

АНАЛИЗ ПРЕДЕЛЬНЫХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ВОЗМОЖНОСТЕЙ КРУГЛОШЛИФОВАЛЬНОГО СТАНКА 3М151 ПРИ ВРЕЗНОМ ШЛИФОВАНИИ

Сизый Ю.А., докт. техн. наук, Ушаков А.Н., канд. техн. наук, Новиков Д.Ф.
(Национальный технический университет «ХПИ», г. Харьков)

The paper analyzes the limits of technological possibilities grinding machines 3M151 with plunge grinding

Реализуя какой-либо цикл врезного шлифования, назначают скорость вращения заготовки S , м/мин; скорость врезной подачи V_p , мм/мин и скорость шлифования V , м/с. Последняя в станке 3М151 нерегулируемая и определяется кинематикой привода главного движения. Она такова, что обеспечивает при холостом вращении круга его окружную скорость $V=50$ м/с.

Кроме режимов резания выбирается характеристика круга и режимы правки. Оперативное управление циклом врезного шлифования после выбора характеристик круга и его режимов правки остается только за двумя параметрами: S и V_p . Параметры S , V_p и диаметр d шлифуемой поверхности определяют подачу на оборот или, что тоже самое, глубину шлифования в установившемся режиме шлифования:

$$h_0 = \frac{\pi \cdot d \cdot V_p}{S \cdot 1000}, \quad (1)$$

где d в мм.

Установившийся режим шлифования в фазу шлифования, например с черновой подачей на оборот h_0 , наступает после касания круга с заготовкой через какое-то время, которое необходимо, чтобы в упругой системе станка образовалось усилие натяга, равное радиальной составляющей силы шлифования с подачей на оборот (глубиной) h_0 .

За время образования необходимого натяга в упругой системе станка глубина шлифования нарастает от нуля в момент касания до h_0 в установившемся режиме. За это время окружная составляющая силы шлифования P_z растет также от нуля до какого-то значения в установившемся режиме. При этом рост P_z сопровождается ростом момента сопротивления $M_c = P_z \cdot d / 2$ на двигатель привода, который приводит к уменьшению частоты ω вращения круга, что известно из статической характеристики асинхронного двигателя (формулы Киосса) [1].

Уменьшение ω ведет к росту момента, развиваемого двигателем M_δ привода главного движения станка 3М151, величина которого ограничивается его критическим значением для двигателя.

Важно, к сказанному выше, еще учесть зависимость силы P_z от скорости шлифования V . Однако надежных экспериментальных данных о влиянии скорости шлифования, данных о влиянии скорости шлифования на силу P_z в рекомендуемом для врезного шлифования диапазоне (30...50) м/с не обнаружено. Так, в работе [2] Филимонов Л.Н. приводит данные собственных исследований и ряда других исследователей и отмечает превалирующую тенденцию – рост V ведет к уменьшению P_z . Однако имеет место большой разброс степени этого влияния V на P_z . Кроме этого, в работе [3] в отличие от других работ, рост V ведет к росту P_z . Таким образом, учесть влияние V на P_z проблематично.

В настоящей работе авторы опираются на результаты экспериментальных исследований силы P_z от условий шлифования (полученных в ОКБШС Харьковского завода шлифовальных станков), выполненных при неизменной скорости вращения круга на холостом ходу, равной 50 м/с.

Несомненно, нагружая привод вращения круга моментом резания M_c , двигатель привода теряет обороты и шлифование производится со скоростью ниже 50 м/с. Поэтому в экспериментальной зависимости P_z , полученной в ОКБШС, уже косвенно отражено влияние V на P_z .

