

АНАЛИЗ ЭФФЕКТИВНОСТИ РАБОТЫ ВИБРОВОЗБУДИТЕЛЕЙ РЕЗОНАНСНЫХ ВИБРОТРАНСПОРТНЫХ МАШИН

АФАНАСЬЕВ А. И., СУСЛОВ Д. Н., ЧИРКОВА А. А.

Рассмотрены основные конструкции вибровозбудителей в резонансных вибротранспортных горных машинах. Показано, что основным недостатком инерционных, эксцентриковых и кривошипно-шатунных вибровозбудителей является затруднение поддержания частоты вынуждающей силы в области резонанса. Недостатком электромагнитных резонансных вибровозбудителей является небольшая (0,6–2,2 мм) амплитуда колебаний, а относительно большая частота колебаний не позволяет использовать их в низкочастотных (до 6–7 Гц) вибротранспортных машинах. Согласно своему функциональному назначению вибровозбудитель должен создавать определенную по величине амплитуду колебаний и обеспечивать поддержание резонансного режима работы при изменении технологической нагрузки и параметров динамической системы. Энергопотребление вибровозбудителя должно быть минимальным, а температура обмотки – в допустимых пределах. Предложен показатель оценки степени совершенства конструкции электромагнитного вибровозбудителя постоянного тока для вибротранспортной резонансной машины – отношение движущего импульса к тепловым потерям в обмотке. Установлено, что наиболее эффективным для относительно низкочастотных резонансных вибротранспортных машин является электромагнитный линейный двигатель постоянного тока с векторным управлением.

Ключевые слова: вибротранспортные резонансные машины; движущий импульс силы; частота колебаний; амплитуда колебаний; электромагнитные вибровозбудители; энергетическая эффективность.

Вибрационные машины – грохоты, питатели, транспортеры, вибровыпуски руды – нашли применение в начале XX в., о чем свидетельствуют довоенные [1–5], а также послевоенные [6–10] публикации, посвященные вибротранспортированию сыпучих материалов. Вибротранспортные машины (ВТМ) имеют массу рабочего органа от 200 кг до 40 т [11, 12] и мощность двигателя до 80 кВт. Колебания рабочего органа (РО) в этих ВТМ осуществляются вибровозбудителями кинематического, силового или смешанного типа возбуждения колебаний.

По количеству составляющих систем вибровозбудители можно разделить на два класса. *Первый класс* – это вибровозбудители, которые состоят из двигателя и трансмиссии. *Второй класс* включает вибровозбудители, подвижная часть двигателя которых непосредственно или через упругий элемент соединяется с РО и сообщает ему возвратно-поступательное периодическое движение. В этот же класс входят вибровозбудители типа мотор-вибраторы, содержащие двигатель, на ротор которого с двух сторон закрепляются дебалансы.

Афанасьев Анатолий Ильич – доктор технических наук, профессор кафедры технической механики. 620144, г. Екатеринбург, ул. Куйбышева, 30, Уральский государственный горный университет. E-mail: gmf.tn@m.ursmu.ru

Суслов Дмитрий Николаевич – кандидат технических наук, ведущий инженер-программист. 620012, г. Екатеринбург, пл. Первой Пятилетки, АО «Завод № 9». E-mail: susdmitry@yandex.ru

Чиркова Елена Анатольевна – кандидат технических наук, доцент кафедры технической механики. 620144, г. Екатеринбург, ул. Куйбышева, 30, Уральский государственный горный университет. E-mail: gmf.tn@m.ursmu.ru

А. О. Спиваковский [8] по конструктивному признаку выделил четыре группы вибраторов: инерционные; эксцентрикковые и кривошипно-шатунные; поршневые пневматические и гидравлические; электромагнитные. Рекомендации по выбору типа вибратора достаточно полно приведены в работах [9, 13]. Частоты колебаний рабочих органов с электромагнитными вибраторами кратны частоте тока, т. е. 50 Гц.

