

УДК 621.3.076.7: 531.6

### ПРИМЕНЕНИЕ ЧАСТОТНО РЕГУЛИРУЕМОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА НА ВОЛОЧИЛЬНОМ СТАНЕ МВ-1000В

**Е. О. Хребтов**

Кременчугский национальный университет имени Михаила Остроградского  
ул. Первомайская, 20, г. Кременчуг, 39600, Украина. E-mail: 34092@ukr.net

**А. И. Кулик**

Государственное предприятие "Инженерный центр твердых сплавов "Светкермет"  
ул. Комсомольская, 34, г. Светловодск, 27500, Украина. E-mail: Svetkermet@mail.ru

Рассмотрена проблема реализации плавного пуска волочильного стана, возможность управления и контроля скорости волочения проволоки. Предложена математическая модель электропривода волочильной машины с учетом работы кинематической цепи. Проведены экспериментальные исследования, которые подтверждают результаты моделирования электропривода волочильного стана. Предложен способ управления частотой вращения и интенсивности увеличения скорости тягового барабана (навойки), возможность формирования необходимого пускового момента с применением преобразователя частоты в цепи статора асинхронного двигателя. На основе предложенной математической модели электропривода проведены расчеты оптимальных режимов пуска волочильного стана. Полученные результаты позволяют разработать систему автоматического управления электропластическим волочением тугоплавкой и трудно деформируемой проволоки.

**Ключевые слова:** волочильный стан, частотное регулирование, математическая модель электропривода, система управления.

### ЗАСТОСУВАННЯ ЧАСТОТНО РЕГУЛЬОВАНОГО ЕЛЕКТРОПРИВОДА НА ВОЛОЧИЛЬНОМУ СТАНІ МВ-1000В

**Є. О. Хребтов**

Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського  
вул. Першотравнева, 20, м.Кременчук, 39600, Україна. E-mail: 34092@ukr.net

**А. І. Кулик**

Державне підприємство "Інженерний центр твердих сплавів" Светкермет "  
вул. Комсомольська, 34, м. Світловодськ, 27500, Україна. E-mail: Svetkermet@mail.ru

Розглянуто можливість реалізації плавного пуску волочильного стана, управління і контролю швидкості волочіння дроту. Запропонована математична модель електроприводу волочильної машини з урахуванням роботи кінематичного ланцюга. Проведено експериментальні дослідження, які підтверджують результати моделювання електроприводу волочильного стану. Запропоновано спосіб керування частотою обертання та інтенсивності збільшення швидкості тягового барабана (навойки), можливість формування необхідного пускового моменту із застосуванням перетворювача частоти в ланцюзі статора асинхронного двигуна. На основі запропонованої математичної моделі електроприводу проведені розрахунки оптимальних режимів пуску волочильного стана. Отримані результати дозволяють розробити систему автоматичного управління електропластичним волочінням тугоплавкого та важкодеформованого дроту.

**Ключові слова:** волочильний стан, частотне регулювання, математична модель електроприводу, система управління.

**АКТУАЛЬНОСТЬ РАБОТЫ.** Способы увеличения пластичности тугоплавких и труднодеформируемых металлов во время волочения в промышленности реализованы с использованием технологий прямого и косвенного нагрева движущейся проволоки [1–3]. Они трудно поддаются управлению, т.к. основаны на газовом или электроконтактном нагреве участка проволоки перед очагом деформации.

Современные исследования в области металлургии предлагают варианты усовершенствования процесса волочения проволоки путем модернизации, как технологии увеличения пластичности, так и волочильного оборудования [4–6]. Тенденции модернизации технологии, в частности, заключаются в реализации электропластического эффекта (ЭПЭ) в процессе волочения [4]. Суть данного эффекта состоит в воздействии импульсным током большой плотности и частоты в зоне деформации металла [7, 8]. Это, в свою очередь, приводит к снижению усилия деформации металла, а также к улучшению качества

конечной продукции [2]. Анализируя работы [6–9], относящиеся к процессу электропластического волочения, можно сделать вывод, что вопросы реализации внедрения электропластического эффекта в процесс волочения металла, достаточно разработаны теоретически и освещены в научной литературе. Приведено значительное количество примеров способов реализации электропластического волочения (ЭПВ), для различных металлов и способов деформации [7–12]. Опираясь на выше перечисленные работы и исследования, возникает возможность, разработки системы автоматического управления процессом электропластического волочения проволоки (САУ ЭПВ).

Создание такой системы управления можно охарактеризовать как модернизацию уже существующего стана. Ведь разработка САУ не требует изменения электромеханической системы волочильного стана, а лишь применения дополнительно оборудования позволяющего контролировать и задавать

требуемые параметры, для возникновения в зоне деформации ЭПЭ. Вследствие этого исследуемый стан в работе будет менее энергоемким, технология позволит уменьшить вероятность обрыва проволоки, а так же получать продукцию обладающую улучшенными физико-механическими свойствами.

Задача построение САУ ЭПВ состоит из двух этапов: контроль и управление процессом волочения проволоки с применением ЭПЭ; разработка режимов подачи управляемых импульсов тока в зону деформации металла.

Данная работа относится к исследованиям первого этапа.

Исследования работы волочильной машины, относится к моментам и режимам включения и выключения волочильного стана.

В настоящее время на большинстве волочильных станов отсутствуют какие-либо элементы контроля и регулировки параметров температуры и скорости. Это означает, что основные параметры технологического процесса, не управляемы и не контролируемы и зависят от внешних факторов, которые не учитываются при работе. Такой режим работы имеет ряд недостатков, один из которых это полное отсутствие возможности регулирования скорости волочения, что приводит к частым обрывам проволоки во время пуска волочильного стана. Они могут быть вызваны качеством обрабатываемой проволоки или работой самого стана, резким рывком при пуске, быстрым нарастанием скорости с большим приложенным моментом. Частые обрывы, влекут за собой, увеличение материальных затрат и снижение производства проволоки. Так же присутствуют не прямые негативные следствия частых обрывов, это частое включение асинхронного двигателя (АД) электропривода волочильной машины (ВМ). При включениях АД, в обмотках статора происходит скачок тока в 5–7 раз больше номинального, что вызывает нагрев обмоток статора. При частом включении, возрастает вероятность преждевременного повреждения изоляции обмоток двигателя и как следствие, выход его из строя.