Вся динамика работы асинхронного двигателя от разгона его вхолостую; работы в режиме нарастающей глубины шлифования, т.е. в режиме торможения его с нарастанием нагрузки и остановкой при превышении нагрузки его критического значения хорошо описывается моделью в виде 3-х дифференциальных уравнений [1]:

$$\left. \begin{aligned} \frac{dM_\delta}{dt} &= (\omega_0 - P\omega) \cdot \psi - \frac{1}{T_\delta} M_\delta; \\ \frac{d\psi}{dt} &= \frac{2}{T_\delta} \cdot M_\kappa - \frac{1}{T_\delta} \cdot \psi - (\omega_0 - P \cdot \omega) \cdot M_\delta; \\ \frac{d\omega}{dt} &= \frac{1}{I} \cdot M_\delta - \frac{1}{I} \cdot M_c. \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

Модель (2) хороша еще и тем, что все параметры ее: T_δ ; S_κ ; M_κ ; P могут быть рассчитаны, пользуясь только каталожными данными двигателя. Для двигателя 4А132М4П2, применяемого на станке 3М151, они следующие: $N_{ном} = 11$ кВт; $n_{ном} = 1460$ об/мин; $\mu_n = 2$; $M_u = 2 \cdot r$; $P = 2$. Используя эти данные, получены следующие значения параметров модели [4]:

$$T_\delta = 0,008418; S_\kappa = 0,378334; M_\kappa = 158,363 \text{ Н}\cdot\text{м}.$$

В модель (2) вместо момента инерции ротора I_p необходимо подставить момент инерции I всего привода, т.е. к I_p добавить моменты инерции шкивов ременной передачи, шпинделя и круга с крепежными фланцами. Согласно выполненного расчета, суммарный момент инерции привода вращения круга $I = 2,6177$ Н·м. Нагрузка на двигатель создается, как уже отмечалось, нарастающей глубиной шлифования $h(t)$ и соответственно нарастающим моментом

силы резания M_c . В работе [5] получены формулы для расчета глубины шлифования $h(t)$ для различных фаз цикла врезного шлифования. Так, для фазы шлифования с черновой подачей h_0 эта формула следующая:

$$h(t) = h_0 \left(1 - \exp \left(- \frac{j \cdot t}{c_p \cdot T} \right) \right), \quad (3)$$

где t – время, с; T – время оборота заготовки, с; j – статическая жесткость упругой системы станка, Н/м; c_p – статическая “жесткость” процесса шлифования, Н/м.

“Жесткость” процесса врезного шлифования – это отношение радиальной составляющей силы шлифования P_y к глубине шлифования h :

$$c_p = \frac{P_y}{h}. \quad (4)$$

Расчет составляющих силы шлифования P_z и P_y производится на основе эмпирической зависимости, полученной в ОКБШС Харьковского завода шлифовальных станков:

$$P_z = 2,254 \frac{\sigma_t^{0,342} H^{0,258} \cdot V_p^{0,945}}{Z^{0,051} \cdot S^{0,073} \cdot S_{pr}^{0,073} \cdot t_{pr}^{0,026}}, \text{ Н/мм}, \quad (5)$$

где σ_t (кгс/мм²) – предел прочности материала заготовки при 600⁰С; H – показания прибора “Звук-202” – частота собственных колебаний круга, кГц (ГОСТ 25901-83); Z – зернистость; V_p – скорость врезной подачи, мм/мин; S_{pr} – продольная скорость правки, мм/мин; t_{pr} – глубина правки, мм.

Поскольку глубина шлифования h изменяется в фазе неустановившегося режима врезного шлифования при неизменной V_p , задаваемой механизмом подачи, то для расчета изменяющейся силы P_z от h , необходимо выразить V_p через h , согласно (2), и подставить это выражение в (5). В результате получено:

$$P_z = 523,3 \frac{\sigma_t^{0,342} \cdot H^{0,256} \cdot S^{0,872} \cdot h^{0,945}}{Z^{0,051} \cdot S_{pr}^{0,073} \cdot t_{pr}^{0,026} \cdot d^{0,945}}, \text{ Н/мм}. \quad (6)$$