Инерционные вибровозбудители используются в относительно быстроходных зарезонансных и резонансных ВТМ, могут быть выполнены по разным схемам. Наиболее простая конструктивная схема – с одним дебалансом (грохоты ГВЛ-500, ГВЛ-750 и др.). Эти вибровозбудители могут эффективно использоваться на ВТМ, работающих в зарезонансном режиме с частотой 10–25 Гц, что является их основным недостатком. При их применении на высокочастотных ВТМ существенно увеличиваются опорные реакции, что значительно снижает ресурс подшипников. В резонансных машинах инерционные вибровозбудители используются редко, так как при изменении технологической нагрузки динамическая система «выходит» из резонанса, что приводит к снижению производительности ВТМ. Одним из путей решения этой проблемы является разработка автоматической системы для поддержания резонансного режима [14–17]. Однако вследствие инерционности двигателя эта проблема решается не в полной мере. Кроме того, такие системы управления эффективны на средних и высоких частотах работы двигателя (больше 25 Гц). Инерционные мотор-вибраторы ИВ-104–ИВ-111 серийно выпускаются в РФ. Конструктивно они выполнены по одной схеме, но отличаются друг от друга массой (20–80 кг), мощностью двигателя (0,25–2,20 кВт), величиной возмущающей силы (3,1–40,0 кН), частотой колебаний (25–95 Гц). Дебалансы устанавливаются с обеих сторон ротора. Корпус двигателя жестко закрепляется на рабочем органе. Так как обычно жесткости упругих опор в вертикальной и горизонтальной плоскости не равны, то рабочий орган совершает эллиптические, близкие к круговым колебания. Амплитуда колебаний РО может регулироваться изменением величины массы дебалансов, что требует остановки машины и разборки вибровозбудителя. Частоту колебаний возможно изменять за счет применения частотных преобразователей и соответствующих систем управления [14]. Однако относительно низкие частоты получить с этим типом вибровозбудителя практически невозможно, так как возмущающая сила прямо пропорциональна квадрату угловой частоты. Поэтому для получения необходимой по величине возмущающей силы приходится увеличивать массу дебалансов. Кроме того, снижение частоты вращения ротора при постоянной нагрузке приводит к значительному повышению температуры обмотки из-за ухудшения охлаждения, что может вызвать ее отказ.

Эксцентрикковые вибровозбудители выполняются по различным схемам и бывают уравновешенного и неуравновешенного типа. Наибольшее распространение получили эксцентрикковые вибровозбудители с упругим шатуном. Максимальная величина возмущающей силы определяется деформацией упругих элементов и их жесткостью, а амплитуда колебаний – массой рабочего органа и жесткостью опор. Главным недостатком эксцентриккового вибровозбудителя с упругим шатуном является зависимость амплитуды колебаний от величины технологической нагрузки и сил сопротивления (силы трения в опорах, силы трения груза и т. д.). Эксцентрикковые вибровозбудители с жестким шатуном применяются в резонансных виброконвейерах ВР-80, ВУР-1, ВУР-80 [18]. Они сообщают рабочему органу кинематически определенное движение. Их основными недостатками являются затрудненный пуск и повышенные нагрузки при пусковом режиме. Для обеспечения стабильного пуска в трансмиссию устанавливается махо-

вик или эксцентрик с регулируемой величиной эксцентриситета. С целью повышения производительности ВТМ разработаны эксцентриковые вибровозбудители с переменной амплитудой колебаний рабочего органа [19–20].

Эксцентриковые вибровозбудители целесообразно использовать в относительно низкочастотных вибрационных машинах для создания больших возмущающих усилий и амплитуд. При использовании эксцентрикового вибровозбудителя в относительно быстроходных машинах его габариты становятся неприемлемо большими.

Поршневые вибровозбудители реактивного и активного типов просты по конструкции, но имеют относительно низкий КПД за счет работы энергоносителя (воздуха) в открытом цикле.

Гидравлические вибровозбудители с замкнутыми циклами энергоносителя могут быть с нерегулируемыми [21], а также регулируемые частотой и амплитудой.

