

УДК 621.313, 62-837

А.С. Семёнов¹, Я.С. Харитонов², А.Н. Егоров²**РАЗРАБОТКА МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПРИВОДА С СИСТЕМОЙ УПРАВЛЕНИЯ СТАБИЛИЗАЦИИ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ ПИТАТЕЛЯ**

Северо-Восточный федеральный университет им. М.К. Аммосова, Политехнический институт (филиал), г. Мирный, Республика Саха (Якутия)¹,
АК «АЛРОСА» (ПАО), СТ «Алмазавтоматика», г. Мирный, Республика Саха (Якутия)²

Посвящена исследованию вибрационного перемещения слоя сыпучего материала в вибрационных питателях и разработке математической модели их электромагнитного привода путем математического моделирования. Представлена актуальность проделанного исследования, заключающаяся в малоизученности данного вопроса и распространенности поточно-транспортных систем для перемещения сыпучего материала на обогащательных фабриках по переработке и обогащению алмазосодержащего сырья. Проведены теоретические исследования перемещения слоя сыпучего материала при различных частотах и амплитудах вибрации. Разработана математическая модель, описывающая перемещение сыпучего материала по лотку питателя при вибрационном воздействии, произведено сопоставление с экспериментальными и расчетными данными. Разработана математическая модель электромагнитного привода с системой управления, стабилизирующей производительность питателя, которая позволяет получить оптимальную частоту собственной вибрации питателя при известной резонансной частоте.

Ключевые слова: поточно-транспортная система, вибрационный питатель, электромеханическая система, электромагнитный привод, система управления, математическое моделирование, MatLab, резонансная частота, тяговое усилие, электромагнитный момент.

Введение

Повышение эффективности использования энергетических ресурсов является одним из факторов, способствующим стабильности и устойчивому развитию экономики во всех отраслях промышленности. Одной из наиболее энергоемких сфер промышленности является горнодобывающее производство. Увеличение электропотребления горной промышленностью определяется не только ростом производства, но и качественными изменениями технологии, усложнением условий добычи и переработки руды, внедрением природоохранных мероприятий и пр. [1].

Обзор последних теоретических и экспериментальных исследований по вибрационному перемещению слоя сыпучего материала в вибрационных питателях позволил сделать вывод, что технологический процесс перемещения мелкозернистого материала в поточно-транспортных системах под воздействием вибраций в радиометрических, рентгенометрических и рентгенолюминесцентных сепараторах требует дальнейшего изучения – новых исследований для совершенствования конструкций вибрационных питателей и их электроприводов [2].

Вибрационные питатели занимают не последнее место в технологических процессах горных предприятий, поскольку, в отличие от других видов питателей, позволяют создать относительно устойчивый, равномерный поток материала, а также имеют возможность запуска с завалом подающего бункера. При комбинировании технологии вибрационных перемещений материала и применения различных колосниковых решеток и сит можно достичь сепарации сыпучего материала по размерам кусков или фракций. Современная номенклатура вибрационных питателей включает в себя широкий диапазон производительностей от десятых долей до нескольких сотен кубических метров материала в час, а крупность загружаемого материала может достигать 750 мм.

Обогащение алмазосодержащего сырья – сложный технологический процесс, зависящий от количественного содержания полезного компонента в руде, требующий большего числа подготовительных и основных операций для получения конечной продукции, при обеспечении в процессе обогащения крупности и качества алмаза без нарушений. Рентгенолюминесцентная сепарация, используемая на обогатительных фабриках АК «АЛРОСА» (ПАО), обеспечивает извлечение алмазов по всем переделам не менее 85-95% по массе и более 99,5% по стоимости [3].

Качественное исполнение и настройка режимов работы поточно-транспортной системы, обеспечивающей подачу материала в рентгенолюминесцентных сепараторах, может обеспечить повышение извлечения алмазов и снизить энергоёмкость производства путем уменьшения расхода электроэнергии [4].

Постановка задачи. В задачу исследования поточно-транспортной системы, состоящей из вибрационных питателей, входили следующие этапы:

- теоретические исследования перемещения слоя сыпучего материала при различных частотах и амплитудах вибрации, обоснование режимов работы, параметры вибрационного питателя и его привода;
- разработка математической модели, описывающей перемещение сыпучего материала по лотку питателя при вибрационном воздействии, и её апробация при сопоставлении с экспериментальными данными;
- разработка математической модели электромагнитного привода с системой управления, стабилизирующей производительность питателя.