Целью работы является построение математической модели электропривода ВМ, как основы для разработки системы управления работы волочильного стана.

#### МАТЕРИАЛ И РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ.

Исследования проводились для однократной волочильной машины МВ-1000В. Машина МВ-1000В – малогабаритный волочильный стан, который используется для волочения нагретой вольфрамовой проволоки диаметром 1–0,5 мм. При кратности волочения – 1 и скорости волочения – 10 м/мин. на стане за год производится 8,1 т проволоки  $\varnothing$  0,52 мм (при коэффициенте использования – 0,25). Технические характеристики волочильного стана приведены в табл. 1.

В исследованный ЭП входит асинхронный двигатель 4АХ80В4У3. С помощью паспортных параметров по методике [13] были рассчитаны парамет-

ры схемы замещения, которые используются при разработке математической модели.

Таблица 1 – Технические характеристики волочильной машины МВ-1000В

| Наименование                         | Размерность            | Величина |
|--------------------------------------|------------------------|----------|
| Диаметр барабанов тяговых            | мм                     | 400      |
| Количество барабанов тяговых         | шт.                    | 2        |
| Материал проволоки                   | Вольфрам               |          |
| Диаметр исходной проволоки           | мм                     | 1,0      |
| Диаметр готовой проволоки            | мм                     | 0,52     |
| Тяговые усилия                       | кг                     | 200      |
| Смазка технологическая               | Жидкая, индивидуальная |          |
| Электродвигатель 4АХ80В4У3           | шт                     | 2        |
| Общий вес машины с электродвигателем | кг                     | 757      |

Электропривод (ЭП) волочильного стана представляет собой сложную кинематическую цепь, которая влияет на характеристики работы стана и представлена на рис. 1.

Электромеханическая система электропривода состоит из асинхронной машины, которая через ременную передачу приводит в движение червяк редуктора. Он преобразует угловую скорость и момент, в скорость и усилия волочения формирующимся тяговым барабаном.

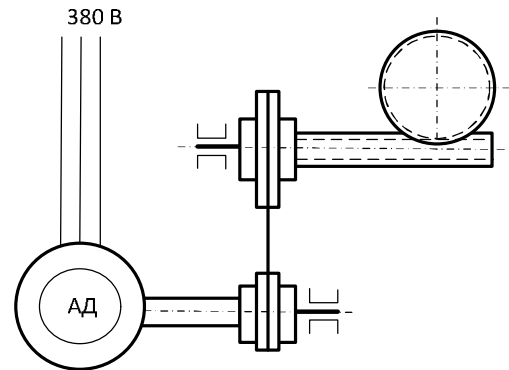


Рисунок 1 – Схема электропривода стана

Значение параметров: номинальная мощность  $P=1,5$  кВт; номинальная скорость –  $n_{ном}=1430$  об/мин; номинальный момент –  $M = 10,5$  Нм; номинальный ток статора  $I = 3,1$  А; коэффициент полезного действия  $\eta = 0,77$ ; коэффициент мощности  $\cos \varphi = 0,83$ ; активное сопротивление статора  $R_1 = 7,437$  Ом; реактивное сопротивление статора  $X_1 = 4,8$  Ом; приведенное активное сопротивление ротора  $R_2 = 3,718$  Ом; приведенное реактивное сопротивление ротора  $X_2 = 4,8$  Ом; момент инерции двигателя  $J = 0,0035$  кг·м<sup>2</sup>.

При моделюванні асинхронної машини використовуємо повну систему рівнянь, яка описує фізичні процеси, що відбуваються в машині [14–16]. Приймаємо наступні допущення: сталь машини ненасичена; фазні обмотки симетричні і зміщені на  $120^\circ$ ; магнітно-двигуча сила (МДС) обмоток і магнітних полів розподілені синусоїдально вздовж кола повітряного зазору; ротор електрично і магнітно-симетричний. Реально розподілені обмотки АД замінюються середоточеними, а МДС прирівнюється МДС реальної обмотки.

Рішення системи рівнянь рівноваги напруг разом з рівнянням руху ротора дозволяє визначити характер перехідного процесу, розрахувати токи, потікосоєднання, розвиваемий двигателем електромагнітний момент [14–16]. Кінематичні пари представлені функціями, що входять до складу системи диференціальних рівнянь, що описують електропривід. Отримані характеристики відображають роботу електро механічної системи волоочильного стану.

С математичної точки зору рішення диференціальних рівнянь зводиться до чисельного або аналітичного інтегрування на заданому інтервалі з постійним або з змінним, по вибраній процедурі, кроком інтегрування. При початкових нульових умовах ( $t = 0$ ) система диференціальних рівнянь представляє собою задачу Коші, яка дозволяє знайти частинне рішення рівнянь при ( $t > 0$ ).

В матричному вигляді рівняння рівноваги напруг для трьох фаз статора А, В, С і трьох фаз ротора а, б, с можна записати в вигляді [14]:

$$[R][i(t)] + \frac{d}{dt}[\Psi(t)] - [U(t)] = 0, \quad (1)$$

$$\text{де } [U(t)] = \begin{bmatrix} u_A \\ u_B \\ u_C \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}, u_A = \sqrt{2}E_f \sin(\omega_c t),$$

$$u_B = \sqrt{2}E_f \sin\left(\omega_c t - \frac{2\pi}{3}\right), u_C = \sqrt{2}E_f \sin\left(\omega_c t + \frac{2\pi}{3}\right)$$

$E_f$  – ефективне фазне значення напруги живлення;  $\omega_c = p_n f \pi$  – кутова швидкість обертання поля статора,  $p_n$  – кількість пар полюсів, при частоті мережі  $f$ .