Электромагнитные вибровозбудители выпускаются трех типов: реактивные с выпрямителем; реактивные с подмагничиванием; реактивные с постоянными магнитами. По характеру воздействия электромагнитные вибровозбудители делятся на две группы: с гармонической возмущающей силой; с гармонической возмущающей силой и ударным импульсом.

В горной промышленности нашли применение резонансные питатели с силовым вибровозбуждением ПЭВ-1-0,5, ПЭВ-1-2 и др. с вибровозбудителями ВЭМ1-0,5; ВЭМ1-2, а также виброконвейеры типа 79-ТС; 95-ТС. Эти ВТМ работают с частотой, кратной частоте промышленной сети (50 Гц), и амплитудой от 1,2 до 2,2 мм, а в качестве вибровозбудителя в них используют электромагнитные линейные двигатели-вибраторы.

Патентный поиск показал, что совершенствование конструкций электромагнитных вибраторов идет в направлении повышения при прочих равных условиях их мощности [22–24] и приспособляемости к изменению резонансной частоты.

Анализ конструкций отечественных и зарубежных электромагнитных вибраторов показывает, что они выполнены практически по одинаковым схемам.

Основным недостатком рассмотренных электромагнитных резонансных вибровозбудителей является относительно небольшой ход якоря. Это обусловлено тем, что по закону Максвелла магнитодвижущая сила уменьшается с увеличением рабочего зазора. Соответственно, уменьшаются величина возмущающей силы и амплитуда колебаний рабочего органа. Кроме того, относительно большая частота колебаний не позволяет использовать такие вибровозбудители в низкочастотных (до 6–7 Гц) вибротранспортных машинах.

Электромагнитные вибровозбудители по конструктивному исполнению представляют собой линейные двигатели. Их общими недостатками являются относительно низкий КПД, что обуславливается работой вибровозбудителей в переходном режиме, а также большая масса. Электромагнитный вибратор ВЭМ1-1 мощностью 2 кВт имеет массу 550 кг, а рабочий орган (лоток) – 300 кг.

Одним из основных требований, которые предъявляются к вибровозбудителям резонансных машин, является регулирование частоты и амплитуды колебаний РО при изменении технологической нагрузки и параметров динамической системы.

Исходя из функционального назначения вибровозбудитель должен реализовать создание определенной по величине амплитуды колебаний и обеспечить поддержание резонансного режима работы при изменении технологической нагрузки. При этом энергопотребление вибровозбудителя должно быть минимальным, а температура обмотки сохраняться в допустимых пределах [25].

Амплитуда колебаний рабочего органа (РО) связана с величиной усилия, развиваемого двигателем, и следовательно, с его мощностью. В резонансных маши-

нах амплитуда колебаний значительно больше, чем в зарезонансных. Поэтому существует возможность использования потенциальной энергии упругих опор для уменьшения энергопотребления.

Авторами статьи предложены опытно-промышленные линейные электромагнитные двигатели (вибровозбудители) различного принципа действия для низкочастотных питателей-грохотов [25].

Первый тип представляет собой индукционный импульсный двигатель с конденсаторным накопителем энергии. Второй тип – электромагнитный (без индукционных колец) с конденсаторным накопителем энергии. Длительность движущего импульса при прочих равных условиях определялась величиной емкости конденсаторной батареи. В третьем – электромагнитном двигателе – в качестве источника питания использован трехфазный управляемый сенсорами выпрямитель. Фактически это линейный векторный электромагнитный двигатель. Эти вибровозбудители были установлены на опытно-промышленный резонансный питатель-грохот, и проведены соответствующие исследования, целью которых было определение рациональных параметров вибровозбудителя.