Теоретические решения. Одной из важнейших проблем, возникающих при работе различных вибрационных установок, является проблема прохождения через резонансные частоты [5]. Традиционный способ решения этой проблемы состоит в подаче на вход системы достаточно больших по величине постоянных управляющих сигналов, формируемых независимо от текущих значений вектора состояния (система управления разомкнутого типа) [6]. Типичным преобразователем, обеспечивающим необходимые условия в системе управления питателя, является преобразователь в виде электромагнитного привода (ЭМП) [7]. В этих системах при отсутствии внешней силы дифференциальные уравнения будут иметь следующий вид:

$$\begin{cases} m \cdot h'' + r \cdot h' + c \cdot h - \frac{1}{2} \cdot \frac{dL}{dh} \cdot i^2 = 0 \\ \frac{dL}{dh} \cdot h' \cdot i + L \cdot \frac{di}{dt} + R \cdot i = U \end{cases} \quad (1)$$

ЭМП представляет собой электромагнит с подвижным якорем. При подаче напряжения U на обмотку электромагнита, имеющую индуктивность L и активное сопротивление R создается электромагнитное тяговое усилие $F_T = \frac{1}{2} \cdot \frac{dL}{dh} \cdot i^2$, которое притягивает якорь, изменяя его положение относительно сердечника, при этом происходит переключение контактов [8]. Из анализа дифференциальных уравнений (1) имеем: $m \cdot h''$ – сила инерции, $r \cdot h'$ – сила вязкого сопротивления, которой в ЭМП можно пренебречь, $c \cdot h$ – сила сопротивления возвратной пружины, имеющей жесткость C , $\frac{1}{2} \cdot \frac{dL}{dh} \cdot i^2$ – тяговое усилие, $\frac{dL}{dh} \cdot h' \cdot i$ – электродвижущая сила (ЭДС), вызванная изменением индуктивности при перемещении якоря, $L \cdot \frac{di}{dt}$ – ЭДС, вызванная изменением тока, $R \cdot i$ – падение напряжения на активном сопротивлении обмотки ЭМП. Тяговое усилие ЭМП определяется изменением индуктивности L при перемещении якоря. При конструкции ЭМП клапанного типа и малом перемещении якоря можно считать, что:

$$L = \mu \cdot \frac{S_c}{\delta_H - h} \cdot \omega^2. \quad (2)$$

Тогда $\frac{dL}{dh} = \frac{\mu \cdot S_C \cdot \omega^2}{(\delta_H - h)^2}$, откуда

$$F_T = \frac{1}{2} \cdot \frac{\mu \cdot S_C \cdot \omega^2}{(\delta_H - h)^2} \cdot i^2 = \frac{1}{2} \cdot \frac{\mu \cdot S_C \cdot \omega^2}{\delta^2} \cdot i^2, \quad (3)$$

где $\delta = \delta_H - h$.

При включении ЭМП на постоянное напряжение, как это обычно бывает, процесс описывается нелинейными дифференциальными уравнениями:

$$\begin{cases} m \cdot \delta'' + r \cdot \delta' + c \cdot \delta - \frac{k}{\delta^2} \cdot i^2 = 0 \\ \frac{k \cdot \delta'}{\delta^2} + L \cdot \frac{di}{dt} + R \cdot i = U \end{cases}, \quad (4)$$

где $k = \frac{\mu \cdot S_C \cdot \omega^2}{2}$.

Однако использование управления с обратной связью позволяет пройти через резонансные частоты на этапе запуска вибровозбудителя при снижении уровня входных сигналов, что делает возможным использование исполнительного двигателя меньшей мощности. Если добавить к данной системе модель выпрямителя с автономным инвертором и управлением по амплитуде вибраций, то получим модель электромеханической системы с системой управления стабилизирующей производительность питателя.

Методика исследования. Управление моделью стенда осуществляется с помощью компьютерной реализации модели. Компьютерная модель реализована благодаря пакету программ MatLab. Пакет программ MatLab можно отнести к числу универсальных пакетов программ (ПП), не ориентированных на конкретные прикладные области моделирования технических систем [9].

Важнейшей составляющей MatLab является приложение структурного моделирования динамических систем (ДС) Simulink. Simulink – это библиотека блоков для многодоменного моделирования и модельного проектирования. Он поддерживает системный дизайн, моделирование, автоматическую генерацию кода и непрерывный контроль, включая проверку встроенных систем. Simulink предоставляет графический редактор, настраиваемые библиотеки блоков и решатели для моделирования и симулирования ДС. Он интегрирован с MatLab, позволяя включать его алгоритмы в модели и экспортировать результаты моделирования для дальнейшего анализа [10].

Рассчитаем резонансные частоты для продольных и вертикальных колебаний, которые соответственно будут равны [11]:

$$f_{\text{ПР}} = \frac{1}{2\pi} \cdot \sqrt{\frac{k}{m}} = \frac{1}{2 \cdot 3,14} \cdot \sqrt{\frac{64760}{0,2416}} = 82,4 \text{ Гц},$$

$$f_{\text{ВЕР}} = \frac{1}{2\pi} \cdot \sqrt{\frac{k}{m}} = \frac{1}{2 \cdot 3,14} \cdot \sqrt{\frac{16586}{0,2416}} = 41,7 \text{ Гц},$$

где $k = \frac{E \cdot F}{h}$ – жесткость одной рессоры лотка питателя; m – масса одной рессоры лотка, кг; $E = 2,86 \cdot 10^4$ – модуль упругости кимберлита, МПа; $F = a \cdot b$ – площадь рабочей поверхности материала, м²; h – высота слоя материала, м; a, b – соответственно ширина и длина одной рессоры лотка питателя, м.