Принимаем неизменными при оперативном управлении циклом врезного шлифования следующие параметры формулы (6): шлифуемая шейка вала диаметром $d=65$ мм, сталь закаленная 40X ($\sigma_t=22$ кгс/мм²; круг 24A16НСМ1К ($H=1,38$; $Z=16$); $S_{pr}=150$ мм/мин; $t_{pr}=0,01$ мм. С этими значениями и с учетом ширины шлифования формула (6) приобретает следующий вид:

$$P_z = 63,7 \cdot S^{0,872} \cdot h^{0,945} \cdot B, \text{ Н}. \quad (7)$$

Принимая $P_y = 2,5 \cdot P_z$, вычисляемую согласно формулы (4), и выражая V_p через h и d , анализируя полученную зависимость относительно h методом наименьших квадратов [6], получаем:

$$P_y = c_p \cdot h, \text{ Н/м}, \quad (8)$$

где $c_p = 1,709 \cdot 10^6 \cdot \frac{\sigma_t^{0,342} \cdot H^{0,258} \cdot S^{0,872} \cdot B}{Z^{0,051} \cdot S_{pr}^{0,073} \cdot t_{pr}^{0,026} \cdot d^{0,945}}$.

Расчет статической жесткости j упругой системы станка, что необходимо для расчета $h(t)$, согласно формулы (3), для трехмассовой модели станка 3М151 приведен в работе [7] и получено следующее значение: $j = 3,169 \cdot 10^7$ Н/м.

Последний параметр в формуле (3) – это время оборота заготовки:

$$T = \frac{\pi \cdot d \cdot 60}{S \cdot 1000}, \text{ с.} \quad (9)$$

Функциональная связь между системами врезного шлифования в фазу шлифования с черновой подачей h_0 показана на рис. 1.

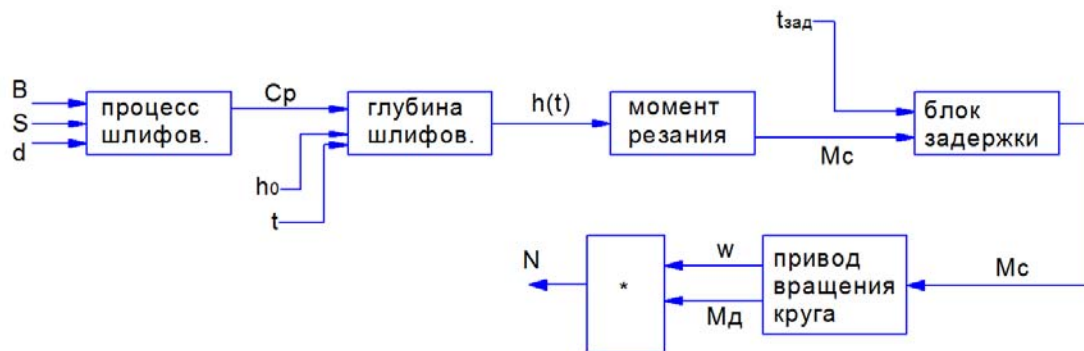


Рис. 1. Функциональная схема врезного шлифования в фазу шлифования с черновой подачей h_0

Расчеты c_p , $h(t)$ и $M_c = P_z \cdot d / 2$ рассмотрены выше. Момент M_c , согласно рис. 1, подается на вход привода вращения круга, т.е. на вход модели электродвигателя, описанной уравнениями (2), с моментом инерции I всего привода после задержки на время $t_{зад}$, необходимое для разгона двигателя вхолостую. Выходными сигналами привода являются угловая скорость движения ω и момент, развиваемый им - M_∂ .

В установившемся равновесном режиме шлифования $M_\partial = M_c$ и произведение $\omega \cdot M_\partial = N$ – мощность привода. Если $M_c > M_\partial$, то двигатель останавливается. Варьируя параметрами оперативного управления врезным шлифованием (h_0 , B , d , S), можно оценить предельные режимы шлифования, ограниченные мощностью привода или диапазоном регулирования скоростью врезной подачи V_p , мм/мин, который в станке 3М151 равен 0,2...4,5 мм/мин. Программа (блок-схема) имитационного моделирования системы врезного шлифования на станке 3М151 в пакете VisSim приведена на рис. 2, разгон двигателя вхолостую иллюстрируется графиками на рис. 3. Из рис. 3,а видно, что угловая скорость вращения двигателя ω до нагружения его моментом сопротивления (шлифования) M_c , т.е. для времени меньше $t_{зад} = 5$ с, увеличивается монотонно и достигает установившегося значения примерно за 4 секунды. Известно, что асинхронные двигатели представляют собой колебательное звено. Однако при присоединении к двигателю привода, т.е. массы с большим моментом инерции,

он превращается в апериодическое звено 2-го порядка и такой двигатель при разгоне его монотонно набирает обороты до номинального их значения.

