

*СИЗЫЙ Ю.А., СТАЛИНСКИЙ Д.В., ЧАЙКА Э.Г., УШАКОВ А.Н., ЩЕРБИНИНА Т.Е.*

## РАСЧЕТ И ИССЛЕДОВАНИЕ СТАТИЧЕСКИХ И ДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ ПРИВОДА ВРАЩЕНИЯ ЗАГОТОВКИ КРУГЛОШЛИФОВАЛЬНОГО СТАНКА

В статье представлено определение и численный расчет параметров математической модели двигателя постоянного тока с независимым возбуждением мод. 2ПД100МУХЛ4. Моделирование выполнено на основе разработанной структурной схемы двигателя в виде передаточных функций и связей между ними, что позволило получить визуальное наблюдение за угловой скоростью  $\omega$  ротора двигателя и током якорной цепи  $J_a$ . В соответствии с ограничениями  $J_a$  в зависимости от продолжительности работы двигателя в установившемся режиме получено максимально допустимое значение момента сопротивления на роторе двигателя равное 5Н·м. Модель двигателя дополнена устройствами обратной связи по скорости – тахогенератором и тиристорным преобразователем, а также электронным потенциометром, что в совокупности позволяет уменьшить всплески тока в переходных режимах и обеспечить стабильное значение настраиваемой скорости  $\omega$ . Полученные результаты позволяют выполнить анализ динамики крутильной системы привода вращения заготовки без упрощения модели двигателя, как это обычно делается.

**Ключевые слова:** двигатель постоянного тока; математическая модель; режим пуска, режим установившегося состояния; передаточная функция; момент сопротивления.

*СИЗЫЙ Ю.А., СТАЛИНСКИЙ Д.В., ЧАЙКА Э.Г., УШАКОВ О.М., ЩЕРБИНИНА Т.Е.*

## РОЗРАХУНОК І ДОСЛІДЖЕННЯ СТАТИЧНИХ І ДИНАМІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ЕЛЕКТРОДВИГУНА ПРИВОДУ ОБЕРТАННЯ ЗАГОТОВКИ КРУГЛОШЛІФОВАЛЬНОГО ВЕРСТАТА

У статті подано визначення та чисельний розрахунок параметрів математичної моделі двигуна постійного струму з незалежним збудженням мод. 2ПД100МУХЛ4. Моделювання виконано на основі розробленої структурної схеми двигуна у вигляді передавальних функцій і зв'язків між ними, що дозволило отримати візуальне спостереження за кутовою швидкістю  $\omega$  ротора двигуна і струмом якорного ланцюга  $J_a$ . Згідно з обмеженнями  $J_a$  в залежності від тривалості роботи двигуна в усталеному режимі отримано максимально допустиме значення моменту опору на роторі двигуна рівне 5Н·м. Модель двигуна доповнена пристроями зворотного зв'язку по швидкості – тахогенератором і тиристорним перетворювачем, а також електронним потенціометром, що в сукупності дозволяє зменшити сплески струму в перехідних режимах і забезпечити стабільне значення налагоджувальної швидкості  $\omega$ . Отримані результати дозволять виконати аналіз динаміки крутильної системи привода обертання заготовки без спрощення моделі двигуна, як це зазвичай робиться.

**Ключові слова:** двигун постійного струму; математична модель; режим пуску, режим сталого стану; передатна функція; момент опору.

*SIZY J.A., STALINSKY D.V., CHAYKA E.G., USHAKOV A.N., SCHERBININA T.E.*

## CALCULATION AND RESEARCH STATIC AND DYNAMIC CHARACTERISTICS ELECTRIC MOTOR DRIVE OF ROTATION BLANK IN CIRCULAR GRINDING MACHINE TOOL

The article definition and numerical calculation of parameters of mathematical model of the drive of a direct current with independent excitation of model 2ПД100МУХЛ4 is presented. Simulation is executed on the basis of the designed block diagram of the drive in the form of transmitting functions and links between them that has allowed to receive visual observation of an angular velocity  $\omega$  a rotor of the drive and a current of anchor circuit  $J_a$ . According to limitations  $J_a$  depending on operation time of the drive in a steady run the acceptable value of the moment of resistance on a drive rotor equal 5Н·м is received as much as possible. The drive model is added by feedback devices on speed - the generator and the thyristor the converter, and also an electronic potentiometer that in aggregate allows to diminish current splashes in transitive conditions and to ensure stable value of adjusted speed  $\omega$ . The received results will allow to make the analysis of dynamics of torsional system of a roll drive of preform without simplification of model of the drive as it usually becomes.