Следует отметить, что параметры a, b, h и m можно найти в технической документации исследуемого питателя. Также важно учитывать, что величина F будет меняться в зависимости от рассматриваемого уровня колебаний, как показано на рис. 1.

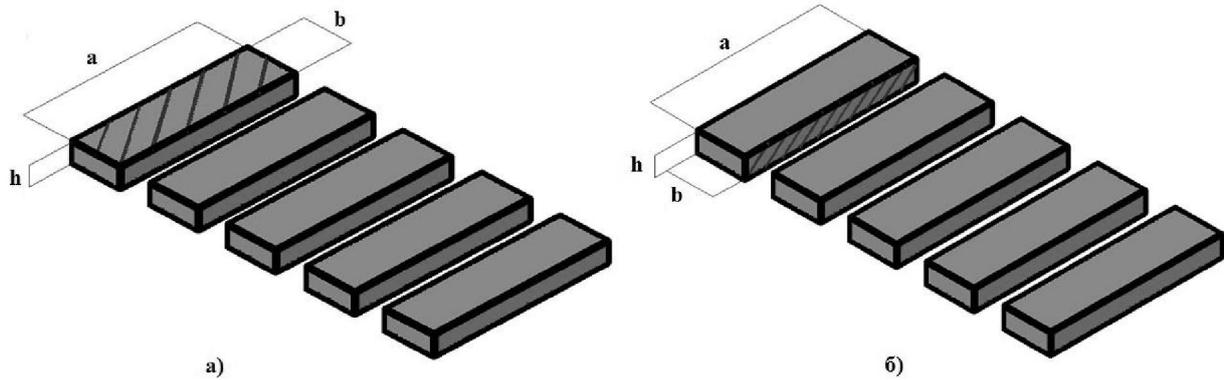


Рис. 1. Поведение кимберлита с лотком:
a – при продольных колебаниях; *b* – вертикальных колебаниях, где площадь рабочей поверхности F – заштрихованная область

Результаты моделирования. Для оценки правильности расчета коэффициентов жесткости опор и величины масс собираем суммарные одномассовые математические модели, имитирующие продольные и вертикальные колебания лотка, которые представлены на рис. 2 и рис. 3 соответственно [12]. Математические модели состоят из следующих основных блоков библиотеки MatLab/Simulink: Step – шаговый сигнал; Sum – сумматоры сигналов и обратных связей; Gain – усилители; Integrator – интегрирующие звенья; блоки Display и Scope – дисплей и осциллограф для численного и графического отображения выходных данных.

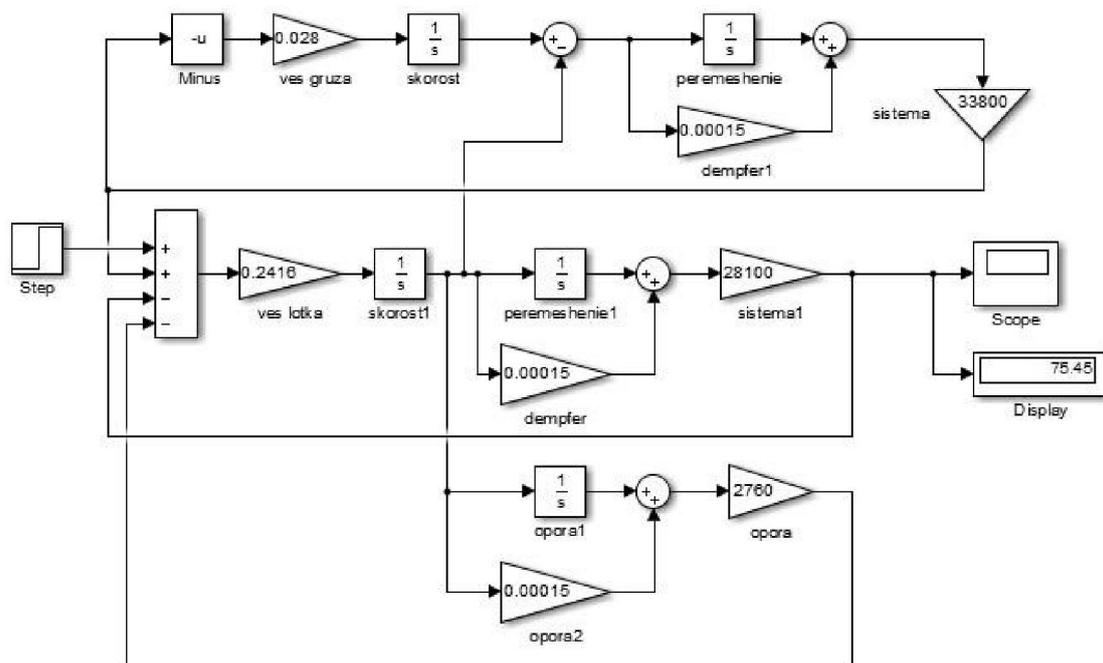


Рис. 2. Математическая модель имитации продольных колебаний лотка питателя

В результате моделирования имеем практически полное совпадение резонансных частот с погрешностью, не превышающей 10%, что допускается при математическом моделировании динамических систем [13]:

