УДК 621.3

Ю.А.ГАВРИЛОВ
Аспирант кафедры электротехники и электромеханики

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ И ИМИТАЦИОННАЯ МОДЕЛИ ИНЕРЦИОННОЙ РЕЗОНАНСНОЙ ЩЕКОВОЙ ДРОБИЛКИ С ЭЛЕКТРОПРИВОДОМ ВОЗВРАТНО-ВРАЩАТЕЛЬНОГО ДВИЖЕНИЯ

Разработаны математическая и имитационная модели инерционной резонансной щековой дробилки (ИРЩД) с электроприводом возвратно-вращательного движения. Исследованы режимы работы электромеханической системы на резонансной (собственной) частоте системы при различных представлениях нагрузки (вязкое, эквивалентное вязкое, сухое трение и их комбинации) при симметричных и несимметричных циклах нагружения, как в разомкнутой, так и в замкнутой системе управления.

Mathematical and imitating models of an inertial resonant crusher with the electric drive of returnable, rotary movement are developed. Operating modes of electromechanical system on resonant (own) frequency of system are investigated (researched) at various representations of loading (viscous, equivalent viscous, dry friction and their combinations) at symmetric and asymmetrical cycles of loading, both in opened, and in the closed control system.

Дробление и измельчение различных материалов и полезных ископаемых поглощают значительную часть вырабатываемой в стране электроэнергии [1, 2]. Измельченные материалы используются в дорожном строительстве, строительной и горной промышленности. Все, что связано с созданием высокопроизводительных и малоэнергоемких дробильных машин, относится к проблеме государственной значимости. Актуальными являются практически все научные и технические решения в этом направлении.

Известно, что существующие вибрационные щековые дробилки неспособны работать на резонансной частоте из-за проявления эффекта Зоммерфельда, характеризующегося неконтролируемым увеличением амплитуды колебаний и обуславливающего в большинстве случаев необходимость перехода в зарезонансную зону. Это влечет за собой завышение установленной мощности электродвигателей (рис.1).

Для повышения эффективности работы вибрационных щековых дробилок необходимо:

- обеспечить рабочий режим щековой дробилки на резонансной частоте, так как минимум затрат энергии соответствует этому режиму [4];
- повысить надежность синхронизации движения щек дробилки путем синхронизации электромагнитных моментов инерционных вибровозбудителей.

Предлагаемая инерционная резонансная щековая дробилка (ИРЩД) с электроприводом возвратно-вращательного дви-

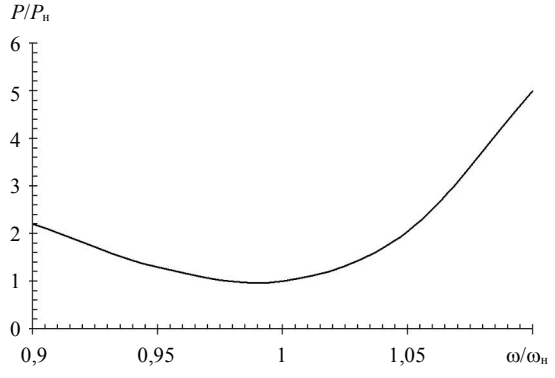


Рис.1. Диаграмма относительной мощности двигателя, необходимой для создания колебаний с заданными параметрами в зависимости от зоны работы