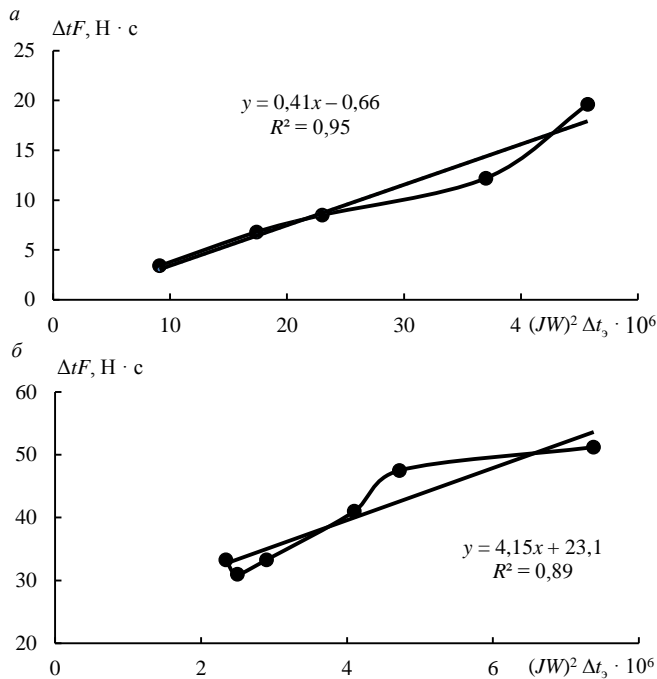


Рис. 1. Зависимость движущего импульса от квадрата магнитодвижущей силы, умноженной на время импульса:

a – двигатель индукционный; $W = 930$; $D_a = 50$ мм; *б* – двигатель электромагнитный; $W = 270$; $D_a = 100$ мм

В резонансных машинах для поддержания стабильной амплитуды колебаний движущее усилие целесообразно прилагать во время движения рабочего органа вперед (по ходу движения горной массы), а возврат назад РО осуществлять за счет силы тяжести, действующей на него, и потенциальной энергии упругих опор. Таким образом, двигатель будет работать не весь цикл колебаний, а только часть времени. Такой режим работы позволит существенно сократить энергозатраты на рабочий процесс.

Задача поддержания резонансной частоты вынуждающей силы решалась при помощи сенсорных датчиков, которые отслеживали положение РО и подавали

сигнал в систему управления, включая и выключая оптодиристоры выпрямителя.

Методика экспериментальных исследований заключалась в следующем. По известной массе m рабочего органа и измеренному периоду собственных колебаний находилась жесткость упругих опор C , а затем по закону Гука определялась статическая деформация упругих элементов от силы тяжести A_0 . Сенсорами включался источник питания, и в обмотку двигателя подавалась электрическая энергия. Замерялась амплитуда отклонения рабочего органа A_1 и записывался ток I в обмотке, а также фиксировалось время его протекания $\Delta t_{и}$. С использованием закона сохранения энергии определялась энергия $E_{и} = 0,5C(A_1^2 \pm 2A_1A_0) \pm mg\cos\alpha$. Знак «+» или «-» выбирался в зависимости от направления движущего усилия. Первый знак ставится «+», а второй «-», если движущее усилие направлено вниз и опускает РО. С использованием закона сохранения количества движения определялся движущий импульс $\Delta tF = (2m E_{и})^{0,5}$.

В таблице приведены результаты экспериментов с разными типами линейных управляемых двигателей.