С геометричної точки зору миттєві значення напруг, струмів, потікосоєднань, є ортогональні проекції відповідних векторів на осі фаз обмоток статора і ротора:

$$[i(t)] = \begin{bmatrix} i_A(t) \\ i_B(t) \\ i_C(t) \\ i_a(t) \\ i_b(t) \\ i_c(t) \end{bmatrix}, [R] = \begin{bmatrix} R_1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & R_1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & R_1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & R_1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & R_1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & R_1 \end{bmatrix},$$

$$[\Psi(t)] = \begin{bmatrix} \Psi_A(t) \\ \Psi_B(t) \\ \Psi_C(t) \\ \Psi_a(t) \\ \Psi_b(t) \\ \Psi_c(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} [L_S] & [L_{RS}] \\ [L_{SR}] & [L_R] \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_A(t) \\ i_B(t) \\ i_C(t) \\ i_a(t) \\ i_b(t) \\ i_c(t) \end{bmatrix},$$

$$[L_S] = \begin{bmatrix} l_1 + \frac{2}{3}L_1 & \frac{2}{3}L_1 \cos\left[\frac{2\pi}{3}\right] & \frac{2}{3}L_1 \cos\left[2\frac{2\pi}{3}\right] \\ \frac{2}{3}L_1 \cos\left[\frac{2\pi}{3}\right] & l_1 + \frac{2}{3}L_1 & \frac{2}{3}L_1 \cos\left[2\frac{2\pi}{3}\right] \\ \frac{2}{3}L_1 \cos\left[2\frac{2\pi}{3}\right] & \frac{2}{3}L_1 \cos\left[\frac{2\pi}{3}\right] & l_1 + \frac{2}{3}L_1 \end{bmatrix},$$

$$[L_R] = \begin{bmatrix} l_2 + \frac{2}{3}L_2 & \frac{2}{3}L_2 \cos\left[\frac{2\pi}{3}\right] & \frac{2}{3}L_2 \cos\left[2\frac{2\pi}{3}\right] \\ \frac{2}{3}L_2 \cos\left[\frac{2\pi}{3}\right] & l_2 + \frac{2}{3}L_2 & \frac{2}{3}L_2 \cos\left[2\frac{2\pi}{3}\right] \\ \frac{2}{3}L_2 \cos\left[2\frac{2\pi}{3}\right] & \frac{2}{3}L_2 \cos\left[\frac{2\pi}{3}\right] & l_2 + \frac{2}{3}L_2 \end{bmatrix},$$

$$[L_{RS}] = \begin{bmatrix} M \cos(\theta) & M \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) & M \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) \\ M \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & M \cos(\theta) & M \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \\ M \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) & M \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & M \cos(\theta) \end{bmatrix},$$

$$[L_{SR}] = \begin{bmatrix} M \cos(\theta) & M \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & M \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \\ M \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) & M \cos(\theta) & M \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) \\ M \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & M \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) & M \cos(\theta) \end{bmatrix},$$

де  $\theta = \omega_c t$ .

Рішення рівнянь рівноваги напруг фаз разом з рівнянням руху ротора:

$$J \frac{d}{dt} \omega(t) + M_d = M_c, \quad (2)$$

$$\frac{d}{dt} \gamma_R(t) + \omega(t) = 0, \quad (3)$$

де  $J$  – приведений момент інерції двигателя;  $M_d$  – електромагнітний момент, розвиваемий двигателем;  $M_c$  – момент опору;  $\omega(t)$  – шк-

рость вращения ротора;  $\gamma_R(t)$  – текущий угол поворота ротора, позволяет найти токи, электромагнитный момент, развиваемый двигателем. Выражение для расчета электромагнитного момента имеет вид:

$$M_d = -\frac{3}{2} p |\vec{\Psi}_\mu \times \vec{i}_1| = -\frac{3}{2} p |\Psi_\mu \cdot i_1 \cdot \sin(a_\mu - a_1)|, \quad (4)$$

где  $a_\mu$  – угол, определяющий направление вектора главного потокосцепления  $\Psi_\mu$ ;  $a_1$  – угол, определяющий направление вектора статора  $i_1$ .

Момент  $M_d$  на валу двигателя с помощью шкива преобразуется в пару сил, результирующая которых  $F_r$  действует на колесо ременной передачи, приводя ее в движение по направляющим. При этом усилии выражается следующей зависимостью [17]:

$$F_r = \frac{M_d}{r}, \quad (5)$$

где  $r$  – радиус шкива.

Движение ведущего шкива по координате  $x$  описывается уравнением [16]:

$$2m \frac{d^2 x}{dt^2} + \mu \frac{dx}{dt} = F_r, \quad (6)$$

где  $\mu$  – коэффициент сил вязкого трения;  $m$  – вес вращающейся массы.

Для передаточной функции, которая описывает ременную передачу входной величиной, есть перемещение, а выходной усилии элемента  $F_r$ . Если правую и левую часть уравнения (6) поделить на  $1/\mu$ , то получим:

$$\frac{2m}{\mu} \frac{d^2 x}{dt^2} + \frac{dx}{dt} = F_r \frac{1}{\mu}. \quad (7)$$

При применении преобразования Лапласа выражение 7 в операторной форме примет вид:

$$\frac{2m}{\mu} x(p)p^2 + x(p)p = F_r(p) \frac{1}{\mu}$$

$$x(p)p \left( \frac{2m}{\mu} p + 1 \right) = F_r(p) \frac{1}{\mu},$$

где  $\frac{1}{\mu} = k$  – коэффициент усиления элемента;

$\frac{2m}{\mu} = T$  – время интегрирования или временная

постоянная переходного процесса;  $p = \frac{d}{dt}$  – дифференциальный оператор.

