

УДК 621.961.001

Шоленинов В. Е.  
Чоста Н. В.**ИССЛЕДОВАНИЕ НОЖНИЦ С КАТЯЩИМСЯ РЕЗОМ ДЛЯ ОБРЕЗКИ  
ЛИСТОВОГО ПРОКАТА**

К качеству резки металлических полос предъявляются жесткие требования, так как деформация отрезаемых полос ввиду необходимой дополнительной правки представляет серьезную помеху для производства. Требуемая точность резки является основным фактором, обуславливающим конструктивные параметры ножниц. С точки зрения качества реза наиболее рационально использовать ножницы с катящимся резом (НКР), в которых верхний дугообразный нож движется по неподвижному прямолинейному нижнему ножу. Как показали исследования [1], оптимальной траекторией движения ножа является такая траектория, при которой верхний нож катится по горизонтальной прямой линии, лежащей ниже режущей кромки нижнего ножа на глубину вертикального перекрытия между ножами.

Эта схема обеспечивает более высокое качество резки листов, чем гильотинные ножницы, за счёт минимального перемещения верхнего ножа относительно разрезаемого проката, а также за счёт практически постоянного перекрытия по всей длине реза [2].

В настоящее время нет методики метрического синтеза НКР, а так же методики кинематического и динамического исследования.

Целью работы является разработка методики, позволяющей выполнить метрический синтез НКР для резки листового проката, который является механизмов 3-го класса; методики определения передаточных функций первого и второго порядка линейных и угловых координат механизма, а также получение и анализ графиков зависимости угла поворота ножа от угла поворота входного звена; определение параметров, влияющих на кинематические характеристики механизма, и способов управления ими.

На рис. 1. изображена кинематическая схема исследуемого механизма. Два синхронно вращающихся входных звена 1 и 6 приводят в движение механизм. Нож крепится к шатуну 2, который совершает плоское движение, обеспечивая необходимую траекторию перемещения ножа. Механизм относится к механизму третьего класса, что вызывает значительные затруднения в расчете кинематических и силовых параметров.

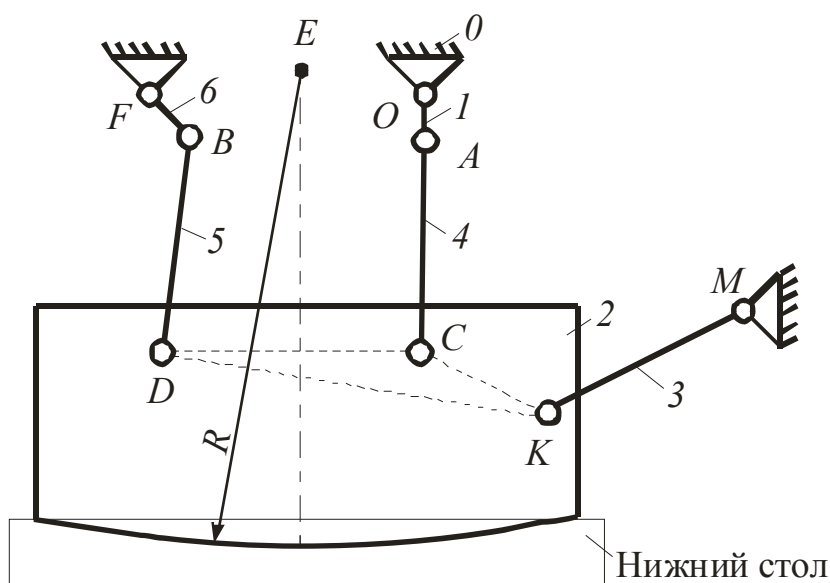


Рис. 1. Структурная схема ножниц с катящимся резом

Первым этапом расчёта механизма является его метрический синтез, в результате которого определяются линейные и угловые координаты элементов механизма для достаточного количества положений начального звена. Однако для механизмов 3-го класса это представляет определенные сложности [3].

