

К РАСЧЕТУ ФЕРРОРЕЗОНАНСНОГО ФИЛЬТР-СТАБИЛИЗАТОРА

В. И. ЛУКОВНИКОВ

(Представлена научно-техническим семинаром кафедры электрооборудования)

На рис. 1, а представлена принципиальная схема феррорезонансного фильтр-стабилизатора (ФРФСТ), позволяющая одновременно защитить инвертор от перегрузок по току и преобразовать его прямоугольное выходное напряжение в стабилизированное синусоидальное. Предлагаемое устройство относится к группе феррорезонансных

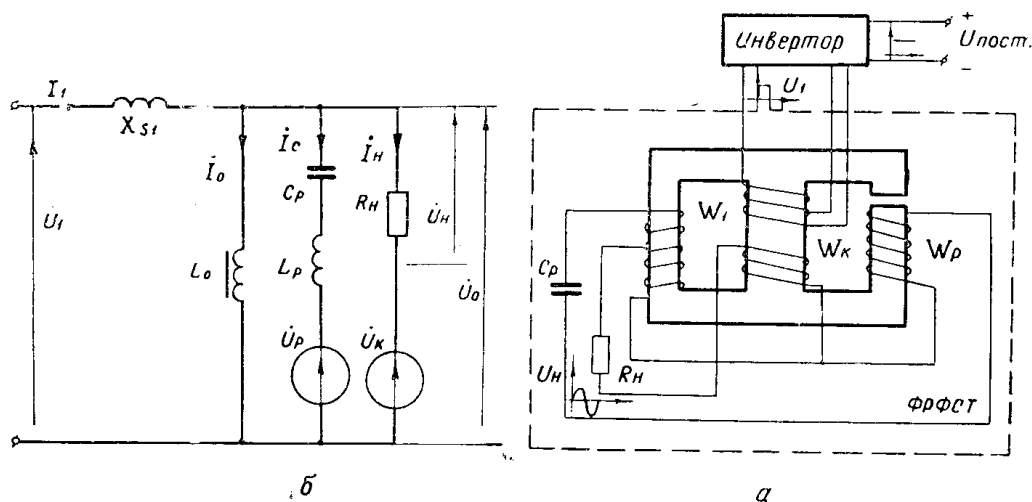


Рис. 1. Феррорезонансный фильтр-стабилизатор: а) принципиальная схема, б) эквивалентная схема

стабилизаторов с магнитным шунтом, которые достаточно полно описаны в [1, 2, 3]. Особенностью устройства является то, что для фильтрации выходного напряжения используется контур рабочей емкости C_p и индуктивности L_p обмотки W_p , размещенной на магнитном шунте. Через контур $C_p L_p$, настраиваемый в резонанс по третьей гармонике, «отсасывается» из кривой напряжения $U_{н3}$ 3-я гармоника, а все остальные ослабляются напряжением фильтрации U_p , наводимым в обмотке W_p .

Целью данной работы является вывод условий фильтрации и получение поправок к методике расчета феррорезонансных стабилизаторов А. Г. Лурье [2] для определения основных параметров ФРФСТ.

При выводе характеристик ФРФСТ делаются допущения, что потери в ферромагнитном сердечнике отсутствуют, а кривые токов, напряжений и магнитных потоков синусоидальны. Эквивалентная схема (параметры приведены к обмотке W_2) представлена на рис. 1, б, где обозначено: X_{s1} — индуктивное сопротивление рассеяния первичной обмотки W_1 , L_0 — индуктивность насыщенного реактора, C_p — рабочая емкость, R_n — нагрузочное сопротивление, U_k — компенсационное напряжение, U_p — напряжение фильтрации.

Кривая намагничивания аппроксимируется функцией вида $H = a \times \times B^m$, где a и m — постоянные величины. Решая систему уравнений, где обозначения токов и напряжений соответствуют рис. 1 б

$$\begin{aligned} I_1 &= I_0 + I_c + I_n, \\ \dot{U}_1 &= \dot{U}_0 + jX_{s1} I_1, \\ \dot{U}_0 &= j\omega L_0 I_0, \\ \dot{U}_0 &= \dot{U}_p + \dot{I}_0 (j\omega L_p + 1/j\omega C_p), \\ \dot{U}_0 &= \dot{U}_k + \dot{I}_n R_n, \end{aligned} \quad (1)$$

относительно \dot{U}_1 , для действующих значений переменных величин получим соотношение:

$$U_1 = \kappa_0 B_0 \{ [1 - \rho(1 + \kappa_1) + AB_0^m]^2 + \tau_1^2 \}^{0,5} [(1 - \kappa_1 \rho)^2 + \kappa^2 \tau_1^2]^{-0,5}, \quad (2)$$

где

$$\kappa = U_k / U_1; \quad \kappa_1 = U_p / X_{s1} I_1; \quad \tau_1 = X_{s1} / R_n; \quad \rho = X_{s1} (\omega^{-1} C_p^{-1} - \omega L_p)$$

— коэффициенты компенсации, фильтрации, нагрузки, резонанса; B_0 — действующее значение магнитной индукции в насыщенном стержне; $\kappa_0 = \omega S_2 W_2$ и A — коэффициенты пропорциональности.

