

УДК 537.868

DOI 10.46960/2658-6754_2021_1_83

ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЙ ВОЗБУДИТЕЛЬ НИЗКОЧАСТОТНЫХ МЕХАНИЧЕСКИХ КОЛЕБАНИЙ. ВОПРОСЫ ТЕОРИИ, МОДЕЛИРОВАНИЯ, РАЗРАБОТКИ И ПРИКЛАДНОЙ ЗНАЧИМОСТИ

И.Е. Туманов

Казахский национальный университет имени Аль-Фараби
Алматы, Республика Казахстан
isa.tumani56@mail.ru

Представлен электромагнитный возбудитель низкочастотных механических колебаний, в котором стандартная частота напряжения питания (50 Гц) на выходе трансформируется в низкочастотный диапазон механических колебаний за счет настройки параметров резонансного контура. Представлены результаты модельных экспериментов в среде *Matlab*. Описан принцип работы и структуры данного устройства, определен характер работы с несколькими видами преобразования энергии: электрической в магнитную и магнитной в механическую. Показано основное требование, предъявляемое к построенной модели – сохранение энергии и мощности при соответствующих преобразованиях. Построены физические модели всех модификаций электромагнитного возбудителя вибрационного типа. Модель представлена тремя составными частями: электрической, магнитной и механической.

Ключевые слова: вибродвигатель, вибропреобразователь, электромагнитный возбудитель низкочастотных механических колебаний.

Для цитирования: Туманов, И.Е. Электромагнитный возбудитель низкочастотных механических колебаний. Вопросы теории, моделирования, разработки и прикладной значимости // Интеллектуальная Электротехника. 2021. № 1. С. 83-92. DOI: 10.46960/2658-6754_2021_1_83

ELECTROMAGNETIC EXCITER OF LOW-FREQUENCY MECHANICAL VIBRATIONS. QUESTIONS OF THEORY, MODELING, DEVELOPMENT AND APPLICATION SIGNIFICANCE

I.E. Tumanov

Al-Farabi Kazakh National University
Almaty, Republic of Kazakhstan
isa.tumani56@mail.ru

Abstract. The article presents an electromagnetic exciter of low-frequency mechanical vibrations, in which the standard frequency of the supply voltage (50 Hz) at the output, is transformed into a low-frequency range of mechanical vibrations by adjusting the parameters of the resonant circuit. The results of model experiments in the Matlab environment are presented. The principle of operation and structure of this device is described and the nature of work with several types of energy conversion is determined: electrical into magnetic and magnetic into mechanical. The main requirement for the constructed model is shown - conservation of energy and power with appropriate transformations. According to the requirements, physical models of all modifications of an electromagnetic exciter of vibration type are built. The model is presented in three parts: electrical, magnetic and mechanical.

Keywords: electromagnetic exciter of low-frequency mechanical vibrations, vibration motor, vibration transducer.

For citation: I.E. Tumanov, “Electromagnetic exciter of low-frequency mechanical vibrations. questions of theory, modeling, development and application significance”, *Smart Electrical Engineering*, no. 1, pp. 83-92, 2021. DOI: 10.46960/2658-6754_2021_1_83

I. Введение

Электромагнитный возбуждатель низкочастотных механических колебаний (ЭМВ НЧК) представляет собой электромеханическую систему, состоящую из трех взаимосвязанных подсистем (электрической, магнитной и механической) (рис. 1).

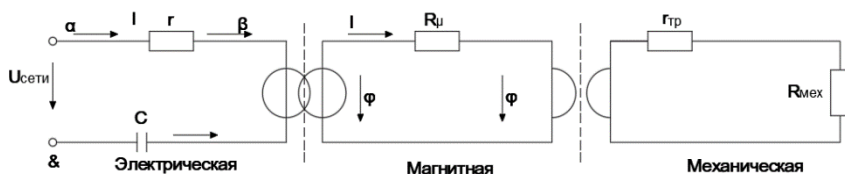


Рис. 1. Теоретико-цепная модель электромеханической системы

Fig. 1. Chain-theoretical model of an electromechanical system

Принципиальное отличие этого вида преобразователя заключается в том, что ЭМВ НЧК обеспечивает низкочастотный диапазон механических колебаний (параметр на выходе) якоря при высокочастотном диапазоне напряжения питания (параметр на входе). Основной причиной недостаточной информации о данном типе вибропреобразователя было предубеждение ученых и инженеров относительно опасности использования резонансных

явлений в силовых цепях в процессе эксплуатации и обслуживания. Впервые схема такого преобразователя была описана Ю.Е. Нитусовым в 1956 г. [1].

