

А.И. Афанасьев, Д.Н. Сулов

ОЦЕНКА ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ВИБРОВОЗБУДИТЕЛЕЙ РЕЗОНАНСНЫХ ВИБРОТРАНСПОРТНЫХ МАШИН

Рассмотрены основные типы вибровозбудителей используемые в резонансных вибротранспортных горных машинах. Показано, что основным недостатком инерционных, эксцентриковых и кривошипно-шатунных вибровозбудителей является трудность оперативного регулирования вынуждающей частоты колебаний при выходе системы из резонанса. Электромагнитные резонансные вибровозбудители широко используемые в горной промышленности имеют относительно небольшой ход якоря. Относительно большая частота колебаний не позволяет использовать их в низкочастотных (до 6—7 Гц) вибротранспортных машинах. Исходя из функционального назначения вибровозбудитель должен реализовать создание определенной по величине амплитуды колебаний и поддержание резонансного режима работы при изменении технологической нагрузки. Энергопотребление вибровозбудителя должно быть минимальным, а температура обмотки в допустимых пределах. Предложен показатель оценки степени совершенства конструкции вибровозбудителя для конкретной вибротранспортной 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, угловая частота и амплитуда колебаний, электромагнитные вибровозбудители, энергетическая эффективность.

DOI: 10.25018/0236-1493-2018-1-0-126-132

В настоящее время в горнодобывающей промышленности РФ используются вибротранспортные машины (ВТМ) имеющие массу рабочего органа от 200 кг (грохот ГВА-500) до 40 т (грохот ГПТ-2) [1], с мощностью двигателя от 1,5 до 80 кВт. В этих ВТМ используются вибровозбудители (вибраторы) различных типов и это определяет общую конструкцию машины.

А.О. Спиваковский [2] по конструктивному признаку выделил четыре группы вибраторов: 1 — инерционные; 2 — эксцентриковые (кривошипно-шатунные);

3 — поршневые пневматические и гидравлические; 4 — электромагнитные. Рекомендации по выбору типа вибратора достаточно полно приведены в работах [3]. Основной недостаток инерционных, эксцентриковых и кривошипно-шатунных вибровозбудителей — трудность оперативного регулирования вынуждающей частоты и амплитуды при выходе системы из резонанса [4—6].

Поршневые гидравлические и пневматического вибровозбудители реактивного типа наиболее простые по конструкции, но имеют относительно низкий

КПД, за счет работы энергоносителя в открытом цикле и утечки рабочей жидкости в процессе работы.

Электромагнитные вибровозбудители выпускаются трех типов: реактивные с выпрямителем, реактивные с подмагничиванием, реактивные с постоянными магнитами. Основным недостатком электромагнитных резонансных вибровозбудителей является относительно небольшой ход якоря и постоянство частоты вынуждающей силы, кратной частоте переменного тока — 50 Гц.

Одним из основных требований, которые предъявляются к вибровозбудителям резонансных машин является регулирование частоты. Это необходимо для стабильной работы резонансной машины при изменении технологической нагрузки и параметров динамической системы. Исходя из функционального назначения вибровозбудитель должен реализовать создание определенной по величине амплитуды колебаний и поддержание резонансного режима работы при изменении технологической нагрузки. При этом энергопотребление вибровозбудителя должно быть минимальным, а температура обмотки в допустимых пределах [7, 8].

Амплитуда колебаний рабочего органа (РО) связана с величиной усилия развиваемого двигателем [9, 10] и, следовательно, с его мощностью. 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 его силы тяжести и потенциальной энергии упругих опор. Таким образом, двигатель будет работать не весь цикл колебаний, а только часть времени. Такой режим работы двигателя позволит существенно сократить энергозатраты на рабочий процесс.

