УДК 621.313

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ НАГРУЗОК НА ИСПОЛНИТЕЛЬНЫХ ОРГАНАХ В СИСТЕМЕ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ ОЧИСТНЫМ КОМБАЙНОМ

Величко В.И., студент
(ГВУЗ «Донецкий национальный технический университет», г. Донецк, Украина)

Очистной комбайн как объект управления является нелинейной автономной автоколебательной системой со многими степенями свободы. Поэтому, при недоступности натурных испытаний представительные исследование качества и устойчивости систем автоматического управления нагрузкой очистных комбайнов возможны лишь при использовании математической модели, воспроизводящей реальные процессы взаимодействия исполнительных органов с разрушаемым массивом. Наиболее важным при формировании нагрузок на исполнительных органах является процесс стружкообразования, определяющий силы реакции забоя и спектр нагрузок привода исполнительных органов.

Момент сил сопротивления на исполнительном органе M и силы реакции забоя R_a, R_b, R_c в любой момент времени определяются суммой моментов и сил, действующих на каждый *i*-тый резец, находящийся в зоне резания:

$$M = R\sum_{i=1}^{N} z_i;\; R_a = \sum_{i=1}^{N} a_i;\quad R_b = \sum_{i=1}^{N} b_i;\quad R_c = \sum_{i=1}^{N} c_i;$$

$$\alpha_i = -y_i \cos\gamma_i + z_i \sin\gamma_i;\quad b_i = -y_1 \sin\gamma_i - z_i \cos\gamma_i;\quad c_i = x_i;$$

здесь z_i, y_i, x_i соответственно сила резания, сила подачи и боковая сила, действующая на i-тый резец, γ_i- угловое положение i -того резца; $\gamma_i = \gamma_{0i} + \gamma$, где γ - координата исполнительного органа, получаемая из решения уравнений динамики привода исполнительных органов, γ_{0i} - начальный угол установки *i*-того резца на исполнительном органе.Значения z_i, y_i, x_i определяются в зависимости от толщины стружки на каждом *i*-том резце.

Определим толщину стружки *i*- того резца h_i при его заданном угловом перемещении γ_i (рис. 1), предполагая, что *i*-тая линия резания находится в фиксированной вертикальной плоскости и осевые перемещения исполнительного органа отсутствуют. Такое предположение оправданно и подтверждено сравнением результатов моделирования и натурных испытаний нагруженности исполнительных органов комбайна К103.

Толщина стружки – это расстояние между режущими кромками резца в рассматриваемом положении с осью шнека в точке С (точка К) и в некотором прошлом положении с осью в точке А, когда резец пересекал луч СК, направленный от оси шнека к резцу (точка В). Обозначим радиус шнека СК через R, а горизонтальное (в направлении подачи) и вертикальное смещение (приращения координат) оси шнека через Δx , Δy . Отметим, что во введенной системе координат значения приращения Δx неотрицательные, а значения приращения Δy могут иметь любой знак. Дальнейшие рассуждения не зависят от знака Δy , поэтому рассмотрим случай, приведенный на рис. 1, как общий.

Из треугольников ACD и ABC находим:

$$\angle ACD = arctg\frac{\Delta x}{\Delta y},\quad \angle ACB = \pi + \gamma_i - arctg\frac{\Delta x}{\Delta y},\quad |AC| = \sqrt{(\Delta x)^2 + (\Delta y)^2}$$

Используя теорему косинусов и функцию $sign(\Delta y)$, окончательно получим:

$$|BK| = h_i = R - \sqrt{R^2 - ((\Delta x)^2 + (\Delta y)^2)\sin^2\alpha_i} + (sign(\Delta y))\sqrt{(\Delta x)^2 + (\Delta y)^2}\cos\alpha_i, \quad (1)$$

где $\alpha_i = \gamma_i - arctg\dfrac{\Delta x}{\Delta y}$.

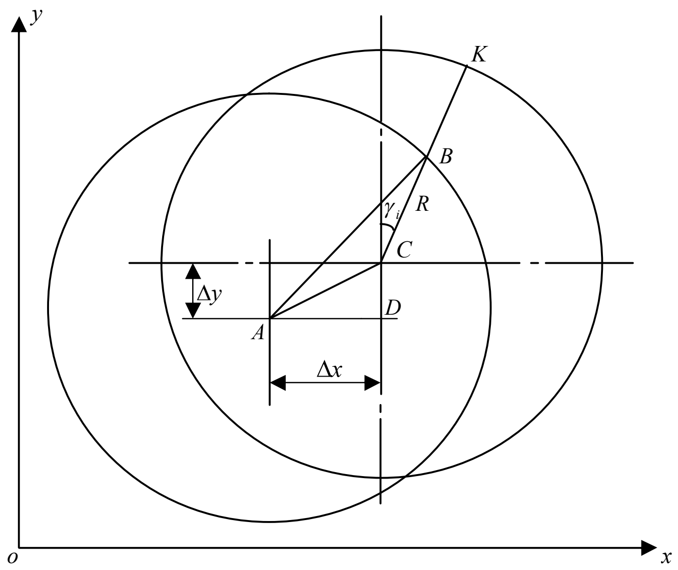

Рисунок 1 - К выводу формулы толщины стружки

В формуле (1) значения приращений $\Delta x, \Delta y$, γ_i являются функциями пространственных координат исполнительного органа x, y, γ, определяемых из решения уравнений движения комбайна в пространстве лавы и уравнений динамики привода исполнительных органов:

