

УДК 621.313.33.001.1

DOI: 10.24160/1993-6982-2020-1-62-66

Резонансный электромагнитный вибровозбудитель колебаний с обратной связью

М.И. Ибадуллаев, А.К. Нуралиев, А.Ж. Есенбеков, А.И. Назаров

Ряд современных технологических процессов может быть значительно интенсифицирован за счет использования вибровоздействий с широким диапазоном частот и амплитуд колебаний. Наиболее эффективным источником вибрации во многих случаях являются электромагнитные вибровозбудители (ЭМВВ).

Непосредственное преобразование электрической энергии в механическую энергию колебаний открывает возможность создания устройств, управляемых электрическими методами. Однако колебательные процессы в цепях с электромагнитными вибровозбудителями (применительно к вибрационной технике) мало изучены. Это объясняется сложностью воздействий нелинейности электромагнитов вибровозбудителей и источника питания на вибрационные процессы, т. е. нелинейной зависимостью амплитуды и фазы вибрации от параметров системы нелинейного характера изменения индуктивности от перемещения якоря.

Результаты теоретических и экспериментальных исследований колебательных электромеханических систем (ЭМС), построенных на основе ЭМВВ с обратной связью, разработка методов анализа резонансных схем ЭМВВ с целью получения оптимальных характеристик в режимах низкочастотных колебаний (НЧК) демонстрируют возможности экономичного потребления электрической энергии и производительности ЭМВВ, используемых в различных отраслях промышленности. Введение обратной связи управляющей частоты и величин амплитуд выходного напряжения источника, питающего ЭМВВ, позволяет автоматически подстраивать частоту вибрации к частоте резонанса упруго подвешенного грузонесущего органа ЭМВВ таким образом, чтобы амплитуды виброскорости, а, следовательно, и производительности оставались неизменными.

Для обеспечения устойчивого резонансного режима электромагнитного вибрационного возбудителя проанализированы напряжения, пропорциональные по фазе между выходным напряжением инвертора и скоростью перемещения грузонесущего органа.

Результаты исследования показали, что за счет воздействия обратной связи, по фазе меняющей задающую частоту в направлении настройки на резонанс, можно обеспечить рациональный режим работы ЭМВВ.

Ключевые слова: вибровозбудитель, электромагнит, перемещение, амплитудно-частотные, фазочастотные и низкочастотные автоколебания, грузонесущий орган.

Для цитирования: Ибадуллаев М.И., Нуралиев А.К., Есенбеков А.Ж., Назаров А.И. Резонансный электромагнитный вибровозбудитель колебаний с обратной связью // Вестник МЭИ. 2020. № 1. С. 62—66. DOI: 10.24160/1993-6982-2020-1-62-66.

A Resonant Electromagnetic Vibration Exciter of Oscillations with a Feedback

M.I. Ibadullaev, A.K. Nuraliev, A.Zh. Esenbekov, A.I. Nazarov

A number of modern technological processes can be significantly intensified due to the use of vibrations with a wide range of oscillation frequencies and amplitudes. In many cases, electromagnetic vibration exciters (EMVE) can serve as the most effective vibration source.

Direct conversion of electric energy into mechanical vibration energy opens the possibility for developing devices controlled by electrical methods. However, the oscillatory processes in the circuits containing electromagnetic exciters have been studied to an insufficient extent as applied to vibration engineering. This is connected with the complexity of the effects caused by the nonlinearity of vibration exciter electromagnets and power source on the vibration processes, i.e., a nonlinear dependence of the vibration amplitude and phase on the system parameters and a nonlinear dependence of inductance from the armature displacement.

The results from theoretical and experimental studies of oscillating electromechanical systems (EMC) built on the basis of an EMVE with feedback, and the development of methods for analyzing resonant EMVE circuits with a view to obtain the optimal characteristics in low-frequency oscillation modes (LFO) demonstrate the possibilities of economically efficient consumption of electric energy and the performance of the EMVEs used in different industry branches. With the introduction of feedback proportional to the control frequency and the output voltage amplitudes of the EMVE

power supply source, it becomes possible to automatically adjust the vibration frequency to the resonance frequency of the elastically suspended EMVE load-carrying member for maintaining constancy of vibration velocity amplitudes and, hence, the system performance.

To achieve a stable resonance operation mode of the electromagnetic vibration exciter, the voltage proportional in phase between the inverter output voltage and the load-carrying member motion speed are analyzed.

