

УДК 62-523.2

© 2009

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

Об эффективности звена извлечения квадратного корня в системе электромагнитного вибровозбудителя

Показано, що включення в канал керування електромагнітного вібровбуджувача ланцюга добування квадратного корня лінеаризує всю систему.

Известно [1], что электромагнитные вибровозбудители (ЭМВ) представляют собой нелинейную систему. Нелинейность ЭМВ выражается в тяговом усилии F . Для наглядности представим на рис. 1 электромагнитомеханическую схему ЭМВ, где M — магнитопровод; $Я$ — якорь; PM — реактивная масса; $Пр_я$, $Пр_м$ — пружины; K — корпус; //// — фундамент; δ_0 — воздушный зазор; O — обмотка с электрическим током; U — задающее напряжение.

Тяговое усилие F в общем случае определяется зависимостью

$$F = \frac{dW_e}{d\delta}, \quad (1)$$

где W_e — электрическая энергия ЭМВ; δ — переменный воздушный зазор.

Энергия

$$W_e = \frac{1}{2}Li^2, \quad (2)$$

где L — индуктивность обмотки; i — электрический ток в обмотке.

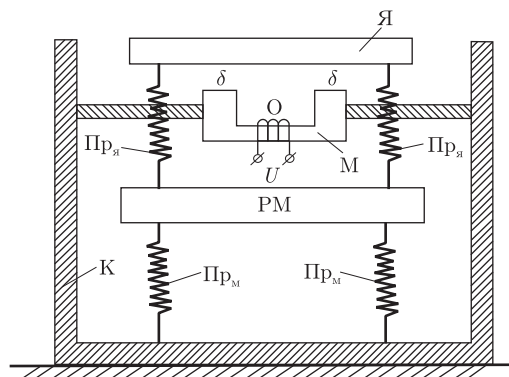


Рис. 1

В свою очередь

$$L = \frac{w\Phi}{i}, \quad (3)$$

где Φ — магнитный поток в ЭМВ; w — число витков обмотки.

В соответствии с законом полного тока

$$iw = \frac{\Phi}{G}; \quad G = \frac{\mu_0 S}{2\delta}; \quad L = w^2 G, \quad (4)$$

где G — магнитная проводимость в ЭМВ; μ_0 — магнитная проницаемость воздуха; S — площадь поперечного сечения полюса М у зазора δ .

Подставляя (2)–(4) в (1), получим

$$F = \frac{1}{2} w^2 \frac{d}{d\delta} (i^2 G) = \frac{1}{2} w^2 \left(G \frac{di^2}{d\delta} + i^2 \frac{dG}{d\delta} \right). \quad (5)$$

Для выяснения зависимости тока i от переменного воздушного зазора δ запишем уравнение электрической цепи ЭМВ в виде

$$U = ri + L \frac{di}{dt},$$

где r — активное сопротивление обмотки; t — время.

При $U = U_a \sin \omega t$, где U_a — амплитуда; ω — круговая частота,

$$i = \frac{U_a}{\sqrt{r^2 + (\omega L)^2}} \sin(\omega t - \varphi),$$

где $\varphi = \arctg \frac{\omega L}{r}$.

Так как будем рассматривать установившийся процесс тока $i(t)$, то угол φ можно не учитывать и

$$i(t) = \frac{U_a \sin \omega t}{\sqrt{r^2 + (\omega L)^2}} = \frac{U_a \sin \omega t}{\sqrt{r^2 + \left(\frac{\omega \mu_0 S w^2}{2\delta} \right)^2}}. \quad (6)$$

Как видно из (6), ток $i(t)$ зависит от переменного воздушного зазора δ . Подставляя (6) в (5), получим

$$F(t) = \mu_0 S \left(\frac{U_a w \sin \omega t}{2\delta} \right)^2 \left[\frac{\alpha}{\delta \left[r^2 + \left(\frac{\alpha}{\delta} \right)^2 \right]} - 1 \right] \frac{1}{r^2 + \left(\frac{\alpha}{\delta} \right)^2}, \quad \alpha = \frac{w^2 \omega \mu_0 S}{2}. \quad (7)$$

Выражение (7) приведем к виду

$$F = \gamma U_a^2 \sin^2 \omega t, \quad (8)$$

где γ — все сомножители в (7), кроме $(U_a \sin \omega t)^2$.

