

А.А. ЧЕРНО, канд. техн. наук, доц. кафедры компьютеризированных систем управления, НУК, Николаев;
А.П. ГУРОВ, канд. техн. наук, проф. кафедры автоматики, НУК, Николаев

ОПТИМИЗАЦИЯ ЧАСТОТЫ КОЛЕБАНИЙ ВИБРАЦИОННЫХ УСТАНОВОК С ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫМ ПРИВОДОМ ПО КРИТЕРИЮ МАКСИМУМА КПД

Введение. В современной промышленности для обеспечения многих технологических процессов широкое применение нашли вибрационные установки. К таким процессам относятся: вибрационное уплотнение бетонных смесей, вибрационное транспортирование, сепарация и многие другие [1]. Из известных видов вибрационных приводов наиболее перспективным является электромагнитный привод, обладающий такими преимуществами, как высокая надежность, большой рабочий ресурс, высокий коэффициент полезного действия (КПД) при работе в околорезонансном режиме, простота управления амплитудой колебаний, возможность создавать вибрации с частотами выше 100 Гц [3]. Устойчивая работа электромагнитного вибрационного привода в режиме, близком к резонансному, обеспечивается путем автоматического управления его частотой и амплитудой [7]. При этом частота должна выбираться из условия максимальной энергетической эффективности. Поэтому, актуальной задачей является определение частот, обеспечивающих максимальный КПД электромагнитного привода вибрационных установок.

Анализ последних исследований. В работе [6] путем численного моделирования проведены исследования энергетических характеристик управляемого электромагнитного вибрационного привода при варьировании частотой тока в обмотке вибратора, а также определена оптимальная частота, обеспечивающая максимум КПД. Этот результат может быть использован только для фиксированных параметров привода, рассмотренного в [6] в качестве примера.

Целью данной работы является получение регрессионной модели, позволяющей определять оптимальную по критерию максимума КПД частоту электромагнитного вибрационного привода для разных значений его параметров.

Материал исследования. Возьмем за основу вибрационный привод, рассмотренный в [6]. Он включает в себя электромагнитный вибратор и преобразователь частоты. Вибратор состоит из двух одинаковых электромагнитов, каждый из которых содержит U-образные сердечник и якорь с размещенной на них 4-хсекционной обмоткой. Магнитопровод изготовлен из шихтованной электротехнической стали 3413, толщина листа 0,35 мм. Сердечники жестко закреплены на неподвижной части вибратора, а якоря – на подвижной. Обмотки электромагнитов подключены параллельно. Основные параметры вибратора: b_m – ширина магнитопровода; h_m – толщина магнитопровода; H_{core} – высота сердечника; H_{anchor} – высота якоря; b_{pole} – ширина полюса; δ_0 – начальная величина воздушного зазора; W – число витков обмотки; R – активное сопротивление обмотки; n_{el} – число электромагнитов; c – жесткость упругой связи между подвижной и неподвижной частью; b_{spr} – коэффициент вязкого трения в пружинах вибратора; X_n – номинальная амплитуда относительных колебаний подвижной и неподвижной части; $P_{out,n}$ – номинальная выходная мощность. Значения параметров приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Параметры электромагнитного вибратора

b_m , мм	h_m , мм	H_{core} , мм	H_{anchor} , мм	b_{pole} , мм	δ_0 , мм	W	R , Ом	n_{el}	c , МН/м	b_{spr} , Н/(м/с)	X_n , мм	$P_{out,n}$, Вт
89	50	71	58	24	1,8	800	2,8	2	10	100	1	250

Преобразователь частоты включает в себя однофазный диодный выпрямитель, дроссель и однофазный инвертор, состоящий из 4-х транзисторов IGBT, включенных по мостовой схеме. Основные параметры преобразователя: f_{PWM} – частота сигнала широтно-импульсной модуляции; E_{on} , E_{off} и E_{rec} – потери энергии соответственно при открытии, закрытии транзистора и восстановлении встречного диода при стандартных значениях тока и напряжения I_{st} и U_{st} , приведенных в справочнике; U_{CE} – прямое падение напряжения на открытом транзисторе; U_{IF} – прямое падение напряжения на встречном диоде инвертора; U_{RF} – прямое падение напряжения на диоде выпрямителя; R_f – активное сопротивление обмотки дросселя. Значения параметров преобразователя частоты приведены в таблице 2.