**Keywords:** motor of direct current; mathematical model; starting regime, regime steady state; transe function; moment of resistance.

### 1.

**Введение.** Электродвигатель постоянного тока представляет собой важнейший элемент привода вращения обрабатываемой заготовки в круглошлифовальных станках. Обычно это двигатель с независимым возбуждением и обеспечивает бесступенчатое изменение частоты его вращения изменением напряжения подаваемое на обмотку якоря в сторону его уменьшения от номинального значения в 220 В.

Полную информацию о двигателе необходимую для управления приводом подачи заготовки можно получить на структурной его модели представляющей соединение элементов модели при помощи передаточных функций и сумматоров.

Разработке этой модели и посвящена настоящая статья с анализом поведения важнейших ее элементов – тока якорной цепи, частоты вращения ротора, момента сопротивления на роторе

двигателя в установившемся и переходных режимах работы двигателя.

**Литературный обзор.** Рассмотренная в статье модель электродвигателя постоянного тока с независимым возбуждением предлагает в дальнейшем использование ее в модели привода вращения заготовки круглошлифовального станка.

В принятой в середине прошлого века методике исследования приводов вращения станков [7] электродвигатель представлялся как устройство, обеспечивающее электромагнитную связь ротора и статора описываемую жесткостью или податливостью этой связи. Такое описание лишает исследователя наблюдения во времени за важнейшими параметрами двигателя и привода в различных режимах их работы.

В более поздней литературе [2] модель двигателя представлена наиболее полно системой дифференциальных уравнений ДУ, которая может

быть непосредственно использована для составления схемы набора на аналоговой вычислительной машине (АВМ).

В современной литературе [1,6] и др. модель двигателя в виде системы ДУ решается как на АВМ, так и на современных ЭВМ.

В предлагаемой в статье модели двигателя, в виде структурной схемы состоящей из блоков с передаточными функциями и связями между ними удобна для визуального наблюдения за всеми сигналами модели, в частности в пакете прикладных программ *Vissim*, что позволяет управлять ими в различных режимах работы двигателя.

**3. Цель и задачи исследования.** Получить информацию о поведении параметров двигателя визуальным моделированием в установившихся и переходных режимах его работы решив следующие задачи:

- 1) обеспечить величину всплеска тока якоря не выше допустимого из условия нагрева его обмоток;
- 2) установить максимальное значение момента сопротивления ограниченное током якоря;
- 3) получить зависимость напряжения  $U_3$ , подаваемое на двигатель в зависимости от требуемой (настраиваемой) частоты  $\omega$  вращения ротора с учетом обратной связи по скорости.

#### 4. Изложение основного материала.

Статические и динамические характеристики привода вращения заготовки круглошлифовального станка в значительной степени определяются электродвигателем этого привода. Обычно это двигатель постоянного тока с независимым возбуждением, обеспечивающим бесступенчатое регулирование частоты вращения заготовки.

Современные круглошлифовальные станки и, в частности станок 3М152ВФ20 с электродвигателем привода заготовки 2ПД100МУХЛ4, оборудованы программным управлением, которое позволяет программно задавать частоту вращения заготовки и поддерживать ее при изменяющемся моменте шлифования, приложенном к заготовке.

Анализировать статические и динамические свойства двигателя 2ПД100МУХЛ4 наиболее полно можно по известной математической модели в виде системы дифференциальных уравнений [1, 2]:

$$\left. \begin{aligned} L_{я} \frac{dJ_{я}}{dt} + R_{я} J_{я} + E &= U; \\ J \frac{d\omega}{dt} &= M_g - M_c, \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

Здесь в (1)  $U$  – напряжение постоянного тока, подаваемое на якорь, которое является входом в двигатель;  $R_{я}$ ,  $L_{я}$  – сопротивление и индуктивность якорной цепи. Напряжение  $E$ , возникающее в обмотке якоря в результате вращения его в магнитном поле статора называют противо ЭДС и вычисляют следующим образом:

$$E = K \cdot \phi \cdot \omega, \quad (2)$$

где  $K$  – коэффициент, зависящий от конструктивных параметров двигателя;  
 $\phi$  – магнитный поток возбуждения;  
 $\omega$  – угловая скорость двигателя.