Таким образом, передаточная функция данного элемента после проведенных преобразований будет иметь вид [18]:

$$W_1(p) = \frac{x(p)}{F_r(p)} = \frac{1/\mu}{p(1 + T_1 p)}. \quad (7)$$

При выводе силовой передаточной функции принимались следующие основные допущения: червяк и червячное колесо считаем безынерционным; наличием зазоров в червячной паре пренебрегаем; коэффициент трения считаем постоянным.

Даная зависимость справедлива при любых направлениях внешних моментов и угловых скоростей элементов передачи [17]:

$$M_1 = -M_2 \frac{d_1}{d_2} \operatorname{tg}(\gamma - k_r \rho), \quad (8)$$

где  $M_1$  – момент на валу червяка;  $M_2$  – момент на валу червячного колеса;  $d_1$ ,  $d_2$  – делительный диаметр червяка и червячного колеса;  $\gamma$  – угол подъема винтовой линии червяка;  $\rho$  – угол трения между червяком и червячным колесом;  $k_r$  – коэффициент режима, определяющий направление движения червячной передачи.

Передаточная функция имеет следующий вид:

$$W_2(p) = \frac{M_2(p)}{M_1(p)} = \frac{d_2/d_1}{\operatorname{tg}(\gamma - k_r \rho)}.$$

Результаты моделирование разработанной математической модели электропривода волоочильного стана МВ–1000В, приведены на рис. 2–8.

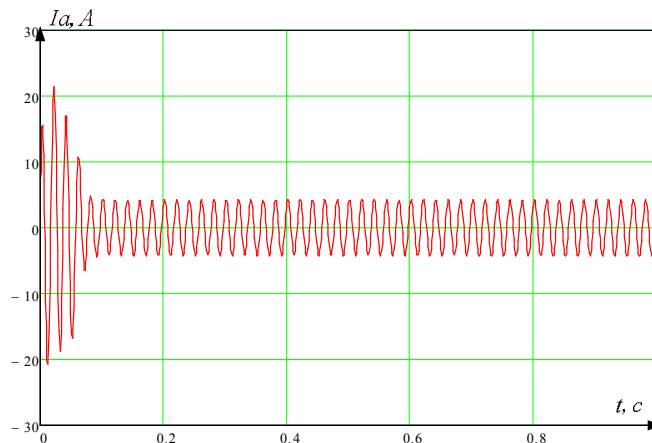


Рисунок 2 – Зависимость тока статора фазы А от времени

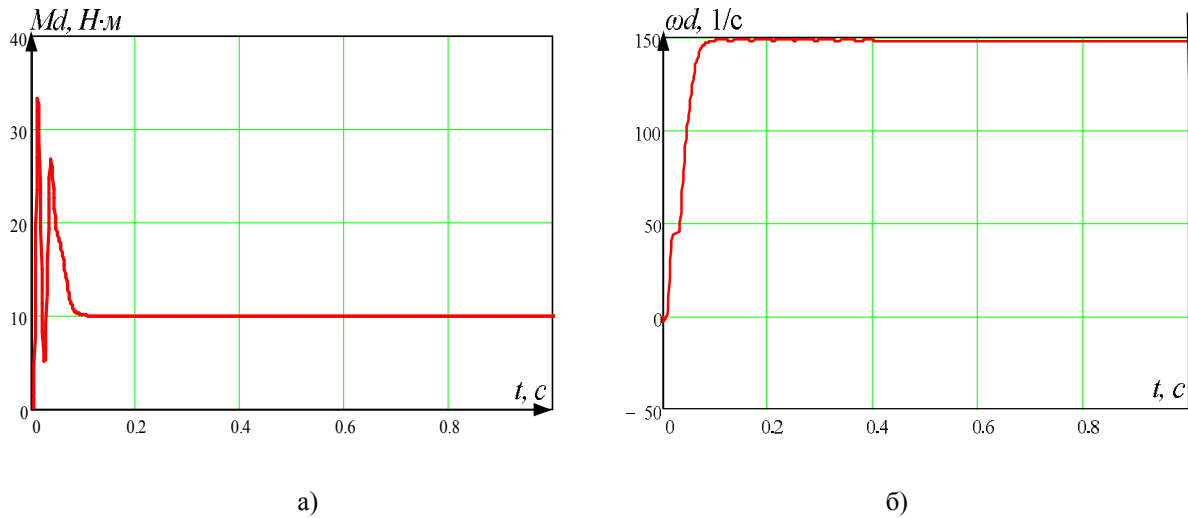


Рисунок 3 – Кривые изменения момента двигателя (а) и скорости двигателя волочильного стана (б)