Число степеней свободы определим по формуле Чебышева:

$$W = 3 \cdot n - 2 \cdot p_1 - p_2 = 3 \cdot 6 - 2 \cdot 8 = 2, \quad (1)$$

следовательно, механизм имеет два начальных звена.

Формула строения механизма:

$$\begin{array}{l} (0-1) \\ (0-6) \end{array} \begin{array}{l} \nearrow \\ \searrow \end{array} (2-3-4-5), \quad (2)$$

где (2-3-4-5) – группа III класса.

Использование традиционного метода – изменения начального звена [4], для определения кинематических и силовых параметров не применимо, так как механизм всегда остается III класса. Для выполнения метрического синтеза рассмотрим метода составления статически определимой системы уравнений.

В настоящей работе мы проводили расчёты для 48 положений начального звена.

Исходные данные для расчёта механизма, рассматриваемого в прямоугольной системе координат:  $x_O = 0$  мм,  $y_O = 0$  мм,  $L_{OA} = 140$  мм,  $L_{FB} = 77,5$  мм,  $L_{MK} = 3000$  мм.

Для определенного положения кривошипа – 1 и 6, когда известны координаты точек  $A$  и  $B$  –  $X_A$  и  $Y_A$ ,  $X_B$  и  $Y_B$ , неизвестными являются по две координаты точек  $C$ ,  $D$  и  $K$ , то есть шесть неизвестных, для определения которых можно записать шесть уравнений связей, образующих систему квадратных уравнений:

Составим систему уравнений:

$$\begin{cases} (x_A - x_C)^2 + (y_A - y_C)^2 = l_{AC}^2; \\ (x_M - x_K)^2 + (y_M - y_K)^2 = l_{MK}^2; \\ (x_K - x_C)^2 + (y_K - y_C)^2 = l_{KC}^2; \\ (x_C - x_D)^2 + (y_C - y_D)^2 = l_{CD}^2; \\ (x_K - x_D)^2 + (y_K - y_D)^2 = l_{KD}^2; \\ (x_B - x_D)^2 + (y_B - y_D)^2 = l_{BD}^2, \end{cases} \quad (3)$$

где  $l_{AC}$ ,  $l_{MK}$ ,  $l_{KC}$ ,  $l_{CD}$ ,  $l_{KD}$ ,  $l_{BD}$  – длины звеньев и расстояния между точками.

Координаты точек  $A$  и  $B$  рассчитываются по формулам:

$$\begin{aligned} x_A &= x_O + l_{OA} \cdot \cos \varphi_1; \\ y_A &= y_O + l_{OA} \cdot \sin \varphi_1; \\ x_B &= x_F + l_{FB} \cdot \cos \varphi_6; \\ y_B &= y_F + l_{FB} \cdot \sin \varphi_6, \end{aligned} \quad (4)$$

где  $\varphi_1$ ,  $\varphi_6$  – углы поворота звена 1 и 6 соответственно.

Для решения системы уравнений можно использовать метод последовательных приближений [5]. Для определения угловых передаточных функций использовались тригонометрические зависимости, например угол  $\varphi_{KD}$  можно определить по формуле:

$$\varphi_{KD} = \arctg \left( \frac{y_D - y_K}{x_D - x_K} \right). \quad (5)$$

Последовательно меняя положения начальных звеньев и решая систему уравнений, определяем координаты всех точек.

На рис. 2 представлен график зависимости угла поворота ножа –  $\varphi_{CD}$  в зависимости от угла поворота входного звена –  $\varphi_{OA}$ .

