

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ДИНАМИЧЕСКИХ РЕАКЦИЙ ОСНОВАНИЯ ДВУХ ТИПОВ ЛЕСОПИЛЬНЫХ РАМ

Гмырак А.С., Вихренко В.С.

Log frames of two types (with a central slider-crank mechanism and translation motion of the saw frame and with a non-central slider-crank mechanism and plane motion of the saw frame) are considered. The analytical expressions for kinematic characteristics are deduced. The dynamic forces on the log frame basements are calculated and compared with each other. Calculations are performed within program package MathCAD.

В настоящее время лесопильные рамы (ЛПР), характеризующиеся высокой производительностью при распиловке бревен, широко используются в большинстве лесоперерабатывающих комплексов как на территории Республики Беларусь, так и за ее пределами. В отличие от других устройств деревообработки ЛПР не претерпели кардинальных изменений за прошедшие десятилетия. В основе большинства из них лежит та или иная модификация кривошипно-ползунного механизма (КПМ). Наибольшее распространение получили ЛПР с центральным КПМ и поступательным движением пильной рамки (рис 1а). Это, в первую очередь, связано с простой конструкции и относительно небольшими затратами на их производство.

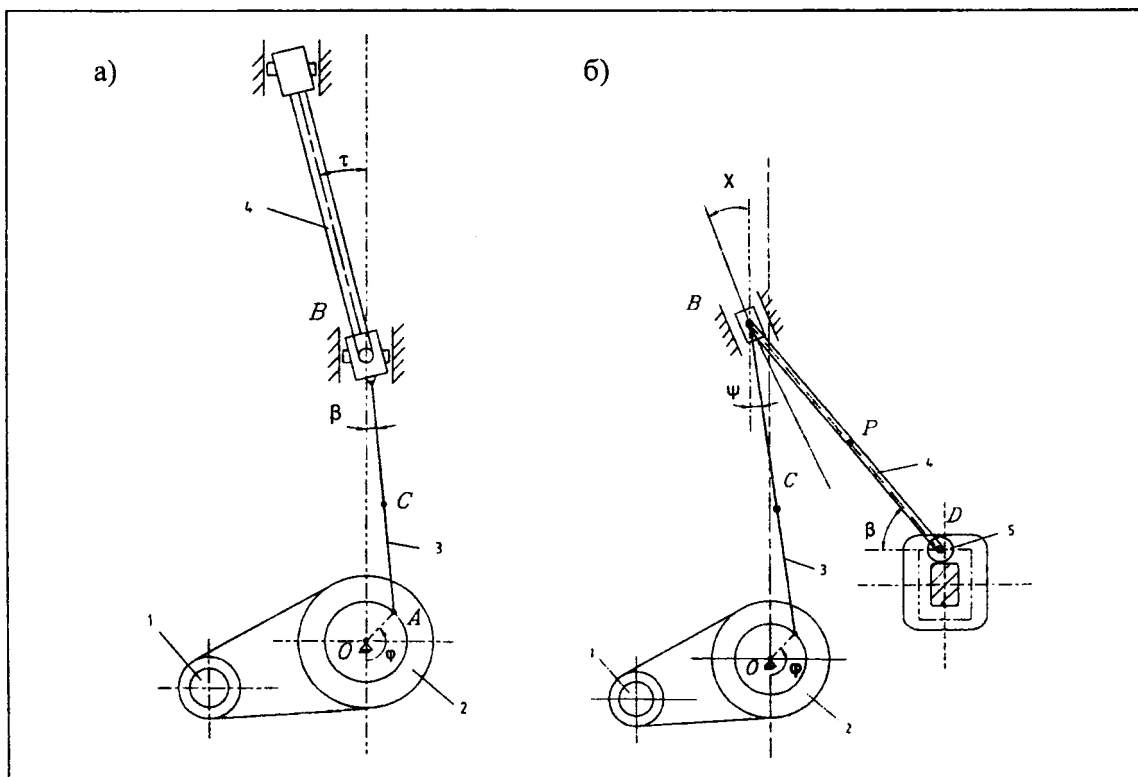


Рис. 1. Кинематические схемы лесопильных рам:

а) с центральным КПМ, б) с нецентральным КПМ,

1 – двигатель, 2 – кривошип, совмещенный с маховиком, 3 – шатун, 4 – пильная рамка, 5 – ролик