В УГГУ были разработаны, изготовлены и испытаны несколько линейных управляемых двигателей для вибротранспортных машин. Двигатели устанавливались на ВТМ с различной массой рабочего органа и частотой собственных колебаний. Первый тип представлял собой индукционный импульсный двигатель с конденсаторным накопителем энергии. Второй тип был выполнен электромагнитным (без индукционных колец) с конденсаторным накопителем энергии. Оба двигателя имели диаметр якоря 50 мм. Третий тип был такой же, как и второй, но в качестве источника питания был трехфазный управляемый сенорами выпрямитель, а диаметр якоря — 100 мм. Фактически это был линейный векторный электромагнитный управляемый двигатель постоянного тока.

Первые два вибровозбудителя были установлены на физическую модель грохота с длиной просеивающей поверхности $L = 1,2$ м и шириной $b = 0,4$ м и опытно-промышленный резонансный питатель-грохот: $L = 1,8$ м и $b = 0,6$ м. Параметры опытно-промышленного грохота были больше, чем у серийного грохота ГВА-500, но меньше, чем у ГВА-750. Затем были проведены соответствующие исследования, целью которых было определение рациональных параметров вибровозбудителя. Рабочий орган грохота — короб был установлен на плоских пружинах, которые были жестко закреплены в раме.

Таким образом эквивалентная расчетная динамическая схема грохота представляла собой одномассовую односвязную систему. Минимальная масса РО первого грохота была 28 кг, а второго — 100 кг. Конструкция грохота предусматривала возможность изменения массы РО, что позволило при постоянной жесткости опор изменять резонансную частоту от 3 до 6,5 Гц, а амплитуду от 10 до 30 мм. Угол вибрации короба грохота

был равен 30° , колебания прямолинейные, плоские.

Методика экспериментальных исследований заключалась в следующем:

- По закону Гука определялась статическая деформация (A_0) упругих элементов от силы тяжести рабочего органа.

- По известной массе (m_{po}) рабочего органа и измеренному периоду собственных колебаний находилась жесткость упругих опор (C).

- От источника питания подавалась электрическая энергия в обмотку двигателя и замерялась амплитуда отклонения рабочего органа (A_1).

- Согласно закону сохранения энергии определялась энергия движущего импульса $E_{и} = 0,5C(A_1^2 \pm 2A_1A_0) \pm m_{po}g\cos\alpha$. Первый знак ставится «+», а второй «-», если движущее усилие направлено вниз и опускает РО. В противном случае знаки меняются местами.

- Согласно закона сохранения количества движения находится движущий импульс — $\Delta tF = (2m_{po}E_{и})0,5$.

- С помощью осциллографа записывался ток (J) в обмотке и фиксировалось время его протекания ($\Delta t_{и}$).

В таблице приведены результаты экспериментов с различными типами линейных двигателей — вибровозбудителей.

По нашему мнению, оценку энергетической эффективности линейных двигателей ($k_{эд}$) для ВТМ, следовательно степень их конструктивного совершенства, целесообразно проводить отношению величины импульса движущего усилия к потерям энергии на нагрев обмотки:

$$k_{эд} = \Delta tF/E_R \quad (1)$$

Максимум этого отношения свидетельствует о том, что для данной вибрационной машины выбранный двигатель имеет рациональные параметры.

