Записки Ленинградского орденов Ленина и Трудового Красного Знамени горного института им. Г В. Плеханова, т. LIII, вып. 1, 1966 г.

УДК 621.064.1

ИССЛЕДОВАНИЕ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ В НЕЛИНЕЙНОЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЦЕПИ НА МАТЕМАТИЧЕСКОЙ АНАЛОГОВОЙ МАШИНЕ МН-7

В. Г Бауман, О. В. Иванов, В. М. Квятковский, Б. И. Комаров, Е. М. Проскуряков

При включении ненагруженного трансформатора через конденсаторы установки продольной компенсации УПК в цепи могут возникать незатухающие резонансные колебания. Частота этих колебаний обычно составляет 1/3 частоты питающей сети (при субгармоническом резонансе) или равна частоте сети (при феррорезонансе напряжений). Резонансные колебания, как известно, сопровождаются резким увеличением намагничивающего тока трансформатора и перенапряжениями как на самой УПК, так и на трансформаторе.

Для устранения резонансных колебаний используются активные сопротивления, шунтирующие конденсаторы. Эти сопротивления могут быть как линейными (величина которых не зависит от режима работы), так и нелинейными, типа варисторов. Выбор величины требуемого шунтирующего сопротивления представляет весьма сложную и трудоемкую задачу, так как связан с необходимостью анализа нелинейных дифференциальных уравнений, описывающих переходные процессы в цепях с катушками на стальных сердечниках. Поэтому целесообразно определять величины сопротивлений, при которых в исследуемой цепи не возникает устойчивых резонансных колебаний.

На аналоговой машине непрерывного действия типа МН-7 * нами исследованы переходные процессы включения ненагруженного трансформатора через УПК с линейным и нелинейным шунтирующими сопротивлениями. При этом приняты следующие допущения: потери в стали за счет вихревых токов и гистерезиса не учитывались; рассеяние катушки со стальным сердечником считалось не зависящим от насыщения сердечника; нелинейная зависимость потокосцепления от тока (вебер-амперная характеристика) катушки на стальном сердечнике построена по кривой намагничивания трансформатора.

При таких допущениях уравнения переходного процесса в исследуемой схеме электрической цепи (рис. 1, *а*), записанные в относительных

* В исследовании на машине МН-7 принимал участие А. В. Стороженко.

единицах и синхронных секундах, имеют вид

$$\left.\begin{aligned} r_1 i_1 + x_1 \frac{di_1}{dt} + u_c + \frac{d\Psi}{dt} &= U_m \sin(\omega t + \psi_u); \\ i_2 + i_3 &= i_1; \\ i_2 &= \frac{1}{x_c} \cdot \frac{du_c}{dt}; \\ \Psi &= f_1(i_1); \\ i_3 &= f_2(u_c), \end{aligned}\right\} \quad (1)$$

где r_1 — полное относительное активное сопротивление цепи; x_1 — относительное индуктивное сопротивление цепи; x_c — относительное емкостное сопротивление УПК; ψ_u — начальная фаза напряжения; u_c — напряжение на конденсаторе; Ψ — относительное потокосцепление, созданное магнитным потоком, замыкающимся по стали сердечника.

В качестве базисных величин приняты номинальные напряжения и ток катушки, за единицу времени — синхронная секунда.

Для схемы с линейным шунтом

$$i_3 = g_ш u_c. \quad (2)$$

Для нелинейного шунта из карборундового сопротивления

$$i_3 = A u_c^3. \quad (2')$$

На основании системы уравнений (1) составлена структурная схема модели (рис. 1, *б*), для которой написаны машинные уравнения *

$$\left.\begin{aligned} -\frac{du_4}{dt_M} &= k_{151} u_2 - k_{152} u_8 - k_{153} u_6; \\ -\frac{du_8}{dt_M} &= k_{81} u_{10}; \\ -u_{10} &= k_{41} u_6 - k_{42} u_8; \\ -u_5 &= k_{11} u_4 - k_{12} u_6, \end{aligned}\right\} \quad (3)$$

где k_{11}, k_{12}, — коэффициенты усиления соответствующих решающих усилителей машины; u_2, u_4, — напряжения на выходах соответствующих усилителей.