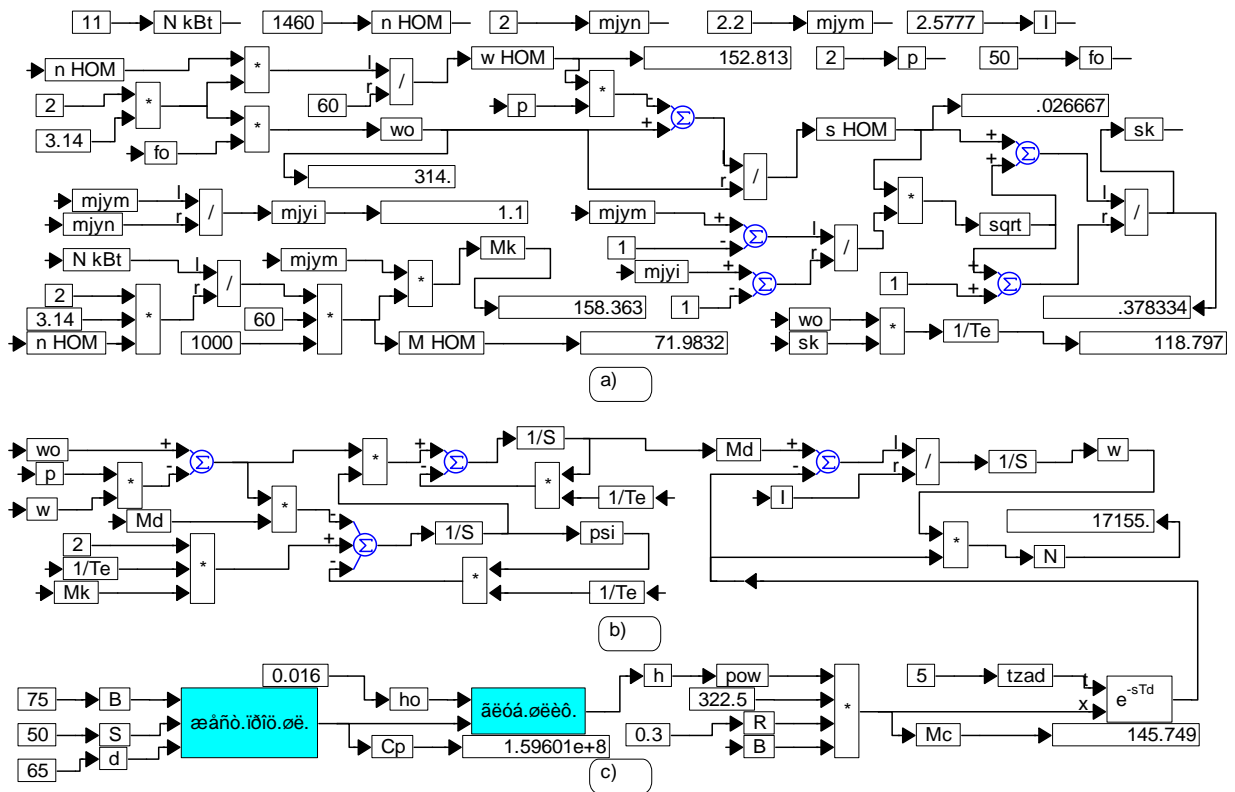


Рис. 2. Общая программа моделирования привода вращения шлифовального круга

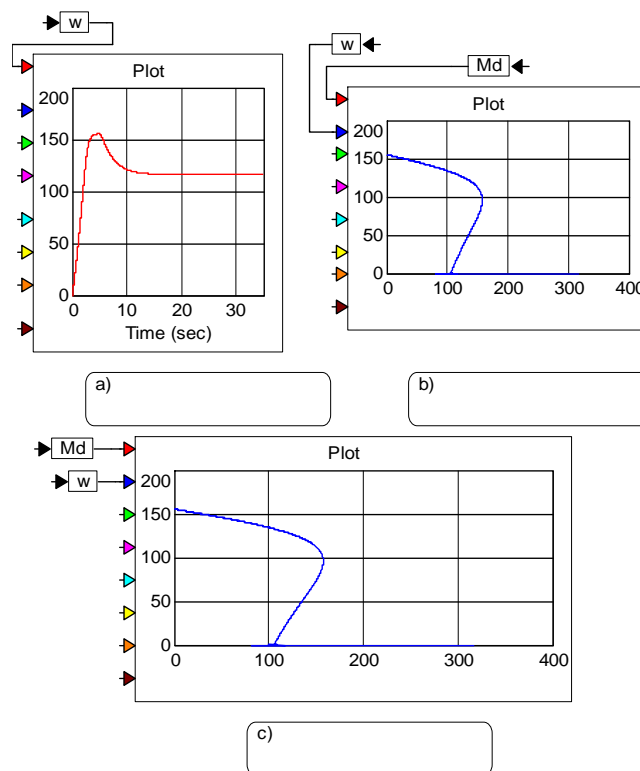


Рис. 3. Разгон двигателя 4A132M4П2 вхолостую с приводом вращения шлифовального круга:

а – изменение ω за время разгона; б, с – зависимости ω от M_d

Пакет *VisSim* позволяет получать двумерные графики с устанавливаемыми сигналами на оси абсцисс и ординат.

На рис. 2,б приведен график $\omega(M_\delta)$, из которого видно, как изменяется M_δ от ω . На рис. 2,с зависимость $\omega(M_\delta)$ показана в начальной фазе разгона, из которой видно, что разгон сопровождается большими колебаниями M_δ .

Для вычисления момента сопротивления (резания) M_c сначала вычисляется жесткость процесса шлифования по формуле (11), оформленная в виде Simulink блока “жесткость процесса шлифования”. Затем вычисляется глубина шлифования $h(t)$, согласно формуле (3), и затем вычисляется $M_c = P_z \cdot R$ (где R – радиус круга, равный 0,3 м) и P_z по формуле (7).