Целью исследования и моделирования является развитие основных теоретических положений и принципов функционирования вибропреобразователя на основе анализа его амплитудно- и фазочастотных характеристик и сопоставление с результатами моделирования. В основе функционирования ЭМВ НЧК заложена идея использования в электрической подсистеме «резонанса напряжений», обеспечивающего перепоступление энергии из одной подсистемы в другую и служащего в качестве инструмента преобразования высокочастотной составляющей активных параметров (напряжение питания, ток в цепи и магнитный поток) электрической подсистемы на входе в низкочастотную составляющую активного параметра (тяговое усилие электромагнита) механической подсистемы на выходе [2].

II. Принцип работы ЭМВ НЧК

Принцип работы (возвратно-поступательное движение за счет настраиваемости резонансного контура) и структура ЭМВ НЧК, состоящей из трех разнородных подсистем с несколькими видами преобразования энергии (электрической в магнитную и магнитной в механическую) представлен на рис. 2.

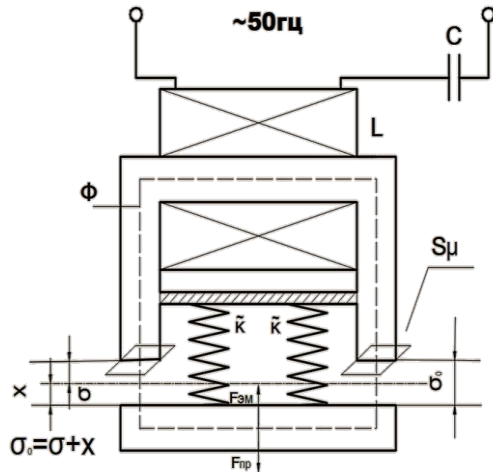


Рис. 2. Конструктивная схема ЭМВ НЧК в однофазном однократном исполнении

Fig. 2. Structural diagram of electromagnetic exciter of low-frequency mechanical vibrations in single-phase one-cycle execution

Особенностью механической характеристики вибропреобразователя (рис. 3) является условие наличия двузначности модулей $F_{эм}$ и $F_{пр}$ для меняющихся значений δ воздушного зазора в функции времени.

$$F_{\Sigma}(t) = F_{эм} + F_{пр}. \quad (1)$$

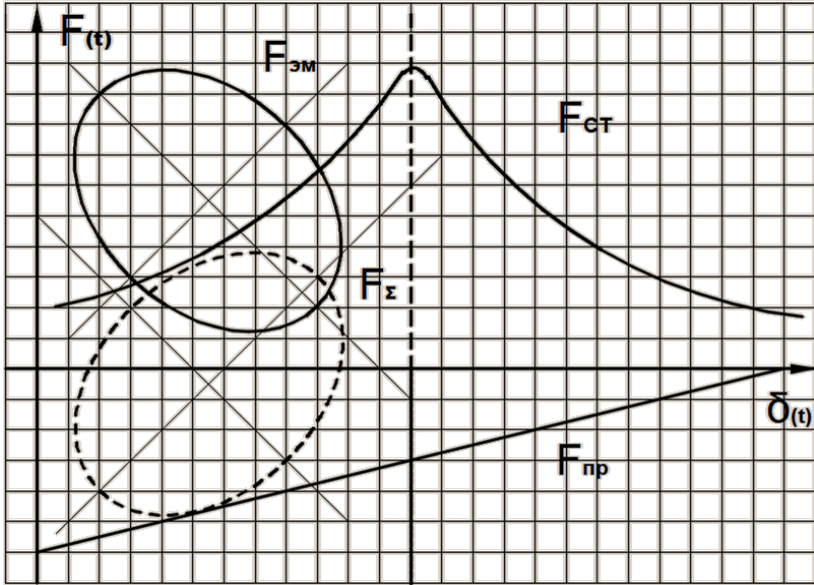


Рис. 3. Механическая характеристика ЭМВ НЧК

Fig. 3. Mechanical characteristics of electromagnetic exciter of low-frequency mechanical vibrations