Так как $\dot{U}_n = \kappa_0 \dot{B}_0 - \kappa \dot{U}_1$, то действующее значение выходного напряжения

$$U_n = \kappa_0 B_0 \{ (1 - \kappa_1 \rho) - \kappa [1 - \rho(1 + \kappa_1) AB_0^m] \} [(1 - \kappa_1 \rho)^2 + \kappa^2 \tau_1^2]^{-0,5}, \quad (3)$$

$$\text{ток в нагрузке } I_n = \eta U_n X_{s1}^{-1}, \quad (4)$$

первичный ток

$$I_1 = \kappa_0 B_0 X_{s1}^{-1} [(AB_0^m - \rho)^2 + (1 - \kappa)^2 \tau_1^2]^{0,5} [(1 - \kappa_1 \rho)^2 + \kappa^2 \tau_1^2]^{-0,5}. \quad (5)$$

Качество ФРФСТ оценивается по регулировочной $U_n = f_1(U_1)$, внешней $U_n = f_2(I_n)$ и нагрузочной $I_1 = f_3(\eta)$ характеристикам, расчет которых осуществляется согласно соотношениям (2) — (5). На рис. 2 представлены характеристики ФРФСТ, рассчитанные для трех вариантов стабилизатора по параметрам, близким к экспериментальным:

$A \neq 1 \text{ тл}^{-3}$; $\kappa_0 = 30 \text{ м}^2 \text{ сек}^{-1}$; $m = 3$; $\kappa = \kappa_1 = 0,2$; $U_1 = 30 \text{ в}$; $X_{s1} = 300 \text{ м}$, $\eta = 1$.

Характеристики, обозначенные 1 а, 1 б, 1 в, соответствуют ФРФСТ без обмоток компенсации и фильтрации с коэффициентом резонанса $\rho = 1$ и $\eta = 0$. Характеристики 2 а ÷ 2 в и 3 а ÷ 3 в описывают нагруженные ФРФСТ с обмотками W_k и W_p и коэффициентами резонанса соответственно 2 и 1.

Анализируя кривые, можно увидеть, что введение обмоток W_k и W_p повышает коэффициент стабилизации, жесткость внешней характеристики и уменьшает величину первичного тока I_1 при коротком замыкании в нагрузке ($\eta = \infty$), а при $\rho = 1$ в характеристиках исчезает зона многозначности.

Для выяснения условий фильтрации необходимо получить аналитическое выражение $u_H(i)$. Мгновенные значения токов, напряжений и магнитных потоков связаны системой дифференциальных уравнений:

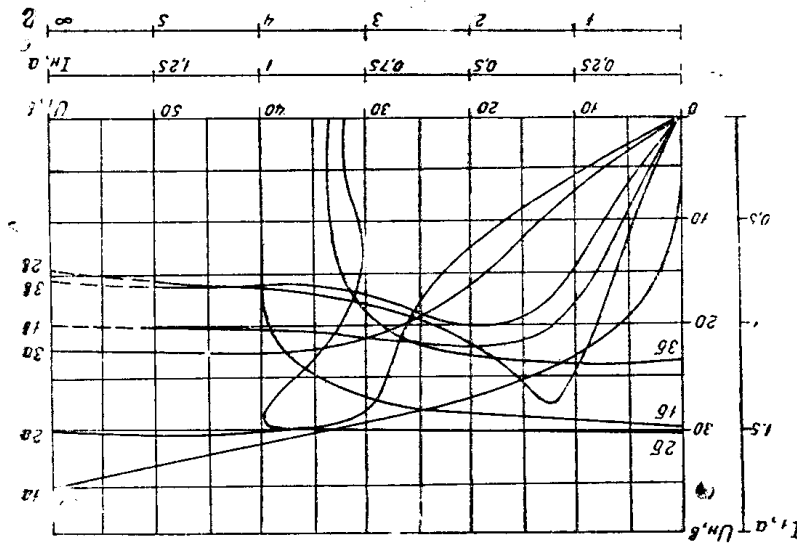


Рис. 2. Основные расчетные характеристики ФРФСТ

$$\begin{aligned}
 i_1 &= i_0 + i_c + i_H, \\
 i_0 &= D \cdot \psi^\gamma, \\
 u_1 &= \frac{d\psi}{dt} + L_{S1} \frac{di_1}{dt}, \\
 u_1 &= L_{S1} \frac{di_1}{dt} + L_p \frac{di_c}{dt} + \frac{1}{C_p} \int i_c dt + \kappa_1 \left(u_1 - \frac{d\psi}{dt} \right), \\
 u_1 &= i_H R_H + \kappa u_1 + L_{S1} \cdot \frac{di_1}{dt},
 \end{aligned} \tag{6}$$

где $i_0 = D\psi^\gamma$ — функция, аппроксимирующая кривую намагничивания для мгновенных значений индукции и напряженности, причем ψ — мгновенное значение протокосцепления в насыщенном стержне, D и γ — постоянные величины, i_0 — мгновенное значение тока в обмотке W_2 , L_{S1} — индуктивность рассеяния.

Из системы (6) выводится общее дифференциальное уравнение

$$\begin{aligned}
 \frac{d^3 \psi}{dt^3} + (a + b\psi^{\gamma-2}) \frac{d^2 \psi}{dt^2} + e \frac{d\psi}{dt} + f\psi^\gamma + g\psi &= \kappa \frac{d^2 u_1}{dt^2} + \\
 + h \frac{du_1}{dt} + \kappa e u_1 + f \int u_1 dt,
 \end{aligned} \tag{7}$$

в котором

$$\begin{aligned}
 a &= R_H L_{S1}^{-1} + R_H L_p^{-1} (1 + \kappa_1); \quad b = R_H D \gamma (\gamma - 1); \quad e = L_p^{-1} C_p^{-1}, \\
 f &= D R_H L_p^{-1} C_p^{-1}; \quad g = R_H C_p^{-1} L_p^{-1} L_{S1}^{-1}; \quad h = \kappa_1 R_H L_p^{-1} + R_H L_{S1}^{-1}.
 \end{aligned}$$

Представляя прямоугольное входное напряжение $u_1(t)$ [в виде ряда Фурье, преобразуем выражение (7)

$$\frac{d^3 \psi}{dt^3} + (a + b\psi^{\gamma-2}) \frac{d^2 \psi}{dt^2} + e \frac{d\psi}{dt} + f\psi^\gamma + g\psi = 4U_{1m} \pi^{-1} \{ \kappa (\omega^2 -$$

$$\begin{aligned}
& - e) \cdot \left[2 \sin \omega t + 10 \cdot 3^{-1} \sin 3\omega t + \dots + \left(2p + 1 + \frac{1}{2p + 1} \right) \sin (2p + \right. \\
& \quad \left. + 1) \omega t + \dots \right] + (h\omega - g\omega^{-1}) \left[2 \cos \omega t + 10 \cdot 9^{-1} \cos 3\omega t + \right. \\
& \quad \left. + \dots + \left(1 + \frac{1}{4p^2 + 4p + 1} \right) \cos (2p + 1) \omega t + \dots \right] \}. \quad (8)
\end{aligned}$$

Здесь $U_{1,m}$ — амплитуда прямоугольного напряжения $u_1(t)$; $p = 1, 2, \dots$

Решение уравнения (8) имеет вид:

$$\begin{aligned}
\psi & = L_1 \sin \omega t + L_3 \sin 3\omega t + \dots + L_{2p+1} \sin (2p + 1) \omega t + \\
& \quad + \dots + N_1 \cos \omega t + N_3 \cos (2p + 1) \omega t + \dots, \quad (9)
\end{aligned}$$

где коэффициенты $L_1, L_3, \dots, N_1, N_3, \dots$ определяются из системы алгебраических уравнений, которая получается после интегрирования системы интегралов вида [1]:

$$\begin{aligned}
& \int_0^{2\pi} F(t) \cdot \sin \omega t dt = 0, \\
& \int_0^{2\pi} F(t) \cos \omega t dt = 0, \\
& \dots \dots \dots \\
& \int_0^{2\pi} F(t) \sin (2p + 1) \omega t dt = 0, \\
& \int_0^{2\pi} F(t) \cos (2p + 1) \omega t dt = 0, \quad (10) \\
& \dots \dots \dots
\end{aligned}$$

в которой $F(t)$ — выражение, получающееся из (8) после подстановки в него зависимости (9).