Результаты экспериментов с линейными управляемыми двигателями

№	E_k , Дж	$E_{и}$, Дж	A_1 , мм	ΔtF , Н*с	J , А	$\Delta t_{и}$, мс	$J^2\Delta t_{э}$, А ² *с	E_R , Дж	$k_{эд}$, Н*с/Дж	Примечание
1	29,6	0,85	3,7	3,4	17,7	34	10,5	21,4	0,159	Двигатель индукционный, $m_{po} = 28-40$ кг
2	52,4	2,13	7,5	6,8	20	50	20	40	0,17	
3	70	3,13	9,6	8,5	21	60	26,4	53	0,16	
4	87,6	4,97	13,6	12,2	25	68	42,5	85	0,143	
5	105	10,7	22	19,6	27,2	70	52,5	96	0,203	
6	29,6	2,6	8,7	7,8	9,4	45	4,4	29	0,268	Двигатель электромагнитный, $m_{po} = 28-40$ кг
7	52,4	4,9	11	9,8	16	55	14,1	28	0,35	
8	29,6	0,6	5,4	5,8	11,2	37	2,3	9,1	0,308	
9	52,4	3,05	9,8	8,7	15,2	50	5,7	23	0,51	
10		5,2	12	32,3	9	175	14,2	32,3	1,0*	Двигатель электромагнитный, $m_{po} = 140$ кг** $m_{po} = 205$ кг*** $m_{po} = 173$ кг**** $m_{po} = 150$ кг
11		9,4	16	51,2	26	150	101,2	56	0,91	
12		8,1	14	47,5	18	200	64,8	33	1,43	
13		3,7	10	31	19,5	90	34,4	20,5	1,52	
14		4,1	12	41	25	90	56,2	33,8	1,73**	
15		3,2	9	33,3	23	75	39,8	23,8	1,4***	
16		2,0	7	33,3	20	80	32	19,2	1,52****	

* $W = 930$, $\varnothingя = 50$ мм, $m_{po} = 100$. опыты 1–9 — двигатель с конденсаторным накопителем энергии, E_k — энергия конденсаторной батареи, $\Delta t_{э}$ — эквивалентное время протекания тока по обмотке.

При определении параметров электромагнитного линейного двигателя постоянного тока теоретически достаточно просто определить максимальный ток в обмотке и установить время его протекания. Однако определить величину движущего импульса по закону Максвелла практически невозможно, так как при движении якоря изменяется рабочий зазор и, соответственно, индуктивность обмотки. Поэтому, необходимо экспериментально определить зависимость движущего импульса от тока и времени.

На рис. 1, 2 приведены зависимости движущего импульса, соответственно, индукционного и электромагнитного линейных двигателей от произведения квадрата тока и длительности его протекания в обмотке. Они имели параметры: число витков обмотки — 930, ее масса — 2,4 кг, электрическое сопротивление обмотки — 4,0 Ом. Энергия заряда конденсаторов устанавливалась в диапазоне 30–105 Дж за счет изменения напряжения. Рабочий зазор у индукционного двигателя, т.е. толщина медных колец — 30 мм, у электромагнитного — 25 мм. Жесткость упругих элементов — 28 Н/мм. Максимальная величина тока в обмотке регулировалась за счет изменения величины напряжения заряда конденсаторной батареи.

Регрессионная зависимость движущего импульса индукционного двигателя от тока и времени его протекания в обмотке имеет вид:

$$\Delta t F = 0,35 J^2 \Delta t_3 - 0,67 R^2 = 0,95 \quad (2)$$

Для электромагнитного двигателя с конденсаторами аналогичное уравнение регрессии:

$$\Delta t F = 0,36 J^2 \Delta t_3 + 5,8 R^2 = 0,86 \quad (3)$$

На рис. 3 приведена зависимость движущего импульса линейного двигателя постоянного тока с сенсорным управлением от произведения тока и времени. Двигатель имел параметры: диаметр

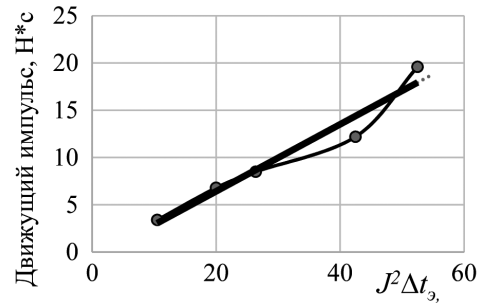


Рис. 1. График зависимости движущего импульса индукционного двигателя от тока и времени его протекания в обмотке