Из (8) видно, что тяговое усилие $F(t)$ пропорционально U_a^2 , а это значит, что в формировании $F(t)$ ЭМВ является нелинейной системой. Наличие в (7) и (8) сомножителя $\sin^2(\omega t)$ вызывает появление в $F(t)$ постоянной составляющей $(1/2)U_a^2$ и гармоники $-(1/2)\gamma U_a^2 \times \cos 2\omega t$, т. е. гармоники с удвоенной частотой (2ω) [2]. Такое тяговое усилие воздействует на якорь, являющийся вместе с реактивной массой РМ колебательной системой с двумя степенями свободы, и создает колебания этой системы с удвоенной частотой (2ω) при наличии постоянного смещения x_0 , уменьшающего зазор δ_0 . Уменьшение воздушного зазора до величины $\delta = \delta_0 - x_0 \pm x_a \sin 2\omega t$, где x_a — амплитуда колебаний якоря, нежелательно из-за невозможности увеличить x_a . Кроме того, при вибрационных испытаниях объектов необходимо управлять не только уровнем вибраций, но и частотой ω . При наличии указанной нелинейности в $F(t)$ поддиапазоны частот 2ω не соответствуют поддиапазонам частот ω , что затрудняет соблюдение соответствия стендовых испытаний эксплуатационным условиям, в которых функционируют испытуемые объекты. Для исключения указанных недостатков предлагается включать в канал управления ЭМВ аналоговое звено извлечения квадратного корня ($\sqrt{\quad}$). В этом случае задающее напряжение $U_a \sin \omega t$ должно прикладываться ко входу звена ($\sqrt{\quad}$). В результате уравнение электрической цепи ЭМВ принимает вид $\sqrt{U_a \sin \omega t} = ri + L di/dt$ и вынужденная составляющая тока записывается выражением (угол φ здесь не имеет значения)

$$i(t) = \sqrt{\frac{U_a \sin \omega t}{r^2 + (\omega L)^2}} = \sqrt{\frac{U_a \sin \omega t}{r^2 + \left(\frac{\alpha}{\delta}\right)^2}}. \quad (9)$$

Подставляя (9) в (5), получим

$$F(t) = \frac{\mu_0 S U_a w \sin \omega t}{4\delta^2 \left[r^2 + \left(\frac{\alpha}{\delta}\right)^2 \right]} \left[\frac{\alpha}{\delta \left[r^2 + \left(\frac{\alpha}{\delta}\right)^2 \right]} - 1 \right] = \gamma U_a w \sin \omega t. \quad (10)$$

Из (8) видно, что тяговое усилие $F(t)$ пропорционально $U_a \sin \omega t$, т. е. управляющему воздействию $U(t)$. Показатель степени при $\sin \omega t$ равен единице, что обуславливает соответствие частоты $F(t)$ и колебаний якоря заданной частоте (ω). Кроме того, при таком исполнении управления ЭМВ исключается появление постоянного смещения x_0 якоря, что также обуславливает возможность увеличения амплитуды x_a колебаний якоря. Аналоговая реализация звена ($\sqrt{\quad}$) может быть такой, как на рис. 2, где U — входное воздействие; E — постоянное напряжение (например, напряжение питания полупроводниковых звеньев); Y — выходной сигнал звена; ε — промежуточный сигнал; УВ1–УВ3 — устройства (звенья) вычитания (сумматоры с инвертором [-1]); БУ1–БУ2 — блоки умножения; $\boxed{K_1}$, \boxed{K} — усилители с коэффициентами усиления K_1 , K соответственно. Проанализируем данное звено ($\sqrt{\quad}$). Запишем уравнения

$$1) (E - \varepsilon E^2)K_1 = \varepsilon \text{ или } EK_1 = \varepsilon EK_1 \left(\frac{1}{K_1 E} + E \right),$$

откуда $\varepsilon = 1/E$, так как $E \gg 1/(K_1 E)$, $|E| > 1$;

$$2) U - Y \left(Y - \frac{E}{K} \right) K \frac{1}{E} = Y,$$

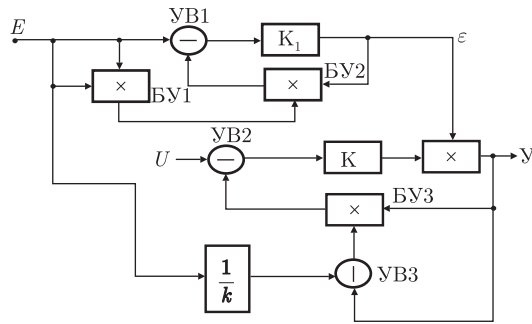


Рис. 2

откуда $Y = \sqrt{U}$, т.е. выходной сигнал данного звена точно равен корню квадратному от входного сигнала. В микросхемном исполнении это звено малогабаритное. После этого звена должен стоять усилитель мощности, выход которого подается на вход ЭМВ.

Таким образом, из данного изложения видно эффективное преимущество от включения звена ($\sqrt{\quad}$) в канал управления электромагнитного вибровозбудителя.

1. *Вибрации в технике* / Под ред. Э.Э. Лавендела. – Москва: Машиностроение, 1981. – Т. 4. – 510 с.
2. *Бронштейн И. Н., Семендяев К. А.* Справочник по математике. – Москва: ГИТТЛ, 1956. – 608 с.

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

Поступило в редакцию 06.06.2009

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

On the efficiency of a link for the square root taking in an electromagnetic vibroexciter system

It is shown that the introduction of a link for the square root taking in a electromagnetic vibroexciter system linearizes this system.