Однако существует ряд неблагоприятных эффектов, в частности, большие динамические нагрузки на опорные и соединительные узлы, сильная вибрация, давление бревна на пилы при холостом ходе при непрерывной подаче. Эти эффекты накладывают ряд ограничений на ресурс работы и производительность лесопильных рам. В связи с этим разработаны и внедрены в производство ЛПР с применением нецентральных КПМ [1] (рис. 1, б) и исполь-

зованием прогрессивных материалов (в частности, антифрикционных и легких сплавов). Они характеризуются пониженной вибрацией, меньшими нагрузками на соединительные звенья и меньшими эксплуатационными издержками, но пока не получили массового распространения ввиду их относительно высокой стоимости.

Исследование динамики лесопильных рам позволяет выявить достоинства и недостатки их различных схем, а также моделировать поведение ЛПР при различных нагрузках.

В качестве объектов исследования выбраны два типа лесопильных рам:

1) С центральным КПМ и поступательным движением пильной рамки (рис. 1, а).

2) С нецентральным КПМ и плоскопараллельным движением пильной рамки (рис. 1, б).

Динамика ЛПР с центральным КПМ подробно исследована [2–4]. Поэтому остановимся на детальной разработке программно-математической модели модификации ЛПР 2-го типа, и сопоставим результаты вычисления динамических реакций основания в обоих случаях.

Особенностью ЛПР 2-го типа является то, что в процессе работы пильная рамка 4 изменяет угол наклона к вертикали, что позволяет увеличить подачу на один оборот кривошипа. Точка D движется по прямоугольной траектории с закругленными углами против хода часовой стрелки. Рабочий ход соответствует движению точки D вниз по левой направляющей, в конце рабочего хода точка D выходит на нижнюю горизонтальную прямую, и пильная рамка резко уходит вперед по направлению подачи бревна, обеспечивая возможность непрерывной подачи при отсутствии давления бревна на полотно пилы во время холостого хода пильной рамки. В этом состоит одно из преимуществ конструкции.

На основании принципа Даламбера для ЛПР 1-го типа уравнения динамических реакций (V – вертикальная составляющая, H – горизонтальная составляющая, M_O – реактивный момент, приведенный к оси вращения кривошипа) принимают вид:

$$V(t) = m_2 \ddot{y}_C + m_3 \ddot{y}_B + m_4 \ddot{y}_P, \quad (1)$$

$$H(t) = m_2 \ddot{x}_C + m_4 \ddot{x}_P, \quad (2)$$

$$M_O(t) = m_2 \ddot{x}_C (R \cos \varphi + (l/2) \cos \beta) - m_2 \ddot{y}_C (R/2) \sin \varphi - m_4 \ddot{y}_P (L/2) \sin \tau. \quad (3)$$

где $x_C = (R/2) \sin \varphi$, $y_C = (l/2) \sqrt{1 - (R/l)^2 \sin^2 \varphi} - R \cdot \cos \varphi$,
 $y_B = R \cos \varphi + l \sqrt{1 - (R/l)^2 \sin^2 \varphi}$, $y_P = y_B + (L/2) \cos \tau$.

Здесь m_i – масса i -го звена, R – радиус кривошипа, L – длина пильной рамки, l – длина шатуна, τ – угол наклона пильной рамки к вертикальной оси, φ – угол поворота кривошипа.

Для ЛПР 2-го типа уравнения динамических реакций имеют вид:

$$V(t) = m_2 \ddot{y}_C + m_3 \ddot{s}_b \cos \chi + m_4 \ddot{y}_B + m_5 \ddot{y}_D, \quad (4)$$

$$H(t) = m_2 \ddot{x}_C - m_3 \ddot{s}_b \sin \chi + m_4 \ddot{x}_P + m_5 \ddot{x}_D, \quad (5)$$

$$M_O(t) = M_O(\Phi_B) + M_O(\Phi_{C_x}) + M_O(\Phi_{P_x}) + M_O(\Phi_{D_x}) + M_O(\Phi_{C_y}) + \\ + M_O(\Phi_{P_y}) + M_O(\Phi_{D_y}) - M_C^\Phi + M_P^\Phi \quad (6)$$