Кроме перечисленных параметров электромагнитного привода, для расчета его энергетических характеристик необходимо также знать резонансную частоту виброустановки ω_r и частоту вибрации ω , которая в данной задаче является оптимизируемой величиной. Для рассматриваемой колебательной системы $\omega_r = 278$ рад/с

© А.А. Черно, А.П. Гуров, 2015

(44,3 Гц).

Таблица 2 – Параметры преобразователя частоты

f_{PWM} , кГц	E_{on} , мкДж	E_{off} , мкДж	E_{rec} , мкДж	I_{st} , А	U_{st} , В	U_{CE} , В	U_{IF} , В	U_{RF} , В	R_r , Ом
8	390	150	35	10	400	1,75	1,9	0,8	0,2

Для упрощения задачи, в качестве оптимизируемой величины будем рассматривать не абсолютное значение частоты ω , а относительную частоту $\omega^* = \omega/\omega_r$. В работе [6] показано, что оптимальная частота отличается от резонансной ($\omega_{opt}^* < 1$), а ее значение зависит от величины выходной мощности P_{out} . Для того, чтобы из упомянутых выше параметров выделить факторы, которые также влияют на величину ω_{opt}^* , проанализируем физические явления, которые вызывают несоответствие между резонансной и оптимальной частотами.

На рис. 1 приведены временные диаграммы электромагнитной силы F , величины воздушного зазора δ и тока в обмотке I для частот $0,95\omega_r$ и ω_r , рассчитанные с помощью динамической модели, описанной в [5]. На частоте $0,95\omega_r$ амплитуда электромагнитной силы больше, чем при резонансе, но отставание относительного перемещения от силы по фазе – меньше. Поэтому, максимальным значениям силы на частоте $0,95\omega_r$ соответствуют значения воздушного зазора $\delta = 1$ мм, а на резонансной частоте – $\delta = 1,5$ мм. При меньшей величине зазора большее значение электромагнитной силы может быть получено при меньшей МДС, и, следовательно, при меньших потерях мощности. Поэтому, при уменьшении частоты вниз от резонансной, наблюдается увеличение КПД электромагнитного привода, обнаруженное в [6].

