметра / В. Л. Заковоротный, Т. С. Санкар, Е. В. Бордачёв // СТИН. — 1995. — № 1. — С. 12–18.
3. Моделирование динамической связи, формируемой процессом точения, в задачах динамики процесса резания (скоростная связь) / В. Л. Заковоротный [и др.] // Вестник Дон. гос. техн. ун-та. — 2011. — № 2. — С. 137–146.

Материал поступил в редакцию 5.02.2013.

References

1. Zakovorotniy, V. L., Sankar, T. S., Bordachev, E. V. Sistema optimalnogo upravleniya protsessom glubokogo sverleniya otverstiy malogo diametra. [Optimal control system of pinhole deep drilling.] STIN, 1994, no. 12, pp. 9–15 (in Russian).
2. Zakovorotniy, V. L., Sankar, T. S., Bordachev, E. V. Sistema optimalnogo upravleniya protsessom glubokogo sverleniya otverstiy malogo diametra. [Optimal control system of pinhole deep drilling.] STIN, 1995, no. 1, pp. 12–18 (in Russian).
3. Zakovorotniy, V. L., et al. Modelirovaniye dinamicheskoy svyazi, formiruyemoy protsessom tocheniya, v zadachakh dinamiki protsessa rezaniya (skorostnaya svyaz). [Dynamic coupling simulation formed through turning process in cutting dynamic problems (high-velocity connection).] Vestnik of Don State Technical University, 2011, no. 2, pp. 137–146 (in Russian).

EFFECT OF SPINDLE SERVO DRIVE PROPERTIES ON DRILLING DYNAMICS OF DEEP PINHOLES*

V. P. Lapshin, I. A. Turkin
(Don State Technical University)

Some issues on forming movement modeling when drilling deep holes with the dynamic link generated under cutting are considered. The results of the spindle frequency drift trajectories simulation in Matlab according to the parameters of the servo motor and process characteristics are presented. For the first time, metal drilling cut processes with the ever increasing section modulus determined by chip making are simulated. The phase path describing the forming movement dynamics under drilling deep holes with the increasing section modulus associated with chip making is exemplified. The phase portrait transformation depending on the servo motor parameters and the production process is shown. Recommendations on the motor parameters selection are given. They depend on the processing dynamic characteristics, and on the modulus effect determined by chip making.

Keywords: deep-hole drilling, section modulus, model, feed drive, bore chip.

* The research is done within the frame of the independent R&D.