Момент сопротивления подается на вход прибора через блок задержки с задержкой времени $t_{зад}=5$ с. Для условий шлифования согласно рис. 2 ($B=75$ мм; $d=65$ мм; $S=50$ м/мин; $h_0=0,016$ мм) результаты моделирования приведены на рис. 4, из которого видно, что угловая скорость круга после разгона вхолостую и нагружения приводом моментом M_c заметно уменьшается – до $\omega=117$ рад/с. Момент M_δ через 10 с после нагружения приводом моментом M_c сравнивается с ним, и привод приобретает установившийся режим работы с постоянной глубиной шлифования $h_0=0,016$ мм и потребляемой мощностью $N=17,15$ кВт (рис. 2). Условия шлифования с заданной h_0 обеспечиваются скоростью врезной подачи $V_p=3,9$ мм/мин (рис. 4).

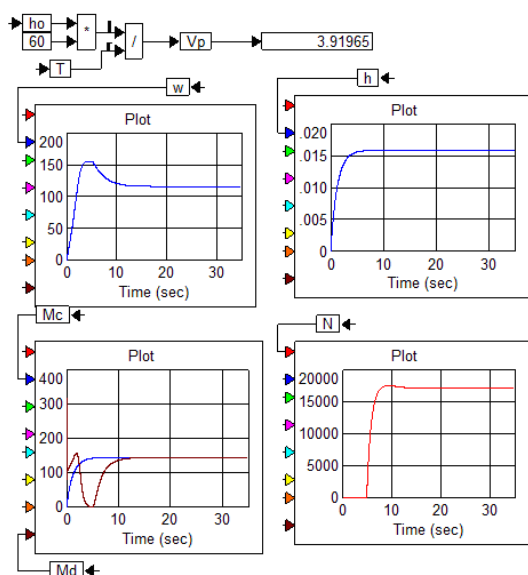


Рис. 4. Результаты моделирования работы привода вращения круга станка 3М151 при $h_0 = 0,016$ мм, $d = 65$ мм; $S = 50$ м/мин.