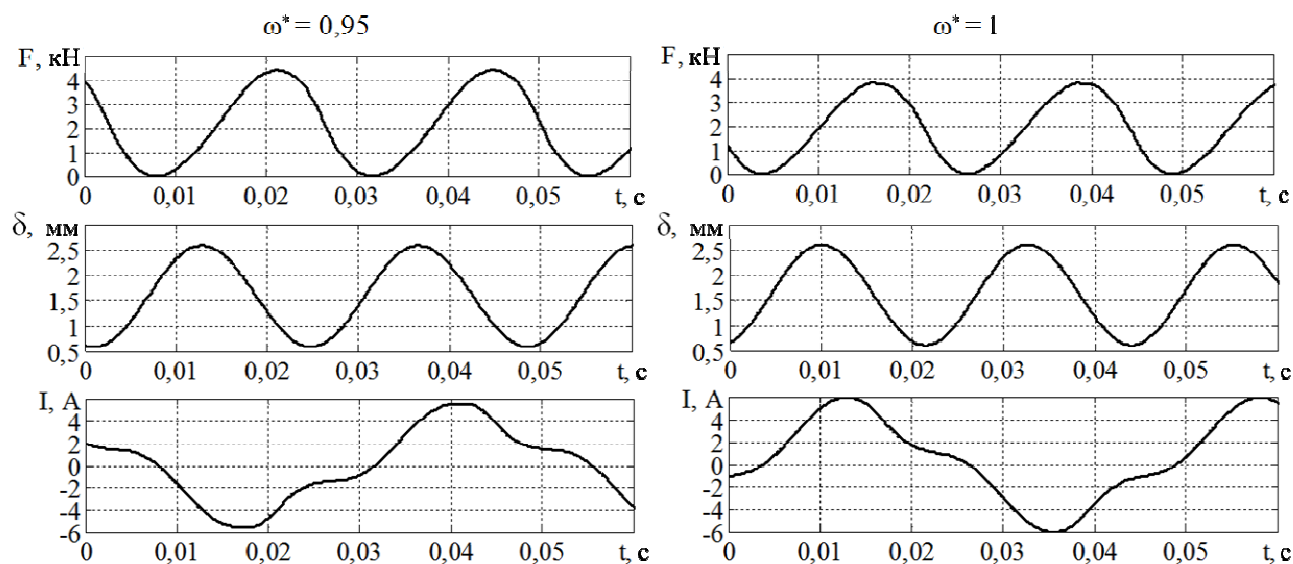


Рис. 1 Временные диаграммы электромагнитной силы, воздушного зазора и тока в обмотке вибратора

Таким образом, смещение оптимальной частоты в дорезонансную область обусловлено изменением величины воздушного зазора во времени. Следовательно, величина ω_{opt}^* зависит от факторов, оказывающих непосредственное влияние на пределы изменения воздушного зазора и на его фазу относительно электромагнитной силы. Этими факторами являются: жесткость пружин вибратора c , начальная величина воздушного зазора δ_0 , амплитуда относительных колебаний якоря и сердечника X и выходная мощность P_{out} .

Поскольку величина δ_0 выбирается в зависимости от требуемой амплитуды X , эти два фактора нельзя считать независимыми. Поэтому, вместо δ_0 будем рассматривать величину $\delta'_0 = \delta_0 - X$.

Составим матрицу планирования численного эксперимента в соответствии с ортогональным планом второго порядка [2]. Для этого введем кодированные факторы $x_0, x_1, \dots, x_{14}$, связанные с величинами c , δ'_0 , X , P_{out} и между собой уравнениями:

$$\begin{aligned}
 x_1 &= \frac{c}{2 \cdot 10^6 \text{ Н}} - 4; \quad x_2 = \frac{\delta'_0}{0,2 \cdot 10^{-3} \text{ м}} - 5; \quad x_3 = \frac{X}{0,2 \cdot 10^{-3} \text{ м}} - 6; \quad x_4 = \frac{P_{out}}{62,5 \text{ Вт}} - 3; \\
 x_5 &= x_1^2 - 0,8; \quad x_6 = x_2^2 - 0,8; \quad x_7 = x_3^2 - 0,8; \quad x_8 = x_4^2 - 0,8; \\
 x_9 &= x_1 x_2; \quad x_{10} = x_1 x_3; \quad x_{11} = x_1 x_4; \quad x_{12} = x_2 x_3; \quad x_{13} = x_2 x_4; \quad x_{14} = x_3 x_4.
 \end{aligned}$$

Фактор $x_0 = 1$.

Матрица планирования эксперимента приведена в таблице 3 (столбцы 6 – 20).