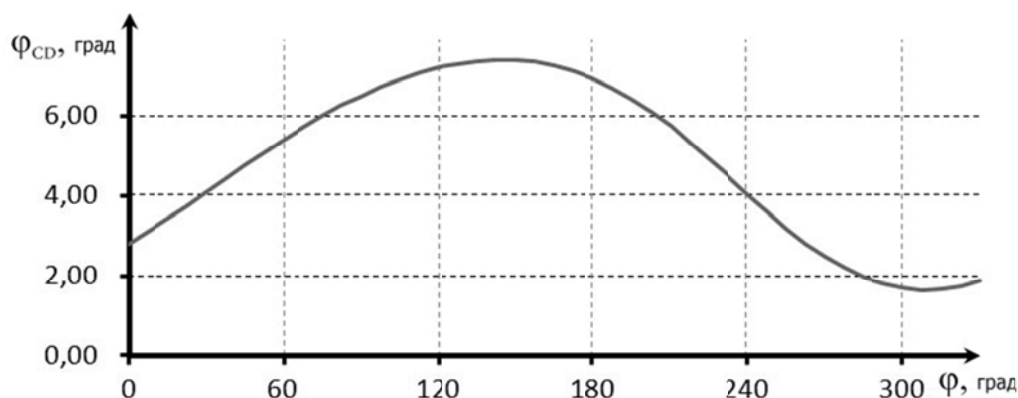


Рис. 2. График изменения угла поворота ножа  $\varphi_{CD}$  от угла поворота кривошипа

Из графика видно, что абсолютный угол разворота ножа составляет около 7 градусов.

Передаточные функции первого и второго порядка – аналоги линейных и угловых скоростей и ускорений, можно определить двумя способами – численным дифференцированием передаточных функций нулевого порядка или составление системы уравнений.

Первый способ реализовали методом дифференцирования по 6 точкам. Нами была разработана универсальная функция, позволяющая выполнять дифференцирование. Из недостатков можно отметить – для не гладких функций наблюдаются разрывы, а так же в крайних точках точность полученных результатов менее 1 %.

Второй способ, основанный на составлении системы уравнений, лишен вышеописанных недостатков. Ниже представлена система уравнений для определения передаточных функций первого порядка:

$$\begin{cases} (x_A - x_C)(x'_A - x'_C) + (y_A - y_C)(y'_A - y'_C) = 0; \\ (x_M - x_K) \cdot x'_K + (y_M - y_K) \cdot y'_K = 0; \\ (x_K - x_C)(x'_K - x'_C) + (y_K - y_C)(y'_K - y'_C) = 0; \\ (x_C - x_D)(x'_C - x'_D) + (y_C - y_D)(y'_C - y'_D) = 0; \\ (x_K - x_D)(x'_K - x'_D) + (y_K - y_D)(y'_K - y'_D) = 0; \\ (x_B - x_D) \cdot x'_D + (y_B - y_D) \cdot y'_D = 0. \end{cases} \quad (6)$$

Передаточные функции первого порядка конца кривошипов определим по формулам:

$$\begin{aligned} x'_A &= -l_{OA} \sin \varphi_1; \\ y'_A &= l_{OA} \cos \varphi_1; \\ x'_B &= -l_{FB} \sin \varphi_6 \cdot j; \\ y'_B &= l_{FB} \cos \varphi_6 \cdot j, \end{aligned} \quad (7)$$

где  $j = +1$ , если кривошипы вращаются в одну сторону и  $j = -1$ , если вращаются в разные.

Для определения передаточных функций второго порядка использовалась система уравнений:

$$\left\{ \begin{array}{l} (x'_A - x'_C)^2 + (x_A - x_C)(x''_A - x''_C) + (y'_A - y'_C)^2 + (y_A - y_C)(y''_A - y''_C) = 0; \\ -x'_K{}^2 + (x_M - x_K) \cdot x''_K + y'_K{}^2 + (y_M - y_K) \cdot y''_K = 0; \\ (x'_K - x'_C)^2 + (x_K - x_C)(x''_K - x''_C) + (y'_K - y'_C)^2 + (y_K - y_C)(y''_K - y''_C) = 0; \\ (x'_C - x'_D)^2 + (x_C - x_D)(x''_C - x''_D) + (y'_C - y'_D)^2 + (y_C - y_D)(y''_C - y''_D) = 0; \\ (x'_K - x'_D)^2 + (x_K - x_D)(x''_K - x''_D) + (y'_K - y'_D)^2 + (y_K - y_D)(y''_K - y''_D) = 0; \\ (x'_B - x'_D) \cdot x'_D + (x_B - x_D) \cdot x''_D + (y'_B - y'_D) \cdot y'_D + (y_B - y_D) \cdot y''_D = 0. \end{array} \right. \quad (8)$$