Смысл овала $F_{эм}(t)$ состоит в том, что усилие $F_{\Sigma}(\delta)$ (рис. 3) для обеспечения колебаний якоря должно быть знакопеременным относительно оси абсцисс за цикл колебаний якоря. Это возможно лишь в том случае, если $F_{эм}(\delta)$ обладает двузначностью (чему и удовлетворяет вышеотмеченный овал), таким образом, F_{Σ} приобретает двузначность за счет формы кривой $F_{эм}(\delta)$. При этом модули $F_{эм}$ и $F_{пр}$ для меняющихся значений δ должны сопоставляться так, чтобы указанная двузначность реализовывалась [3].

Резонанс напряжений выполняет функцию «клапана», регулирующего перепоступление энергии из электрической подсистемы в электромагнитную подсистему, и далее в механическую (рис. 1 и 4). На рис. 4 показаны

временные характеристики активных входных параметров (напряжения питания, тока в цепи и магнитного потока), при этом в качестве выходной временной характеристики (тяговое усилие электромагнита) выступает огибающая синусоида модулированных амплитуд входных активных параметров.

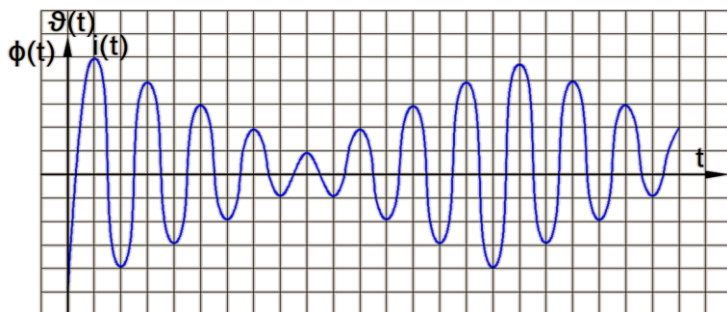


Рис. 4. Процесс биений и модуляции колебаний в вибропреобразователе

Fig. 4. The process of beating and modulation of vibrations in a vibration transducer

III. Анализ характеристик ЭМВ НЧК

Аналитические и модельные методы исследования определили необходимость анализа амплитудно-частотных характеристик вибропреобразователя в их взаимосвязи с фазочастотными характеристиками. Поэтому в [3] было исследовано влияние фазочастотных характеристик вибропреобразователя на режимные параметры функционирования ЭМВ НЧК и разработана научно обоснованная методика построения векторной диаграммы режимных параметров вибропреобразователя на базе расчетно-аналитических исходных экспериментальных данных во взаимосвязи входных и выходных активных параметров.

Векторная диаграмма (рис. 5) показывает, что чем меньше угол расхождения между вектором скорости и вектором тягового усилия электромагнита, тем меньше потери энергии и, соответственно – выше КПД вибропреобразователя. При этом вектор скорости – это тот же вектор перемещения, перпендикулярные друг другу ($\theta_v = \theta_x + 90^\circ$), а последний влияет на закон изменения воздушного зазора во времени:

$$\delta(t) = \delta_0 - X \cdot \sin(v \cdot t + \theta_x) = \delta_0 \cdot [1 - \beta \cdot \sin(v \cdot t + \theta_x)]; \quad (2)$$

$$\operatorname{tg}\theta_F = \frac{\Phi_{(k,-1)} \cdot \sin(\alpha_{(k,0)} - \alpha_{(k,-1)}) + \Phi_{(k,+1)} \cdot \sin(\alpha_{(k,+1)} - \alpha_{(k,0)})}{\Phi_{(k,-1)} \cdot \cos(\alpha_{(k,0)} - \alpha_{(k,-1)}) + \Phi_{(k,+1)} \cdot \cos(\alpha_{(k,+1)} - \alpha_{(k,0)})}, \quad (3)$$

где $\operatorname{tg}\theta_F$ – тангенс угла наклона вектора тягового усилия электромагнита, который определяется и зависит от расположения векторов комбинационных составляющих магнитных потоков [2].