The study results have shown that, owing to the feedback effect that adjusts the driving frequency in phase toward tuning to resonance, a rational EMVE operation mode can be secured.

Key words: vibration exciter, electromagnet, displacement, amplitude-frequency, phase-frequency and low-frequency self-oscillations, load-carrying member.

For citation: Ibadullaev M.I., Nuraliev A.K., Esenbekov A.Zh., Nazarov A.I. A Resonant Electromagnetic Vibration Exciter of Oscillations with a Feedback. Bulletin of MPEI. 2020;1:62—66. (in Russian). DOI: 10.24160/1993-6982-2020-1-62-66.

Широкое применение вибрационных устройств различного технического назначения, требования эффективности и экономичности к их работе ведут к созданию методов проектирования вибрационных устройств, работающих в режимах, близких к оптимальным [1 — 4].

Управление и настройка реальных устройств в заданном режиме становятся легче при использовании электромагнитных вибровозбудителей, в которых сила и, следовательно, амплитуда колебаний меняются при изменении силы тока.

Как показали исследования, наиболее эффективны колебательные системы с обратной связью, воздействующей на источник питания таким образом, что частота его входного напряжения подстраивается в резонанс к частоте собственных колебаний силовой части [5 — 7].

При автоматическом поддержании резонансного режима увеличивается экономичность системы, благодаря уменьшению тока, потребляемого возбудителем вибрации. При этом решается вопрос выбора вида обратной связи (ОС) в неавтономных электромеханических системах (ЭМС). Известно, что только фаза между электромагнитной силой и перемещением рабочей части электромагнитного вибровозбудителя (ЭМВВ) имеет однозначную зависимость расстройки частоты колебаний ω от частоты собственных колебаний ω_0 [5, 8]. Зависимость же амплитуд скорости перемещения носит двужначный характер и является резонансной, поэтому данные параметры не используются для построения обратной связи в резонансных колебательных ЭМС. В реальных электрических схемах с ОС по фазе трудно получить сигнал, пропорциональный

электромагнитной силе, а сигнал, пропорциональный виброперемещению, получаемому тензодатчиками, обладает малой величиной. Следует выделить напряжение, пропорциональное фазе между выходным напряжением инвертора и скоростью перемещения грузонесущего органа ЭМВВ.

Одна из возможных схем, построенных по указанному принципу, показана на рис. 1.

Рассмотрим взаимодействие ее элементов. Частота колебаний ω в данной системе равна частоте выходного напряжения инвертора И, управляемого задающим генератором ЗГ, частота которого регулируется входным напряжением. Источник ЭДС E_0 постоянного напряжения подмагничивания для упрощения анализа включен последовательно с выходным напряжением $U_{\text{и}}$ инвертора. Под действием напряжения в магнитопроводе ЭМВВ возникает электромагнитная сила, возбуждающая колебания силовой части с частотой ω . Эти колебания передаются датчику скорости ДС, жестко укрепленному на рабочей части механизма. На выходе ДС образуется напряжение $U_{\text{дс}}$, пропорциональное скорости колебаний и усиливается усилителем $Y_{\text{АРУ}}$ с автоматической регулировкой коэффициента усиления. Амплитуда напряжения на выходе усилителя неизменна.

Выходное напряжение усилителя $U_{\text{осс}}$ суммируется сумматором С с выходным синусоидальным напряжением $U_{\text{осн}}$ задающего генератора ЗГ. Элементы схемы подобраны таким образом, что амплитуды обеих переменных напряжений равны по величине в любом режиме работы. Амплитуды синусоидальных напряжений сдвинуты относительно друг друга на некоторый угол

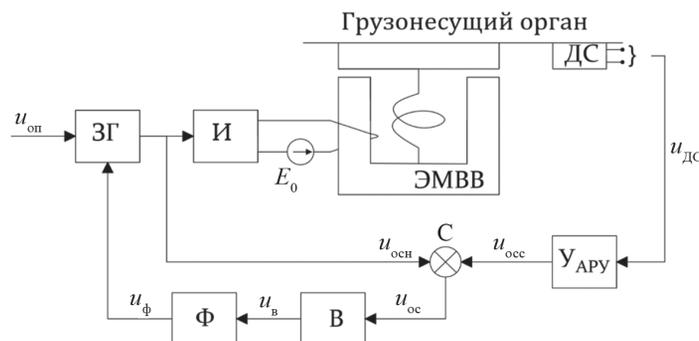


Рис. 1. Функциональная схема неавтономной ЭМС с ОС по фазе

γ . Мгновенное значение суммы напряжений определяется равенством:

$$U_{\text{осн}} = 2U_{\text{ос}} \cos\left(\frac{\gamma}{2}\right) \sin\left(\omega t + \frac{\gamma}{2}\right). \quad (1)$$

