

ИССЛЕДОВАНИЕ ПЕРЕХОДНОГО ПРОЦЕССА ПРИ КОРОТКОМ ЗАМЫКАНИИ В ЦЕПИ КОМПЕНСИРОВАННОГО ФЕРРОМАГНИТНОГО УТРОИТЕЛЯ ЧАСТОТЫ С ПОМОЩЬЮ АНАЛОГОВОЙ МАШИНЫ

Я. В. ПЕТРОВ, М. С. КОМАЛТИЛОВ, С. Н. ЛЫСЕНКО

(Представлена научно-техническим семинаром НИИ АЭМ и кафедры ЭПА ТПИ)

Короткие замыкания (к. з.) за конденсаторами продольной компенсации (ПК) ферромагнитного утробителя частоты могут вызвать опасные перенапряжения конденсаторов и обмоток преобразователя. Для выбора уровня изоляции обмоток, рабочего напряжения конденсаторов и средств защиты от перенапряжений необходимо предварительно оценить возможные предельные токи к. з. в установке. Короткое замыкание компенсированного утробителя представляет собой сложный электромагнитный колебательный процесс в нелинейной цепи, оба компонента магнитной характеристики $B(H)$ трансформаторов которой несинусоидальны. Поэтому расчет токов к. з., особенно переходного режима, чрезвычайно затруднен и может быть выполнен при ряде допущений лишь приближенно.

Получим общее выражение для токов переходного и установившегося режимов к. з., а также напряжения на конденсаторах ПК, применяя методику Н. А. Галочкина, разработанную им для анализа установившихся процессов утробителя с поперечной компенсацией и активной нагрузкой [1]. Расчет выполним на фазу выхода; потерями в стали, рассеянием вторичных обмоток и гармониками выше третьей пренебрегаем, сопротивления первичных обмоток трансформаторной группы ориентировочно учтем, принимая $E_{1л}/U_{1л} < 1$.

Уравнения н. с. сердечников трансформаторов группы

$$\begin{aligned} i_a \omega_1 + i_2 \omega_2 &= l_c H_a; \\ i_b \omega_1 + i_2 \omega_2 &= l_c H_b; \\ i_c \omega_1 + i_2 \omega_2 &= l_c H_c, \end{aligned} \quad (1)$$

где i_a, i_b, i_c — первичные токи;

i_2 — вторичный ток;

ω_1, ω_2 — числа витков фазы входа и выхода (при Т-образной схеме выхода полагать $\omega_2 = 1,5 \omega_{2\gamma}$, где $\omega_{2\gamma}$ — число витков фазы эквивалентной звезды);

l_c — длина средней линии магнитной индукции;

H — мгновенное значение напряженности магнитного поля соответствующей фазы.

Сложив уравнения и учтя, что в трехфазной трехпроводной системе $i_a + i_b + i_c = 0$, получим

$$i_2 = \frac{l_c}{3W_2} \sum_{i=a, b, c} H_i. \quad (2)$$

Уравнение напряжений вторичной цепи, состоящей из последовательно включенных нелинейной индуктивности, емкости и активного сопротивле-

ния обмотки утробителя

$$\frac{d\Psi_3}{dt} + \frac{1}{C} \int i_2 dt + i_2 r_2 = 0, \quad (3)$$

где Ψ_3 — потокосцепление третьей гармоники для трех фаз.

Так как

$$\Psi_3 = 3\omega_2 \Phi_3 = 3\omega_2 B_3 F_c = 3\omega_2 B_{1M} F_c \frac{B_3}{B_{1M}} = 3\omega_2 B_{1M} F_c x, \quad (4)$$

где F_c — активное сечение сердечника, то (3) перепишется

$$3\omega_2 B_{1M} F_c \frac{dx}{dt} + \frac{1}{C} \int i_2 dt + i_2 r_2 = 0. \quad (5)$$

Дифференцируем (5) по времени

$$3\omega_2 B_{1M} F_c \frac{d^2 x}{dt^2} + \frac{i_2}{C} + r_2 \frac{di_2}{dt} = 0. \quad (6)$$

Аппроксимируем основную кривую намагничивания сердечника полиномом третьей степени

$$H = a_1 B + a_3 B^3. \quad (7)$$

В [1] показано, что при такой аналитической записи магнитной характеристики $H(B)$ и косинусоидальных линейных э.д.с. имеем

$$\sum_{i=a,b,c} H_i = (3a_1 B_{1M} + 4,5a_3 B_{1M}^3)x + 3a_3 B_{1M}^3 x^3 + 0,75a_3 B_{1M}^3 \cos 3\omega_1 t. \quad (8)$$