$$\Delta f_{\text{ПР}} = \frac{f_{\text{ПР.расч}} - f_{\text{ПР.мод}}}{f_{\text{ПР.расч}}} \cdot 100\% = \frac{82,4 - 75,45}{82,4} \cdot 100\% = 8,4\%,$$

$$\Delta f_{\text{ВЕР}} = \frac{f_{\text{ВЕР.расч}} - f_{\text{ВЕР.мод}}}{f_{\text{ВЕР.расч}}} \cdot 100\% = \frac{41,7 - 38,26}{41,7} \cdot 100\% = 8,2\%.$$

Также на графиках (рис. 4) мы видим, что в начале вибрации частота превышает резонансные значения в несколько раз. По мере продолжительности вибрации происходит затухание частоты. Примерно к 200 с времени моделирования осуществляется выход её на резонансное значение.

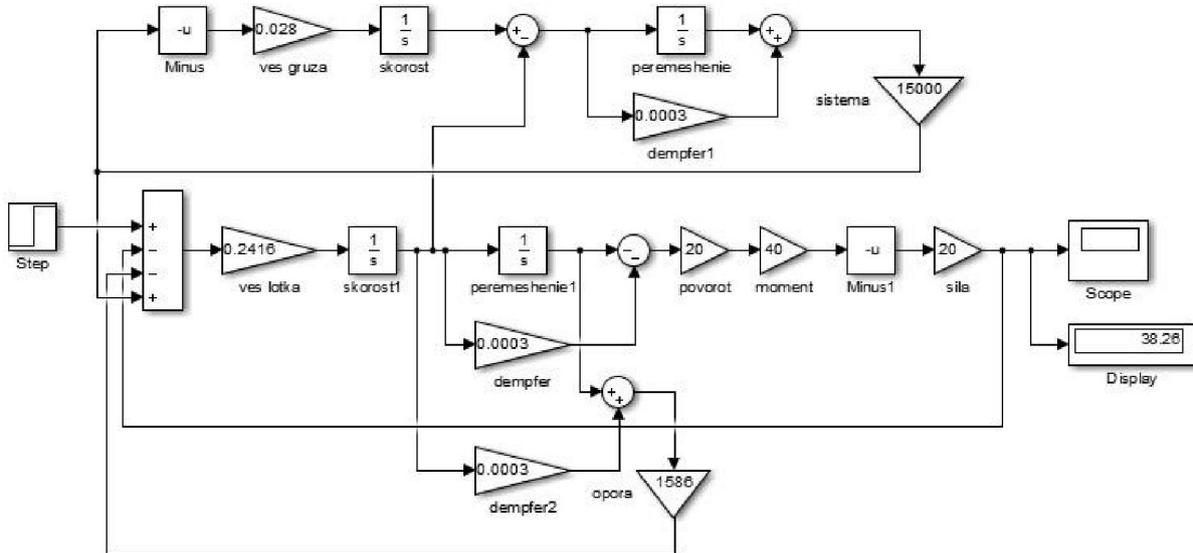


Рис. 3. Математическая модель имитации вертикальных колебаний лотка питателя

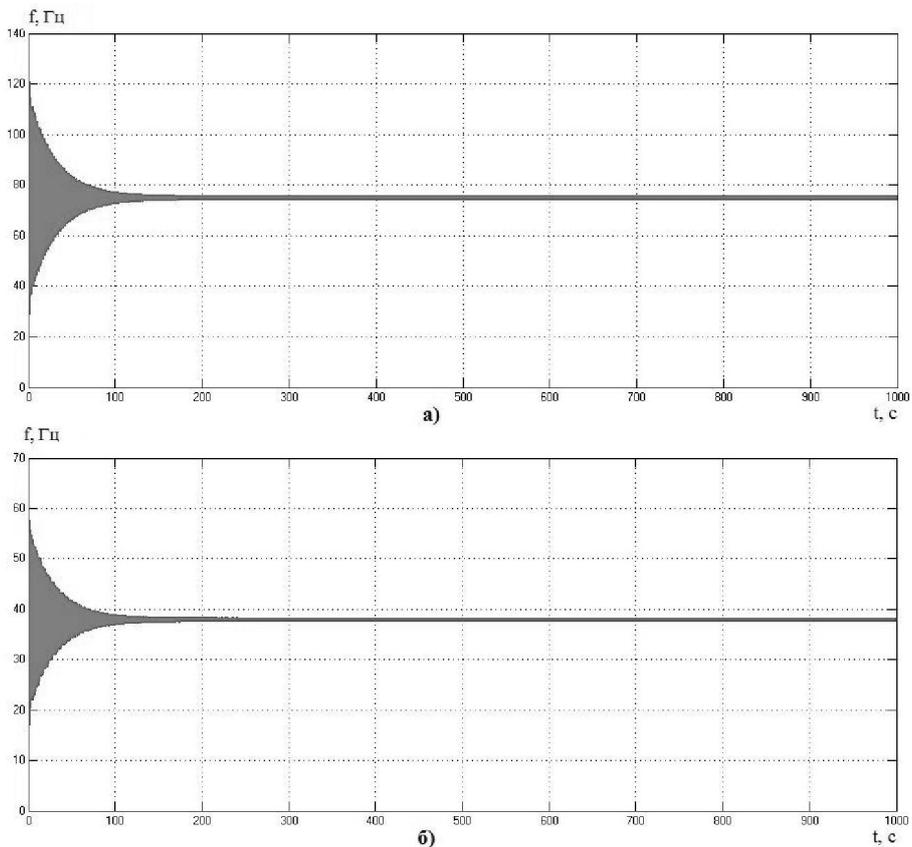


Рис. 4. Графики затухания резонансной частоты вибрации:
 а – для продольных колебаний; б – вертикальных колебаний

