

УДК 534.232.001:62.50

© 2009

Член-корреспондент НАН України **А. Е. Божко**

Об эффектах введения электродиссипационных звеньев в структуру электромагнитного виброударного возбудителя

Наводяться принципи варіації силами дисипації в електромагнітних віброударних збуджувачах за допомогою введення в структуру збудника додаткових електричних ланцюгів, які разом з механічною дисипацією збільшують загальну дисипацію у збуднику.

Опыт работы с электромагнитными виброударными возбудителями (ЭМВ) показал, что при воспроизведении ударов, гашении последударных колебаний подвижной системы ЭМВ и с целью экономии энергии управления ЭМВ при уменьшенном воздействии вибраций на детали и узлы при резонансе в ЭМВ можно изменять структуру ЭМВ с помощью введения звеньев, создающих в ЭМВ дополнительные силы диссипации подвижной системы (якоря) [1]. Эти звенья обуславливают возникновение управляемых эффектов в ЭМВ. Для пояснения существа рассматриваемых вопросов представим на рис. 1 электромагнитомеханическую схему однотактного однокоординатного ЭМВ, где M — магнитопровод; $Я$ — якорь; O — электрическая обмотка; $Пр$ — пружины; δ_0 — воздушный зазор; U — управляющая электродвижущая сила (электрическое напряжение); F — тяговое усилие; P — вес якоря.

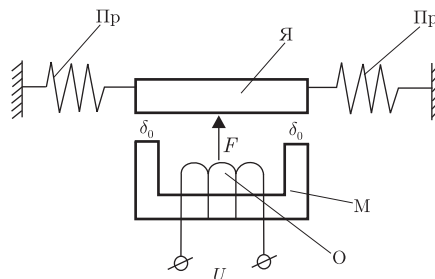


Рис. 1

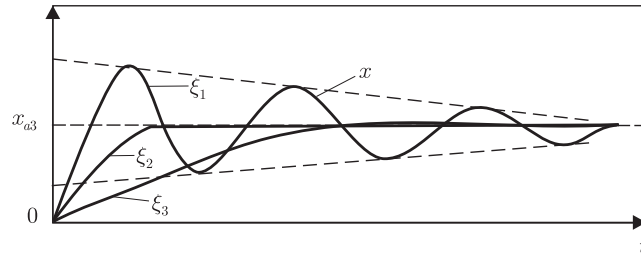


Рис. 2

Дифференциальное уравнение движения в ЭМВ записывается так:

$$m \frac{d^2 x(t)}{dt^2} + b \frac{dx(t)}{dt} + cx(t) = F(t) + P. \quad (1)$$

Здесь m — масса подвижной системы ЭМВ совместно с весовой нагрузкой; b , c — коэффициенты диссипации и жесткости соответственно; $x(t)$ — перемещение якоря.

При наличии в $F(t)$ постоянной составляющей F_0 якорь от действия $F_0 + P$ смещается на величину $x_0 = (F_0 + P)/c$, уменьшая этим самым воздушный зазор до величины $\delta = \delta_0 - x_0$. Для колебаний якоря в зазоре δ при отсутствии ударов якоря о полюса магнитопровода необходимо соблюдение условия $x_{a \max} \leq \delta$. Удары якоря (Я) о полюса магнитопровода (М) вызывают не только разрушение М и Я, но и некоторую потерю магнитных свойств материала М и Я. Такое явление разрушения возникает тогда, когда ЭМВ может функционировать в резонансном режиме. Обычно в ЭМВ сила диссипации очень мала, так как само явление диссипации в ЭМВ осуществляется в результате трения о воздух витков пружин и других подвижных элементов системы якоря, т.е. здесь показатель диссипации $\xi = b/(2m\omega_0) \ll 1$, где $\omega_0 = \sqrt{c/m}$ — собственная частота колебаний якоря. Увеличение диссипации в ЭМВ с помощью электрических звеньев можно осуществить, ориентируясь на уравнение (1). Представим это уравнение с некоторым дополнением его в правой части, являющимся добавочной отрицательной тяговой силой, пропорциональной скорости колебаний якоря, в виде

$$m \frac{d^2 x}{dt^2} + b \frac{dx}{dt} + cx = F + P - b_{\Xi} \frac{dx}{dt} \quad (2)$$

(b_{Ξ} — коэффициент усиления в дополнительном дифференцирующем звене dx/dt). Здесь необходимо иметь в виду показатель дополнительной диссипации $\xi_{\Xi} = b_{\Xi}/(2m\omega_0)$, который может находиться в пределах $0 < \xi_{\Xi} < \alpha$, где α — величина, больше единицы. Как видно из уравнения (2), общий коэффициент диссипации системы (2) равен $b_{\Sigma} = b + b_{\Xi}$. При $\xi_{\Sigma} = (b_{\Sigma})/(2m\omega_0) < 1$ система якоря является колебательной. При $\xi_{\Sigma} \geq 1$ эта система представляет собой аperiodическое звено второго порядка. На рис. 2 покажем график кривых перехода якоря из нулевого положения в некоторое заданное x_{a3} при $\xi_1 < 1$, $\xi_2 = 1$, $\xi_3 > 1$.