Напряжение $U_{\text{ос}}$ обратной связи, нелинейно зависящее от угла γ , выпрямляется двухполупериодным выпрямителем В и фильтруется RC-фильтром Ф (см. рис. 1). Постоянное напряжение с выхода фильтра подается вместе с опорным напряжением $U_{\text{оп}}$ на вход задающего генератора ЗГ для подстройки его частоты в резонанс с частотой собственных колебаний ω_0 . Синусоидальным напряжением выхода ЗГ управляет инвертор. Поскольку он имеет релейную передаточную характеристику, то входное синусоидальное напряжение преобразуется им в прямоугольное.

Уравнения ЭМВВ имеют следующий вид:

$$\frac{d\Psi}{dt} + \frac{R}{L(x)}\Psi = U_n \text{sign}\omega_b t + E_0; \quad (2)$$

$$M \frac{d^2 X}{dt^2} + \beta \frac{dX}{dt} + KX = (Xi), \quad (3)$$

где U_n — амплитуда выходного прямоугольного напряжения инвертора; R — активное сопротивление обмотки; $L(X)$ — индуктивность обмотки электромагнита; $\Psi = Li$ — потокосцепление; ω_b — частота колебаний ЭМВВ; t — время; E_0 — напряжение источника подмагничивания; M — масса колеблющейся части; X — перемещение подвижной массы; β — коэффициент трения; $F(X, i)$ — электромагнитная сила; i — ток, А; K — коэффициент упругости.

Индуктивность $L(X)$ зависит от перемещения X и приближено описывается аппроксимирующей функцией

$$L = \frac{L_0}{1 - m_L X/X_0}, \quad (4)$$

где L_0 — индуктивность в обмотке при $X = 0$; m_L — коэффициент аппроксимации; X_0 — зазор при обесточенной обмотке ЭМВВ.

Нелинейная система (2), (3) отражает функции ЭМВВ в установившемся режиме. Уравнения могут быть решены с помощью средств вычислительной техники. На практике данная система решается приближенным аналитическим методом, при этом результаты нелинейно зависят от параметров колебаний.

Для определения периодических режимов системы можно воспользоваться методом малого параметра Пуанкаре (1), (2), (4), приняв за малый параметр величину μ . На практике это всегда выполняется, поскольку активное сопротивление в цепи обмотки всегда меньше индуктивного.

Величина постоянного подмагничивания составляет порядка μ , так как в используемых устройствах $E_0/U_n < 1$.

Порождающие решения (2), (3) при учете постоянной составляющей и первой гармоники приложенного напряжения выглядят как:

$$\Phi = \lambda - \text{cost};$$

$$Y = P_0 \left[K_0 (0,5 + \lambda^2) - 2\lambda K_1 \cos(\tau + \theta_1) + \right. \\ \left. + 0,5 K_2 \cos(2\tau + \theta_2) \right];$$

$$Y = \frac{X}{X_0}; \quad \tau = \omega_b t; \quad \Phi = \frac{\pi \omega_b \Psi}{4U_n};$$

$$\delta = \frac{\beta}{M\omega_b}; \quad V_0^2 = \frac{K}{M\omega_b}; \quad \mu = \frac{R}{\omega_b L_0}; \quad (5)$$

$$e_0 = \frac{\pi E_0}{4U_n \mu \omega_b}; \quad P_0 = \frac{8m_L U_n^2}{\pi^2 L_0 X_0^2 M \omega_b^4};$$

$$K_0 = \frac{1}{V_0^2}; \quad K_1 = \frac{1}{\sqrt{(V_0^2 - 1)^2 + \delta^2}}; \quad \text{tg}\theta_1 = \frac{\delta}{1 - V_0^2};$$

$$K_2 = \frac{1}{\sqrt{(V_0^2 - 4) + 4\delta^2}}; \quad \text{tg}\theta_2 = \frac{4\delta}{4 - V_0^2};$$

Здесь λ характеризует величину постоянного подмагничивания и определяется из алгебраического уравнения первого приближения:

$$P_0 m_L K_0 \lambda^3 + (0,5 m_L P_0 K_0 + m_L P_0 K_1 \cos\theta_1 - 1)\lambda + e_0 = 0. \quad (6)$$

Уравнение (6) служит не только для определения постоянной составляющей магнитного потока, но и для поиска амплитуды основных колебаний на первой гармонике, согласно (5), где она входит в числитель в первой степени.