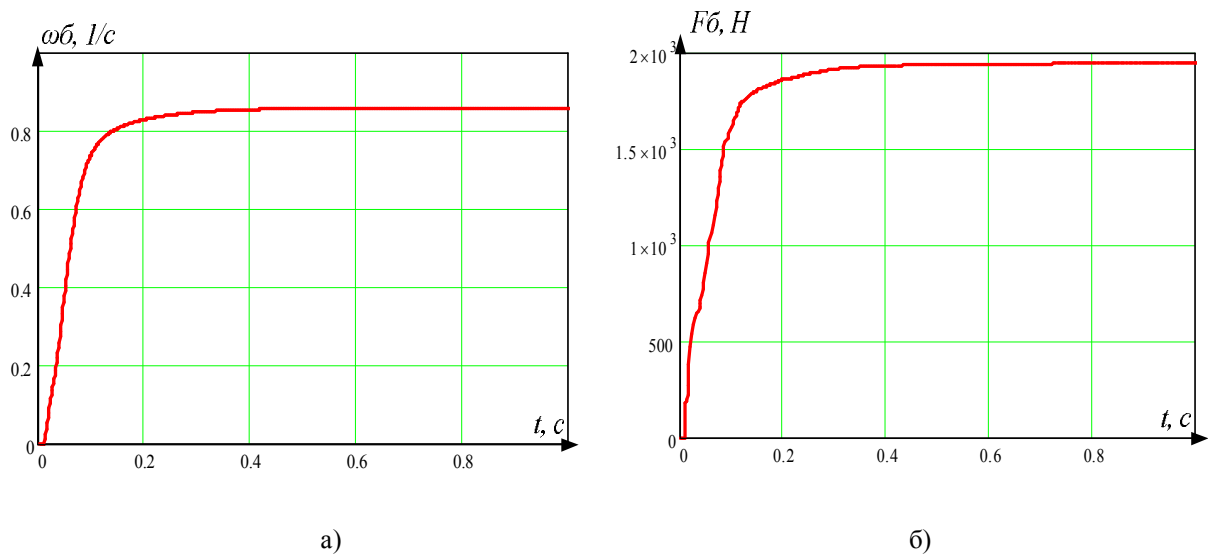


Рисунок 4 – Кривые изменения скорости барабана волочильного стана (а) и усилия волочения волочильного стана (б) при пуске под нагрузкой

На рис. 2 представлено амплитудное значение тока фазы А, симметричной асинхронной машины, при прямом пуске под нагрузкой. В первоначальный момент времени, наблюдается увеличение тока статора почти в пять раз от номинального значения. Это результат прямого пуска АД, что может привести к колебаниям напряжения в сети это является негативным фактором для работы остальных потребителей. Данный режим сопровождается интенсивным ускорением электромеханической системы, что является источником значительных динамических нагрузок на электрическую и механическую часть волочильного стана. Графики на рис. 3, 4 изображают изменение момента и скорости двигателя, скорость волочения и усилия выдающее тяговым барабаном при прямом пуске под нагрузкой. Из полученных зависимостей можно сделать вывод об интенсивности изменения значе-

ний параметров работы волочильного стана, то есть дает возможность увидеть причину возникновения частых обрывов проволоки при пуске.

Для подтверждения работоспособности разработанной математической модели, проведены экспериментальные исследования силы тока фаз статора АД, МВ–1000В, в момент пуска при волочении вольфрамовой проволоки диаметром 0.56 мм.

Для измерения и фиксации величин силы токов, напряжений использовался блок датчиков тока и напряжения [19], и модуль ЦАП-АЦП mDAQ [20].

Экспериментальные зависимости тока во времени фазы А статора АД изображены на рис. 5. Результаты моделирования и экспериментальные значения тока при пиковом значении амплитуды тока отличаются на 9 %, в установившемся режиме это отличие составляет 5 %.

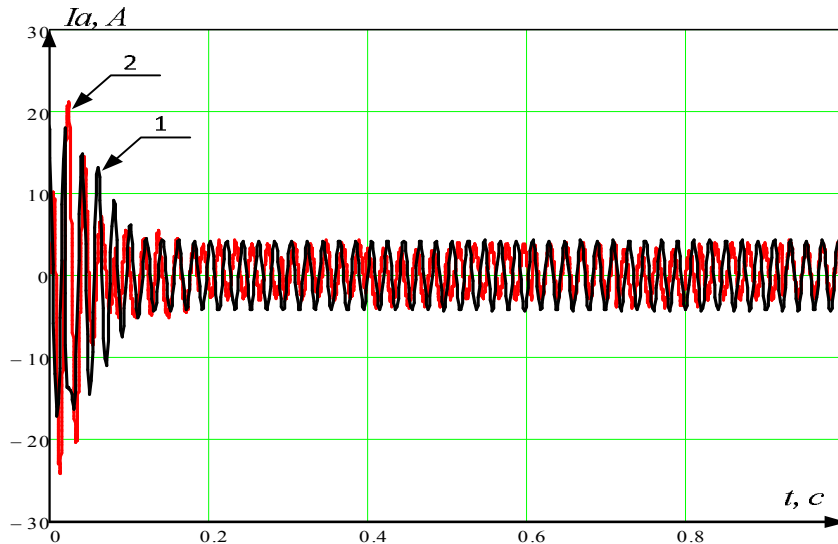


Рисунок 5 – Амплитудное значения тока статора при моделировании (1) и экспериментальные значения (2)

Как видно из рис. 5, предложенная математическая модель, достаточно реально отображает значения параметров исследуемого объекта. Это позволяет в дальнейшем на основе построенной математической модели решать задачу создания системы контроля и управления волоочильным станом МВ-1000В.

Для предотвращения обрывов проволоки и реализации управление электродвигателем главного привода, используется преобразователь частоты (ПЧ) в цепи статора. Это позволяет с помощью регулируемых управляющих сигналов частоты и напряжения, получать необходимые параметры работы асинхронного двигателя, для осуществления

плавного пуска, увеличения время разгона двигателя до номинальной скорости. Это, в свою очередь, позволило предотвратить вероятность обрыва проволоки при пуске.

Моделирование плавного пуска стана с линейным законом частотного управления выполняется с заданным начальным напряжением для создания пускового момента достаточного для пуска двигателя под нагрузкой. При выполнении расчета установлено, что начальное значение напряжения для формирования минимального достаточного пускового момента составляет  $0,33U_{ном}$ . Результаты моделирования плавного пуска представлены на рис. 6–8.