где $x_C = R \cos \varphi - l/2 \sin \psi$, $x_P = L/2 \cos \beta - s_B \sin \chi$, (7)

$$y_C = R \sin \varphi + l/2 \cos \psi, \quad y_P = b + s_B \cos \chi - L/2 \sin \beta, \\ y_D = b + s_B \sin \chi - L \cdot \sin \beta. \quad (8)$$

$$M_O(\Phi_{x_C}) = m_2 \ddot{x}_C (R \sin \chi + l/2 \cos \psi), \quad M_O(\Phi_B) = m_3 \ddot{s}_b h,$$

$$M_O(\Phi_{x_P}) = m_4 \ddot{x}_P (b + s_B \cos \chi - L/2 \sin \beta), \quad M_O(\Phi_{x_D}) = m_5 \ddot{x}_D y, \quad M_O(\Phi_{y_D}) = m_5 \ddot{y}_D x,$$

$$M_O(\Phi_{y_C}) = m_2 \ddot{y}_C (R \cos \varphi - l/2 \sin \psi), \quad M_O(\Phi_{y_P}) = m_4 \ddot{y}_P (L/2 \cos \beta - s_B \sin \chi),$$

$$M_P^\Phi = m_4 \cdot L^2 \cdot \ddot{\beta} / 12, \quad M_C^\Phi = -m_2 l^2 \ddot{\psi} / 12 \quad (9)$$

Здесь m_i – масса i -го звена, R – радиус кривошипа, L – длина пильной рамки, l – длина шатуна, β – угол наклона пильной рамки к горизонтальной оси, φ – угол поворота кривошипа (маховика), ψ – угол наклона шатуна к вертикальной оси, s_B – перемещение точки B по направляющей O_1S (рис. 2).

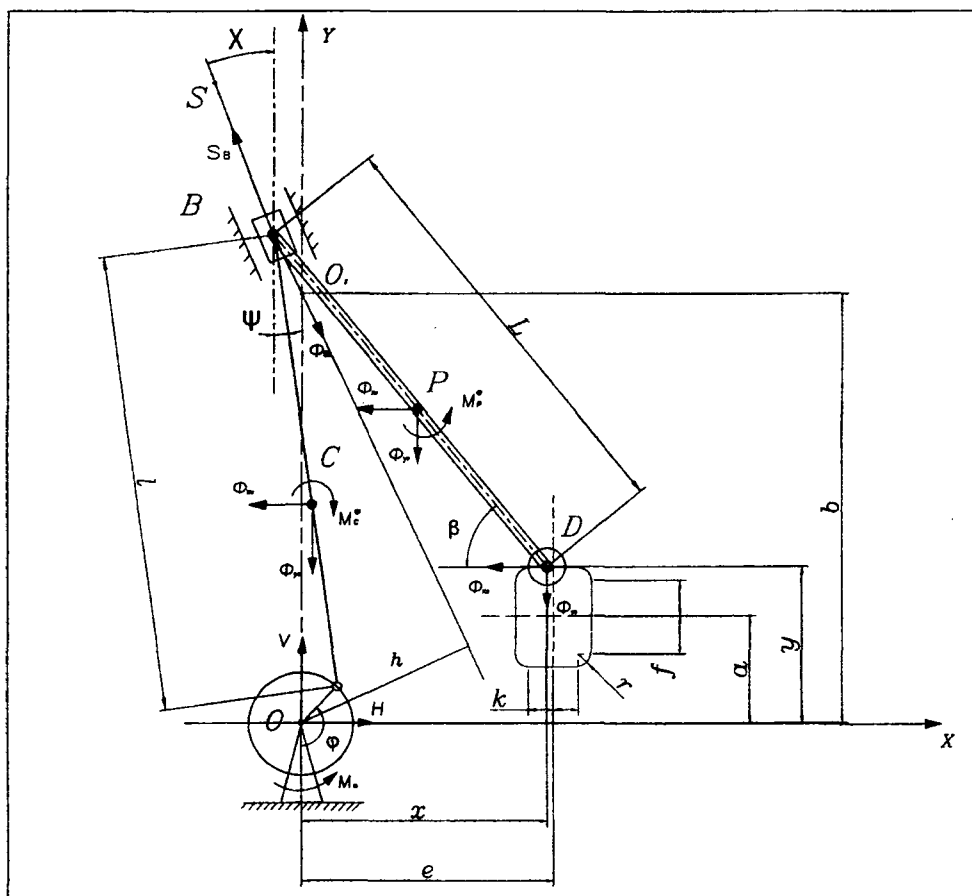


Рис. 2. Схема распределения сил инерции в ЛПР с нецентральной КПМ

Перемещение пильной рамки и колеса шарнирной подвески D непосредственно связано с перемещением s_B точки B , откладываемым от точки O_1 (пересечения направляющей ползуна B с осью Oy) по оси O_1S . s_B находим из системы уравнений