Результаты экспериментов с линейными управляемыми двигателями

Номер	E_k , Дж	$E_{и}$, Дж	A_1 , мм	ΔtF , Н · с	I , А	$\Delta t_{и}$, мс	$(IW)^2\Delta t_s$, ($A^2 \cdot c$) · 10^6	E_R , Дж	$\Delta tF/E_R$, Н · с/Дж	Примечание
1	29,6	0,85	3,7	3,4	17,7	34	9,10	21,4	0,159	Двигатель индукционный. Число витков $W = 930$; $D_{я} = 50$ мм; $m_{РО} = 28$ кг
2	52,4	2,13	7,5	6,8	20,0	50	17,40	40,0	0,170	
3	70,0	3,13	9,6	8,5	21,0	60	23,00	53,0	0,160	
4	87,6	4,97	13,6	12,2	25,0	68	37,00	85,0	0,143	
5	105,0	10,70	22,0	19,6	27,2	70	45,70	96,0	0,203	
6	29,6	2,60	8,7	7,8	9,4	45	3,80	29,0	0,268	Двигатель электромагнитный. $W = 930$; $D_{я} = 50$ мм; $m_{РО} = 28$ кг
7	52,4	4,90	13,3	11,8	14,0	55	4,70	21,5	0,545	
8	29,6	1,39	5,4	2,8	11,2	37	2,00	9,1	0,308	
9	52,4	3,05	9,8	8,7	15,2	50	4,95	23,0	0,376	
10		5,20	12,0	32,3	9,0	175	12,30	32,3	1,000*	Двигатель электромагнитный. $W = 270$; $D_{я} = 100$ мм; $m_{РО} = 140$ кг ** $m_{РО} = 205$ кг *** $m_{РО} = 173$ кг **** $m_{РО} = 150$ кг
11		9,40	16,0	51,2	26,0	150	7,38	56,0	0,910	
12		8,10	14,0	47,5	18,0	200	4,72	33,0	1,430	
13		3,70	10,0	31,0	19,5	90	2,50	20,5	1,520	
14		4,10	12,0	41,0	25,0	90	4,10	33,8	1,730**	
15		3,20	9,0	33,3	23,0	75	2,90	23,8	1,400***	
16		2,00	7,0	33,3	20,0	80	2,34	19,2	1,520****	

* $W = 930$; $D_{я} = 50$ мм; $m_{РО} = 100$; опыты 1–9 – двигатель с конденсаторным накопителем энергии; E_k – энергия конденсаторной батареи; E_R – тепловые потери энергии в обмотке двигателя; Δt_s – эквивалентное время протекания тока по обмотке.

Поскольку амплитуда колебаний РО зависит от величины движущего импульса, а тепловые потери – от величины тока, времени его протекания и электрического сопротивления обмотки, то, по мнению авторов, энергетическую эффективность данного двигателя целесообразно оценивать отношением движущего импульса силы к потерям в обмотке. Величина импульса силы, при прочих равных условиях, указывает на эффективность преобразования двигателем электромагнитной энергии в механическую. Чем больше этот показатель, тем лучше двигатель. Величина потерь энергии на нагрев указывает на совершенство его конструкции: чем меньше потери, тем эффективнее работа двигателя (т. е. выше КПД). Следует отметить, что при массе РО 205 кг масса линейного двигателя 30 кг, потребляемая мощность до 630 Вт, амплитуда колебаний 18–24 мм, угол

наклона РО к горизонту 2° , производительность 20 т/час. Серийно выпускаемый вибропитатель ВЭМ1-1 имеет мощность двигателя 1000 Вт, массу РО 160 кг, массу вибровозбудителя 195 кг, угол наклона РО к горизонту 12° , производительность до 60 т/час. При такой величине угла наклона производительность испытываемой машины возрастет до 100 т/час. Таким образом, эффективность разработанного авторами управляемого линейного двигателя существенно больше, чем серийного.

На рис. 1 приведены зависимости движущего импульса от квадрата магнитодвижущей силы, умноженной на время импульса.

Относительно большое значение корреляционного отношения свидетельствует о линейной связи движущего импульса с магнитодвижущей силой и временем, что не противоречит закону Максвелла. Уравнения регрессии показывают, что импульс силы увеличивается с ростом площади поперечного сечения якоря, что также следует из закона Максвелла.

Таким образом, выбрав напряжение источника питания, число витков обмотки и ее сопротивление, можно определить максимальный ток и по заданному времени его протекания (связанному с частотой колебаний РО) рассчитать величину движущего импульса. Далее можно определить амплитуду колебаний РО и другие режимные параметры резонансной ВТМ.