Анализ (2), (3), (6) показал, что при учете взаимодействия подсистем в определенной области частот возбуждения колебаний реализуются несколько периодических режимов. Главное отличие исследуемой системы от представленных ранее заключается в том, что устойчивость однозначных колебаний обеспечивается за счет воздействия обратной связи по фазе колебаний.

Экспериментально исследована неавтономная вибраторная система с разомкнутой обратной связью по фазе колебаний. На рисунке 2 представлена полученная зависимость скорости виброперемещений от частоты вынужденных колебаний $V = f(\omega_b)$ (графики 1 — 3) для различных значений колеблющейся массы $M_1 = 15,4$ кг, $M_2 = 6,6$ кг, $M_3 = 2,77$ кг. Зависимости показаны вместе с соответствующими амплитудно-частотными характеристиками (АЧХ) ЭМВВ.

Зависимость напряжения U_Φ носит нелинейный характер $U_\Phi = f(\omega_b)$ (графики 4 — 6, рис. 2). При частоте $\omega_b = \omega_0$ (резонансе) U_Φ имеет одну и ту же величину и не зависит от массы M и высоты максимума АЧХ.

Напряжение U_Φ , рассчитанное аналитически по (1), отличается от экспериментально полученного на 10...12%.

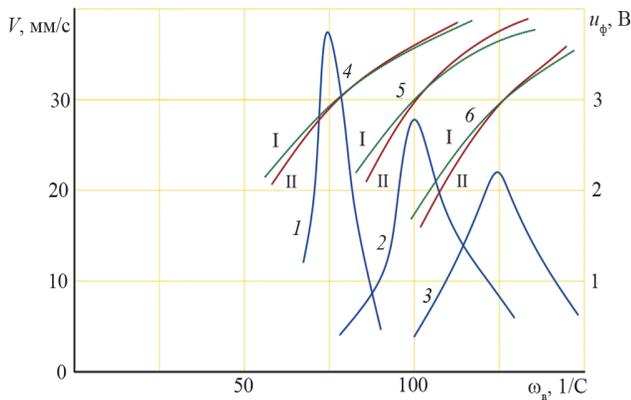


Рис. 2. Амплитудно-частотные характеристики ЭМВВ:
I — эксперимент; II — расчет

Литература

1. Ильин М.М., Колесников К.С., Саратов Ю.С. Теория колебаний. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2003.
2. Попов Е.Г. Теория нелинейных систем автоматического регулирования и управления. М.: Наука, 2011.
3. Исмаилов З.И., Халилов И.А. Исмаилов А.З. Исследование двухтактного вибровозбудителя в вынужденном режиме // Узбекский журнал проблем информатики и энергетики. 1994. № 6. С. 44—48.
4. Назаров А.И. Ибодуллаев М.И., Тилляходжаев М.М. Синтез корректирующих звеньев в системах управления электромагнитных вибровозбудителей // Вестник ТашГТУ. 2017. № 1. С. 58—62.
5. Назаров А.И., Ибодуллаев М.И., Тилляходжаев М.М. Структурная схема электромагнитного вибровозбудителя с амплитудно-частотным управлением // Журнал проблем энерго- и ресурсосбережения. 2016. № 3—4. С. 55—59.
6. Боголюбов Н.Н., Митропольский Ю.А. Асимптотический метод в теории нелинейных колебаний. М.: Наука, 2008.
7. Бессонов Л.А. Нелинейные электрические цепи. М.: Высшая школа, 1977.
8. Афанасьев А.И., Закаменных Ю.Г. Анализ энергозатрат резонансных вибротранспортных машин // Известия Вузов. Горный журнал. 2008. № 8. С. 101—106.
9. Антипов В.И., Ефременков Е.Е., Руин А.А., Субботин Ю.О. Повышение эффективности работы вибрационных механизмов за счет возбуждения низкочастотного резонансного режима колебаний // Стекло и керамика. 2007. № 5. С. 13—16.
10. Ланне А.А. Оптимальный синтез линейных электронных систем. М.: Связь, 2008.