$$\begin{aligned} -R \cos \varphi + l \cos \psi &= b + s_B \cos \chi, \\ R \sin \varphi - l \sin \psi &= s_B \sin \chi, \end{aligned} \quad (10)$$

исключив для этого с помощью тригонометрической единицы угол ψ и решив полученное квадратное уравнение:

$$s_B = \sqrt{(R \cos(\varphi + \chi) + b \cos \chi)^2 - R^2 - 2bR \sin \varphi - b^2 + l^2} - R \cos(\varphi + \chi) - b \cos(\chi). \quad (11)$$

Из условия компоновки механизма перед радикалом выбран положительный знак. Из второго уравнения системы (10) находим функции угла ψ :

$$\sin \psi = (R \sin \varphi - s_B \sin \chi) / l, \quad \cos \psi = \sqrt{1 - \sin^2 \psi} = \sqrt{1 - (R \sin \varphi - s_B \sin \chi)^2 / l^2}.$$

Для нахождения положения точки D и угла β как функций угла φ запишем

$$b + s_B \cos \chi - L \sin \beta = y, \quad L \cdot \cos \beta - s_B \sin \chi = x, \quad (12)$$

где x и y – координаты точки D (рис 3).

Точка D движется по сложной траектории, состоящей из 8 последовательно соединенных участков. Зависимость положения точки D и угла β от перемещения s_B получим, решая систему уравнений (12) для каждого участка в отдельности. Отметим, что для участков 1 и 5 заданы x -координаты токи D , 3 и 7 – y -координаты, а участки 2, 4, 6 и 8 заданы уравнениями

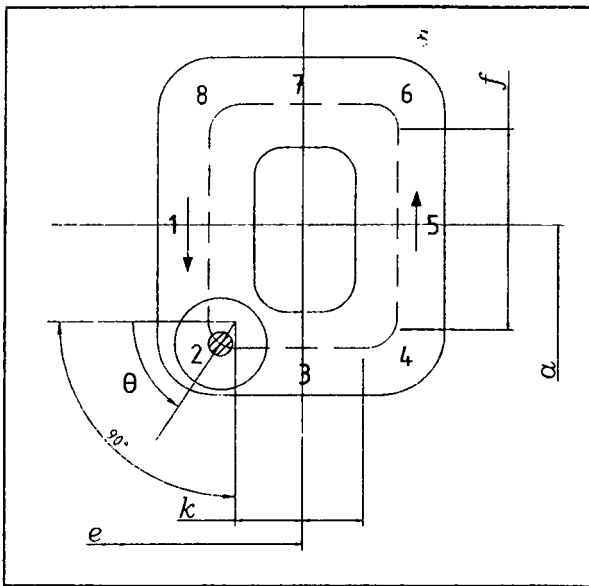


Рис. 3. Разбиение траектории движения точки D на участки

соответствующих дуг окружности радиуса r .

Рассмотрим в качестве примера вычисление на первых двух участках:

Участок 1

Для x_1 -координаты точки D (нижний индекс обозначает номер участка) справедливо соотношение (r – радиус скругления траектории точки D)

$$x_1 = e - k - r.$$

Второе уравнение системы (12) перепишем в виде

$$\cos \beta_1 = (x_1 - s_B \sin \chi) / L,$$

$$\sin \beta_1 = \sqrt{1 - \cos^2 \beta_1}.$$

Тогда из первого уравнения системы (12)

$$y_1 = s_B \cos \chi + b - L \sin \beta_1. \quad (13)$$

Участок 2

Координаты точки D выражаются через угол θ_2 , который откладывается против хода часовой стрелки (рис 3):

$$x_2 = e - k - r \cos \theta_2, \quad y_2 = a - f - r \sin \theta_2.$$

Значения тригонометрических функций угла β найдем из системы уравнений (12):

$$\cos \beta_2 = (x_2 - s_B \sin \chi) / L, \quad \sin \beta_2 = (b + s_B \cos \chi - y_2) / L.$$