Т.к. рассматриваемый двигатель с независимым возбуждением, то принимаем  $\phi$  неизменным и

$$E = C_e \cdot \omega, \quad (3)$$

где  $C_e = K \cdot \phi$ .

Таким образом, согласно (1) напряжение, подаваемое на якорь двигателя расходуется на преодоление активного сопротивления, индуктивного и противо ЭДС.

Второе уравнение системы (1) – это уравнение движения двигателя, где

$J$  – момент инерции всех вращающихся масс приведенных к валу движения;

$M_g$  – момент развиваемый двигателем:

$$M_g = C_m J_{я}. \quad (4)$$

$M_c$  – момент сопротивления приложенный к валу двигателя.

Наиболее полно выявить статические и динамические свойства двигателя удобно моделированием, например, в пакете визуального моделирования *Vissim* [3], при известных параметрах  $R_{я}$ ,  $J_{я}$ ,  $C_e$ ,  $C_m$ ,  $J$  и моменте сопротивления  $M_c$ .

В справочнике по электрическим машинам [4] приводятся все данные двигателей серии 2П:

$N_n$  – мощность номинальная, кВт;

$U_n$  – номинальное напряжение сети, В;

$n_n$  – номинальная частота вращения, мин<sup>-1</sup>;

$\eta$  – коэффициент полезного действия, %;

$R_{я}$  – сопротивление обмотки якоря, Ом (при 15° С);

$R_{gn}$  – сопротивление обмотки дополнительных полюсов, Ом;

$L_{я}$  – индуктивность инерции якоря, мГн.

$J$  – момент инерции якоря, кг·м<sup>2</sup>.

Параметры  $C_e$  и  $C_m$  не приводятся и рассчитываются из номинальных значений перечисленных данных двигателя.

Сопротивление якорной цепи

$$R_{яя} = 1,2(R_{я} + R_{gn}) + R_{цц}, \quad (5)$$

где  $R_{цц}$  – щеточное сопротивление, Ом;

1,2 – коэффициент, учитывающий нагрев обмоток;

$$R_{цц} = 2 / J_{яя}, \quad (6)$$

где  $J_{яя}$  – номинальный ток якорной цепи, который вычисляется следующим образом:

$$J_{яя} = \frac{N_n \cdot \eta}{U_n}, \quad (7)$$

Значение  $C_e$  рассчитывается из статической электромеханической характеристики электродвигателя, т.е. из первого уравнения системы

$$(1) \text{ при отсутствии слагаемого } L_{я} \frac{dJ_{я}}{dt}.$$

Перепишем это уравнение с номинальными значениями параметров:

$$R_{яя} \cdot J_{яя} + C_e \cdot \omega_n = U_n, \quad (8)$$

и из (8) получаем:

$$C_e = \frac{(U_n - R_{яя} \cdot J_{яя})}{\omega_n}, \frac{\text{В} \cdot \text{с}}{\text{рад}}. \quad (9)$$

Коэффициент  $C_m$  обычно очень близок численно к  $C_e$ , но с другой размерностью,  $\frac{\text{Н} \cdot \text{м}}{\text{А}}$ . Зная  $C_m$  можно рассчитать номинальный момент развиваемый двигателем:

$$M_n = C_m \cdot J_{ня} \cdot \quad (10)$$

Двигатель 2ПД100МУХЛ4 имеет следующие паспортные данные:

$N_n=0,85$  кВт,  $U_n=220$  В,  $n_n=2360$  мин<sup>-1</sup>=247,14 рад/с,  $\eta=78\%$ ,  $R_{я}=1,99$  Ом,  $R_{gn}=1,22$  Ом,  $L=78$  мГн,  $J=0,011$  кг·м<sup>2</sup>.

Согласно (7)  $J_{ня}=3,01$  А; согласно (6)  $R_{цт}=0,66$  Ом; и согласно (5)  $R_{ня}=4,52$  Ом.