После подтверждения правильности расчета резонансных частот колебаний для оценки перемещения кимберлита по лотку питателя разрабатываем математическую модель электромагнитного привода [14]. Данная модель (рис. 5) по сравнению с моделями, представлен-

ными на рис. 2 и рис. 3, дополнена следующими элементами из библиотеки MatLab/Simulink: SinWave – задатчик синусоидального сигнала; Product – блок произведения сигналов; Divide – блок деления сигналов; MathFunction – математическая операция (в нашем случае возведение в квадрат); XYGraph – графопостроитель, обеспечивающий построения графика зависимости одного сигнала от другого (функции $f=x(y)$) [15, 16].

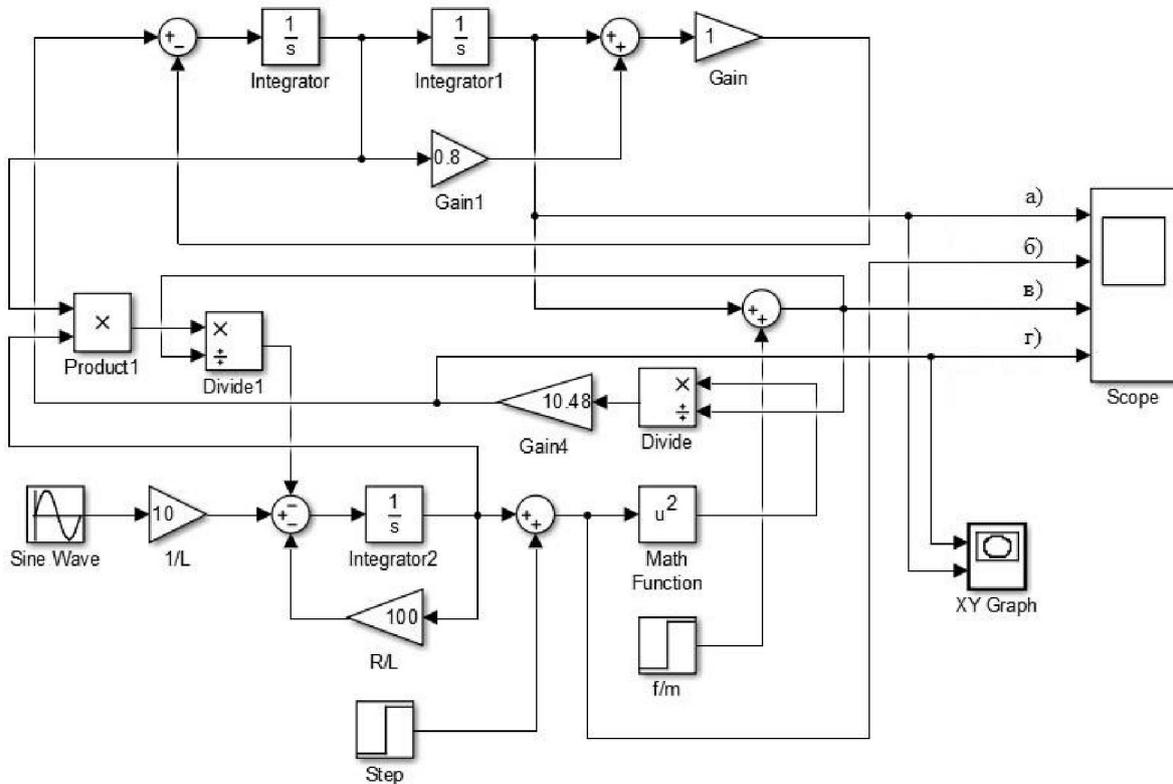


Рис. 5. Математическая модель электромагнитного привода с системой управления стабилизации производительности питателя

В результате моделирования на осциллографе мы можем наблюдать значения параметров собственной частоты (*a*), резонансной частотой (*б*), величину тягового электромагнитного усилия (*в*) и момент (*г*), прикладываемый к электромагнитам (рис. 6). Проанализируем эти графики.