Закон изменения угла θ_2 получим из системы уравнений (12), исключив из нее угол β с помощью тригонометрической единицы. Результат представим в виде

$$A_3 = A_1 \cdot \sin \theta_2 - A_2 \cdot \cos \theta_2, \quad (14)$$

где $A_1 = b + s_B \cos \chi - a + f$, $A_2 = s_B \sin \chi + e - k$, $A_3 = (L^2 - A_1^2 - A_2^2 - r^2) / 2r$.

Переходя в уравнении (14) к амплитудно-фазовому представлению, запишем окончательно его решение

$$\theta_2 = \arccos \left(A_1 / \sqrt{A_1^2 + A_2^2} \right) + \arcsin \left(A_3 / \sqrt{A_1^2 + A_2^2} \right). \quad (15)$$

Вывод формул на участках 3, 5, 7 и 4, 6, 8 аналогичен выводу на участках 1 и 2.

Полученные результаты представляются в виде функциональных массивов

$$x = x_1, \dots, x_8; \quad y = y_1, \dots, y_8; \quad \sin \beta = \sin \beta_1, \dots, \sin \beta_8; \quad \cos \beta = \cos \beta_1, \dots, \cos \beta_8, \quad (16)$$

которые интегрируются в вычислительный пакет MathCAD [5] и выполняется их программно-аналитическая обработка. Подстановка полученных результатов в выражения (4) – (9) позволяет найти искомые реакции.

Результаты вычисления реакций как функций времени за один оборот кривошипа представлены на рис. 4 и 5. Полный оборот кривошипа осуществляется за время $t = 2\pi / \omega = 0.291$ с. Угловая скорость кривошипа $\omega = 21.4$ рад/с принята постоянной. Все величины на рисунках даны в единицах системы СИ. Геометрические характеристики и массы звеньев ЛПР двух типов приняты равными:

- 1) $R = 0.4 \text{ м}, l = 1.2 \text{ м}, L = 1.48 \text{ м}, \tau = 11, m_1 = 1250 \text{ кг}, m_2 = 20 \text{ кг}, m_3 = 2.5 \text{ кг}, m_4 = 332 \text{ кг} .$
 2) $R = 0.2 \text{ м}, l = 1.8 \text{ м}, L = 1.48 \text{ м}, \gamma = 11, b = 1.6 \text{ м}, k = 0.02 \text{ м}, f = 0.1238 \text{ м}, e = 0.3 \text{ м},$
 $a = 0.3562 \text{ м}, m_1 = 650 \text{ кг}, m_2 = 20 \text{ кг}, m_3 = 2.5 \text{ кг}, m_4 = 224 \text{ кг}, m_5 = 8 \text{ кг} .$