Коэффициент  $C_e$  получим из (9) равным 0,83 В·с/рад и соответственно  $C_m=0,83$  Н·м/А.

Таким образом, имеются все числовые параметры системы (1), что позволяет визуальным моделированием проанализировать статические и динамические характеристики рассматриваемого двигателя.

Визуальное моделирование двигателя можно выполнить двумя методами: 1) решая систему уравнений (1) методом понижения производной; 2) сформировав структурную схему модели соединением передаточных функций элементов системы (1).

Для реализации метода понижения производной необходимо разрешить уравнения (1) относительно старших производных и проинтегрировать эти производные, используя стандартные блоки пакета *Vissim* [3].

Более наглядный анализ получаем, если систему (1) представить в виде структурной схемы, т.е. как сочетание передаточных функций ее элементов с прямыми и обратными связями, что также можно реализовать в пакете *Vissim*.

Воспользуемся вторым методом для чего из первого уравнения системы (1) запишем:

$$\frac{L_{я}}{R_{я}} \frac{dJ_{я}}{dt} + J_{я} + \frac{1}{R_{я}} E = \frac{1}{R_{я}} U. \quad (11)$$

Преобразуем (11) по Лапласу при нулевых начальных условиях [5]:

$$\frac{L_{я}}{R_{я}} S \cdot J_{я}(S) + J_{я}(S) = \frac{1}{R_{я}} (U(S) - E(S)); \quad (12)$$

где  $S$  – комплексная переменная  $S = C + i\omega$ ,  $J_{я}(S)$ ,  $U(S)$ ,  $E(S)$  преобразования Лапласа функций времени соответственно  $J_{я}(t)$ ,  $U(t)$ ,  $E(t)$ .

Величину  $\frac{L_{я}}{R_{я}}$  называют электромагнитной постоянной времени и обозначают  $T_{э}$ .

Введя  $T_{э}$  и вынеся  $J_{я}(S)$  из левой части (12) получаем:

$$J_{я}(S)(T_{э} \cdot S + 1) = \frac{1}{R_{я}} (U(S) - E(S)) - \frac{1}{R_{я}} U(S) - \frac{1}{R_{я}} E(S)$$

$$J_{я}(S) = \frac{1/R_{я}}{T_{э} \cdot S + 1} U(S) - \frac{1/R_{я}}{T_{э} \cdot S + 1} E(S) \quad (13)$$

Согласно (13) уравнение (11) может быть представлено структурной схемой следующего вида:

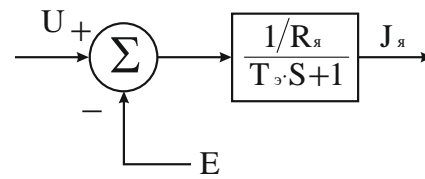


Рис. 1 – Элемент структурной схемы согласно (13)

Согласно второго уравнения системы (1) ток якоря  $J_{я}$  умноженный на  $C_m$  дает момент развиваемый двигателем  $M_g$  и схему на рис. 1 можно дополнить пропорциональным безинерционным звеном с коэффициентом передачи  $C_m$ .

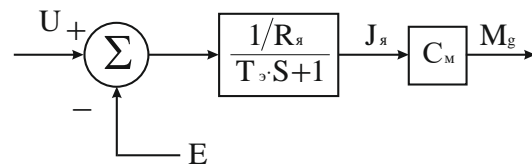


Рис. 2 – Элемент схемы рис.1 дополненный моментом сопротивления  $M_g = C_m J_{я}$

Рассмотрим второе уравнение системы (1):

$$J \frac{d\omega}{dt} = C_m J_{я} - M_c = M_g - M_c. \quad (14)$$

Преобразуем (14) по Лапласу при нулевых начальных условиях:

$$J \cdot S \cdot \omega(S) = M_g(S) - M_c(S).$$

Запишем следующую передаточную функцию:

$$W(S) = \frac{\omega(S)}{M_g(S) - M_c(S)} = \frac{1/J}{S}. \quad (15)$$

Выходным сигналом этой передаточной функции является  $\omega$ , а входным  $M_g - M_c$ . Следовательно, чтобы получить  $\omega$  нужно от  $M_g$  на рис. 2 отнять  $M_c$  и подать эту разность на блок с передаточной функцией  $\frac{1/J}{S}$ . Полученный сигнал  $\omega$  пропорциональным безинерционным звеном с коэффициентом передачи  $C_e$  преобразуется в противо ЭДС  $E$ , которая по отрицательной обратной связи подается на сумматор, на который приходит задаваемое напряжение  $U$ . Таким образом, получается структурная схема модели двигателя, показанная на рис. 3.