Передаточные функции второго порядка конца кривошипов определим по формулам:

$$\left\{ \begin{array}{l} x''_A = -l_{OA} \cos \varphi_1; \\ y''_A = -l_{OA} \sin \varphi_1; \\ x''_B = -l_{FB} \cos \varphi_6 \cdot j; \\ y''_B = -l_{FB} \sin \varphi_6 \cdot j. \end{array} \right. \quad (9)$$

Крайнее положение механизма определим из условия, что передаточная функция первого порядка равна нулю, что составляет для рассматриваемого механизма  $240,5^\circ$ .

Следующим шагом в исследовании НКР является анализ влияния различных параметров на кинематические характеристики механизма.

Так как в процессе работы НКР происходит прижим металла ножом с последующим резом за счет сдвига, важно исследовать влияние различных параметров на угол разворота ножа –  $\Delta\varphi$ .

Из рис. 1 видно, что звено 1 смещено относительно звена 6 на угол  $\Delta\alpha$ . Исследования механизма показало, что при изменении величины углового смещения происходит изменение величины разворота ножа 2. На рис. 3 представлен график зависимости угла разворота ножа  $\Delta\varphi$  от величины  $\Delta\alpha$ .

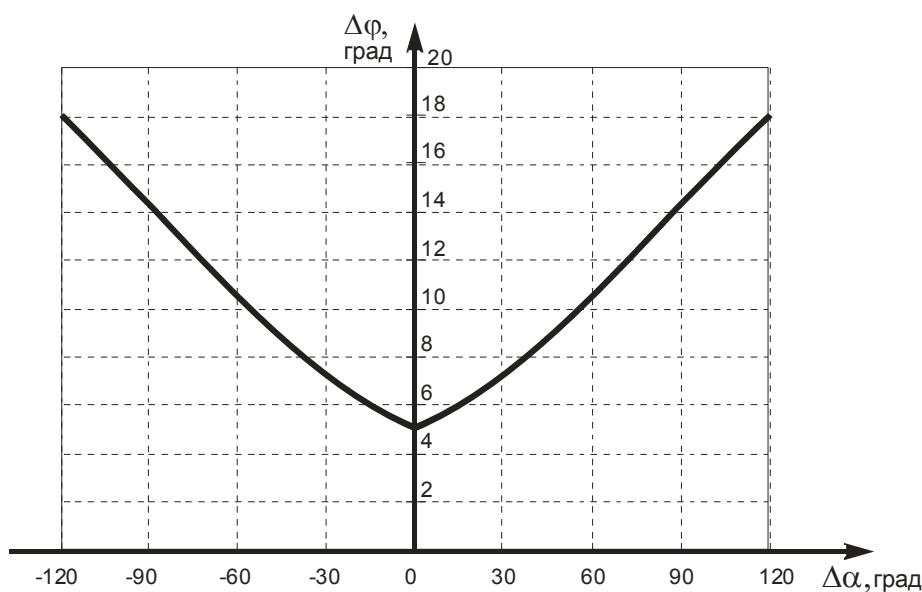


Рис. 3. График зависимости угла разворота ножа  $\Delta\varphi$  от величины  $\Delta\alpha$

Анализ графика показал:

– минимальный угол разворота соответствует нулевому угловому смещению кривошипов 1 и 6. Однако значение смещения всегда остается не нулевым;

– график имеет близкий к параболическому вид с двумя симметричными ветвями. Таким образом, для достижения необходимого угла разворота ножа не играет роли какой кривошип идет первым.

На угол разворота ножа так же оказывает влияние длина коромысла  $3 - l_{KM}$  (см. рис. 1). На рис. 4 показан график зависимости угла разворота ножа  $\Delta\varphi$  от длины коромысла  $l_{KM}$ . Анализ графика показывает практически линейную зависимость.