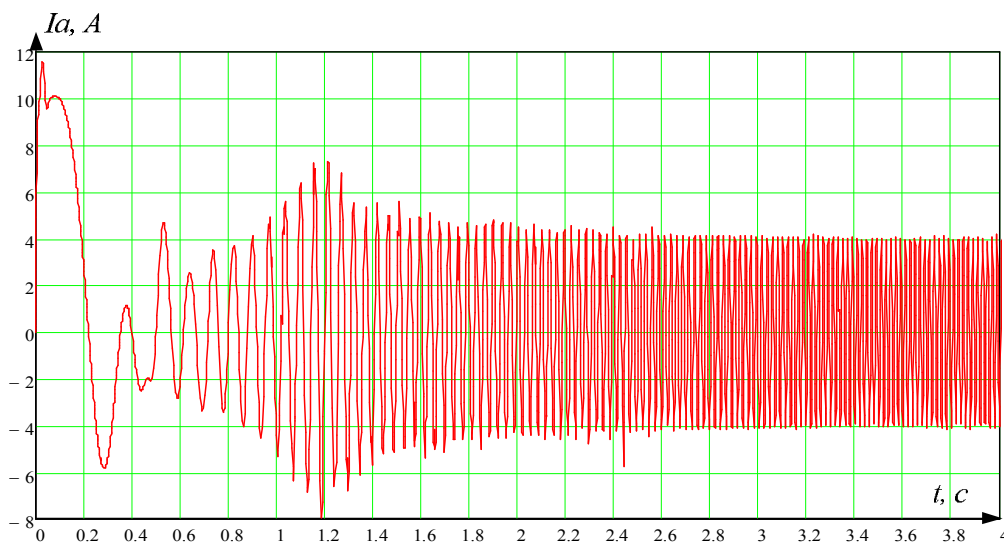


Рисунок 6 – Зависимость тока статора фазы А при математическом моделировании ЧРЕП с плавным пуском под нагрузкой

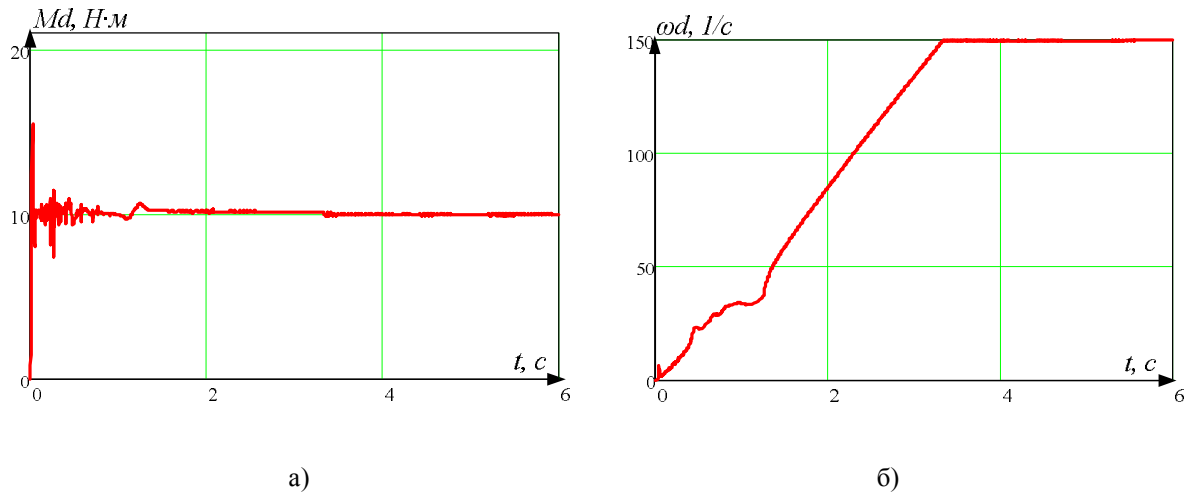


Рисунок 7 – Кривые изменения момента двигателя (а) и скорости двигателя волоочильного стана (б) при плавном пуске под нагрузкой при математическом моделировании ЧРАЕП

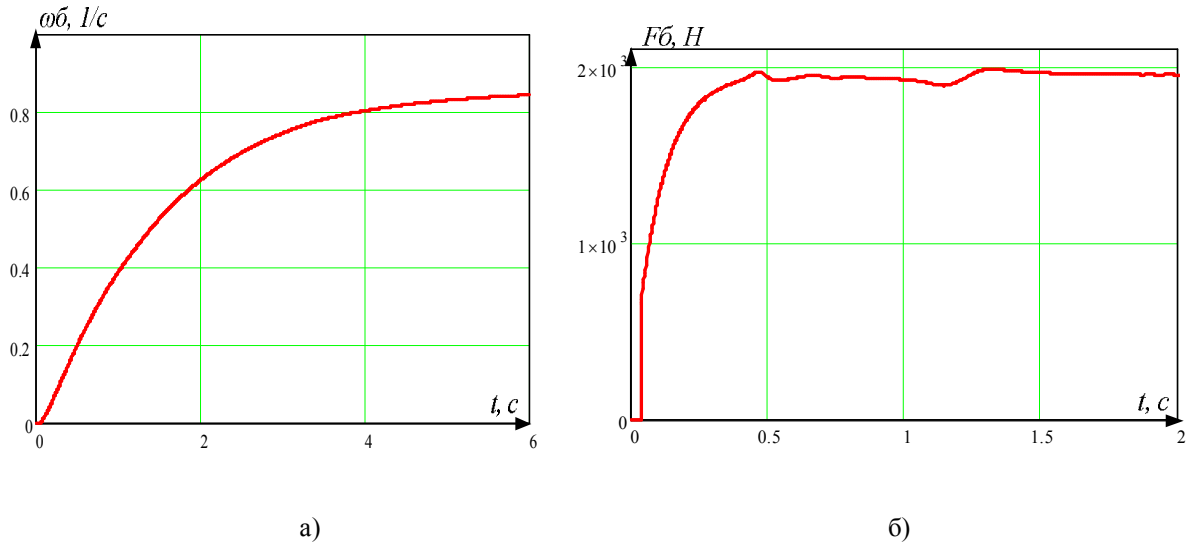


Рисунок 8 – Кривые изменения скорости барабана волоочильного стана (а) и усилия волочения волоочильного стана (б) при плавном пуске под нагрузкой при математическом моделировании ЧРАЕП

При применении ПЧ в цепи статора АД пусковой ток уменьшает амплитудное значение на 45 %. Таким образом, предотвращаются токовые перегрузки, уменьшается потери мощность при пуске, снижается энергопотребление. Увеличивается ресурс работы не только электропривода, но и самого стана.