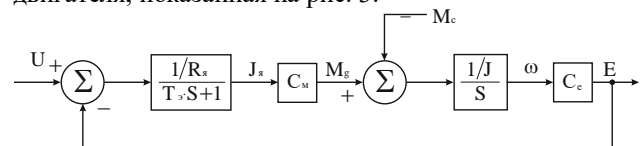


Рис. 3 – Полная структурная схема двигателя

Блок-схема модели двигателя согласно рис. 3 с параметрами, полученными выше к двигателю 2ПД100МУХЛ4, приведена на рис. 4.

На вход блок – схемы моделирования подается ступенчатый сигнал  $U$  обозначенный как  $U_c$  равный номинальному его значению 220 В.

Возмущающее воздействие на двигатель это момент сопротивления  $M_c$ . На рис. 4  $M_c$  подается ступенчатым сигналом равным 5Н·м с задержкой по времени на 0,8 сек.

В [4] указывается  $J_a$  допустимое для различных режимов работы двигателя. При длительной эксплуатации предельно допустимый ток якоря не должен превышать  $(0,9 \div 1)J_{ня}$ . Кратковременная перегрузка в течении 60 сек. допускает значение тока равное  $2 \cdot J_{ня}$ , а в течении 10 сек –  $4 \cdot J_{ня}$ .

При врезном шлифовании, продолжительность операции которого не превышает 60 сек, предельно допустимое значение  $J_a = 2 \cdot J_{ня} = 2 \cdot 3,01 = 6,02$  А.

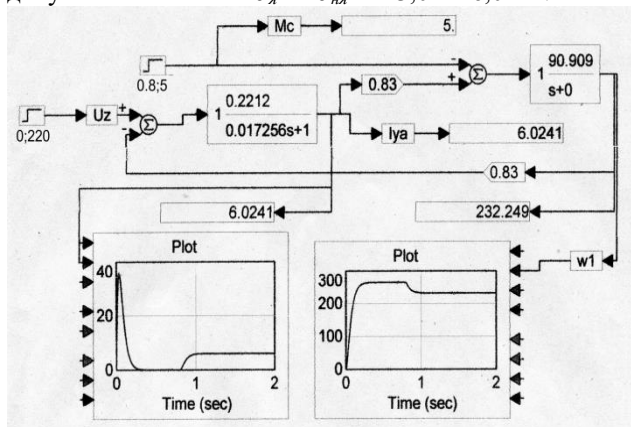


Рис. 4 – Структурная схема модели двигателя с численными параметрами ее и результатами моделирования в пакете Vissim

Блок – схему моделирования двигателя 2ПД100МУХЛ4 с численными ее параметрами согласно рис.3 в пакете Vissim, выбрав метод, шаг и время интегрирования, задав момент сопротивления  $M_c$  ступенчатым сигналом с задержкой на 0,8 сек величиной 5Н·м, а входной сигнал ступенчатым сигналом равным номинальному значению напряжения  $U$ , т.е. 220 В, выполняем моделирование, результаты которого приведены на рис. 4.

Эти результаты представлены на рис. 4 графиками изменения тока в якорной цепи  $J_{ya}$  и  $\omega_1$ .

При пуске двигателя  $J_{ya}$  сначала резко возрастает до 35 А, а затем до нуля и при подаче  $M_c = 5$ Н·м он снова вырастает до 6,02 А и устанавливается на этом значении.

Таким образом, подобранное значение  $M_c = 5$  Н·м является предельно допустимым для работы двигателя 2ПД100МУХЛ4 в приводе заготовки круглошлифовального станка.