Экспериментальные исследования показали, что одним из эффективных вибровозбудителей для резонансных ВТМ является линейный электромагнитный двигатель постоянного тока с сенсорным управлением. Величина импульса силы линейно зависит от квадрата магнитодвижущей силы и времени, что не противоречит закону Максвелла.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Левенсон Л. Б. Машины для обогащения полезных ископаемых. М.-Л.: Госмашметиздат, 1933. 323 с.
2. Левенсон Л. Б., Прейгерзон Б. И. Дробление, грохочение полезных ископаемых. М.-Л.: Гостехиздат, 1940. 771 с.
3. Терсков Г. Д. Движение тела на наклонной плоскости с продольными колебаниями // Изв. Томского индустриального института. 1937. Т. 56. Вып. IV. С. 18–26.
4. Бауман В. А. Исследование вибрационного питателя // Сб. тр. Ленинградского института механизации строительства (ЛИМС). М.-Л.: Стройиздат, 1939. С. 38–44.
5. Lindner G., Forderrinnen. Die Fordertechnik. 1912. Heft 2. 120 s.
6. Левенсон Л. Б., Цигельный П. М. Дробильно-сортировочные машины и установки. М.: Госстройиздат, 1952. 562 с.
7. Блехман И. И. О выборе основных параметров вибрационных конвейеров // Обогащение руд. 1959. № 2. С. 16–20.
8. Спиваковский А. О., Гончаревич И. Ф. Горнотранспортные вибрационные машины. М.: Углетехиздат, 1959. 219 с.
9. Блехман И. И., Джанелидзе Г. Ю. Вибрационное перемещение. М.: Наука, 1964. 410 с.
10. Блехман И. И. Синхронизация динамических систем. М.: Наука, 1971. 896 с.
11. Юдин А. В. Тяжелые вибрационные питатели и питатели-грохоты для горных перегрузочных систем. Екатеринбург: Изд-во УГГГА, 1996. 188 с.
12. Справочник по обогащению руд. Подготовительные процессы / под ред. О. С. Богданова. М.: Недра, 1982. 365 с.
13. Спиваковский А. О., Гончаревич И. Ф. Вибрационные конвейеры, питатели и вспомогательные устройства. М.: Машиностроение. 1972. 326 с.
14. Дмитриев В. Н., Горбунов А. А. Резонансный вибрационный электропривод машин и установок с автоматическим управлением // Известия Самарского научного центра РАН. 2009. Т. 11. № 3. С. 56–62.
15. Асташев В. К. Системы возбуждения авторезонансных вибротехнических устройств // Вестник научно-технического развития. 2007. № 1. С. 12–19.
16. Антипов В. И., Руин А. А. Динамика резонансной низкочастотной параметрически возбуждаемой вибрационной машины // Проблемы машиностроения и надежности машин. 2007. № 5. С. 7–13.
17. Антипов В. И., Ефременков Е. Е., Руин А. А., Субботин К. Ю. Повышение эффективности работы вибрационных механизмов за счет возбуждения низкочастотного резонансного режима колебаний // Стекло и керамика. 2007. № 5. С. 13–16.

18. Вибрационные транспортирующие машины / В. Н. Потураев [и др.]. М.: Машиностроение, 1964. 214 с.

19. Инерционный конвейер: а. с. 1787883 СССР. МКИ³ В 07 В1/46, F 02 В75/32; опубл. 21.02.93. Бюл. № 2. 4 с.

20. Инерционный конвейер: а. с. 1645215 СССР. МКИ³ В 07 В1/46, F 02 В75/32; опубл. 11.06.91. Бюл. № 16. 3 с.

21. Гончаревич И. Ф. Вибрационные конвейеры для угольной промышленности // Экспресс информация НИИИформтяжмаш. М., 1965. 23 с.

22. Электромагнитный привод резонансного вибратора: пат. 2146412 Рос. Федерация. № 98100524/09; заявл. 05.01.98; опубл. 10.03.00. Бюл. № 5. 3 с.

23. Вибратор резонансного действия с электромагнитным приводом: пат. 2356646 Рос. Федерация. № 2006103967/28; заявл. 10.02.06; опубл. 20.08.07. Бюл. № 25. 3 с.