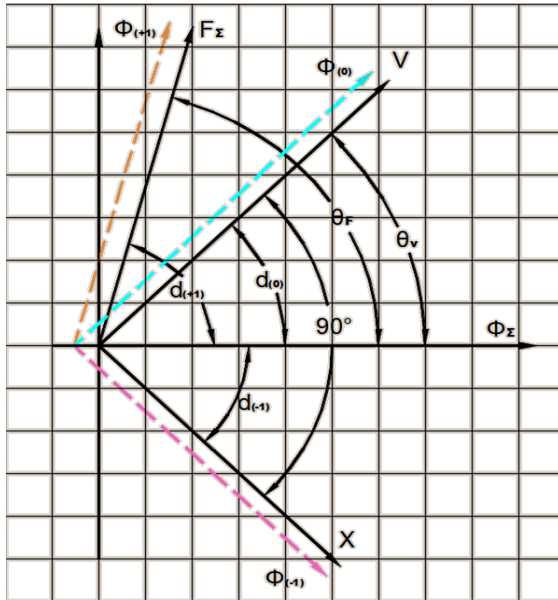


Рис. 5. Векторная диаграмма состояний режимных параметров электромеханической системы, построенная на основе расчетно-аналитических результатов

Fig. 5. Vector diagram of states of operating parameters of an electromechanical system, built on the basis of calculated and analytical results

IV. Результаты моделирования

Полученные в результате моделирования в Matlab осциллограммы активных параметров вибропреобразователя на входе и выходе (рис. 6,7) соответствуют теоретическим выкладкам модели вибропреобразователя, при этом данные по другим модификациям (двухтактный однофазный, трехфазный и с четырехсторонним воздействием на якорь) также аналогичны приведенным [4]:

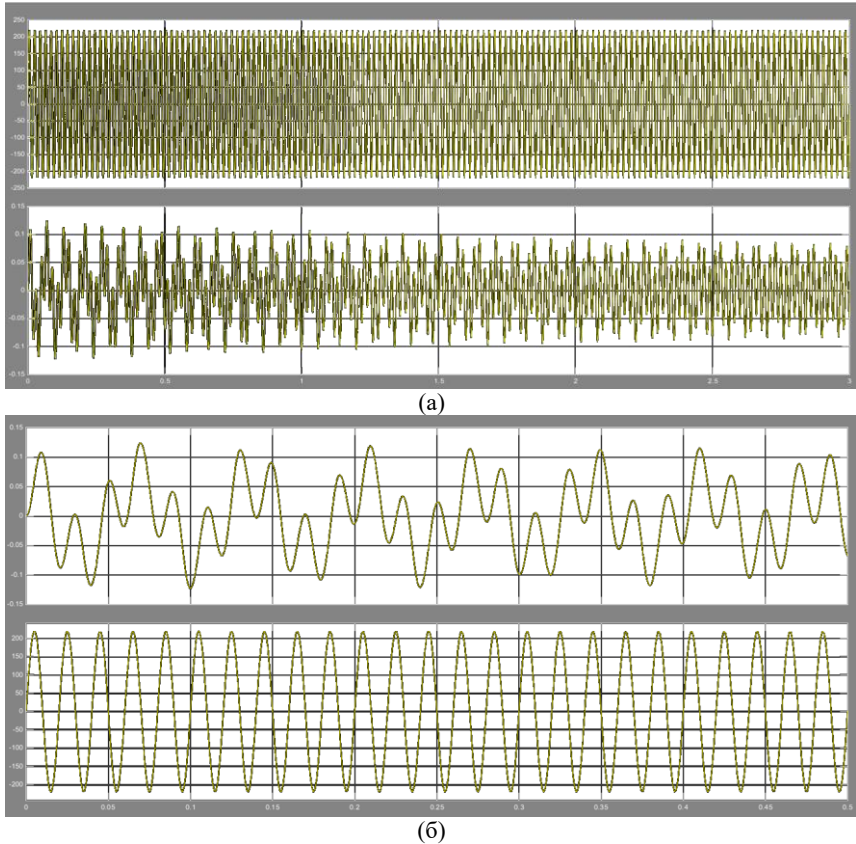


Рис. 6. Осциллограмма тока (а) и напряжения (б) в ЭМВ НЧК

Fig. 6. Oscillogram of current (a) and voltage (b) in electromagnetic exciter of low-frequency mechanical vibrations