Из правого графика рис. 4 видно, что после подачи возмущающего воздействия  $M_c = 5$ Н·м частота вращения двигателя заметно падает с 268 рад/с до 232 рад/с. В тоже время для рационального (в идеале оптимального) управления циклом круглого наружного врезного шлифования (КНВШ) необходимо поддерживать неизменной скорость вращения заготовки при изменяющихся значениях момента резания.

Современные круглошлифовальные станки, и в частности станок 3М152ВФ20, оборудованы системой числового программного управления (ЧПУ) режимами обработки, и в частности частотой вращения заготовки. Система ЧПУ реализует обратную связь по скорости, что позволяет поддерживать скорость заготовки практически неизменной при изменяющемся моменте шлифования.

Обратная связь по скорости в управлении двигателем 2ПД100МУХЛ4 реализуется тахогенератором  $T_g$  сравнивающим устройством (сумматором) и тиристорным преобразователем  $T_p$ .

Устройства  $T_p$ ,  $T_g$  являются электронными, описываемые передаточной функцией аperiodического звена первого порядка [6]. Постоянные времени этих устройств, определяющих их инерционность, очень малы (сотни доли секунды [6]) и зачастую принимаются равными нулю. Таким образом  $T_p$  и  $T_g$  принимаются как безинерционные пропорциональные звенья, передаточные функции которых это коэффициенты передачи соответственно  $K_{mp}$ ,  $K_{mg}$ . На рис. 5 показана блок – схема модели двигателя, дополненная передаточными функциями устройств обратной связи.

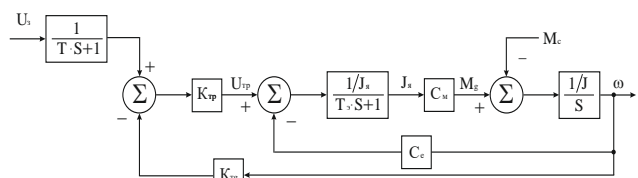


Рис. 5 – Блок – схема модели двигателя с обратной связью по скорости

Обратившись к рис. 4 мы видим, что  $U_z$  ступенчато подаваемое на вход двигателя приводит к всплеску тока якоря до  $\approx 35$  А. Такой ток превышает допустимый при кратковременной перегрузке двигателя в течении менее 10 сек равный  $4 \cdot J_{ня} = 4 \cdot 3,01 \approx 12$  А.

Поэтому для уменьшения такого всплеска напряжение  $U_z$  подается через аperiodическое звено первого порядка с постоянной времени  $T$  величина которой подбирается так, чтобы не превышать величину всплеска тока в 12 А.

В паспорте станка 3М152ВФ20 не приводятся численные значения  $T$ ,  $K_{mp}$ ,  $K_{mg}$  и поэтому они подобраны такими, которые обеспечивают желаемые условия работы двигателя, т.е. стабильное значение частоты вращения двигателя  $\omega_1$  при изменяющемся  $M_c$ . Эти значения следующие  $K_{mp} = 10$ ,  $K_{mg} = 1$ ,  $T = 0,4$  сек.

На рис. 6 приведена блок – схема модели в пакете Vissim с аperiodическим звеном на входе и передаточными функциями устройств обратной связи.

Из графиков рис. 6 видно, что входное напряжение растет по экспоненте от нуля до заданных 255 В за примерно 2 сек. и всплеск тока якоря не превышает допустимого его значения в 12 А.

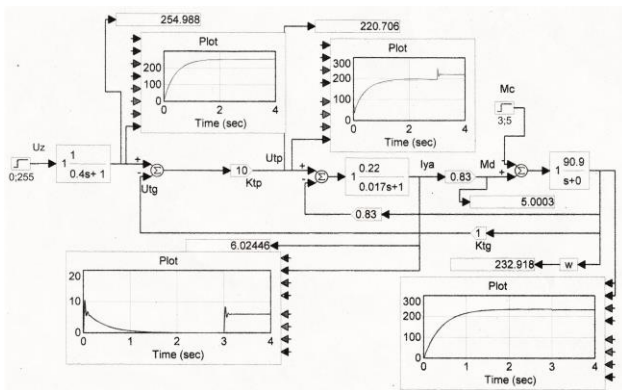


Рис. 6 – Результат моделирования двигателя с обратной связью по скорости и постепенным нагружением его  $U_z$  через апериодическое звено первого порядка

Возмущающее воздействие  $M_c$  подается через 3 сек. и при его максимально допустимом значении в 5Н·м двигатель практически не теряет угловую скорость, что хорошо видно из правого нижнего графика.