При плавном запуске снижаются колебания пускового момента, что влечет за собой уменьшения динамических нагрузок, отрицательно влияющих не только на электромеханическую систему ЭП, но и на кинематические соединения всего стана.

Получаем управляемые характеристики работы двигателя, а также плавный пуск с сохранением начального значения тягового усилия.

**ВЫВОДЫ.** В данной работе проведено исследование параметров работы электропривода волоочильной машины МВ–1000В. Была построена математическая модель работы волоочильной машины, описывающая скорость вращения главного барабана, усилия натяжения, а так же параметры работы двигателя электропривода, ток, момент, скорость. Проведены исследования пускового режима привода. Выполнены сравнения экспериментальных данных тока статора АД с результатами моделирования.

Приведен результат внедрения ПЧ в цепь статора: уменьшение амплитудного значения тока, снижение потерь мощности, возможность регулирования скорости и осуществления управляемого пуска. При плавном запуске снижаются колебания пуско-

вого момента, что влечет за собой уменьшения динамических нагрузок, отрицательно влияющих не только на электромеханическую систему ЭП, но и на кинематические соединения всего стана.

Получена математическая модель, позволяющая осуществить дальнейшую разработку системы автоматического управления электропластическим волочением проволоки и косвенно контролировать скорость волочения.

*Авторы выражают свою признательность профессору В.П. Ляшенко за профессиональную поддержку и ценные консультации на протяжении всей проделанной работы.*

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Крупин А.В. Соловьев В.Я. Пластическая деформация тугоплавких металлов. – М.: Metallurgiya, 1971. – 350 с.
2. Коврев Г.С. Электроконтактный нагрев при обработке цветных металлов. – М.: Metallurgiya, 1975. – 312 с.
3. Колчин О.П., Ляшенко В.П., Шаповал А.Н. Электроконтактный нагрев прутков из тугоплавких металлов перед деформированием // Цветные металлы. – 1979. – № 6. – С. 73–75.
4. Спицын В.И., Троицкий О.А. Электропластическая деформация металлов. – М.: Наука, 1985. – 160 с.
5. А.с. СССР № 1130610 (1984). Устройство автоматического регулирования температуры при электроконтактном нагреве металла / Ляшенко В.П., Гусак В.И. Золотарев Г.Р., Корнейчук В.И., Бюл. изобр. № 47.
6. А.с. СССР № 977504 (1982). Устройство для регулирования степени нагрева движущейся проволоки перед волочением / Ляшенко В.П., Гусак В.И. Бюл. изобр. № 44.
7. Троицкий О.А., Сташенко В.И., Рыжков В.Г., Ляшенко В.П., Кобыльская Е.Б. Электропластическое волочение и новые технологии создания облегченных проводов // Вопросы атомной науки и техники (ВАНТ). – Харьков, 2011. – Вип. 4/2011. – С. 111–117.
8. Троицкий О.А. Электромеханический эффект в металлах // Письма в ЖЭТФ. – 1969. – Т. 10, вып. 1. – С. 18.
9. Ляшенко В.П., Аниськов А.В., Кобыльская Е.Б. Система управления процессом электропластической деформации сверхтонкой проволоки // Труды II Международной конференции «Влияние высокоэнергетических воздействий на структуру и свойства конструкционных материалов», серия «Фундаментальные проблемы современного материаловедения», том 1, 23–30 сентября 2013 г. – Новокузнецк, 2013. – С. 81–92.
10. Кобыльская О.Б., Ляшенко В.П. Дослідження температурних розподілів рухомого середовища з імпульсним джерелами тепла // Вісник Харківського національного університету. Серія «Математичне моделювання. Інформаційні технології. Автоматизовані системи управління». – 2010. – № 890, вып. 13. – С. 115–120.
11. Троицкий О.А. Ультразвуковое электропластическое плющение металла // Вестник научно-технического развития национальная технологическая группа – 2009. – № 10 (26). – С. 42–49.
12. Резниченко В.А. Metallurgiya вольфрама, молибдена и ниобия. – М.: Наука, 1967. – 224 с.
13. Макеев М.С., Кувшинов А.А. Алгоритм расчета параметров схемы замещения асинхронного двигателя по каталожным данным // Журнал "Вектор науки ТГУ". – Тольятти: ТГУ, 2012. – Вып. 1 (23). – С. 108–112.
14. Теория автоматического управления. / Под ред. Воронова А.А. – М.: Высшая школа, 1986. – 504 с.
15. Моделювання електромеханічних систем: підручник / О.П. Чорний, А.В. Луговой, Д.Й. Родькін и др. – Кременчук, 2001. – 410 с.
16. Математическая модель АД в неподвижной системе координат / А.А. Емельянов // Молодой ученый. – 2011. – № 4, т. 1. – С. 7–15.
17. Бать М.И., Джанилидзе Г.Ю., Кельзон А.С. Теоретическая механика в примерах и задачах: учеб. пособие для вузов. – М.: Наука, 1990. – 672 с.
18. Булатова М.Н. Математическая модель червячной передачи // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2009. – № 2–2. – С. 21–27.
19. Калинов А.П. Универсальное учебно-исследовательское оборудование для электромеханических лабораторий // Електромеханічні і енергозберігаючі системи: щоквартальний науково-виробничий журнал. – Кременчук: КДПУ, 2007. – Вип. 1/2007 (1). – С. 14–19.
20. Калинов А.П. Комп'ютеризований лабораторний комплекс для дослідження електромеханічних трансмісій транспортних систем // Електромеханічні і енергозберігаючі системи: щоквартальний науково-виробничий журнал. – Кременчук: КДУ, 2010. – Вип. 1/2010 (9). – С. 50–53.