Подставим (8) в (2), затем дифференцируем полученное выражение по времени и, наконец, внесем значения тока i_2 и его производной di_2/dt в (6); после несложных преобразований получим

$$\begin{aligned} \frac{d^2 x}{dt^2} + \frac{r_2 l_c}{\omega_2^2 F_c} \left(\frac{a_1}{3} + 0,5a_3 B_{1M}^2 + a_3 B_{1M}^2 x^2 \right) \frac{dx}{dt} + \frac{l_c}{\omega_2^2 C F_c} \left(\frac{a_1}{3} + 0,5a_3 B_{1M}^2 \right) x + \\ + \frac{l_c a_3 B_{1M}^2 x}{3\omega_2^2 C F_c} = \frac{l_c a_3 B_{1M}^2}{12\omega_2^2 F_c} \left(3r_2 \omega_1 \sin 3\omega_1 t - \frac{1}{C} \cos 3\omega_1 t \right). \end{aligned} \quad (9)$$

Вводим безразмерное время $\tau = \omega_1 t$ и следующие замены

$$\begin{aligned} \frac{r_2 l_c}{\omega_1 \omega_2^2 F_c} \left(\frac{a_1}{3} + 0,5a_3 B_{1M}^2 \right) &= 2\delta; \\ \frac{r_2 l_c a_3 B_{1M}^2}{\omega_1 \omega_2^2 F_c} &= \delta_1; \\ \frac{l_c}{\omega_1^2 \omega_2^2 C F_c} \left(\frac{a_1}{3} + 0,5a_3 B_{1M}^2 \right) &= \gamma; \\ \frac{l_c a_3 B_{1M}^2}{3\omega_1^2 \omega_2^2 C F_c} &= \lambda; \\ \frac{r_2 l_c a_3 B_{1M}^2}{4\omega_1 \omega_2^2 F_c} &= k_1; \\ \frac{l_c a_3 B_{1M}^2}{12\omega_1^2 \omega_2^2 C F_c} &= k_2. \end{aligned} \quad (10)$$

Тогда (9) будет иметь такой вид:

$$\frac{d^2 x}{d\tau^2} + (2\delta + \delta_1 x^2) \frac{dx}{d\tau} + \gamma x + \lambda x^3 = k_1 \sin 3\tau - k_2 \cos 3\tau. \quad (11)$$

Получено в безразмерной форме нелинейное дифференциальное уравнение второго порядка относительно третьей гармоники индукции. Без второго слагаемого коэффициента при первой производной оно известно под именем расширенного (с членом затухания) уравнения Дуффинга.

Решение уравнения (11) позволяет затем найти ток к.з. согласно (2) и (8)

$$i_2 = \frac{l_c}{\omega_2} [(a_1 B_{1M} + 1,5 a_3 B_{1M}^3) x + a_3 B_{1M}^3 x^3 + 0,25 a_3 B_{1M}^3 \cos 3\tau] \quad (12)$$

и напряжение конденсаторов

$$u_c = \frac{1}{\omega_1 C} \int i_2 d\tau = \frac{l_c}{\omega_1 \omega_2 C} \int [a_1 B_{1M} + 1,5 a_3 B_{1M}^3) x + a_3 B_{1M}^3 x^3 + 0,25 a_3 B_{1M}^3 \cos 3\tau] d\tau.$$

По уравнениям (11) ... (13) рассчитан процесс трех- и двухфазных к.з. в цепи утроителя номинальной мощности 300 ва с помощью АВМ МН-14.