Известно, [4] что регулирование частоты вращения двигателя  $\omega$  постоянного тока осуществляется бесступенчато при изменении напряжения подаваемого на обмотку якоря в сторону уменьшения его от номинального значения 220 В.

Напряжение, подаваемое на обмотку якоря это выходное напряжение тиристорного преобразователя  $U_{tp}$ . Согласно рис. 6 оно равно номинальному, в то время как напряжение на входе в двигатель  $U_z$  с учетом всех дополнительных устройств равно 255 В. При  $U_z = 255$  В частота вращения двигателя согласно рис. 6, т.е. максимальное ее значение, равно 232.9 рад/с. Таким образом, управление частотой вращения двигателя осуществляется уменьшением напряжения  $U_z$  от 255 В в сторону уменьшения.

Поэтому необходимо знать связь  $\omega_f(U_z)$ , т.е. статическую механическую характеристику двигателя с учетом всех дополнительных устройств обратной связи по скорости. Эта связь в динамике зависит от  $M_c$ , однако, влияние  $M_c$  на  $\omega$  невелико, что установлено выше, поэтому приближенную зависимость  $\omega_f(U_z)$  получим при среднем значении  $M_c = 2,5$  Н·м.

Пользуясь блок – схемой модели рис. 6 можно для  $M_c = 2,5$ Н·м перебирая значения  $U_z$  от его максимального допустимого значения обеспечивающее напряжение подаваемое на якорь двигателя равно 220 В в сторону уменьшения, получить податливость механической характеристики

$\beta = \frac{\omega}{U_z}$  или  $U_z = \beta \cdot \omega$ . Значение  $\beta$  для двигателя 2ПД100МУХЛ4 равно 1,12.

При этом максимальное значение  $\omega = 248$  рад/с.

Из модели двигателя записанной через передаточные функции ее элементов может быть получено первое уравнение системы (1), т.е. уравнение якоря с учетом обратной связи по скорости двигателя, для этого от подаваемого на якорь

напряжения  $U$  в установившемся режиме работы надо отнять  $U_{tg}$  и умножить полученный результат на  $K_{tp}$ . В результате получим:

$$L_{я} \frac{dJ_{я}}{dt} + R_{я} J_{я} + C_e \omega = (U_z - U_{tg}) \cdot K_{tp} \cdot \quad (16)$$

Второе уравнение системы (1) остается неизменным. Таким образом, получаем систему дифференциальных уравнений первого порядка, т.е. получаем возможность представить модель двигателя в пространстве состояний с учетом обратной связи по скорости и ограничениями на ток якоря в установившемся режиме круглого наружного врезного шлифования.

Владея разработанной моделью двигателя можно выполнить анализ крутильных колебаний привода вращения заготовки без упрощения модели двигателя как это обычно делается [7].

**Выводы.** Разработана модель двигателя постоянного тока 2ПД100МУХЛ4 с независимым возбуждением в виде структурной схемы с передаточными функциями и связями между ними. Эта модель позволила получить визуальное наблюдение за всеми сигналами модели и решить поставленные задачи:

- обеспечить величину всплесков тока якоря в переходных режимах не выше допустимого из условия его нагрева;
- установить максимальное значение момента сопротивления;
- получить зависимость входного напряжения  $U_z$  от требуемой (настраиваемой) частоты  $\omega$  вращения ротора с учетом обратной связи по скорости.