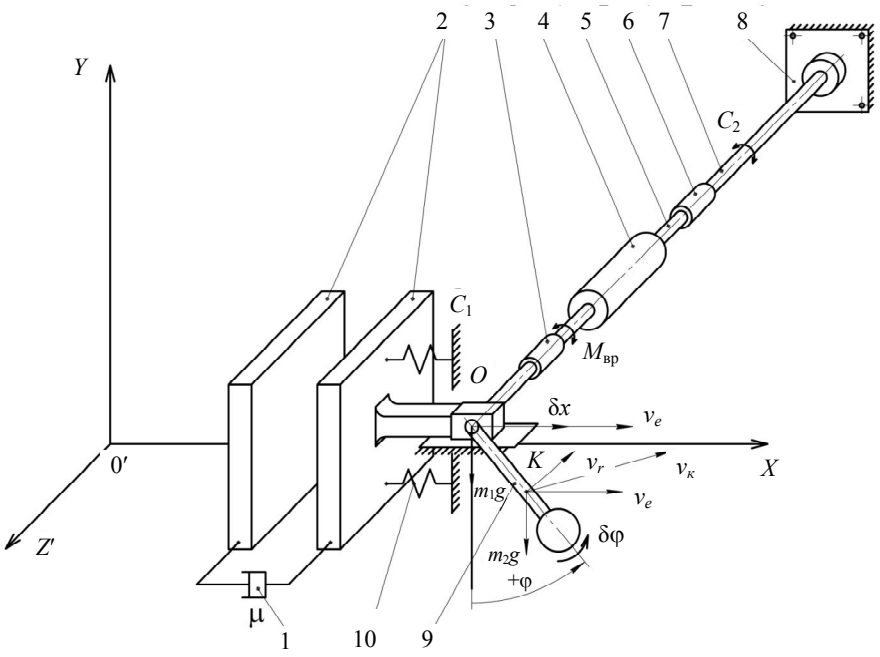


Рис.2. Конструктивно-расчетная схема колебательной системы ИРЩД

1 – нагрузка, представленная коэффициентом сопротивления μ; 2 – щеки дробилки с ползунами; 3 – соединительный элемент (лепестковая муфта); 4 – ротор; 5 – вал ротора двигателя; 6 – соединительный элемент (муфта); 7 – торсион; 8 – опора (корпус); 9 – дебаланс; 10 – пружина

жения (рис.2) способна работать на резонансной (собственной) частоте. Дебалансы 9 соединены с валами роторов двигателей 4 с помощью лепестковых муфт 3, а другие концы валов 5 роторов двигателя с помощью муфт 6 соединены с торсионами 7, закрепленными в корпусе дробилки 8. Конструкция имеет две степени свободы с равными резонансными частотами по координатам возвратно-поступательного движения x и возвратно-вращательного движения φ. Максимальные амплитуды колебаний определяются конструкцией приводного двигателя (в рассматриваемом случае амплитуда колебаний равна 45 град.). В силу симметрии для расчета дробилки достаточно рассмотреть только одну половину выбранной конструктивной схемы.

Уравнения движения системы получены с помощью уравнений Лагранжа второго рода [3] для ИРЩД, представленной схемой на рис.2, и имеют вид (в качестве обобщенных координат выбраны $q_1 = x$ и $q_2 = \varphi$):

$$\left.\begin{aligned} \frac{d}{dt}\left(\frac{\partial T}{\partial x'}\right) - \frac{\partial T}{\partial x} = Q_{\delta} \\ \frac{d}{dt}\left(\frac{\partial T}{\partial \varphi'}\right) - \frac{\partial T}{\partial \varphi} = Q_{\varphi} \end{aligned}\right\}, \qquad (1)$$

где T – кинетическая энергия системы при ее движении относительно инерциальной системы отсчета; Q_{δ} и Q_{φ} – обобщенные силы, отнесенные к соответствующей обобщенной координате q_1 и q_2.

Полная кинетическая энергия системы

$$T = \frac{1}{2} J_{\text{рот}} (\varphi')^2 + \frac{m_1 + m_2}{2} (x')^2 + $$

$$+ m_2 a x' \varphi' \cos\varphi + \frac{1}{2} J_Z (\varphi')^2, \qquad (2)$$

где $J_{\text{рот}}$ и J_Z – момент инерции ротора и дебаланса, соответственно; m_1 и m_2 – масса щеки и дебаланса, соответственно; a – расстояние до центра тяжести дебаланса.

Обобщенные силы для ИРЩД

$$Q_{\tilde{o}} = -\tilde{N}_1 x - \mu x', \qquad (3)$$

$$Q_{\varphi} = M_{\text{вр}} - m_2 a g \sin\varphi - C_2\varphi, \qquad (4)$$

где C_1 и C_2 – коэффициент жесткости; g – ускорение свободного падения; $M_{\text{вр}}$ – вращающий момент.

После подстановки выражений (2)-(4) в (1), дифференциальные уравнения движения ИРЩД примут вид

$$\left.\begin{array}{l} (m_1 + m_2)x'' + m_2 a\varphi'' \cos\varphi - \\ - m_2 a(\varphi')^2 \sin\varphi = -C_1 x - \mu x'; \\ m_2 a x'' \cos\varphi + (J_Z + J_{\text{ðîò}})\varphi'' = \\ = \grave{I}_{\text{âð}} - m_2 a g \sin\varphi - C_2\varphi \end{array}\right\}. \qquad (5)$$

При моделировании приняты параметры дробилки: резонансная частота $f = 50$ Гц; амплитуда колебаний дебаланса $\varphi_{max} = 40\text{-}45$ град; амплитуда колебаний щеки $x_{max} = 4\text{-}5$ мм; масса щеки $m_1 = 50$ кг; масса дебаланса $m_2 = 4{,}12$ кг; расстояние до центра тяжести дебаланса $L_{OK} = a = 0{,}03$ м.