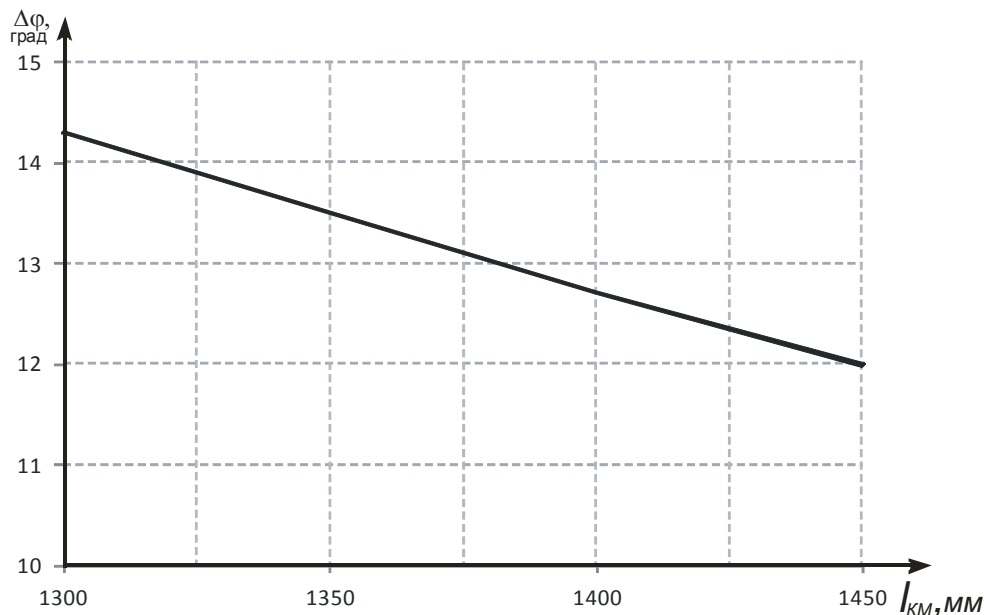


Рис. 4. График зависимости угла разворота ножа  $\Delta\varphi$  от величины длины звена  $l_{KM}$

Для проведения динамического анализа исследуемого механизма определим передаточные функции центров масс. Примем, что звенья имеют однородную структуру, и центр масс располагается на середине звена. На рис. 5 представлена схема нагруженного механизма.

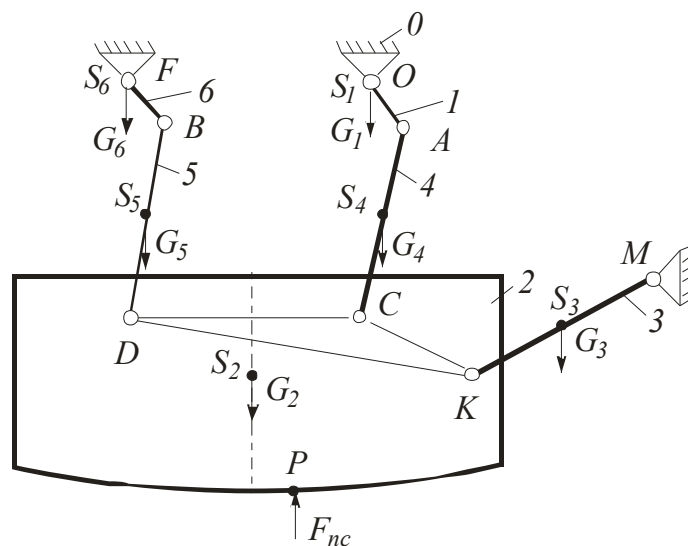


Рис. 5. Схема нагруженного механизма

Приведенный момент сопротивления определим по формуле:

$$M_{nc} = G_2 \cdot \dot{\varphi}_2 + G_3 \cdot \dot{\varphi}_3 + G_4 \cdot \dot{\varphi}_4 + G_5 \cdot \dot{\varphi}_5 + F_{nc} \cdot \dot{y}_P, \quad (10)$$

где  $G_2, G_3, G_4, G_5$  – силы тяжести звеньев, рассчитанные по формуле  $G_i = m_i \cdot g$ ;  $F_{nc}$  – сила производственного сопротивления, равная усилию реза.