На рис. 6, *a* виден процесс включения ЭМП и выход на установившееся значение собственной частоты. Через 14 секунд после запуска частота выходит на своё номинальное значение 146 с^{-1} , успешно преодолев барьер резонансных частот. Коэффициент перерегулирования составляет 0,2, а разрегулирования – 0,11, что является допустимым для динамических систем. На рис. 6, *б* наблюдаем резонансную частоту колебаний ЭМП питателя, которая колеблется в допустимых пределах от 81,65 до 83,2 Гц, что дает погрешность менее 1 %. На рис. 6, *г* показан электромагнитный момент ЭМП, который при пуске достигает величины 214 Н*м , а при выходе частоты на номинальное значение снижается до 147 Н*м . Отношение пускового момента к номинальному не превышает кратности 2, что является очень хорошим результатом, так как диапазон допустимых значений для ЭМП лежит в интервале от 2 до 3.

Зная максимальные значения таких параметров как частота, тяговое усилие и электромагнитный момент, мы можем определить максимальную мощность ЭМП, которая потребуется для обеспечения стабильной производительности питателя при перемещении кимберлита, по следующей формуле:

$$P_{\max} = \frac{\omega_{\max} \cdot F_{\max} \cdot M_{\max}}{E \cdot \eta} = \frac{189,5 \cdot 531,7 \cdot 214,2}{2,86 \cdot 10^4 \cdot 0,8} = 943,3 \text{ Вт} \approx 1 \text{ кВт},$$

где ω_{\max} – максимальная частота вибрации (по графику), 1/с; F_{\max} – максимальное тяговое усилие (по графику), кгс; M_{\max} – максимальный электромагнитный момент (по графику), Н*м; $E = 2,86 \cdot 10^4$ – модуль упругости кимберлита, МПа; $\eta = 0,8$ – принимаемый средний КПД вибровозбудителя.