Осциллограммы показывают характерные процессы биений и модуляции активных параметров на входе вибропреобразователя и характер убывания амплитуды выходного параметра, который, как было отмечено, зависит от угла расхождения между вектором скорости и вектором тягового усилия электромагнита.

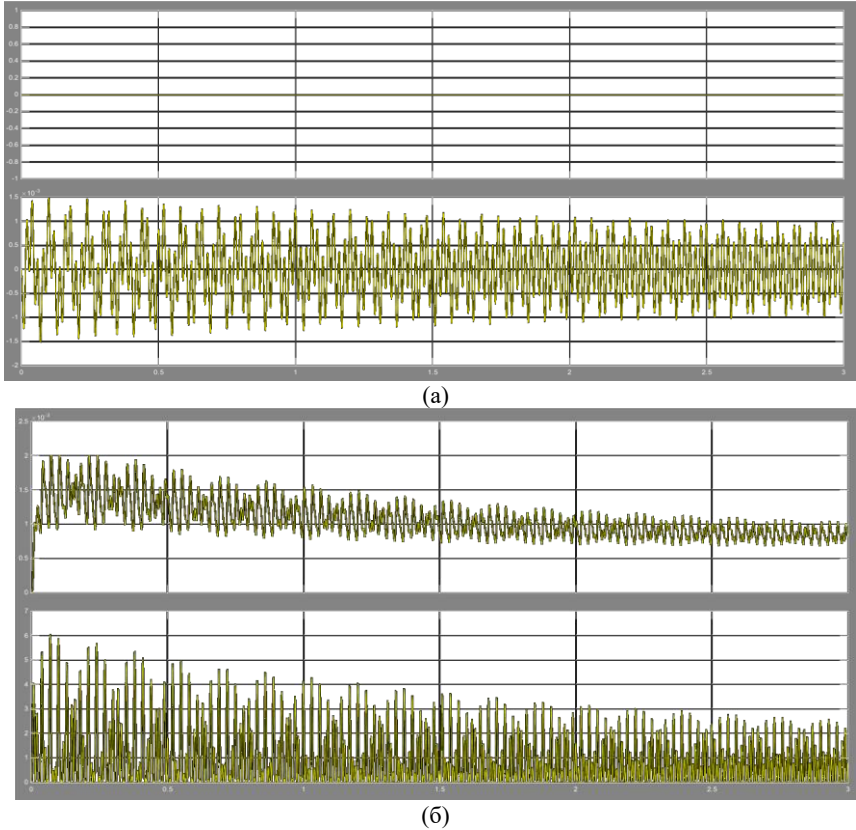


Рис. 7. Осциллограмма магнитного потока (а) и тягового усилия (б) в ЭМВ НЧК

Fig. 7. Oscillogram of magnetic flux (a) and tractive effort (b) in electromagnetic exciter of low-frequency mechanical vibrations

В технической литературе ЭМВ НЧК с последовательно включенным конденсатором получили название «вибродвигателя серии типа МВТУ имени Н.Э. Баумана» и в своем сегменте применения успешно конкурировали с асинхронными двигателями на основе относительной простоты в конструкции и надежности в процессе эксплуатации в качестве низкочастотного вибродвигателя для технологических комплексов по ремонту и приготовлению жидких продуктов с заданными физическими свойствами.

В настоящее время особую актуальность обретают вопросы разработки на базе ЭМВ НЧК тихоходных генераторов переменного тока и преобразователей механической энергии природного происхождения в электрическую в соответствии принципом обратимости в электромеханике [5].