Величина токов, напряжений и потокосцепления исследуемой схемы связана с соответствующими величинами напряжений усилителей масштабными соотношениями

$$\left.\begin{aligned} u &= M_2 u_2; \\ \Psi &= M_5 u_5; \\ i_1 &= M_6 u_6; \\ i_2 &= M_{10} u_{10}; \\ i_3 &= M_{11} u_{11}; \\ u_c &= M_8 u_8. \end{aligned}\right\} \quad (4)$$

---

* Б. Я. Коган. Электронные моделирующие устройства и их применение для исследования систем автоматического регулирования. Госэнергоиздат, 1963.

Из соотношений (1), (3) и (4) определены масштабы

$$M_1 = M_2 = M_3 = M_4 = M_c = 1{,}67 \cdot 10^{-2} \text{ отн. ед./в};$$

$$M_6 = M_7 = M_9 = M_{10} = M_{11} = 7{,}5 \cdot 10^{-2} \text{ отн. ед./в};$$

$$M_8 = 1 \cdot 10^{-2} \text{ отн. ед./в},$$

$$M_t = 1.$$

Нелинейные зависимости $\Psi = f_1(i_1)$ и $i_3 = f_2(u_c)$ моделировались зависимостями $u_6 = f_{M_1}(u_5)$ и $u_9 = f_{M_2}(u_8)$, набранными на нелинейных блоках машины методом кусочно-линейной аппроксимации.

Синусоидальное напряжение питания получено как результат решения дифференциального уравнения вида

$$\frac{d^2y}{dx^2} + ay = 0. \qquad (5)$$

Решение этого уравнения при a 1 набрано на усилителях *7*, *6* и *10*. Начальная фаза включения задана установкой начальных условий на усилителях *7* и *6*.

При исследовании переходных процессов в схеме рис. 1, *а* параметры УПК изменялись в пределах

$$0 \leqslant x_c \leqslant 0{,}3, \quad 0 \leqslant g_ш \leqslant \infty.$$

Активное и индуктивное сопротивления r_1 и x_1 предвключенных элементов приняты равными 0,05, что примерно соответствует сопротивлениям реальной цепи. Как показало исследование влияния фазы включения синусоидального напряжения на характер протекания переходного процесса, наиболее неблагоприятно включение при нулевой фазе. Поэтому дальнейшее исследование ограничено именно этим случаем и направлено на определение граничных величин шунтирующей проводимости $g_ш$, при которых наступает затухание резонансных колебаний.