$$\Delta x = x_j - x_{j-n}, \quad (2)$$

$$\Delta y = y_j - y_{j-n}, \quad (3)$$

$$\gamma_i = \gamma_i + \gamma_{oi}, \quad (4)$$

где x_j, y_j и x_{j-n}, y_{j-n} - соответственно абсцисса и ордината исполнительного органа в настоящий момент времени t_j и в момент времени t_{j-n}, когда впереди идущий резец, находящийся в одной линии резания с рассматриваемым *i*-тым резцом, пересекал радиус, имеющий угол наклона γ_i; γ_i -угловая координата исполнительного органа в момент времени t_j.

Для одного резца в линии резания впереди идущим будет сам же рассматриваемый резец, и для нахождения приращений $\Delta x, \Delta y$ необходимо знать его же координаты x_{j-n} и y_{j-n} на предыдущем обороте исполнительного органа. Следовательно, при программной реализации формул (2) – (4) на каждом шаге вычисления h_i (в очередном фиксированном положении исполнительного органа) в общем случае необходимо иметь предысторию x_{j-n}, y_{j-n} не менее чем за один оборот исполнительного органа.

В предлагаемом алгоритме формирование предыстории и вычисление h_i выполняется через угол $\Delta\varphi$, определяемый как $\Delta\varphi = 2\pi / p$, где p - число положений за один оборот исполнительного органа, в которых вычисляются значения h_i. Такой подход позволяет находить индекс строки с предысторией при любой вариации угловой скорости исполнительного органа.Выбор значения p обусловлен сохранением частотных свойств и формы моделируемого спектра нагрузок на исполнительном органе.

Укрупненный алгоритм расчета нагрузок представлен на рис. 2.