24. Вибратор резонансного действия с электромагнитным приводом: пат. 2356640 Рос. Федерация. № 2006102778/28; заявл. 01.02.06; опубл. 20.08.07. Бюл. № 25. 4 с.

25. Сулов Д. Н., Афанасьев А. И., Косенко Е. А. Результаты и методика тепловых испытаний линейного двигателя грохота // Изв. вузов. Горный журнал. 2011. № 5. С. 106–109.

Поступила в редакцию 16 октября 2017 года

THE ANALYSIS OF EFFECTIVENESS OF WORK OF VIBRATION-GENERATORS OF RESONANT VIBRATION-TRANSPORT MACHINES

Afanas'ev A. I. – The Ural State Mining University, Ekaterinburg, the Russian Federation. E-mail: gmftm@m.ursmu.ru

Suslov D. N. – AO Zavod no. 9, Ekaterinburg, the Russian Federation. E-mail: susdmitry@yandex.ru

Chirkova A. A. – The Ural State Mining University, Ekaterinburg, the Russian Federation. E-mail: gmftm@m.ursmu.ru

This article considers basic types of vibration-generators that are used in resonant vibration-transport mining machines. It has been shown that the main disadvantage of inertial, eccentric and crank gear vibration-generators is the complexity of maintaining regulating compelling frequency of oscillations in resonant zone. The disadvantage of electromagnetic resonant vibration-generators is small amplitude of oscillations (0.6–2.2mm) and relatively big frequency of oscillations doesn't allow using them in low-frequent (up to 6–7 Hz) vibration-transport machines. According to its functional purpose a vibration-generator must create the oscillations of certain amplitude, and maintain the resonant mode when the workload or the parameters of dynamic system are changing. The power consumption of vibration-generator must be minimal and the temperature of winding must be in the allowed range. The article proposes the perfection degree estimation criterion of the structure of electromagnetic direct-current vibration-generator for a vibration-transport resonant machine – the ratio of driving impulse to thermal loss in winding. The article substantiates that an electromagnetic linear engine of direct current with vector controlling is the most effective for relatively low-frequency resonant vibration-transport machines.

Key words: vibration-transport resonant machines; driving impulse of force; frequency and amplitude of oscillations; electromagnetic vibration-generators; power-consumption effectiveness.

REFERENCES

1. Levenson L. B. *Mashiny dlia obogashcheniia poleznykh iskopaemykh* [Machines for mineral concentration]. Moscow, Leningrad, Gosmashmetizdat Publ., 1933. 323 p.
2. Levenson L. B., Preigerzon G. I. *Droblenie i grokhochenie poleznykh iskopaemykh* [Mineral crushing and screening]. Leningrad, Gostekhizdat Publ., 1940. 771 p.
3. Terskov G. D. [Motion of body at the inclined surface with longitudinal oscillations]. *Izv. Tomskogo industrial'nogo institute – Bulletin of the Tomsk Industrial Institute*, 1937, vol. 56, issue IV, pp. 18–26. (In Russ.)
4. Bauman V. A. [The study of a vibrofeeder]. *Sb. tr. Leningradskogo instituta mekhanizatsii stroitel'stva* [Collected works of Leningrad Institute of Mechanization of Construction]. Moscow, Leningrad, Stroiizdat Publ., 1939, pp. 38–44. (In Russ.)
5. Lindner G., Forderrinnen. *Die Fordertechnik*. 1912. Heft 2. 120 s.
6. Levenson L. B., Tsigel'nyi P. M. *Drobitel'no-sortirovochnye mashiny i ustanovki* [Screening and crushing machines and plants]. Moscow, Gosstroizdat Publ., 1952. 562 p.
7. Blekhman I. I. [On the choice of vibrating conveyers basic parameters]. *Obogashchenie Rud – Mineral Processing*, 1959, no. 2, pp. 16–20. (In Russ.)
8. Spivakovskii A. O., Goncharevich I. F. *Gornotransportnye vibratsionnye mashiny* [Mining and conveyor vibrating machines]. Moscow, Ugletekhizdat Publ., 1959. 219 p.
9. Blekhman I. I., Dzhanelidze G. Iu. *Vibratsionnoe peremeshchenie* [Vibratory displacement]. Moscow, Nauka Publ., 1964. 410 p.
10. Blekhman I. I. *Sinkhronizatsiia dinamicheskikh sistem* [Synchronization of dynamic systems]. Moscow, Nauka Publ., 1971. 896 p.
11. Iudin A. V. *Tiazhelye vibratsionnye pitateli i pitateli-grokhoty dlia gornyykh peregruzochnyykh sistem* [Heavy vibrofeeders and screen feeders for mining transfer systems]. Ekaterinburg, UrSMU Publ., 1996. 188 p.
12. *Spravochnik po obogashcheniiu rud. Podgotovitel'nye protsessy. Pod red. O. S. Bogdanova* [Reference book on mineral concentration. Development processes. Edited by Bogdanov O.S.]. Moscow, Nedra Publ., 1982. 365 c.