Таблица 3 – Значения факторов и результаты полного факторного эксперимента

№, МН/	δ'_0 , мм	X, мм	P_{out} , Вт	x_0	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	x_6	x_7	x_8	x_9	x_{10}	x_{11}	x_{12}	x_{13}	x_{14}	ω_{opt}^*	$\bar{\omega}_{opt}^*$	$\Delta\omega_{opt}^*$
1	6	0,8	1	125	1	-1	-1	-1	-1	0,2	0,2	0,2	0,2	1	1	1	1	1	0,929	0,932	0,003
2	10	0,8	1	125	1	1	-1	-1	-1	0,2	0,2	0,2	0,2	-1	-1	-1	1	1	0,966	0,964	0,002
3	6	1,2	1	125	1	-1	1	-1	-1	0,2	0,2	0,2	0,2	-1	1	1	-1	-1	0,954	0,953	$7 \cdot 10^{-4}$
4	10	1,2	1	125	1	1	1	-1	-1	0,2	0,2	0,2	0,2	1	-1	-1	-1	-1	0,975	0,973	0,002
5	6	0,8	1,4	125	1	-1	-1	1	-1	0,2	0,2	0,2	0,2	1	-1	1	-1	1	0,964	0,958	0,006
6	10	0,8	1,4	125	1	1	-1	1	-1	0,2	0,2	0,2	0,2	-1	1	-1	-1	1	0,98	0,987	0,007
7	6	1,2	1,4	125	1	-1	1	1	-1	0,2	0,2	0,2	0,2	-1	-1	1	1	-1	0,97	0,97	$7 \cdot 10^{-5}$
8	10	1,2	1,4	125	1	1	1	1	-1	0,2	0,2	0,2	0,2	1	1	-1	1	-1	0,984	0,986	0,002
9	6	0,8	1	250	1	-1	-1	-1	1	0,2	0,2	0,2	0,2	1	1	-1	1	-1	0,926	0,922	0,004
10	10	0,8	1	250	1	1	-1	-1	1	0,2	0,2	0,2	0,2	-1	-1	1	1	-1	0,959	0,96	0,001
11	6	1,2	1	250	1	-1	1	-1	1	0,2	0,2	0,2	0,2	-1	1	-1	-1	1	0,956	0,95	0,006
12	10	1,2	1	250	1	1	1	-1	1	0,2	0,2	0,2	0,2	1	-1	1	-1	1	0,972	0,976	0,004
13	6	0,8	1,4	250	1	-1	-1	1	1	0,2	0,2	0,2	0,2	1	-1	-1	-1	-1	0,924	0,927	0,003
14	10	0,8	1,4	250	1	1	-1	1	1	0,2	0,2	0,2	0,2	-1	1	1	-1	-1	0,963	0,962	$8 \cdot 10^{-4}$
15	6	1,2	1,4	250	1	-1	1	1	1	0,2	0,2	0,2	0,2	-1	-1	-1	1	1	0,945	0,946	$8 \cdot 10^{-4}$
16	10	1,2	1,4	250	1	1	1	1	1	0,2	0,2	0,2	0,2	1	1	1	1	1	0,971	0,969	0,002
17	5,172	1	1,2	187,5	1	-1,414	0	0	0	1,2	-0,8	-0,8	-0,8	0	0	0	0	0	0,919	0,925	0,006
18	10,83	1	1,2	187,5	1	1,414	0	0	0	1,2	-0,8	-0,8	-0,8	0	0	0	0	0	0,969	0,964	0,005
19	8	0,717	1,2	187,5	1	0	-1,414	0	0	-0,8	1,2	-0,8	-0,8	0	0	0	0	0	0,948	0,947	0,001
20	8	1,283	1,2	187,5	1	0	1,414	0	0	-0,8	1,2	-0,8	-0,8	0	0	0	0	0	0,964	0,966	0,002
21	8	1	0,917	187,5	1	0	0	-1,414	0	-0,8	-0,8	1,2	-0,8	0	0	0	0	0	0,947	0,951	0,004
22	8	1	1,483	187,5	1	0	0	1,414	0	-0,8	-0,8	1,2	-0,8	0	0	0	0	0	0,968	0,965	0,003
23	8	1	1,2	99,11	1	0	0	0	-1,414	-0,8	-0,8	-0,8	1,2	0	0	0	0	0	0,978	0,977	0,001
24	8	1	1,2	275,9	1	0	0	0	1,414	-0,8	-0,8	-0,8	1,2	0	0	0	0	0	0,955	0,957	0,002
25	8	1	1,2	187,5	1	0	0	0	0	-0,8	-0,8	-0,8	-0,8	0	0	0	0	0	0,956	0,954	0,002