Имитационная модель построена с использованием уравнений (5) и содержит следующие блоки: ограничения по углу колебаний дебаланса; формирования момента; задания нагрузок; формирования перемещения щеки дробилки; вычисления работ за период для сил возмущения и сопротивления; формирования угла поворота дебаланса; задания системы управления.

Имитационная модель позволяет:

- вводить все кинематические, динамические и конструктивные параметры расчетной модели;
- при заданной резонансной частоте и введенных параметрах ($m_{\text{щеки}}$; $m_{\text{деб}}$; $r_{\text{деб}}$ и т.д.) вычислять коэффициент жесткости упругих элементов на резонансной частоте, момент инерции дебаланса, а также оперировать ими в структуре модели ИРЩД;
- исследовать режимы работы ИРЩД с разомкнутой и замкнутой системами управления;
- представлять нагрузку в виде сухого трения; вязкого трения; эквивалентного вязкого трения и их комбинаций при симметричных и несимметричных циклах нагружения;
- имитировать изменение динамических параметров в процессе работы модели;
- вычислять работы за период, производимой возмущающей силой и силами диссипативной нагрузки;
- имитировать интервалы работы в генераторных режимах при превышении амплитудой колебаний теоретически допустимых значений;
- визуально представлять результаты моделирования.

Модель позволяет представлять и исследовать структурные схемы (рис.3) ИРЩД с электроприводом в виде: разомкнутой системы с прямым каналом управления, если $K1$ – разомкнут, а $K2$ – замкнут; замкнутой системы управления, если $K1$ – замкнут, а $K2$ – разомкнут.

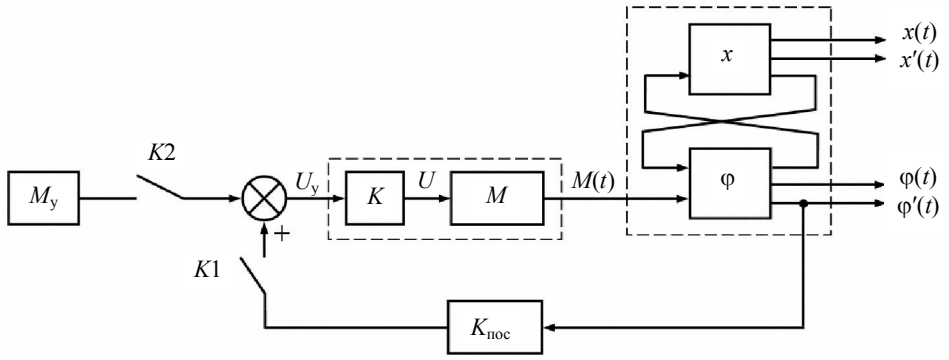


Рис.3. Структурная схема ИРЩД с электроприводом возвратно-вращательного движения

Uy – напряжение управляющего сигнала; *K*1 и *K*2 – ключи; *K* – коэффициент усиления; *M* – электромеханический преобразователь; φ – формирователь угла дебаланса φ(*t*); *x* – формирователь перемещения щеки *x*(*t*); $K_{\text{пос}}$ – коэффициент положительной обратной связи

Исследованы резонансные режимы работы ИРЩД с маятниковым вибровозбудителем и электроприводом возвратно-вращательного движения при разомкнутой и замкнутой системах управления электроприводом и представлении нагрузки вязким, эквивалентным вязким, сухим трением и их комбинациями (рис.4, 5).

Выполненные исследования позволяют сделать следующие основные выводы:

1. Рассмотренная конструкция ИРЩД с электроприводом обеспечивает устойчивую работу на резонансной (собственной) частоте системы даже при существенно нелинейной нагрузке (рис.5), а также при различных представлениях нагрузки (вязкое, эквивалентное вязкое, сухое трение и их комбинации) при симметричных и несимметричных циклах нагружения.