Из этого рисунка видно, что при $\xi_1 < 1$ крутизна нарастания x наибольшая. При $\xi_2 = 1$ и $\xi_3 > 1$ нарастание $x(t)$ происходит по аperiodическому закону, при крутизне фронта меньшей, чем при ξ_1 . При ξ_3 крутизна меньше, чем при ξ_2 . Кроме того, величина силы диссипации $b_{\Sigma} dx/dt$ и, в частности, ξ_{Σ} влияет на амплитуду колебаний x_a колебательной системы (КС), описываемой уравнением (2), при ее работе в резонансном режиме.

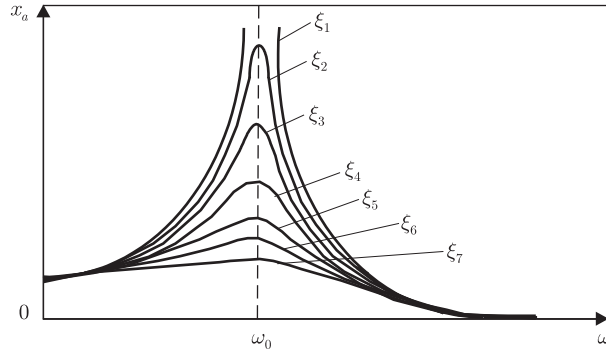


Рис. 3

Резонансные кривые зависимостей $x_a = f(\omega, b)$ при одной и той же величине $F_p(t)$ приведем на рис. 3, где ω — круговая частота задающей силы $F(t)$, $\xi_5 > \xi_4 > \xi_3 > \xi_2 > \xi_1 = 0$, $\xi_6 = 1$, $\xi_7 > 1$.

Из рис. 3 видно, что на резонансе амплитуда x_a значительно уменьшается с увеличением ξ_k , $k = \overline{1, 7}$, при неизменной величине входного воздействия $F_p(t)$. Заметим, что для возбуждения колебаний КС на резонансном режиме $F_p(t)$ значительно меньше, чем вне резонанса.

Покажем справедливость нашего утверждения. Частное решение уравнения (1) имеет вид

$$x(t) = x_a \sin(\omega t - \varphi_k), \quad (3)$$

где [2]

$$x_a = \frac{F_a}{m \sqrt{(\omega_0^2 - \omega^2)^2 + \left(\frac{b\omega}{m}\right)^2}}, \quad \varphi_k = \arctg \frac{\omega b}{m(\omega_0^2 - \omega^2)}.$$

Резонанс в КС возникает при круговой частоте $\omega = \omega_0$ и в этом случае

$$x_a = \frac{F_a}{b\omega_0}, \quad \varphi_k = -\frac{\pi}{2}. \quad (4)$$

Из (4) получаем, что при $b = 0$ $x_a = \infty$. Также из (3) и (4) получаем

$$F_{a\omega} = x_a m \sqrt{(\omega_0^2 - \omega^2)^2 + \left(\frac{b\omega}{m}\right)^2} \quad \text{и} \quad F_{a\omega_0} = x_a b \omega_0. \quad (5)$$

Из (5) видно, что $F_{a\omega} > F_{a\omega_0}$ и при $b = 0$ $F_{a\omega_0} = 0$ и это подтверждает наш вывод об уменьшении F_a при резонансе КС. После краткого анализа КС с точки зрения влияния на ее режим работы силы диссипации $b dx/dt$ покажем применение этого факта в ЭМВ при воспроизведении удара, гашении послееударных колебаний якоря и работе ЭМВ в резонансном режиме. Все указанные случаи рассмотрим последовательно.

При воспроизведении в ЭМВ удара путем передачи на обмотку импульсного напряжения прямоугольной формы $U(t) = U = \text{const}$ при $t = 0 \div \tau$ будем рассматривать формирование

переднего фронта, вершины, спада (заднего фронта) удара и гашение послеударных колебаний якоря. При этом рассмотрим три варианта электроцепи обмотки в ЭМВ, а именно, когда индуктивное сопротивление x_L значительно больше активного R , соизмеримы эти сопротивления и когда $R \gg x_L$. В первом случае считается $U(t)$ — это ЭДС источника напряжения, а в последнем случае — ЭДС источника тока.