Для каждой из 25 комбинаций значений факторов с помощью вычислительной программы, основанной на динамической модели, предложенной в [5], и формулах, приведенных в [6], были рассчитаны значения КПД электромагнитного вибрационного привода η при разных значениях частоты. Путем интерполяции полученных зависимостей определены непрерывные функции $\eta_i(\omega^*)$, где i – номер опыта (№ строки в таблице 3). Для каждой из полученных функций была выделена область, где находится максимум и отсутствуют другие экстремумы, и в этой области методом половинного деления решено уравнение

$$\frac{d\eta_i}{d\omega^*} = 0.$$

В результате были получены оптимальные значения частоты ω_{opt}^* , приведенные в таблице 3 (21-й столбец).

Для получения регрессионной модели выполним аппроксимацию зависимости ω_{opt}^* от факторов методом наименьших квадратов. Согласно [2], коэффициенты аппроксимирующей функции определяются выражениями:

$$b_j = \frac{\sum_{i=1}^N (x_j)_i \omega_{opt_i}^*}{\sum_{i=1}^N (x_j)_i^2},$$

где $j = 0..m-1$; $m=15$ – число кодированных факторов; $N = 25$ – число опытов. Полученные коэффициенты (табл. 4) отражают степень влияния каждого фактора x_j на функцию отклика ω_{opt}^* .

Таблица 4 – Коэффициенты аппроксимирующей функции

b_0	b_1	b_2	b_3	b_4	b_5	b_6	b_7	b_8	b_9	b_{10}	b_{11}	b_{12}	b_{13}	b_{14}
$\times 10^{-3}$														
957,7	13,64	6,931	4,685	-6,926	-4,95	1,05	1,8	6,3	-3	-7,5	1,625	-2,375	1,75	-5,25

Уравнение регрессии:

$$\hat{\omega}_{\text{opt}}^*(x_1, x_2, \dots, x_{m-1}) = \sum_{j=0}^{m-1} b_j x_j. \quad (1)$$

Значения аппроксимирующей функции в точках проведения численного эксперимента приведены в таблице 3 (22-й столбец). Сравнив их со значениями функции отклика ω_{opt}^* , определим абсолютные погрешности:

$$\Delta \omega_{\text{opt}}^* = \left| \omega_{\text{opt}}^* - \hat{\omega}_{\text{opt}}^* \right|.$$

По приведенным в таблице 3 значениям $\Delta \omega_{\text{opt}}^*$ видно, что если определять относительную частоту по уравнению (1), она будет отличаться от оптимальной не более, чем на 0,007. При этом КПД уменьшится не более, чем на $3,7 \cdot 10^{-3}$.

Оценить адекватность полученной регрессионной модели можно также, определив множественный коэффициент детерминации [4]:

$$R_d^2 = \frac{\sum_{i=1}^N \left(\omega_{\text{opt}_i}^* - \bar{\omega}_{\text{opt}}^* \right)^2}{\sum_{i=1}^N \left(\omega_{\text{opt}_i}^* - \bar{\omega}_{\text{opt}}^* \right)^2} = 0,961,$$

где $\bar{\omega}_{\text{opt}}^*$ – среднее значение функции отклика:

$$\bar{\omega}_{\text{opt}}^* = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \omega_{\text{opt}_i}^* = 0,958.$$

Полученное значение коэффициента детерминации показывает, что построенная регрессионная модель учитывает 96,1% изменений оптимальной частоты, вызванных рассматриваемыми факторами.