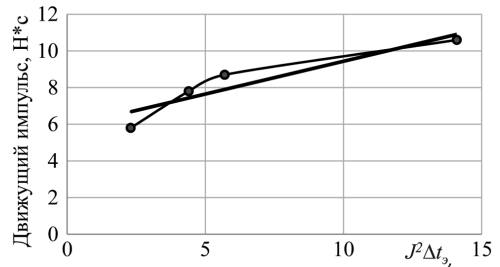


Рис. 2. График зависимости движущего импульса электромагнитного двигателя с конденсаторным накопителем энергии от тока и времени

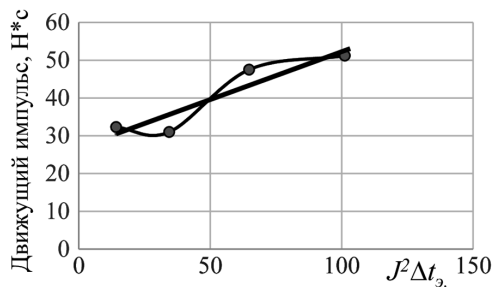


Рис. 3. График зависимости движущего импульса электромагнитного двигателя от тока и времени его протекания в обмотке

якоря 100 мм, число витков обмотки — 270, масса обмотки — 4 кг, электрическое сопротивление обмотки — 0,6 Ом, относительный рабочий зазор — 0,25, ход якоря до выбора рабочего зазора — 15 мм.

Масса рабочего органа изменялась от 100 до 205 кг, суммарная жесткость упругих опор — 72 Н/мм.

Регрессионное уравнение для электромагнитного двигателя постоянного тока имеет вид:


$$\Delta t F = 0,25 J^2 \Delta t_s + 26,9 R^2 = 0,86. \quad (4)$$

Относительно большое корреляционное отношение уравнений (2)–(4) свидетельствует о наличии устойчивой связи между исследуемыми параметрами, что не противоречит закону Максвелла. Низкую энергетическую эффективность индукционного и электромагнитного двигателей с конденсаторным накопителем энергии можно объяснить существенными потерями электромагнитной энергии

в магнитопроводе — якорю и корпусе. Результаты эксперимента приведенные в таблице, а также графики, приведенные на рис. 1–3, позволяют сделать следующие выводы:

- увеличение движущего импульса приводит к росту потерь энергии на нагрев обмотки;
- наиболее эффективным является электромагнитный векторный линейный двигатель постоянного тока, у которого отношение движущего импульса к тепловым потерям в 2–7 раз больше, чем у индукционного и электромагнитного с конденсаторными накопителями энергии.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Обогащительное оборудование: Отраслевой каталог 18-2-82. Ч. 2. — М.: ЦНИИТЭИтяжмаш, 1982. — 103 с.
2. Спиваковский А. О., Гончаревич И. Ф. Вибрационные конвейеры, питатели и вспомогательные устройства. — М.: Машиностроение, 1972. — 326 с.
3. Гончаревич И. Ф., Фролов К. В. Теория вибрационной техники и технологии. — М.: Наука, 1981. — 320 с.
4. Дмитриев В. Н., Горбунов А. А. Резонансный вибрационный электропривод машин установок с автоматическим управлением // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. — 2009. — т. 11. — № 3.
5. 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.
6. Дьяконова В. Я., Косолапова С. А., Калиновская Т. Г. Инерционный конвейер с регулируемой длиной кривошипа // Современные технологии освоения минеральных ресурсов: сборник материалов 7-й Международной научно-технической конференции / Под общ. ред. В. Е. Кислякова. Ч. 1. — Красноярск: ИПК СФУ, 2009. — С. 220–225.
7. Афанасьев А. И., Мальцев В. А., Андриюшенков Д. Н., Лагунов Д. В., Чиркова А. А. Резонансный двухмассовый питатель-грохот // Известия вузов. Горный журнал. — 2011. — № 3. — С. 27–29.
8. Афанасьев А. И., Закаменных А. Ю., Чиркова А. А., Андриюшенков Д. Н. Энергопотребление при работе резонансных грохотов и питателей. Горное оборудование и электромеханика. — 2010. — № 8. — С. 55–56.
9. Bak L., Noga S., Skrzat A., Stachowicz F. Dynamic analysis of vibrating screener system. To cite this article: Bak et al 2013 J. Phys.: Conf. Ser. 451 012028
10. James F. Sullivan. Screening Theory and Practice. March 20, 2013, published by Triple/S Dynamics. www.sssdynamics.com/resources/screening-theory. 