Итак, при $x_L \gg R$. Тогда ток в обмотке $i_1 = (U/L)t$. При R и x_L соизмеримых $i_2 = (U/R)(1 - e^{-\beta t})$, где $\beta = R/L$ — коэффициент затухания. При $R \gg x_L$ $i_3 = U/R$.

Тяговые усилия в этих случаях следующие:

$$F_1 = \mu_0 S \left(\frac{wU}{2\delta L} \right)^2 t^2, \quad (6)$$

$$F_2 = \mu_0 S \left(\frac{wU}{2\delta R} \right)^2 (1 - e^{-\beta t})^2, \quad (7)$$

$$F_3 = \mu_0 S \left(\frac{wU}{2\delta R} \right)^2 U^2. \quad (8)$$

Из (6)–(8) видно, что наиболее безынерционным является тяговое усилие F_3 . При таком F_3 крутизна переднего фронта импульса перемещения якоря наибольшая. Поэтому для воспроизведения удара якорем ЭМВ предпочтение следует отдать системе задания прямоугольного импульса от генератора тока. В этом случае перемещение якоря выражается соотношением

$$x(t) = \frac{F_3}{c} \left[1 - e^{-(b/(2m))t} \left(\cos \omega_1 t + \frac{b}{2m\omega_1} \sin \omega_1 t \right) \right], \quad (9)$$

где $\omega_1 = \sqrt{\frac{c}{m} - \left(\frac{b}{2m}\right)^2}$, $\frac{c}{m} > \left(\frac{b}{2m}\right)^2$.

Выражение (9) графически соответствует кривой $c \xi_1$ на рис. 2. При $t = \infty$ $x(t) = F_3/c$. А это значит, что при длительности управляющего импульса, допускающей получение плоской вершины $x(t)$, $x(t) = F_3/c$.

Из (9) видно, что, уменьшая коэффициент b на переднем фронте импульса, можно увеличить крутизну этого фронта. На вершине необходимо этот коэффициент увеличить и этим самым приблизить выражение вершины $x(t) = F_3/c$. При спаде (на заднем фронте импульса)

$$x(t) = \frac{x(\tau)}{\omega_1} e^{-(b/(2m))t} \left(\frac{b}{2m} \sin \omega_1 t + \omega_1 \cos \omega_1 t \right). \quad (10)$$

Как видно из (10), увеличение коэффициента b вызывает более резкий спад от $x(t)$ до нуля величины $x(t)$. Если значительно увеличить коэффициент b до $\xi > 1$, то

$$x(t) = \frac{x(\tau)}{\alpha_1 - \alpha_2} (\alpha_1 e^{\alpha_1 t} - \alpha_2 e^{\alpha_2 t}). \quad (11)$$

Корни α_1, α_2 — вещественные и отрицательные, так как

$$\alpha_{1,2} = -\frac{b}{2m} \pm \sqrt{\left(\frac{b}{2m}\right)^2 - \frac{c}{m}}, \quad \left(\frac{b}{2m}\right)^2 > \frac{c}{m}.$$

Здесь $\alpha_1 - \alpha_2 = 2\sqrt{(b/(2m))^2 - c/m} > 0$.

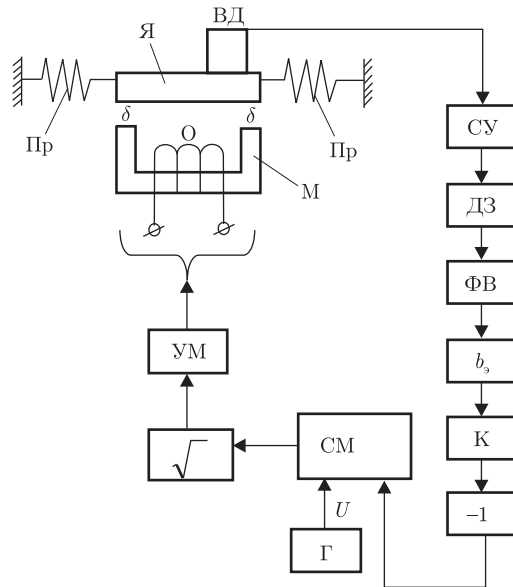


Рис. 4

Из (11) вытекает, что $\alpha_2 e^{\alpha_2 t}$ спадает быстрее, чем $\alpha_1 e^{\alpha_1 t}$, т. е. затягивание спада осуществляется составляющей $\alpha e^{\alpha_1 t}$.