Выводы. Оптимальное значение частоты колебаний вибрационной установки с электромагнитным приводом по критерию максимума КПД зависит от жесткости пружин вибратора, начальной величины воздушного зазора, амплитуды относительных колебаний якоря и сердечника, а также от выходной мощности привода. Полученная регрессионная модель позволяет определить оптимальную частоту в зависимости от перечисленных факторов, поэтому она может быть использована при управлении частотой электромагнитного вибрационного привода с целью обеспечения его максимальной энергетической эффективности.

Список литературы: 1. Вибрации в технике: Справочник: в 6-ти т. – М.: Машиностроение, 1981. – Т. 4: Вибрационные процессы и машины / Под ред. Э.Э. Лавендела, 1981. – 509 с. 2. Ивоботенко Б.А., Ильинский Н.Ф., Копылов И.П. Планирование эксперимента в электромеханике. – М.: Энергия, 1975. – 184 с. 3. Ланець О.С. Високоєфективні міжрезонансні вібраційні машини з електромагнітним приводом (Теоретичні основи та практика створення): Монографія. – Львів: Видавництво Національного університету "Львівська політехніка", 2008. – 324 с. 4. Монтгомери Д.К. Планирование эксперимента и анализ данных. – Ленинград: Судостроение, 1980. – 384 с. 5. Черно А.А. Динамическая модель электромагнитного вибрационного привода // Технічна електродинаміка. – 2014. – №2. – С. 37 – 43. 6. Черно А.А., Монченко М.Ю. Исследование энергетических характеристик электромагнитного вибрационного привода // Матеріали Всеукраїнської науково-технічної конференції з міжнародною участю "Сучасні проблеми автоматики та електротехніки", Миколаїв: НУК, 2015, Інтернетресурс: <http://conference.nuos.edu.ua>. 7. Chernov, A.A. "Control of Resonant Electromagnetic Vibrational Drive Using a Digital Filtering Algorithm Based on Discrete Fourier Transform", *Journal of Automation and Information Sciences*, Vol. 46, Issue 7. 2014, pp. 53 – 68.

Bibliography (transliterated): 1. Lavendel, E.E. *Vibratsii v tekhnike: Spravochnik*. V 6-ti t., T. 4: *Vibratsionnyye protsessy i mashiny*, Mashinostroyeniye, Moscow, USSR, 1981. Print. 2. Ivobotenko, B.A., Ilyinskiy, N.F. and Kopylov, I.P. *Planirovaniye eksperimenta v elektromekhanike*, Energiya, Moscow, 1975. Print. 3. Lanets, A. *Vysokoeffektivni mizhrezonansni vibratsiini mashyny z elektromagnitnym pryvodom (Teoretychni osnovy ta praktyka stvorennia): Monohrafiya*, Lviv: NULP, 2008. Print. 4. Montgomery, D.K. *Planirovaniye eksperimenta i analiz dannykh*, Sudostroyeniye, Leningrad, 1980. Print. 5. Chernov, A.A. "Dinamicheskaya model elektromagnitnogo vibratsionnogo privoda", *Tekhnichna elektrodynamika*, Vol. 2, 2014, pp. 37 – 43. Print. 6. Chernov, A.A., Monchenko, M.J. "Issledovaniye energeticheskikh kharakteristik elektromagnitnogo vibratsionnogo privoda." *Materialy Vseukrainskoi naukovo-tekhnichnoi konferentsii z mizhnarodnoiu uchastiu "Suchasni problemy avtomatyky ta elektrotekhniki"*, Mykolayiv, NUOS, 2015, <http://conference.nuos.edu.ua>. 7. Chernov, A.A. "Control of Resonant Electromagnetic Vibrational Drive Using a Digital Filtering Algorithm Based on Discrete Fourier Transform", *Journal of Automation and Information Sciences*, Vol. 46, Issue 7. 2014, pp. 53 – 68. Print.

Поступила (received) 27.08.2015