КОРОТКО ОБ АВТОРАХ

Афанасьев Анатолий Ильич¹ — доктор технических наук, профессор, e-mail: 2c1@inbox.ru,

Сулов Дмитрий Николаевич¹ — кандидат технических наук, e-mail: 2c1@inbox.ru,

¹ Уральский государственный горный университет.

A.I. Afanasiev, D.N. Suslov

EVALUATION OF ENERGY EFFICIENCY OF RESONANCE CONVEYOR VIBRATION EXCITERS

The scope of the article covers the basic types of vibration exciters used in resonance conveying systems. It is shown that the main disadvantage of inertial, eccentric and crack-and-rod vibration exciters is the complexity of operational monitoring of the forcing frequency when the system is off resonance.

Electromagnetic resonant vibration exciters widely employed in the mining industry have a relatively short-length travel of armature. Furthermore, a comparatively high vibration frequency disallows using them in the low-frequency conveying systems (to 6–7 Hz).

Judged by the functional purpose, a vibration exciter is meant to generate certain amplitude vibrations and maintain resonant mode under the variation in the process load at the minimum power consumption and within the allowable range of winding temperature. It is proposed to evaluate efficiency of a vibration exciter design for a specific vibration conveying systems using a criterion of the ratio of driving force to winding heat loss. It is found that for the comparatively low-frequency resonance conveying systems, the most efficient vibration exciter is the vector-control electromagnetic linear DC drive.

Key words: vibrating conveying systems, angular frequency and amplitude of vibrations, electromagnetic vibration exciter, energy efficiency.

DOI: 10.25018/0236-1493-2018-1-0-126-132

AUTHORS

Afanasiev A.I.¹, Doctor of Technical Sciences,
Professor, e-mail: 2c1@inbox.ru,

Suslov D.N.¹, Candidate of Technical Sciences,
e-mail: 2c1@inbox.ru,

¹ Ural State Mining University,
620144, Ekaterinburg, Russia.

REFERENCES

1. *Obogatitel'noe oborudovanie: Otrazlevoy katalog 18-2-82*. Ch. 2 (Mineral processing equipment. Industry directory 18-2-82, part 2), Moscow, TsNIITEltyazhmash, 1982, 103 p.
2. Spivakovskiy A. O., Goncharevich I. F. *Vibratsionnye konveyery, pitateli i vspomogatel'nye ustroystva* (Vibrating conveyors, feeders and accessories), Moscow, Mashinostroenie, 1972, 326 p.
3. Goncharevich I. F., Frolov K. V. *Teoriya vibratsionnoy tekhniki i tekhnologii* (Theory of vibration of engineering and technology), Moscow, Nauka, 1981, 320 p.
4. Dmitriev V. N., Gorbunov A. A. *Izvestiya Samarskogo nauchnogo tsentra Rossiyskoy akademii nauk*. 2009, vol. 11, no 3.
5. Antipov V. I., Efremenkov E. E., Ruin A. A., Subbotin K. Yu. *Steklo i keramika*. 2007, no 5, pp. 13–16.
6. D'yakonova V. Ya., Kosolapova S. A., Kalinovskaya T. G. *Sovremennye tekhnologii osvoeniya mineral'nykh resursov: sbornik materialov 7-y Mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii*. Pod red. V. E. Kislyakova. Ch. 1 (Modern technologies of mineral resources development. Proceedings of the 7th International scientific and technical conference. Kislyakov V. E. (Ed.), part 1), Krasnoyarsk, IPK SFU, 2009, pp. 220–225.
7. Afanas'ev A. I., Mal'tsev V. A., Andryushenkov D. N., Lagunov D. V., Chirkova A. A. *Izvestiya vuzov. Gornyy zhurnal*. 2011, no 3, pp. 27–29.
8. Afanas'ev A. I., Zakamennykh A. Yu., Chirkova A. A., Andryushenkov D. N. *Gornoe oborudovanie i elektromekhanika*. 2010, no 8, pp. 55–56.
9. Bağ L., Noga S., Skrzat A., Stachowicz F. *Dynamic analysis of vibrating screener system*. To cite this article: Bak et al 2013 J. Phys.: Conf. Ser. 451 012028.