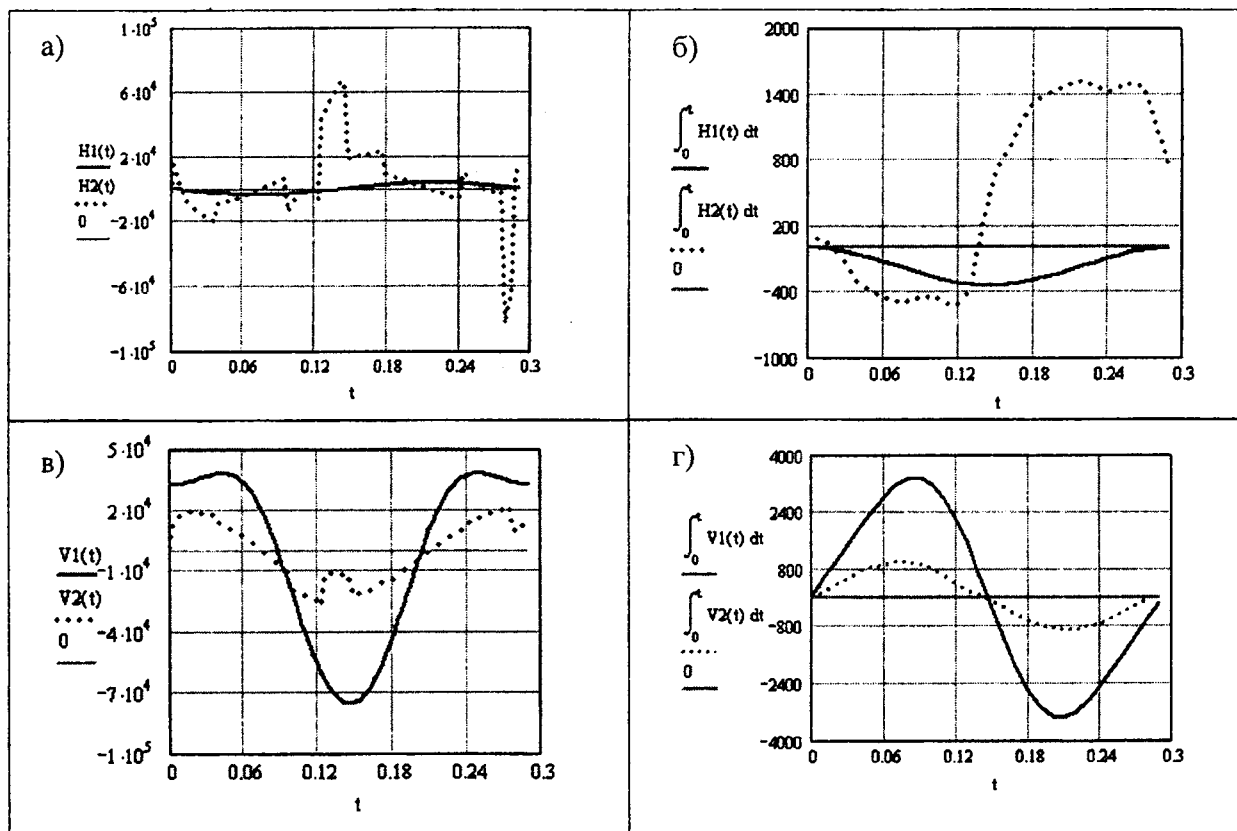


Рис. 4. Графики зависимости реакций и их импульсов от времени.

$H1, H2$ и $V1, V2$ – горизонтальная и вертикальная реакции ЛПР 1-го и 2-го типа, соответственно

Таким образом, можно отметить, что лесопильная рама с центральным кривошипно-ползунным механизмом (1-й тип) воздействует на основание с силами, изменяющимися по закону, близкому к синусоидальному как в вертикальном, так и в горизонтальном направлениях, причем горизонтальная составляющая существенно меньше вертикальной. Момент сил инерции также не велик. С другой стороны, вертикальная составляющая воздействия на основание лесопильной рамы с нецентральным кривошипно-ползунным механизмом и плоско-параллельным движением пильной рамки (2-й тип) в два – три раза меньше, чем в случае рамы 1-го типа, но максимальные значения горизонтальной составляющей реакции основания сравнимы с таковыми вертикальной реакции для рамы 1-го типа. По суммарной реакции $R = \sqrt{H^2 + V^2}$ ЛПР второго типа оказывается существенно меньше нагруженной (рис. 5а), но этот выигрыш обусловлен в основном меньшим весом ее пильной рамки и укороченным кривошипом, а не кинематическими особенностями.

Следует иметь в виду, что воздействие на основание определяется не столько силой, сколько ее импульсом. Поскольку большие значения реакций лесопильной рамы 2-го типа достигаются лишь на малых промежутках времени, можно утверждать, что ее воздействие на основание во время работы будет заметно ниже, чем рамы первого типа, что и демонстрируется рис. 4, б и г. На рис. 5, б показана зависимость от времени импульса E , равного корню квадратному из суммы квадратов импульсов горизонтальной и вертикальной реакций.

В рассматриваемой плоской постановке задачи реакции основания могут быть приведены к равнодействующей. На рис. 5, г показана зависимость от времени расстояния h от линии действия равнодействующей реакции основания до оси вращения кривошипа.