Как видим, в данном случае процесс спада $x(\tau)$ до нуля является аperiodическим и более быстрым, чем процесс, описываемый (10) при $\xi < 1$. А это значит, что в реализации удара в ЭМВ необходимо на переднем фронте сделать $\xi < 1$ и величину этого показателя затухания увеличить на вершине импульса и при его спаде до нуля. При повторении возбуждения удара следует все повторить для переднего фронта, вершины и спада импульса.

Перейдем к резонансному режиму колебаний якоря в ЭМВ. На этом установившемся режиме перемещение описывается выражением (4). Как видим, при $b = 0$ (см. рис. 3) $x_a = \infty$. Такая большая величина амплитуды колебаний якоря вызывает удары якоря о магнитопровод, разрушая и М, и Я. Кроме того, пружины работают в режиме повышенных напряжений и могут быть разрушены. Для исключения факта разрушения элементов в ЭМВ необходимо уменьшать x_a . Для этого следует увеличить либо коэффициент b , либо $\omega_0 = \sqrt{c/m}$, т. е. увеличить коэффициент c и уменьшить массу m , что в последнем случае не всегда возможно. Увеличить коэффициент b можно электрическим звеном с коэффициентом передачи таким, чтобы $(b + b_3)/(2m\omega_0) \approx 0,5 \div 0,9$, где b_3 — коэффициент диссипации звена. Тогда амплитуды x_a будут менее опасны для элементов ЭМВ. При этом сила F_a , а значит и U_a , будет меньше, чем при работе ЭМВ вне зоны резонанса.

Заметим, что увеличение диссипации за счет электрической диссипации следует осуществлять звеном $-b_3 dx/dt$, что при преобразовании уравнения движения ЭМВ даст диссипацию в виде $(b + b_3) dx/dt$ и, соответственно, уменьшит x_a .

Представим на рис. 4 структурную схему системы добавления диссипационной силы в ЭМВ, где ВД — вибродатчик; СУ — согласующий усилитель; ДЗ — дифференцирующее звено; ФВ — фазовращатель; b_3 — звено с коэффициентом передачи b_3 ; К — звено с коэффициентом передачи $K = (z^2/(\mu_0 S))(2\delta/w)^2$, $z = \sqrt{R^2 + (\omega L)^2}$; $[-1]$ — инвертор; Г — генератор задающего напряжения $U = U_a \sin \omega t$; СМ — сумматор; $\sqrt{\quad}$ — звено извлечения квадратного корня; УМ — усилитель мощности.

Из рис. 4 видно, что на вход ЭМВ поступает сигнал $\sqrt{U(t) - Kb_{\text{Э}}dx(t)/dt}$, который создает тяговое усилие $F(t) = \mu_0 SU(w/(2\delta z))^2 - b_{\text{Э}}dx/dt$. Тогда уравнение (1) принимает вид

$$m \frac{d^2x}{dt^2} + (b + b_{\text{Э}}) \frac{dx}{dt} + cx = P + \mu_0 SU \left(\frac{w}{2\delta z} \right)^2,$$

т. е. сила диссипации увеличилась.

Таким образом, в результате данного исследования показаны методы вариации коэффициентом диссипации при воспроизведении удара ЭМВ и работе ЭМВ в резонансном режиме. Реализация такой вариации осуществляется путем подключения в структуру ЭМВ звена $-b_{\text{Э}}dx/dt$, являющегося физически электрическим аналогом силы диссипации.

1. *Божко А. Е.* О трансформации консервативных колебательных звеньев в диссипативные в электродинамических и электромагнитных вибростендах // Доп. НАН України. – 2007. – № 10. – С. 50–55.
2. *Божко А. Е., Голуб Н. М.* Динамико-энергетические связи колебательных систем. – Киев: Наук. думка, 1980. – 188 с.

*Институт проблем машиностроения
им. А. Н. Подгорного НАН Украины, Харьков*

Поступило в редакцию 04.02.2008

Corresponding Member of the NAS of Ukraine **A. E. Bozhko**

On effects of the introduction of electro-dissipative links into the electromagnetic vibrostroke exciter structure

The principles of variation for dissipative forces of an electromagnetic vibrostroke exciter with the help of the introduction of electrical links to the exciter structure for additional dissipation are shown. The additional dissipative links create the aperiodical conditions for a rotor shift in the exciter during the creation of a stroke and the resonance.