10. James F. Sullivan. *Screening Theory and Practice*. March 20, 2013, published by Triple/S Dynamics. www.sssdynamics.com/resources/screening-theory.

FIGURES

Fig. 1. A graph of driving pulse of the induction motor from the current and time of flow in the winding.

Fig. 2. A graph of driving pulse electromagnetic motor with capacitor energy storage of current and time.

Fig. 3. A graph of driving pulse of the electromagnetic motor from the current and time of flow in the winding.

TABLES

The results of experiments with linear driven motors.



ОТДЕЛЬНЫЕ СТАТЬИ ГОРНОГО ИНФОРМАЦИОННО-АНАЛИТИЧЕСКОГО БЮЛЛЕТЕНЯ (СПЕЦИАЛЬНЫЙ ВЫПУСК)

РОЛЬ РУКОВОДИТЕЛЯ И ПЕРСОНАЛА В ОБЕСПЕЧЕНИИ БЕЗОПАСНОСТИ ПРОИЗВОДСТВА

(2017, № 6, СБ 10, 48 с.)

Коллектив авторов

Руководство СУЭК намерено глубоко разобраться в природе, причинах и механизмах травмирования людей на предприятиях, разработать и освоить систему деятельности, которая позволит уйти даже от редких случаев тяжелого и смертельного травмирования работников. В системах организации производства, труда и управления безопасностью решающую роль играет человеческий фактор. Человеческий фактор имеет позитивное проявление, если воздействие человека на процесс снижает опасности или поддерживает процесс на высоком (приемлемом) уровне безопасности и эффективности, и негативное, если увеличивает опасности и снижает эффективность. Необходимо понимать: почему люди поступают не так, как требуется для качественного исполнения функций и операций, и какова в этом роль руководителя, специалиста, работника. В брошюре представлен поход к организации безопасного производства на основе управления человеческим фактором. Приведены результаты опроса руководителей производственных единиц на тему: «Зачем и почему заставляем свой персонал работать безопасно».

Ключевые слова: руководитель, персонал, безопасность производства, производственная система, организация, человеческий фактор, ответственность, установка, квалификация, нарядная система, риск, опасная производственная ситуация.

ROLE OF MANGER AND PERSONNEL IN INDUSTRIAL SAFETY MAINTENANCE

Management of SUEK company intends to get to the core in understanding the nature, causes and mechanisms of industrial injuries, and to develop and introduce a management system such that to eliminate even rare occurrences of severe and fatal injuries. In the systems of the production, labor and safety management and control, a major part belongs to the human factor. The human factor has a positive effect when the influence of a man on a process abates hazard or allows maintaining the process on a high (admissible) level of safety and efficiency, or it produces a negative effect if hazard increases and efficiency decreases. It is required to understand why people act otherwise than is necessary for qualitative performance and operation and what is the role of a manager, a specialist and an employee?

This booklet presents an approach to the arrangement of safe production based on the human factor management. The findings of the interview of the heads of production units on the topic: «Wherefore and why do we encourage employees to work safely?» are described.

Key words: manager, personnel, industrial safety, production system, arrangement, human factor, responsibility, installation, qualification, system of orders, risk, industrial hazard.