Примем для расчета:

- толщина реза в 50 мм;
- количество ходов в минуту 15;
- предел прочности металла 700 МПа;
- максимальное усилие реза 7500 кН.

На рис. 6 представлен график распределения приведенного момента сил сопротивления в зависимости от угла поворота кривошипа.

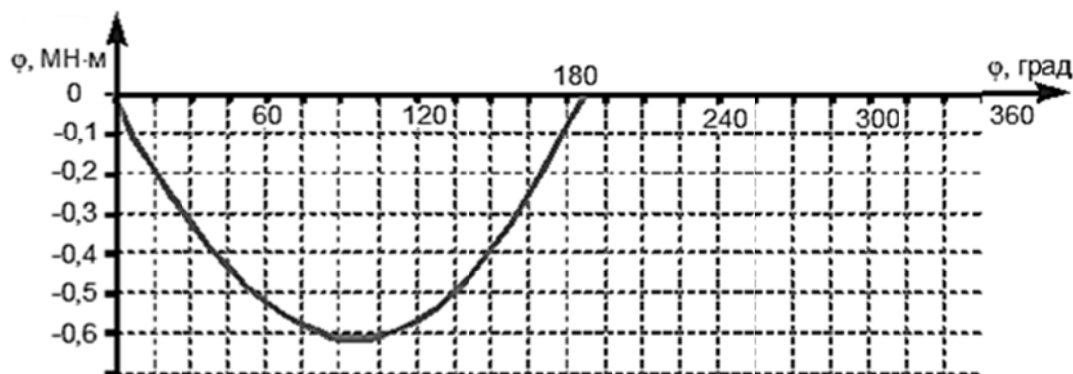


Рис. 6. График приведенного момента сил сопротивления

### ВЫВОДЫ

Разработаны два метода, позволяющие выполнить метрический синтез ножниц с катящимся резом для резки листового проката. Сравнение этих методов показало, что максимальная относительная разность между величинами, полученными разными способами, не превышает 0,1 %. Разработана методика определения передаточных функций первого и второго порядка линейных и угловых координат механизма, а также программа, позволяющая моделировать движение механизма. Приведен график зависимости угла поворота ножа от угла поворота входного звена. Определены параметры, влияющие на кинематические характеристики механизма и способы управления ими. Определен приведенный момент сил сопротивления всех звеньев механизма.

### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Методика расчёта ножниц с катящимся резом / Р. А. Адамович, А. Д. Пальмин, А. М. Рогоза, Л. М. Рудельсон // *Новые конструкции и исследования, агрегатов и машин обработки проката* : сб. науч. тр. / под ред. Попова Б. В. – М. : ВНИИМетмаш, 1985. – С. 62–73.
2. Кіницький Я. Т. *Практикум із теорії механізмів і машин* / Я. Т. Кіницький. – Львів : Афіша, 2002. – 454 с.
3. Левитский Н. И. *Теория механизмов и машин* / Н. И. Левитский. – М. : Наука, 1979. – 574 с.
4. Волков Е. А. *Численные методы* / Е. А. Волков. – М. : Физматлит, 2003. – 248 с.
5. Владимиров Э. А. *Комплексный расчет исполнительного механизма прессы с группами Ассура произвольной структуры* / Э. А. Владимиров, В. Е. Шоленинов // *Удосконалення процесів і обладнання обробки тиском в металургії і машинобудуванні* : зб. наук. пр. – Краматорськ : ДДМА, 2007. – С. 316–321.

Шоленинов В. Е. – ст. преп. каф. ОПМ ДГМА;

Чоста Н. В. – канд. техн. наук, доц. каф. ОПМ ДГМА.

ДГМА – Донбасская государственная машиностроительная академия, г. Краматорск.

E-mail: okmm@dgma.donetsk.ua