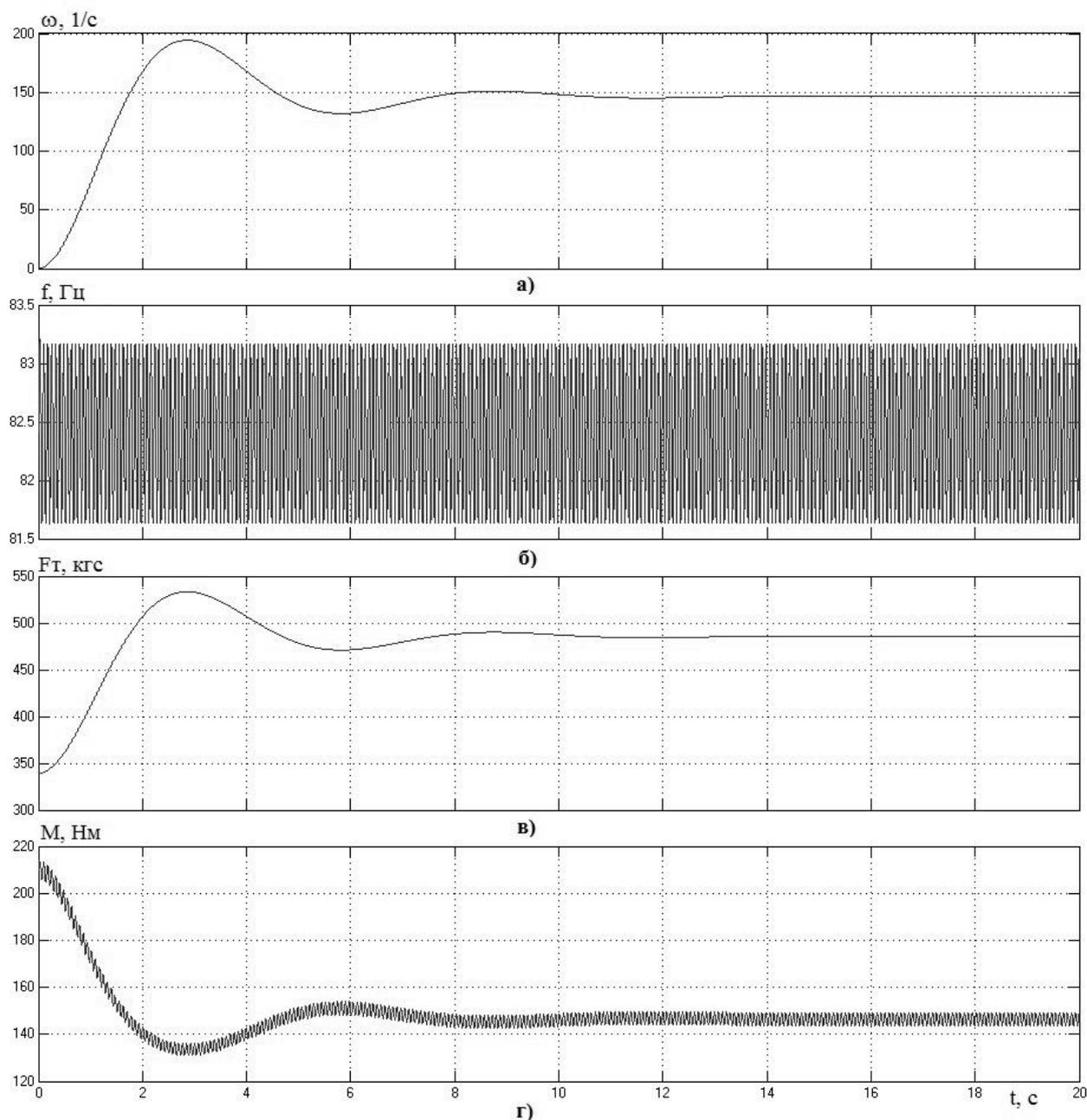


Рис. 6. Результаты моделирования электромагнитного привода:

a – собственная частота; *b* – резонансная частота; *v* – тяговое электромагнитное усилие;
г – электромагнитный момент

При такой мощности ЭМП выглядит предпочтительнее в качестве привода питателя, нежели альтернативные системы, например, асинхронный двигатель с дебалансом, либо более сложная система «тиристорный преобразователь – двигатель постоянного тока – регулируемый дебаланс», которые в зависимости от производительности могут достигать мощности десятков киловатт [17]. Этот выбор будет зависеть от технологического процесса и особенностей системы электроснабжения предприятия [18-22].

Заключение

В результате проделанной работы были произведены теоретические исследования перемещения слоя сыпучего материала при различных частотах и амплитудах вибрации, определена резонансная частота продольных и вертикальных колебаний лотка питателя. Для решения математических задач был использован пакет программ MatLab. Разработаны математические модели, описывающие перемещение сыпучего материала по лотку питателя при вибрационном воздействии, сопоставлены расчетные и смоделированные параметры частот, установлена допустимая погрешность. Разработана математическая модель электромагнитного привода с системой управления стабилизации производительности питателя, позволяющая определить его мощность и подобрать тип системы электропривода с точки зрения оптимальности для технологического процесса и энергоэффективности электрооборудования.

Библиографический список

1. **Решетняк, С.Н.** Особенности применения преобразовательной техники на горнодобывающих предприятиях России / С.Н. Решетняк, В.Н. Фащиленко, О.В. Федоров // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2008. – № 6. – С. 331–334.
2. **Юрченко, А.В.** Математическое моделирование работы вибрационного питателя РМДС // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2011. – № 10. – С. 225–233.
3. **Шлюфман, Е.М.** Разработка методического и аппаратного обеспечения для исследования и повышения эффективности рентгенолюминесцентной сепарации алмазосодержащего сырья: автореферат дисс. ... канд. техн. наук: 25.00.13 / Ин-т проблем комплексного освоения недр. – М., 2004. – 17 с.
4. **Кузнецов, Н.М.** Рациональное электропотребление на горных предприятиях // Труды Кольского научного центра РАН. – 2011. – № 4. – С. 128–135.
5. **Браславский, И.Я.** Математическая модель частотно-регулируемого электропривода с ДС-ДС-преобразователем и емкостными накопителями энергии / И.Я. Браславский // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. – 2016. – № 2 (544). – С. 39–46.
6. **Мещеряков, В.Н.** Математический анализ и моделирование преобразователя частоты матричного типа с непосредственным управлением по методу пространственно-векторной модуляции / В.Н. Мещеряков, Д.В. Байков // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Энергетика. – 2015. – Т. 15. № 1. – С. 21–33.
7. **Маклаков, А.С.** Математическое описание трехуровневого преобразователя частоты с фиксированной нейтралью на базе активного выпрямителя и автономного инвертора напряжения // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Энергетика. – 2016. – Т. 16. № 4. – С. 49–59.
8. **Бериллов, А.В.** Исследование асинхронного генератора с фазным ротором с последовательным соединением статорных и роторных обмоток через преобразователь частоты / А.В. Бериллов, В.Г. Еременко, Х.Н. Нгуен // Вестник МЭИ. – 2016. – № 4. – С. 56–61.
9. **Семёнов, А.С.** Математическое моделирование технических систем в среде MATLAB / А.С. Семёнов, И.А. Якушев, А.Н. Егоров // Современные наукоемкие технологии. – 2017. – № 8. – С. 56–64.
10. **Дьяконов, В.П.** MATLAB R2006/2007/2008 + SIMULINK 5/6/7. Основы применения: учеб. пособие / В.П. Дьяконов. – М.: СОЛОН-Пресс, 2008. – 800 с.
11. **Гендлина, Л.И.** О численном моделировании динамики вибрационного питателя для выпуска горной массы / Л.И. Гендлина, Е.Г. Куликова // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2015. – № 11. – С. 224–230.
12. **Синёнков, Д.В.** Математическое моделирование производительности шнекового питателя высевающего агрегата / Д.В. Синёнков, С.Б. Дёмин // Вестник Иркутского государственного технического университета. – 2016. – № 8 (115). – С. 36–43.
13. **Рыбальченко, Д.Е.** Математическая модель последовательных питателей для централизованных смазочных систем / Д.Е. Рыбальченко [и др.] // Вестник Самарского университета. Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроение. – 2008. – № 1 (14). – С. 152–161.
14. **Матвеев, А.И.** Исследование распределения тяжелых фракций в колеблющейся сыпучей среде / А.И. Матвеев [и др.] // Наука и образование. – 2016. – № 2 (82). – С. 21–26.