#### Список литературы:

1. Филлипс Ч., Харбор Р. *Системы управления с обратной связью*. – Москва : Лаборатория базовых знаний, 2001. – 616 с.
2. Левин А.И. *Математическое моделирование в исследованиях и проектировании станков*. – Москва : Машиностроение, 1978. – 184 с.
3. Дьяконов В.П. *VisSim + Mathcad + MatLAB. Визуальное математическое моделирование*. – Москва : Солон – Пресс, 2004. – 384 с.
4. *Справочник по электрическим машинам*. В 2 томах. Под общей редакцией Копылова И.П., Клокова Б.К. Том 1, Москва : Энергоатомиздат, 1988. – 258 с.
5. Краснов М.Л., Киселев А.И., Макаренко Г.И. *Функции комплексного переменного. Операционное исчисление. Теория устойчивости*. – Москва : Наука, 1981. – 303 с.
6. Петраков Ю.В. *Автоматичне управління процесами обробки матеріалів різанням*. – Київ : УкрНДУТАТ, 2003. – 283 с.
7. Ривин Е. И. *Динамика приводов станков*. – Москва : Машиностроение, 1966. – 204 с.

#### References (transliterated)

1. Phillips Ch., Harbor R. *Sistemy upravlenija s obratnoj svjaz'ju* [Feedback control systems] – Moscow: Laboratorija bazovyh znanij, 2001. – 616 p.
2. Levin A.I. *Matematicheskoe modelirovanie v issledovanijah i proektirovanii stankov* [Mathematical simulation in research and machine tools projection] – Moscow: Mechanical Engineering, 1978. – 184 p.

3. Djakonov V. P. VisSim + Mathcad + MatLAB. *Vizual'noe matematicheskoe modelirovanie* [VisSim + Mathcad + MatLAB. Visual mathematical simulation] – Moscow: Solon – Press, 2004. – 384 p.
4. *Spravochnik po jelektricheskim mashinam* [Reference book in electrical] V 2 tomah. Pod obshej redakciej Kopylova I.P., Klokova B.K. Tom 1, Moscow: Jenergoatomizdat, 1988. – 258 p.
5. Krasnov M.L., Kiselev A.I., Makarenko G.I. *Funkcii kompleksnogo peremennogo. Operacionnoe ischislenie. Teorija ustojchivosti* [The functions of a complex variable. Operational calculation. Theory of sustainability.] – Moscow: Nauka Publ, 1981. – 303 p.
6. Petrakov Yu.V. *Avtomaty`chne upravlinnya procesamy`obrobky` materialiv rizannyam* [Automatic control process of material cutting] – Kiyev : UkrNDUTAT, 2003. – 283 p.
7. Rivin E. I. *Dinamika privodov stankov* [Dynamic of machine tools] – Moscow: Mechanical Engineering, 1966. – 204 p.

Поступила (received) 05.05.2020

*Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors*

**Сизий Юрій Анатолійович (Сизый Юрий Анатольевич, Sisy Jury Anatolievich)** – доктор технічних наук, професор, Державне Підприємство «Український Науково-Технічний Центр Металургійної Промисловості «Енергосталь», м. Харків; тел.: +38-066-788-24-41; e-mail: [sisy.jurys@yandex.ua](mailto:sisy.jurys@yandex.ua);

**Сталінський Дмитро Віталійович (Сталинский Дмитрий Витальевич, Stalinsky Dmitry Vitalievich)** – доктор технічних наук, професор, Державне Підприємство «Український Науково-Технічний Центр Металургійної Промисловості «Енергосталь», м. Харків; тел.: +38 (057) 702-17-31; e-mail: [energostal@energostal.kharkov.ua](mailto:energostal@energostal.kharkov.ua);

**Чайка Едуард Григорович (Чайка Едуард Григорьевич, Chayka Eduard Grigorievich)** – кандидат технічних наук, доцент каф. АСУ Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», м. Харків, Україна; тел.: +38-095-134-61-22; e-mail: [e-chyka@yandex.ua](mailto:e-chyka@yandex.ua);

**Ушаков Олександр Миколайович (Ушаков Александр Николаевич, Uschakov Alexander Nykolaevich)** – кандидат технічних наук, доцент каф. ТМС МІТ Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», м. Харків, Україна; тел.: +38-097-882-22-11; e-mail: [parom38@yandex.ua](mailto:parom38@yandex.ua);

**Щербініна Тетяна Євгенівна (Щербинина Татьяна Евгеньевна, Sherbinina Tatyana Evgenievna)** – кандидат фіз.-мат наук, доцент прикладної математики Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», м. Харків, Україна; тел.: +38-050-323-37-84; e-mail: [kurpa@kpi.kharkov.ua](mailto:kurpa@kpi.kharkov.ua)