PLICATION OF THE FREQUENCY CONTROLLED ELECTRIC DRIVE  
FOR DRAWING MACHINE MV-1000V

**E. Khrebtov**

Kremenchug Mykhailo Ostrohradskyi National University  
vul. Pershotravneva, 20, Kremenchuk, 39600, Ukraine E-mail: 34092@ukr.net

**A. Kulik**

State enterprise "Engineering Center of hard alloys" Svetkermets  
vul. Komsomolskaya, 34, Svetlovodsk, 27500, Ukraine. E-mail: Svetkermets@mail.ru

The realization of the soft start for the drawing machine and the ability to control the speed of wire drawing are considered. A mathematical model of the drawing machine electric drive is proposed. This model takes into consideration the operation of the kinematic chain. The experimental studies, which confirm the simulation results for the drawing machine electric drive, were carried out. The method of control of speed and intensity of the speed increase of the traction drum is proposed. The possibility of the formation of the desired torque using the frequency converter in the stator circuit of the induction motor is described. On the basis of the proposed mathematical model the calculations of the optimal starting modes for drawing machine were carried out. The obtained results allow to develop an automatic control system for an electroplastic drawing of the refractory and stiff wire.

**Key words:** drawing machine, frequency regulation, a mathematical model of the electric drive, control system.

REFERENCES

1. Krupin, A.V., Solovyev, V.Y. (1971) *Plasticheskaya deformatsiya tugoplavkikh metallov* [Plastic deformation of refractory metals], Metallurgy, Moscow, USSR.
2. Kovrev, G.S., (1975) *Elektrokontaktniy nagrev pri obrabotke cvetnih metallov* [Electrocontact heating in the processing of non-ferrous metals], Metallurgy, Moscow, USSR.
3. Kolchin, O.P., Lyashenko, V.P., Shapoval, A.N. (1979) "Electrocontact heating rods of refractory metals to deformation", *Ferrous metals*, vol. 6, pp. 73–75.
4. Spitsyn, V.I., Troitsky, O.A. (1985) *Electroplasticheskaya deformatsiya metalla* [Electro-plastic deformation of metal], Science, Moscow, USSR.
5. Lyashenko, V.P., Gusak, V.I., Zolotarev, G.R., Korneychuk, V.I. (1984) "The automatic temperature control for heating metal electro-contact", no. 1130610. Bull. no. 47, USSR.
6. Lyashenko, V.P., Gusak, V.I. (1982) "A device for controlling the heating of the moving wire before drawing", no. 977504. Bull. no. 44, USSR.
7. Troitsky, O.A., Stashenko, V.I., Ryzhkov, V.G. et al. (2011), "Electroplastic dragging and new technologies creations of the facilitated wires", *Problems of atomic science and technology (SHROUDS)*, vol. 4, pp. 111–117.
8. Troitsky, O.A., (1969) "Electromechanical effect in metals", *JETP Letters*, vol. 10, iss. 1, p. 18.
9. Lyashenko, V.P., Aniskov, A.V., Kobylskaya, Ye.B., (2013) "Process Control System electroplastic deformation superfine wire", *Proceedings of the II International Conference "The impact of high-energy impacts on the structure and properties of structural materials," series "Fundamental Problems of modern materials"*, vol. 1, pp. 81–92.
10. Kobilska, O.B., Lyashenko, V.P., (2010) "Investigation of the temperature distribution of moving media with pulse heat sources", *Journal of Kharkiv National University. The series "Mathematical modeling. Information Technology. Automated control systems*, vol. 890, pp. 115–120.
11. Troitsky, O.A., (2009) "Ultrasound Electroplastic lamination metal", *Bulletin of scientific and technological development of the National Technology Group*, vol. 10 (26), pp. 42–49.
12. Reznichenko, V.A., (1967) *Metallurgiya volframa, molibdena i niobiya* [Metallurgy of Tungsten, molybdenum and niobium], Science, Moscow, USSR.
13. Makeyev, M.S., Kuvshinov, A.A., (2012) "The algorithm for calculating the parameters of the equivalent circuit of the induction motor by catalog data", *Vector science TSU*, vol. 1 (23), pp. 108–112.
14. Voronov, A.A., (1970) *Osnovi teoriiy avtomaticheskogo upravleniya* [Foundations of Automatic Control Theory], Moscow, High School, USSR.
15. Chorniy, O.P., Lugovoy, A.V., Rodkin, D.Y. et al. (2001), *Modelirovanie electromekhanicheskikh sistem* [Modelling of electromechanical systems], Kremenchug, Ukraine.
16. Emelyanov, A.A., (2011) "Mathematical model of AD in the fixed coordinate system", *Young scientist*, vol. 4, pp. 7–15.
17. Bat, M.I., Dzhanelidze, G.Y., Kelzon, A.S., (1990) *Teoreticheskaya mehanika v primerakh i zadachah* [Theoretical Mechanics in examples and problems, manual for high schools], Moscow, USSR.
18. Bulatova, M.N. (2009) "Mathematical model of the worm gear", *Reseedings of the Tula State University. Engineering science*, vol. 2, pp. 21–27.
19. Kalinov, A.P. (2007) "Universal teaching and research equipment for electrical laboratories", *Electromechanical and energy saving systems*, vol. 1, pp. 14–19.
20. Kalinov, A.P. (2007) "The computerized laboratory for the study of complex electromechanical transmission transportation systems", *Electromechanical and energy saving systems*, vol. 1, pp. 50–53.

Стаття надійшла 30.10.2014