Так как $u_n(t) = \frac{d\psi}{dt} - \kappa u_1(t)$, то с учетом (9) получим, что

$$\begin{aligned}
u_n(t) & = - (4\kappa\pi^{-1} U_{1,m} + N_1 \omega) \sin \omega t - [4\kappa U_{1,m} \pi^{-1} (2p + 1)^{-1} + \\
& \quad + (2p + 1) N_{2p+1} \omega] \sin (2p + 1) \omega t \dots + L_1 \omega \cos \omega t + \\
& \quad + L_{2p+1} \omega (2p + 1) \cos (2p + 1) \omega t + \dots, \quad (11)
\end{aligned}$$

откуда условия фильтрации

$$\begin{aligned}
L_3 = L_5 = \dots = L_{2p+1} = \dots = 0, \\
4\kappa U_{1,m} + 9\omega N_3 = 0, \\
\dots \dots \dots \\
4\kappa U_{1,m} + (2p + 1)^2 \omega N_{2p+1} = 0, \\
\dots \dots \dots \quad (12)
\end{aligned}$$

В ряде случаев можно довольствоваться приближенными условиями фильтрации, которые получают при анализе выражения (3). U_n обращается в нуль при одновременном выполнении соотношений

$$\rho = \infty, \quad \kappa = \kappa_1 (1 + \kappa_1)^{-1}. \quad (13)$$

Величина ρ стремится к бесконечности при резонансе в контуре $L_p C_p$. Определенным образом рассчитывая W_p , добиваются резонанса

на 3-й гармонике, тогда она будет отсутствовать в кривой выходного напряжения; остальные гармоники при этом ослабляются, поскольку второе соотношение (13) от частоты не зависит.

Для проверки полученных результатов был изготовлен ФРФСТ с выходной мощностью 30 вт. Кривая намагничивания для действующих значений индукции и напряженности снималась экспериментально при

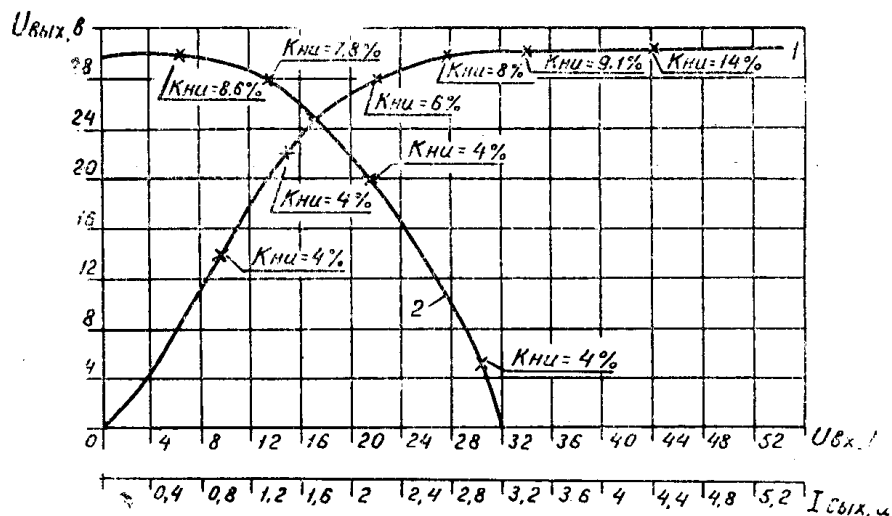


Рис. 3. Экспериментальные характеристики ФРФСТ

питании обмотки возбуждения напряжением прямоугольной формы, аппроксимировалась она функцией вида $H = 4000 \text{ В}^4$. ФРФСТ был выполнен на сердечнике типа Ш 30×30 из стали Э 332, воздушный зазор на одном из боковых стержней равнялся 2,5 мм. При этом $W_1 = 150 \times 2$, $W_2 = 260$, $W_3 = 200$, $W_K = 20$, $W_P = 100$, $C_P = 60 \text{ мкф}$, 250 в.

Характеристики изготовленного стабилизатора представлены на рис. 3. Несовпадение результатов расчета и эксперимента около 10%. Следовательно, параметры ФРФСТ можно рассчитывать по полученным соотношениям, но при изготовлении следует предусматривать отпайки от обмоток W_2 ; W_K ; W_P для обеспечения возможности настройки.

ЛИТЕРАТУРА

1. Л. А. Бессонов. Электрические цепи со сталью. М.—Л., ГЭИ, 344 стр., 1948.
2. А. Г. Лурье. Теория феррорезонансных стабилизаторов напряжения. М.—Л., ГЭИ, 130 стр., 1958.
3. Д. И. Богданов, Г. К. Евдокимов. Феррорезонансные стабилизаторы. М.—Л., ГЭИ, 180 стр., 1958.