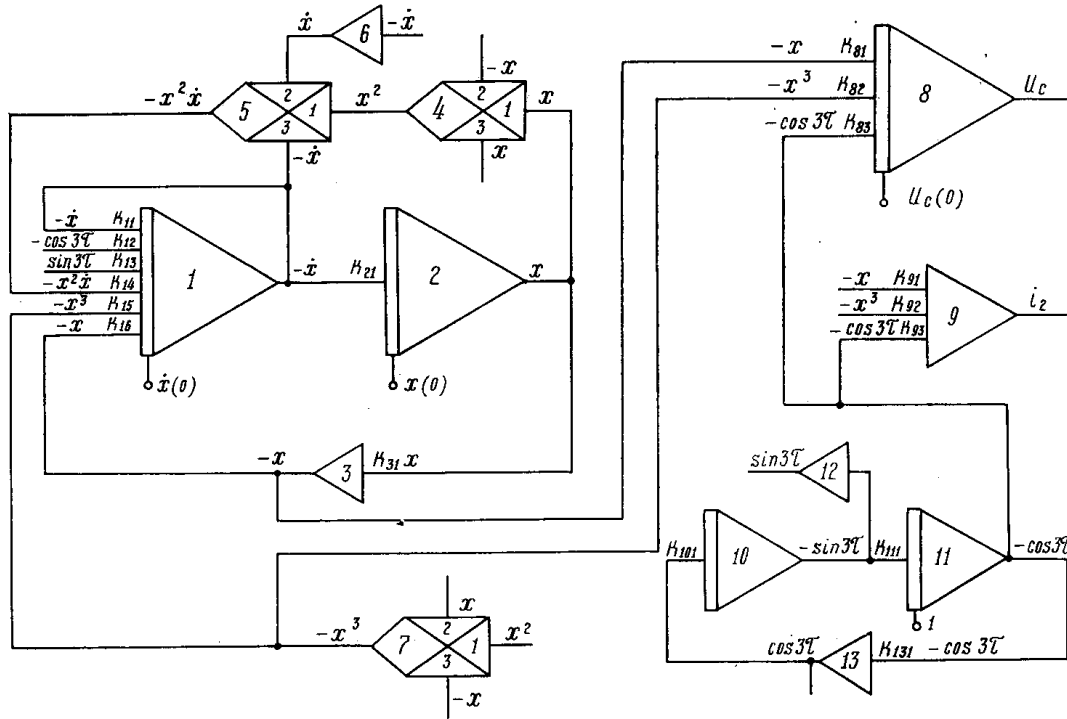


Рис. 1

Структурная схема соединений решающих элементов показана на рис. 1. Решения выполнены при следующих исходных данных: $B_{1M} = 1,84$ тл (сталь Э31—0,35; средняя емкость фазы $C = 365 \mu F$; начальные условия нулевые $[x(0) = 0, \frac{dx(0)}{d\tau} = 0, u_c(0) = 0]$ и отличные от нуля $[x(0) = 0,0943$, что отвечает остаточной индукции стали $B_{1r} = 1,18$ тл, $\frac{dx(0)}{d\tau} = 0,592$ $u_c(0) = U_{cm} = 25,4$ в — амплитуда напряжения на конденсаторах при номинальной нагрузке преобразователя]; коэффициенты аппроксимирующего кривую намагничивания полинома

$$a_1 = -17,8 \cdot 10^2 \frac{м}{ом \cdot сек}, a_3 = 21,6 \cdot 10^2 \frac{м^5}{ом \cdot в^2 \cdot сек^3}$$

На рис. 2 и 3 в качестве примера показаны решения — осциллограммы тока и напряжения на конденсаторах при трехфазном к.з. и не нулевых начальных условиях, полученные с экрана электронно-лучевого индикатора машины. Анализ решений и сравнение их с опытными осциллограммами процессов той же установки показывает следующее.

1. Токи трехфазного к.з. превышают токи двухфазного к.з. в 1,1 ... 1,5 раза.

2. Качественное соответствие расчетных величин замеренным удовлетворительное, а в установившемся режиме точность решений также приемлемая (погрешности не превосходят $\pm 10 \dots 15\%$); моделированный переходный процесс имеет более резкие экстремумы, что можно объяснить при-

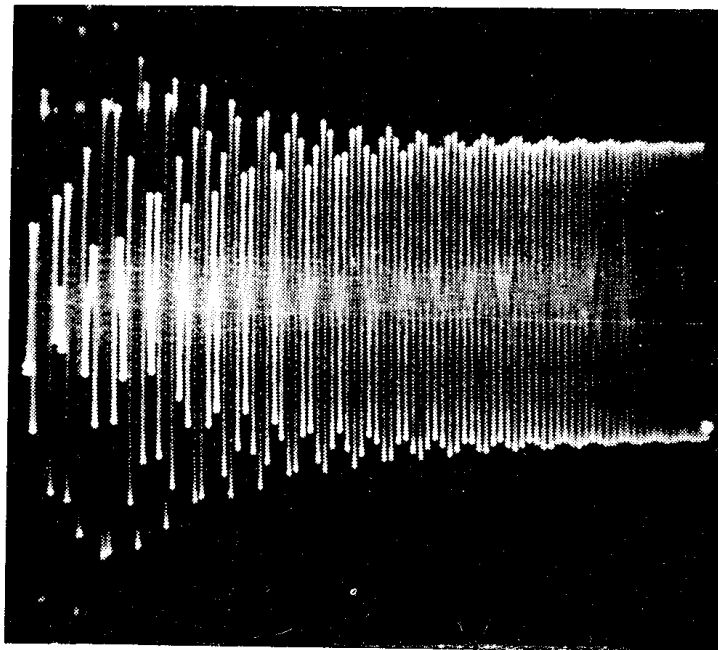


Рис. 2.