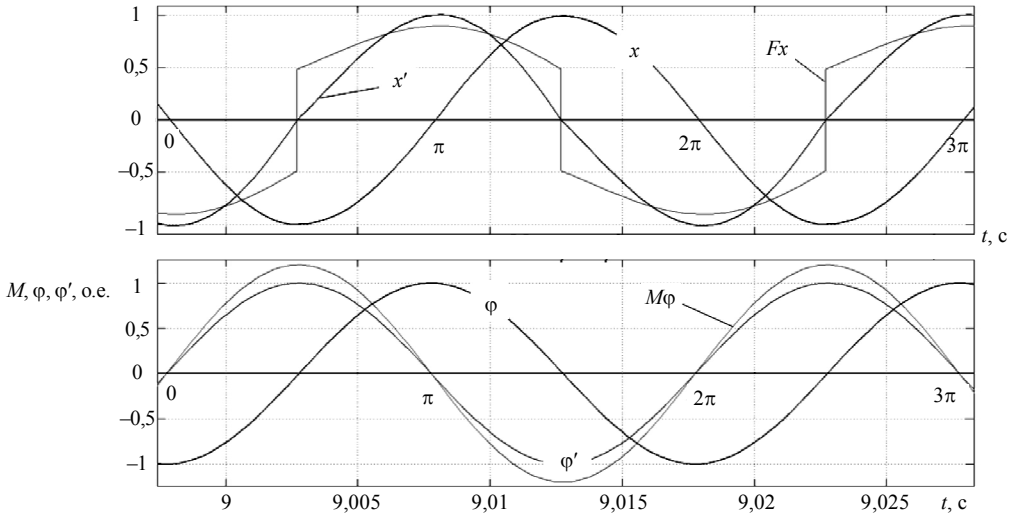


Рис.4. Режим работы (симметричное нагружение) ИРЩД на резонансной частоте с нагрузкой, вызванной силой вязкого и сухого трения $\mu_{вяз}\ x'$ и $F_{сух.тр}$

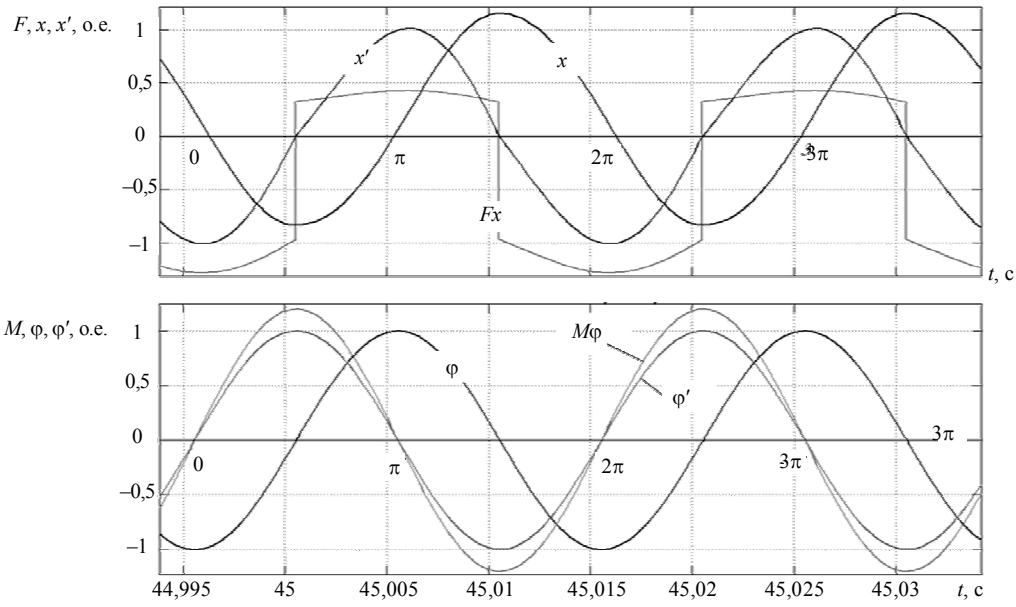


Рис.5. Режим работы ИРЩД (несимметричное нагружение) на резонансной частоте при представлении нагрузки комбинацией вязкого и сухого трения