Заключение

При учете взаимодействия подсистем ЭМВВ в определенной области частот возбуждения реализуется несколько периодических режимов. Отличие исследованной системы от рассмотренных [4, 5, 9, 10] заключается в том, что устойчивая однозначность механических колебаний в данном случае может быть обеспечена за счет воздействия обратной связи по фазе, меняющей задающую частоту в направлении настройки на резонанс. В результате исследования устройства:

- разработана адекватная математическая модель электромеханической системы резонансного электромагнитного вибровозбудителя колебаний с обратной связью;
- на основе метода малого параметра получено решение, сопоставлено с данными эксперимента и выполнен анализ режимов.

References

1. Il'in M.M., Kolesnikov K.S., Saratov Yu.S. Teoriya Kolebaniy. M.: Izd-vo MG TU im. N.E. Baumana, 2003. (in Russian).
2. Popov E.G. Teoriya Nelineynykh Sistem Avtomaticheskogo Regulirovaniya i Upravleniya. M.: Nauka, 2011. (in Russian).
3. Ismailov Z.I., Khalilov I.A. Ismailov A.Z. Issledovanie Dvukhtaktnogo Vibrovobuditelya v Vynuzhdennom Rezhime. Uzbekskiy Zhurnal Problem Informatiki i Energetiki. 1994;6:44—48. (in Russian).
4. Nazarov A.I. Ibodullaev M.I., Tillyakhodzhayev M.M. Sintez Korrektiruyushchikh Zven'ev v Sistemakh Upravleniya Elektromagnitnykh Vibrovobuditel'ey. Vestnik TashGTU. 2017;1:58—62. (in Russian).
5. Nazarov A.I., Ibadullaev M.I., Tillyakhodzhayev M.M. Strukturnaya Skhema Elektromagnitnogo Vibrovobuditelya s Amplitudno-chastotnym Upravleniem. Zhurnal Problem Energo- i Resursosberezheniya. 2016;3—4:55—59. (in Russian).
6. Bogolyubov N.N., Mitropol'skiy Yu.A. Asimptoticheskiy Metod v Teorii Nelineynykh Kolebaniy. M.: Nauka, 2008. (in Russian).
7. Bessonov L.A. Nelineynye Elektricheskie Tsepi. M.: Vysshaya Shkola, 1977. (in Russian).
8. Afanas'ev A.I., Zakamennykh Yu.G. Analiz Energozatrata Rezonansnykh Vibrotransportnykh Mashin. Izvestiya Vuzov. Gornyy Zhurnal. 2008;8:101—106. (in Russian).
9. Antipov V.I., Efremenkov E.E., Ruin A.A., Subbotin Yu.O. Povyshenie Effektivnosti Raboty Vibratsionnykh Mekhanizmov za Schet Vozbuzhdeniya Nizkochastotnogo Rezonansnogo Rezhima Kolebaniy. Steklo i Keramika. 2007;5:13—16. (in Russian).
10. Lanne A.A. Optimal'nyy Sintez Lineynykh Elektronnykh Sistem. M.: Svyaz', 2008. (in Russian).

Сведения об авторах:

Ибадуллаев Мухторхан — доктор технических наук, профессор кафедры электротехники Ташкентского государственного технического университета имени Ислама Каримова, Узбекистан, e-mail: ilider1987@yandex.com

Нуралиев Алмихан Калпакбаевич — кандидат технических наук, доцент кафедры автоматизации промышленных электроприводов Ташкентского института инженеров ирригации и механизации сельского хозяйства, Узбекистан

Есенбеков Азамат Жолдасбаевич — старший преподаватель кафедры электроэнергетики Каракалпакского государственного университета, Узбекистан

Назаров Алишер Имомназарович — магистрант Ташкентского государственного технического университета имени Ислама Каримова, Узбекистан

Information about authors:

Ibadullaev Mukhtorkhan — Dr.Sci. (Techn.), Professor of Electrical Engineering Dept., Tashkent State Technical University Named After Islam Karimov, Uzbekistan, e-mail: ilider1987@yandex.com

Nuraliev Almikhan K. — Ph.D. (Techn.), Assistant Professor of Automation of Industrial Electric Drives Dept., Tashkent Institute of Irrigation and Agricultural Mechanization Engineers, Uzbekistan

Esenbekov Azamat Zh. — Senior Lecturer of Electric Power Engineering Dept., Karakalpak State University, Uzbekistan

Nazarov Alisher I. — Master Student of Tashkent State Technical University Named After Islam Karimov, Uzbekistan

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов

Conflict of interests: the authors declare no conflict of interest

Статья поступила в редакцию: 13.03.2019

The article received to the editor: 13.03.2019