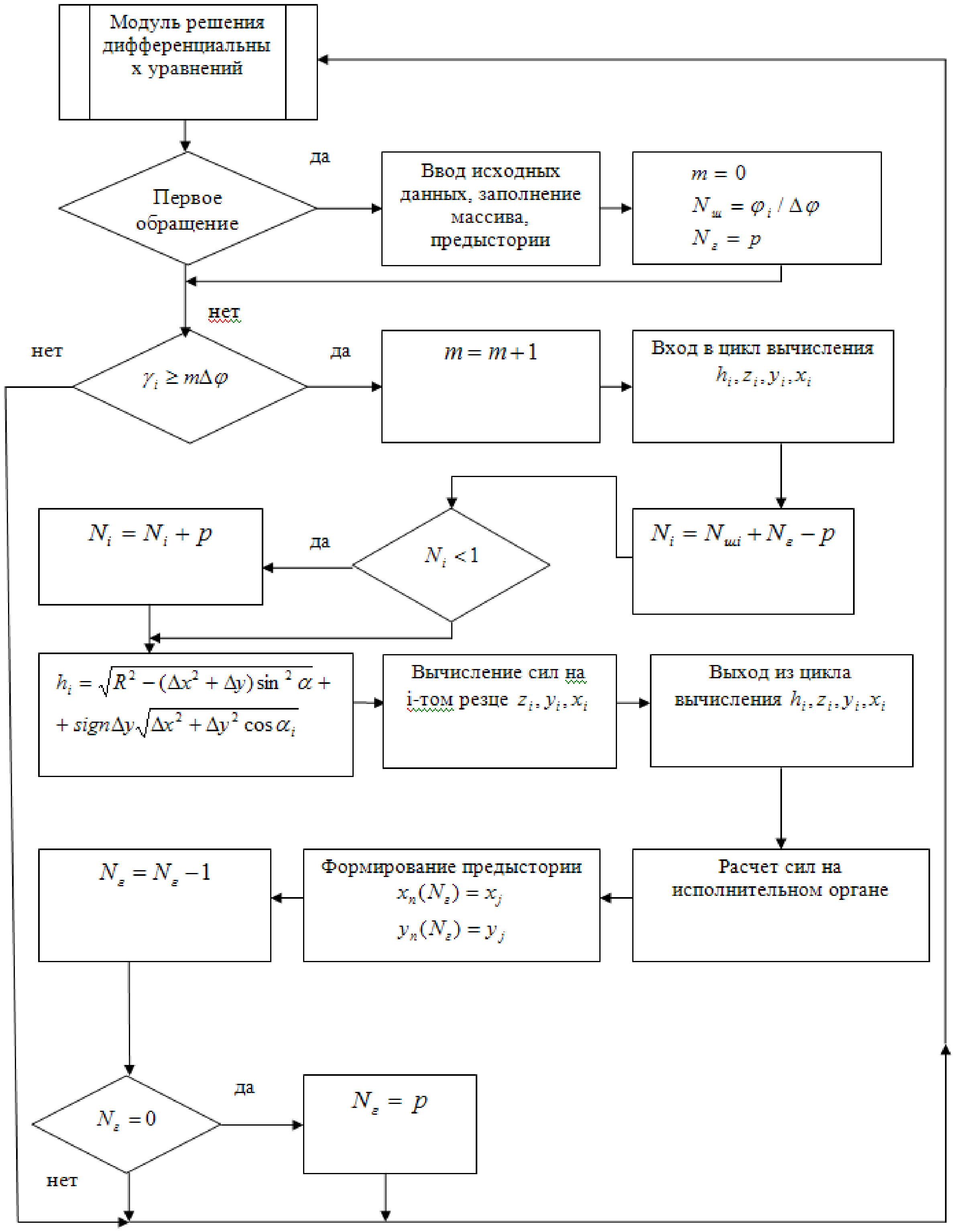

Рисунок 2 - Блок-схема универсального алгоритма расчета нагрузок комбайна

Первому вычислению h_i по формуле (1) предшествует заполнение массива предыстории размерностью $p \bullet 2$ координатами исполнительного органа за прошлый оборот, соответствующее равномерному перемещению и вращению исполнительного органа. Задается индекс $N_г$ границы последней строки массива с предысторией прошлого оборота равным p. Задается нулевое состояние счетчика шагов m. Вычисляется число шагов $N_{шi}$ между *i*-тым резцом и впереди идущим. Для первого и каждого последующего шага вычисления h_i определяется индекс строки с предысторией N_i, вычисляются h_i, по значениям которых находятся значения усилий на резцах и далее на исполнительном органе. Шаг заканчивается занесением текущих координат x_j, y_j в строку массива предыстории с индексом $N_г$ и вычислением $N_г$ для следующего шага.

Оценим погрешность вычисления h_i, получаемую при применении рассматриваемого алгоритмического метода.

Формула (1) точная, но значения Δx и Δy определяются с погрешностью, обусловленной двумя факторами: во-первых, дискретные значения Δx, Δy последующего оборота шнека не соответствуют в общем случае угловому положению резца γ_i, во-вторых, алгоритмически поиск соответствующих углу γ_i значений Δx ,Δy производится с ошибкой. Поэтому оценим устойчивость формулы (1) к погрешностям в определении положения оси шнека в предыдущей траектории резца. Качественный анализ показывает, что квадратный корень уменьшает ошибку, а монотонный рост $arctg\, \Delta x / \Delta y$ от $-\pi/2$ до $\pi/2$ при $\Delta x / \Delta y$ в промежутке $[-\infty;\infty]$ не приводит к существенной ошибке в определении α_i. Следовательно, с учетом четности функций $\sin^2 \alpha$ и $\cos \alpha$, формула (1) устойчива к погрешностям в определении Δx, Δy. Для количественной оценки погрешности определения h_i нужно задать границы изменения, т.е. погрешности Δx, Δy. В связи с этим воспользуемся примером оценки максимальных значений ошибки определения положения оси исполнительного органа в предыдущем обороте шнека. Естественно, что с увеличением шага интегрирования дифференциальных уравнений динамики очистного комбайна ошибка в определении индекса x_{j-n}, y_{j-n} может увеличить погрешность в определении истинных значений указанных переменных. Поэтому выберем максимальный шаг интегрирования 0,01 с, тогда максимальная угловая ошибка составит 11,4^o, а ошибка в определении индекса x_{j-n}, y_{j-n} будет не больше 3. Примем скорость подачи 10см/с, а R=50см и отметим, что с ростом *R* погрешность в определении h_i уменьшается.

Если истинное значение Δx было 10 см, то, предположив пятикратное увеличение скорости оси шнека по сравнению со скоростью подачи в течение 0,03 с, получим ошибочное значение Δx, равное 11,5 см. Ошибка в определении Δy при истинном значении 10 см с учетом амплитуды и частоты вертикальных колебаний оси шнека не превышает 0,4 см.

Расчеты по формуле (1) при различных угловых положениях резца γ_i показывают, что погрешность в определении толщины стружки h_i не превышает 4,9% при допущении погрешности только для Δx 15%. Описанный пример оценки максимальной погрешности в определении h_i полностью согласуется с качественным обоснованием устойчивости формулы (1), а численные значения ошибки в определении h_i при практических расчетах значительно меньше приведенного максимального значения.