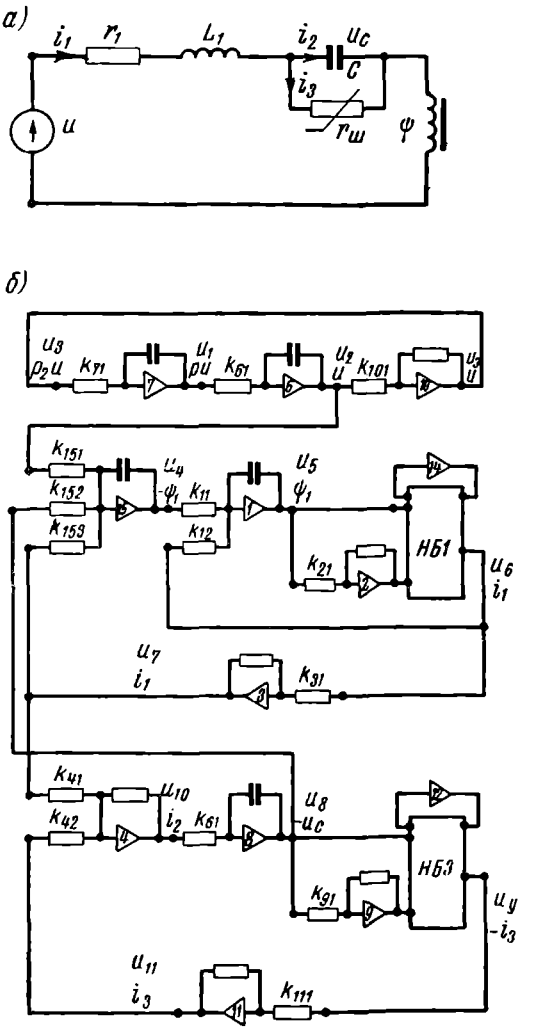


Рис. 1. Схемы исследуемой электрической цепи (*а*) и структурная схема модели (*б*).

На входы усилителей вертикального и горизонтального отклонений луча электронного осциллографа подавались напряжения u_4 и u_8, моделирующие соответственно $\frac{du_c}{dt}$ и u_c. По виду фазовых траекторий, наблюдаемых на экране осциллографа, определялся характер переходного процесса. По полученным таким образом величинам на рис. 2 построены

кривые для линейного *1* и нелинейного *2* шунтов. Эти кривые разбивают плоскость параметров $g_ш$ и x_c на две области — нижнюю, где резонансные колебания не затухают, и верхнюю, где незатухающие резонансные колебания существовать не могут. Кривая *2* проходит несколько ниже кривой *1*, так как в переходном процессе демпфирующее действие нелинейного шунта определяется его динамической проводимостью, которая быстро растет при возрастании напряжения u_c. Характер переходных процессов в схеме с нелинейным шунтом при соответствующих значениях параметров подобен характеру переходных процессов в схеме с линейным шунтом.

В процессе исследования выявлено, что при значениях x_c, лежащих в диапазоне от 0,03, до 0,12 в цепи возникают субгармонические колебания с частотой, равной $\frac{1}{3}$ промышленной. Для подавления этих колебаний величина проводимости шунта должна быть сравнительно большой $\frac{1}{g_ш x_c} \quad \frac{r_ш}{x_c} = (8 \div 10)$. Осциллограммы, иллюстрирующие характер переходных процессов в этом диапазоне величин x_c приведены на рис. 3, *а* и *б*. Проводимость $g_ш = 0{,}75$ недостаточна для подавления субгармонических резонансных колебаний, так как находится в области незатухающих колебаний, где субгармонические колебания устанавливаются сразу после включения. Максимальная величина тока i_1 достигает значения $5I_н$. Максимальное напряжение на конденсаторах составляет 0,45, что для реальной установки УПК соответствует 1550 *в*. Такое значение $U_{c\,m}$ превышает напряжение на УПК при нормальной работе примерно в 4 раза. Максимальный ток в шунте $i_з$ достигает 0,36 относительных единиц или 11,2 *а* в реальной установке. Увеличение проводимости шунта до $g_ш = 2{,}25$ (рис. 3, *б*) приводит к быстрому затуханию субгармонических колебаний.

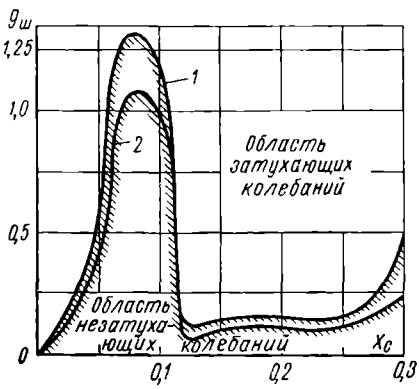


Рис. 2. Область незатухающих колебаний в плоскости параметров $g_ш$ и x_c.