13. Spivakovskii A. O., Goncharevich I. F. *Vibratsionnye konveiry, pitateli i vspomogatel'nye ustroistva* [Vibrating conveyers, feeders, and auxiliary devices]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1972. 326 p.
 14. Dmitriev V. N., Gorbunov A. A. [Resonant vibrating electric drive of machines and plants with automated control]. *Izvestiia Samarского nauchnogo tsentra RAN – News of the Samara Scientific Center of RAS*, 2009, vol. 11, no. 3, pp. 56–62. (In Russ.)
 15. Astashev V. K. [Excitation systems of autoresonant vibration engineering devices]. *Vestnik nauchno-tehnicheskogo razvitiia – Bulletin of Science and Technical Development*, 2007, no. 1, pp. 12–19. (In Russ.)
 16. Antipov V. I., Ruin A. A. [Dynamics of resonant low frequency parametrically generated vibrating machine]. *Problemy mashinostroeniia i nadezhnosti mashin – Journal of Machinery Manufacture and Reliability*, 2007, no. 5, pp. 7–13. (In Russ.)
 17. Antipov V. I., Efremenkov E. E., Ruin A. A., Subbotin K. Iu. [Improving the efficiency of vibrating mechanisms operation by means of generating low frequency resonant mode of oscillations]. *Steklo i keramika – Glass and Ceramics*, 2007, no. 5, pp. 13–16. (In Russ.)
 18. Poturaev V. N., and other. *Vibratsionnye transportiruiushchie mashiny* [Vibrating-transport machines]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1964. 214 p.
 19. *Inertsionnyi konveier* [Inertial conveyer]. Certificate of authorship, no. 1787883, 1993.
 20. *Inertsionnyi konveier* [Inertial conveyer]. Certificate of authorship, no. 1645215, 1991.
 21. Goncharevich I. F. [Vibrating conveyers for coal industry]. *Ekspress informatsiia NIIformtiazhmash – Express Information from the Research and Development Institute of Information on Heavy Power and Transport Engineering*. Moscow, 1965. 23 p. (In Russ.)
 22. Ivashin V. V., Medvedev V. A., Pchelkin D. V. *Elektromagnitnyi privod rezonansnogo vibratora* [Electromagnetic drive of resonant vibrator]. Patent RF, no. 2146412, 2000.
 23. Kostiuk A. I. *Vibrator rezonansnogo deistviia s elektromagnitnym privodom* [Vibrator of resonant action with electromagnetic drive]. Patent RF, no. 2356646, 2007.
 24. Kostiuk A. I. *Vibrator rezonansnogo deistviia s elektromagnitnym privodom* [Vibrator of resonant action with electromagnetic drive]. Patent RF, no. 2356640, 2007.
 25. Suslov D. N., Afanas'ev A. I., Kosenko E. A. [Results and methodology of thermal tests of linear motor of a screen]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Gornyi zhurnal – News of the Higher Institutions. Mining Journal*, 2011, no. 5, pp. 106–109. (In Russ.)
-