В. Заключение

Экспериментально-расчетные данные (осциллограммы) соответствуют основным теоретическим положениям и принципам функционирования ЭМВ НЧК, в основе которых заложена идея использования в электрической подсистеме резонанса напряжений, обеспечивающего перепоступление энергии из одной подсистемы в другую и реализующего в процессе моделирования преобразование высокочастотной составляющей активных параметров электрической подсистемы на входе в низкочастотную составляющую активного параметра механической подсистемы на выходе. Режимные параметры ЭМВ НЧК определяются на основе функциональных зависимостей амплитудно-частотных и фазо-частотных характеристик электромеханической системы.

В соответствии с принципом работы (возвратно-поступательное движение за счет настройки резонансного контура) и структуры ЭМВ НЧК, идентифицирован характер работы с несколькими видами преобразования энергии: электрической в магнитную и магнитной в механическую, при этом сохраняется условие – «сохранение энергии и мощности при соответствующих преобразованиях» для всех четырех модификаций ЭМВ НЧК.

© Туманов И.Е., 2021

Поступила в редакцию 08.03.2021

Received 08.03.2021

Библиографический список

- [1] Нитусов Ю.Е. Об одной схеме электромагнитного вибратора // *Электричество*. 1956. № 5. С. 81-84.
- [2] Туманов И.Е. Многомодульный вибропривод на базе электромагнитного возбудителя низкочастотных колебаний, автореф. дис. канд. техн. наук, КазНТУ-МГТУ, Алматы, Республика Казахстан, 2001 – 28 с.
- [3] Туманов И.Е. Параметрический электромагнитный возбудитель низкочастотных механических колебаний для систем контроля, измерения и дозирования массы // *Электротехника*. 2013. № 8. С. 48-52.
- [4] Tumanov I.E., Orynbayev S.A., Baibutanov B., Kruglikov A., Kacejko P. Modeling of physical subsystem using an example of electromagnetic exciter of low-frequency oscillations // *Applied Mechanics and Materials*. 2015. Т. 736. С. 97-102. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMM.736.97.

- [5] Tumanov I.E., Orynbayev S.A., Baibutanov B. «The processes in the electromagnetic exciter of low-frequency oscillation in its functioning mode» // *Journal of Engineering and Applied Sciences*. 2014. T. 9. № 9. С. 352-359. DOI: 10,3923/jeasci.2014.352.359.

References

- [1] Yu.E. Nitusov, “Ob odnoj skheme elektromagnitnogo vibratora [About one circuit of an electromagnetic vibrator]”, *Elektrichestvo*, no. 5, pp. 81-84, 1956 (in Russian).
- [2] I.E. Tumanov, “*Mnogomodul'nyj vibroprivod na baze elektromagnitnogo vzbuditelya nizkochastotnyh kolebanij [Multi-module vibration drive based on an electromagnetic exciter of low-frequency vibrations]*”, Cand. of Tech. S. thesis, Satbayev University, Almaty, Republic of Kazakhstan, 2001 (in Russian).
- [3] I.E. Tumanov, “Parametricheskij elektromagnitnyj vzbuditel' nizkochastotnyh mekhanicheskikh kolebanij dlya sistem kontrolya, izmereniya i dozirovaniya massy [Parametric electromagnetic exciter of low-frequency mechanical vibrations for control systems, measurement and dosing of mass]”, *Elektrotehnika [Electrical engineering]*, no. 8, pp. 48-52, 2013.
- [4] I.E. Tumanov, S.A. Orynbayev, B. Baibutanov, A. Kruglikov and P. Kacejko, “Modeling of physical subsystem using an example of electromagnetic exciter of low-frequency oscillations”, *Applied Mechanics and Materials*, vol. 736, pp. 97-102, March 2015. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMM.736.97.
- [5] I.E. Tumanov, S.A. Orynbayev and B. Baibutanov, “The processes in the electromagnetic exciter of low-frequency oscillation in its functioning mode”, *Journal of Engineering and Applied Sciences*, vol. 9, no. 9, pp. 352-359, 2014. DOI: 10,3923/jeasci.2014.352.359.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Туманов Исакул Елегенович, кандидат технических наук, доцент Казахского национального университета имени аль-Фараби, г. Алматы, Республика Казахстан.

Isakul E. Tumanov, Cand. Sci. (Eng.), associate professor of the Al-Farabi Kazakh National University, Almaty, Republic of Kazakhstan.