Амплитуда первой полуволны тока i_1 сохраняла свою величину, а последующие значительно уменьшались. При значениях сопротивления УПК x_c, лежащих в пределах 0,12—0,25, в цепи возникают субгармонические колебания частотой 1/3. Они подавляются значительно меньшей величиной проводимости шунта. Как видно на осциллограмме рис. 3, для гашения субгармонических резонансных колебаний в этой области достаточно иметь $g_ш$ порядка 0,15 $\left(\frac{1}{g_ш x_c} = \frac{r_ш}{x_c} = 30 \div 60\right)$.

Характер переходных процессов в этом диапазоне величин x_c виден на осциллограммах рис. 3, *в*, *б*. При отсутствии шунта (рис. 3, *в*) в переходных процессах появляются перемежающиеся феррорезонансные и субгармонические колебания. Феррорезонансные колебания имеют промышленную частоту и характеризуются большими значениями тока в цепи и напряжения на конденсаторах. Ток i_1 достигает (6—7) $I_н$, а напряжение на конденсаторах u_c — величины 0,8 $U_н$, т. е. примерно 2800 *в* в реальной установке. По сравнению с нормальной работой напряжения на конденсаторах возрастают в 4—5 раз. Феррорезонансные колебания возникают при включении цепи и длятся первые 2—5 периодов промышленной частоты, затем срываются и в цепи устанавливаются субгармонические колебания с су-

щественно меньшими амплитудами. В дальнейшем субгармонические колебания вновь переходят в феррорезонансные.

Включение шунта даже с небольшой проводимостью ($g_ш = 0{,}15$) приводит к подавлению феррорезонансных колебаний, которые возникают в цепи лишь в первые периоды переходного процесса рис. 3, *г* и *б*. После