15. **Жарков, В.В.** Математическая модель движения частицы в спиральном питателе-дозаторе роторной фасовочной машины / В.В. Жарков, В.В. Прейс // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2014. – № 7. – С. 76–84.
16. **Зобнин, Б.Б.** Математическая модель дискретного весового дозирования / Б.Б. Зобнин, С.Ю.Петрушенко, С.В. Ендияров // Известия высших учебных заведений. Горный журнал. – 2012. – № 4. – С. 63–67.
17. Алиев И.И. Справочник по электротехнике и электрооборудованию: учеб. пособие для вузов / И.И. Алиев. – 2-е изд., доп. – М.: Высш. шк., 2000. – 255 с.
18. **Голубцов, Н.В.** Проблема эффективности использования энергоресурсов / Н.В. Голубцов, Л.Г.Ефремов, О.В. Федоров // Вестник Чувашского университета. – 2014. – № 2. – С. 18–22.
19. **Федоров, О.В.** Некоторые особенности структуры систем внутреннего электроснабжения // Надежность и безопасность энергетики. – 2015. – №3(30). – С 30–33.
20. **Кузнецов, Н.М.** Особенности электропотребления и пути его оптимизации при подземной разработке кимберлитов / Н.М. Кузнецов, А.Н. Егоров, Н.В. Егоров // Горный журнал. – 2010. – № 7. – С. 87–89.
21. **Козярук, А.Е.** Искажение формы питающего напряжения в сетях электроснабжения при наличии полупроводниковых преобразователей | А.Е. Козярук [и др.] // Горное оборудование и электромеханика. – 2011. – №6. – С. 30–35.
22. **Федоров, О.В.** Влияние электротехнических комплексов с несинусоидальной характеристикой на систему электроснабжения / О.В. Федоров, А.Г. Немцов // Вестник Чувашского университета. – 2012. – №3. – С.166–174.

*Дата поступления
в редакцию 20.04.2018*

A.S. Semenov¹, Ya.S. Kharitonov², A.N. Egorov²

DEVELOPMENT OF MATHEMATICAL MODEL OF ELECTROMAGNETIC DRIVE WITH A CONTROL SYSTEM TO STABILIZE THE PERFORMANCE OF THE FEEDER

Polytechnic institute (branch) of North-Eastern Federal University named after M.K. Ammosov
in Mirny, Mirny, Republic of Sakha (Yakutia)¹
ST «Almazavtomatika» PJSC «ALROSA», Mirny, Republic of Sakha (Yakutia)²

Purpose: The purpose of the research in this work is to study the vibrational displacement of a layer of bulk material in vibrating feeders and to develop a mathematical model of an electromagnetic drive by mathematical modeling.

Design/methodology/approach: The methods of analysis include theoretical studies of technical documentation of flow-transport systems in general and vibrating feeders in particular, mathematical modeling of technical systems using the MatLab software package using the Simulink application.

Findings: As a result of the research, theoretical studies of the movement of a layer of bulk material at various frequencies and amplitudes of vibration were carried out. A mathematical model describing the movement of loose material through the feeder tray under vibration is developed, a comparison is made with the experimental and calculated data.

Originality/value: A mathematical model of an electromagnetic drive with a control system stabilizing the feeder performance is developed, which allows to obtain the optimum frequency of the feeder vibration at a known resonant frequency.

Research limitations/implications: The results obtained can be applied at enrichment plants for the enrichment of diamond-bearing rocks to calculate the power of the feeder drive and the selection of the type of electric drive system in terms of optimality for the technological process and the energy efficiency of electrical equipment.

Conclusions: Vibrating feeders are not the only place in the technological processes of mining enterprises, therefore, the high-quality execution and tuning of the operating modes of the flow-transport system that provides material to the X-ray luminescent separators can provide increased diamond recovery and lower energy intensity of production by reducing power consumption.

Key words: thread-transport system, vibrating feeder, electromechanical system, electromagnetic drive, control system, mathematical modeling, resonance frequency, tractive force, electromagnetic torque.