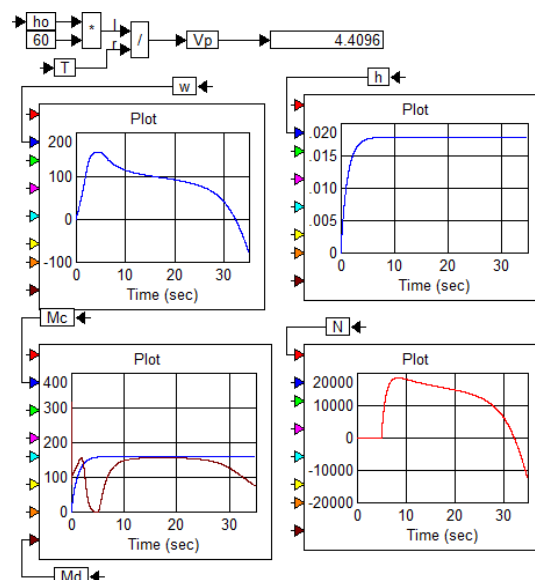


Рис. 5. Результаты моделирования работы привода вращения круга станка 3М151 при $h_0 = 0,018$ мм, $d = 65$ мм; $S = 50$ м/мин

Таким образом, как мощность привода, так и механизм врезной подачи обеспечивают шлифование с указанными условиями.

Однако, если увеличить h_0 до 0,018 мм, то из рис. 5 видно, что после разгона вхолостую и нагружения его моментом M_c двигатель начинает терять обороты сначала медленно, а затем быстро и останавливается. При назначенной $h_0 = 0,018$ мм значение $V_p = 4,4$ мм/мин. Таким образом, назначенный режим шлифования не может быть реализован из-за превышения момента M_c предельного его значения для двигателя 3А132М4П2. При этом значение $V_p = 4,4$ мм/мин не превысило его предельного значения $V_p = 4,5$ мм/мин.

Установлено, что такой же режим шлифования, но с $S = 30$ м/мин не может быть реализован из-за остановки двигателя. При этом $V_p = 2,5$ мм/мин.

Из полученных результатов моделирования видно, что шлифование с продольной шириной $B = 75$ мм ограничивается подачей на оборот (глубиной шлифования) $h_0 \approx 0,016$ мм из-за недостаточной мощности привода.

При шлифовании с меньшей шириной шлифования $B = 60$ мм ограничением продольной глубины $h_0 = 0,034$ мм при $S = 30$ м/мин является мощность привода, а при $S = 50$ м/мин предельная глубина шлифования $h_0 = 0,018$ мм ограничивается скоростью V_p , которая для заданной h_0 должна быть равна 4,4 мм/мин. Если ширина шлифования меньше 60 мм, то ограничением предельных значений h_0 является только величина врезной подачи $V_p = 4,5$ мм/мин.

Список литературы: 1. Леван А.И. Математическое моделирование в исследованиях и проектировании станков / А.И. Леван. – М.: Машиностроение, 1978. – 180 с. 2. Филимонов Л.Н. Высокоскоростное шлифование / Л.Н. Филимонов. – Л.: Машиностроения, Ленинградское отделение, 1979. – 240 с. 3. Эрнст В. Повышенная скорость резания при круглом наружном врезном шлифовании, и ее влияние на результаты шлифования и экономичность (перевод ВНИИАШа). – Диссертация, Лахен, 1965. – № 2557. 4. Основы автоматизированного электропривода / М.Г. Чиликин и др. – М.: Энергия, 1974. – 507 с. 5. Сизый Ю.А. Расчет глубины круглого врезного шлифования на основе его имитационного моделирования / Ю.А. Сизый, А.В. Евтухов // Вестник НТУ "ХПИ", 2001. – №15. – С. 117-126. 6. Евтухов А.В. Підвищення ефективності технології круглого зовнішнього врізного шліфування шляхом вибору раціональної структури та параметрів робочого циклу: Дисертація на здобуття наукового ступеня канд. техн. наук / А.В. Евтухов. – Харків, 2008. 7. Сизый Ю.А. Статическая и динамическая характеристики технологической системы круглого врезного шлифования / Ю.А. Сизый, А.В. Евтухов // Резание и инструмент в технологических системах: междунар. научн.-техн. сб., 2003. – №64. – С. 185-192.