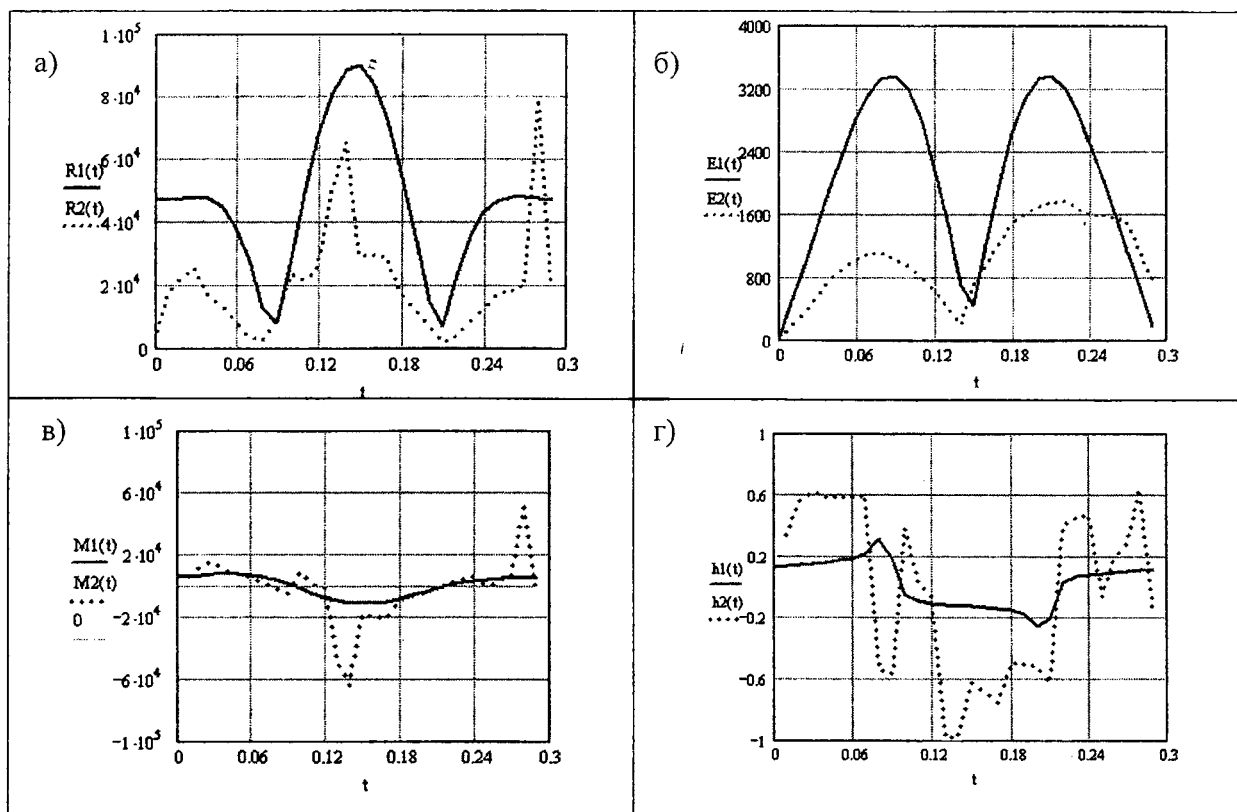


Рис. 5. Графики зависимостей суммарных реакций (R), суммарного импульса (E), реактивного момента (M) и смещения (h) равнодействующей реакции от времени.

Несмотря на несомненные достоинства ЛПР 2-го типа, следует все же отметить, что большие максимальные значения горизонтальной составляющей реакции основания говорят о недостаточном совершенстве ее конструкции и необходимости модернизации. В частности, необходима замена направляющей в виде прямоугольника со скругленными углами на плавно изменяющуюся (например, эллипсоидальную) направляющую.

Разработанные математические модели лесопильных рам и возможность использования профессионального пакета MathCAD обеспечивают возможность исследования различных режимов работы этих механизмов, что может существенно сократить финансовые, материальные и временные затраты при проектировании их модернизированных вариантов.

ЛИТЕРАТУРА

1. <http://www.wood.ru>; <http://www.nszavod.ru>.
2. Агапов, А.И. Динамика процесса пиления древесины на лесопильных рамах. – Горький: ГГУ, 1999.
3. Матвейко, А.П., Федоренчик, А.С. Технология и машины лесосечных работ. – Минск: БГТУ, 2002.
4. Амалицкий, В.В. Деревообрабатывающие станки и инструменты. – М.: Академия, 2007.
5. Дьяконов, В.М. Специальный справочник по MathCAD. – СПб.: Петербург, 2006.