нятыми допущениями и погрешностью аппроксимации; по-видимому, эти же причины являются основой меньшей длительности опытных переходных процессов (3... 4 периода тока питающей сети) в сравнении с рассчитанными (около 4 ... 5 тех же периодов).

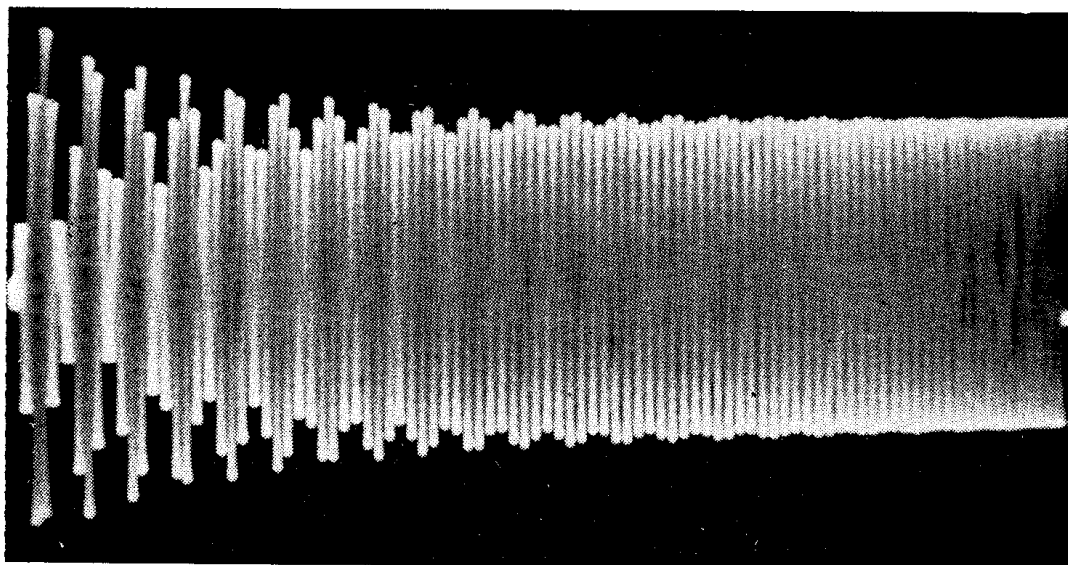


Рис. 3.

3. Ударный ток к.з. и наибольшая амплитуда напряжения конденсаторов наступают через 2,25 или 2,5 периода (тока нагрузки) от начала к.з. и превосходят амплитуды соответствующих установившихся значений не более чем в 1,2 ... 2 раза.

4. Начальные условия несут существенно влияют на переходный процесс (при ненулевых начальных условиях наибольшие амплитуды тока и напряжения неустойчивого режима увеличиваются на 5 ... 10%).

5. Кривые $i_2(t)$ и $u_c(t)$ в переходном режиме имеют характер биений и с известным приближением могут рассматриваться как синусоидальные функции времени, угловая частота которых близка к угловой частоте принужденных колебаний выхода $\omega_2 = 3\omega_1$, а амплитуда гармонически изменяется с угловой частотой $\frac{\omega_2 - \omega'}{2}$, где ω' — угловая частота затухающей свободной слагающей тока к.з., имеющей колебательный характер, причем $\omega' \rightarrow \omega_2$ [2]. Иными словами, переходный процесс к.з. компенсированного утроителя имеет много общего с переходным процессом включения цепи линейных $r_2 - L_{2к} - C$ под синусоидальное напряжение, когда $\frac{r_2}{2L_{2к}} \ll \omega' = \sqrt{\frac{1}{L_{2к}C} - \left(\frac{r_2}{2L_{2к}}\right)^2}$, где $L_{2к}$ — индуктивность выхода утроителя с учетом реакции нагрузки, то есть режим к.з. может быть рассчитан с привлечением хорошо разработанной теории колебаний в линейных цепях.

ЛИТЕРАТУРА

1. Н. А. Г а л о ч к и н. Исследование некоторых свойств и режимов ферромагнитных утроителей частоты с емкостной компенсацией. Диссертация, 1960.
2. Л. Р. Н е й м а н и П. Л. К а л а н т а р о в. Теоретические основы электротехники, ч. II, ГЭИ, 1959.