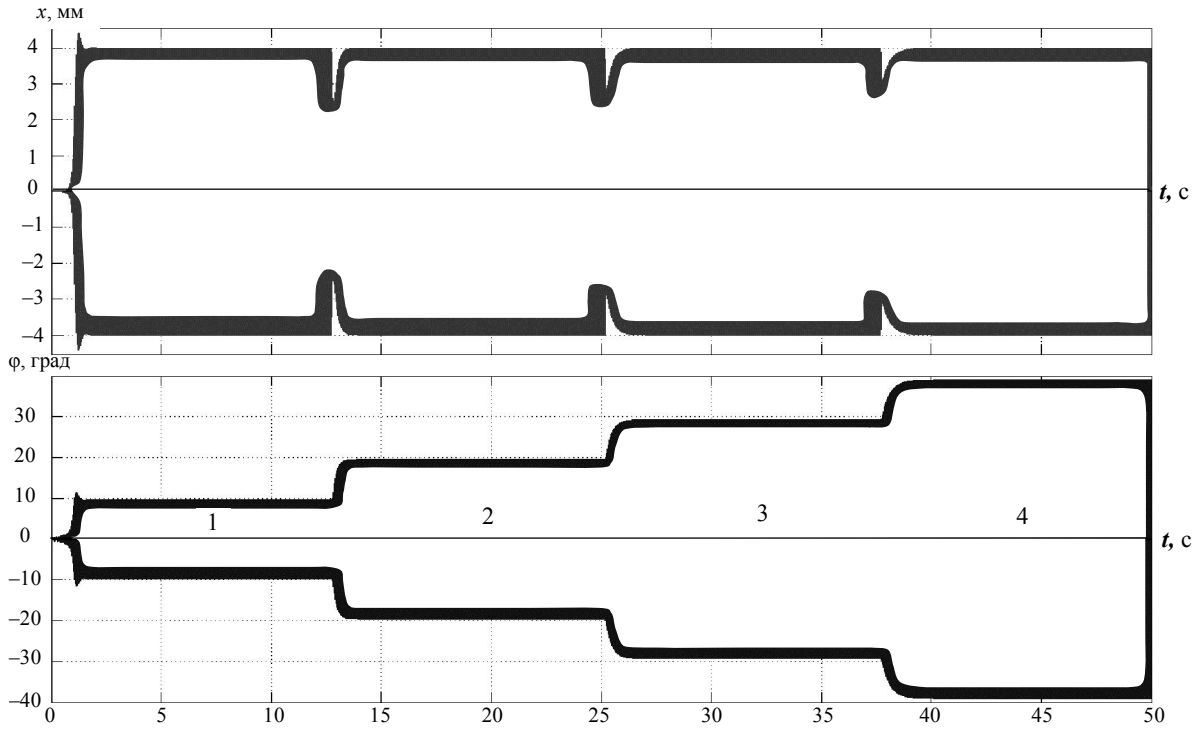


Рис.6. Режим работы ИРЩД на резонансной частоте f = 50 Гц при различных значениях симметричной нагрузки

1 – 25 % $\mu_{вяз.ном}$; 2 – 50 % $\mu_{вяз.ном}$; 3 – 75 % $\mu_{вяз.ном}$; 4 – 100 % $\mu_{вяз.ном}$; $\mu_{вяз.ном}$ = 6965,8 (Н·с)/м

2. При изменении (увеличении / уменьшении) массы щеки дробилки в два раза амплитуды колебаний щеки и дебаланса сохраняются.

3. Для питания электропривода дробилки требуется однофазный преобразователь переменного прямоугольного либо синусоидального тока.

4. При замыкании положительной обратной связью (ПОС) по угловой координате φ' обеспечивается устойчивая работа во всех режимах работы электромеханической системы на собственной частоте при снятом входном управляющем воздействии.

5. Выявлено свойство, имеющее практическую значимость, заключающуюся в том, что при изменении нагрузки от холостого хода до номинальной (рис.6) система обеспечивает практически неизменную амплитуду (размах) колебаний щеки, а амплитуду колебаний дебаланса – пропорциональную нагрузке.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Вайсберг Л.А.* Вибрационные дробилки. Основы расчета, проектирования и технологического применения / Л.А.Вайсберг, Л.П.Зарогатский, В.Я.Туркин; ВСЕГЕИ. СПб, 2004. 306 с.

2. *Ревнивцев В.И.* Вибрационная дезинтеграция твердых материалов / В.И.Ревнивцев, Г.А.Денисов, Л.П.Загоратский, В.Я.Туркин. М.: Недра, 1992. 430 с.

3. *Тимошенко С.П.* Колебания в инженерном деле. М.: Наука, 1967. 444 с.

4. *Шестаков В.М.* Динамика автоматизированных электромеханических систем вибрационных установок / В.М.Шестаков, А.Е.Епишкин. СПб.: Изд-во политехн. ун-та, 2005. 94 с.

Научный руководитель д-р т. н. проф. *Э.А.Загривный*