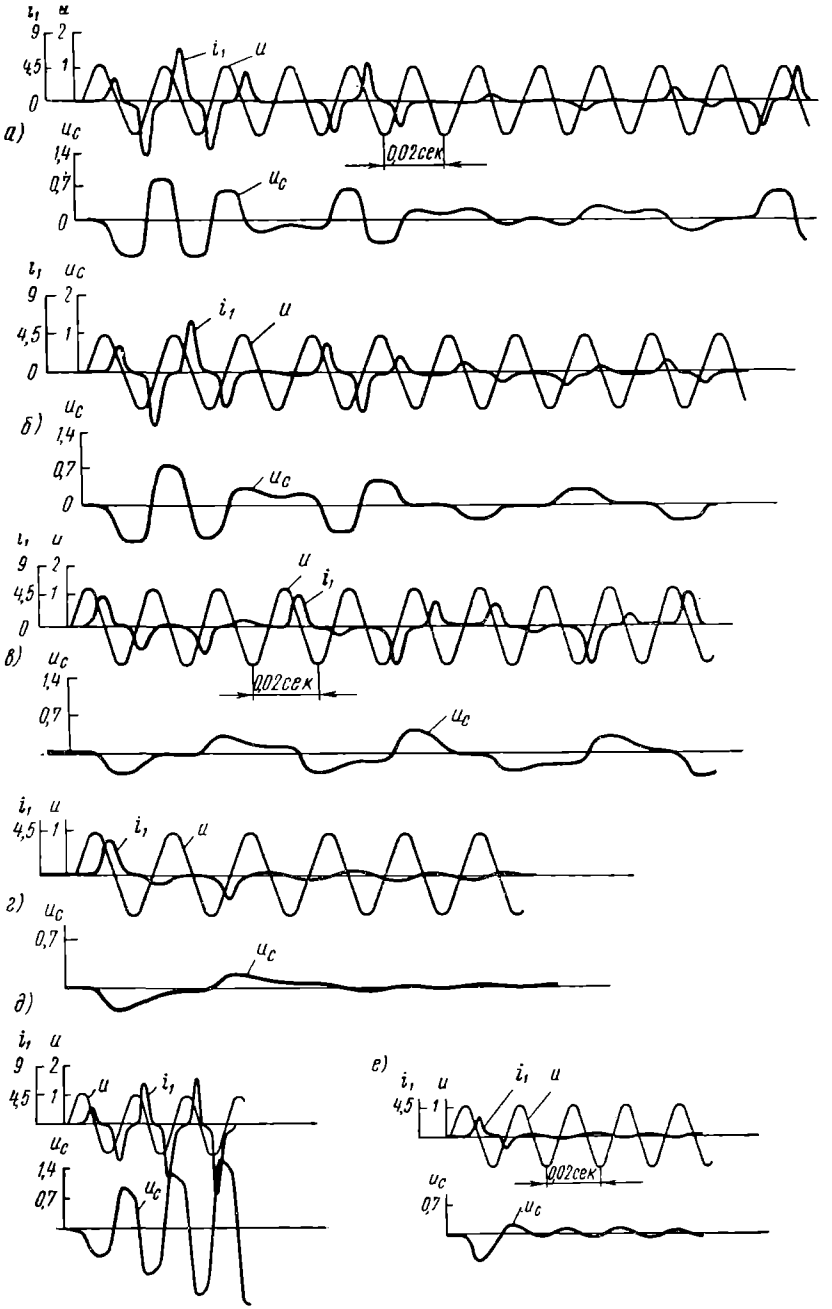


Рис. 3. Осциллограммы переходных процессов включения трансформатора (линейный шунт): *а* — $x_c = 0{,}1$, $g_ш = 0{,}75$; *б* — $x_c = 0{,}1$, $g_ш = 2{,}25$; *в* — $x_c = 0{,}2$, $g_ш = 0$; *г* — $x_c = 0{,}2$, $g_ш = 0{,}15$; *д* — $x_c = 0{,}3$, $g_ш = 0{,}56$; *е* — $x_c = 0{,}3$, $g_ш = 1{,}3$.

исчезновения феррорезонансных колебаний в цепи устанавливаются незатухающие субгармонические колебания со значительно меньшими амплитудами.

Дальнейшее увеличение проводимости шунта приводит к подавлению и субгармонических колебаний. В конце исследованного диапазона изменения x_c (от 0,25 до 0,3) в цепи при включении возникают феррорезонансные колебания. Они сопровождаются токами, величина которых достигает $7{,}5\ I_н$ и больше. При этом, естественно, перенапряжения на конденсаторах превышают в 4—5 раз напряжения нормального режима.

При малых значениях $g_ш$ (меньших 0,56) феррорезонансные колебания не затухают рис. 3, *д*. Увеличение $g_ш$ до 1,3 приводит к подавлению колебаний за первые два периода промышленной частоты (рис. 3, *е*).

Выводы

1. Исследованием на математической модели найдены необходимые шунтирующие сопротивления для гашения резонансных колебаний. Шунтирующее сопротивление должно быть не больше $8x_c$ в интервале x_c от 0,03 до 0,12 и не больше $30x_c$ в интервале x_c от 0,12 до 0,25.

В этих же интервалах изменения x_c нелинейные сопротивления могут иметь большие номинальные значения, что снизит потери энергии в них при нормальных режимах.

2. В исследованном диапазоне изменения x_c выявлены три области. В первой области ($0{,}12 \geqslant x_c \geqslant 0{,}03$) возникают субгармонические колебания, для подавления которых необходимы шунтирующие сопротивления небольшой величины.

Во второй области ($0{,}12 \leqslant x_c \leqslant 0{,}25$) субгармонические колебания подавляются значительно большими шунтирующими сопротивлениями. Резонансные колебания в этой области носят перемежающийся характер. При включении цепи возникают феррорезонансные колебания с большими амплитудами, которые затем переходят в субгармонические с существенно меньшими амплитудами.

В третьей области ($x_c \geqslant 0{,}25$) возникают феррорезонансные колебания на частоте сети с очень большими амплитудами токов и напряжений.

3. Нелинейные шунты оказывают более сильное демпфирующее действие, так как их дифференциальная проводимость возрастает с ростом напряжения.