УДК 621.316.11

О.Б.ШОНИН
Горно-электромеханический факультет,
профессор кафедры электротехники и электромеханики
Е.А.БОЙЦОВА
Горно-электромеханический факультет,
группа ЭР-00-2, ассистент профессора

ФЕРРОРЕЗОНАНСНЫЕ ЯВЛЕНИЯ В ТРАНСФОРМАТОРНО-ЕМКОСТНЫХ КОМПЕНСАТОРАХ КОМБИНИРОВАННОГО ДЕЙСТВИЯ

Особенности феррорезонансных колебаний и методы их устранения рассматриваются на примере трансформаторно-емкостной установки продольной и поперечной компенсации, используемой в цепях питания мощных электродвигателей, в системах электроснабжения рудно-термических и дугосталеплавильных печей. На основе решения уравнения Дуффинга определено влияние амплитуды тока и коэффициента затухания системы на режим работы трансформаторно-емкостного компенсатора. Выполнена оценка области устойчивости основного типа колебаний. Обнаружено существование субгармонических колебаний, выявлено влияние не только амплитуды, но и фазы источника на возникновение аномальных режимов, обусловленных релейным эффектом и явлением автомодуляции. Показано, что устранение феррорезонансных колебаний связано с обеспечением режима магнитной цепи, близкого к линейному, и выбором коэффициента затухания из условия предельно допустимого значения вносимого в линию активного сопротивления.

The paper covers some aspects of origin and damping of ferroresonance oscillations while compensating inductive drop and power factor with capacitors connected into power lines of heavy current loads through transformers. Basic mode approximate solution of Duffing equation was derived to show history of the compensator characteristics response to the current amplitude under different values of decrement coefficient. Stability of the first harmonic regime was estimated under Van-der-Pol approach. Matlab-aided simulation of the processes resulted in revealing subharmonics exitation in the compensator along with strong sensivity of the relay effect and automodulated oscillations to the amplitude and initial phase of independent current and/or pressure source. Avoiding non-linear oscillations is due to providing soft non-linear conditions of magnetic circuit and moderate value of dectrement coefficient limited by the value or resistance inserted into the line.

Если нелинейные ферромагнитные цепи содержат емкостные элементы, то режим работы электрооборудования может быть нарушен в результате возбуждения в цепях феррорезонансных колебаний. Подобные явления возникают в цепях питания рудно-термических и дугосталеплавильных печей, которые снабжены установками продольной компенсации (УПК) с согласующим трансформатором [2], в цепях, образованных измерительными трансформаторами напряжения и емкостью фаз линии, в фильтрах токов обратной последовательности, используемых в релейной защите, при неполнофазном питании силовых трансформаторов и др.

В работе исследуются феррорезонансные колебания на примере установки продольно-поперечной компенсации с согласующим трансформатором. Установка используется в сетях питания мощных электродвигателей, удаленных от источника. В

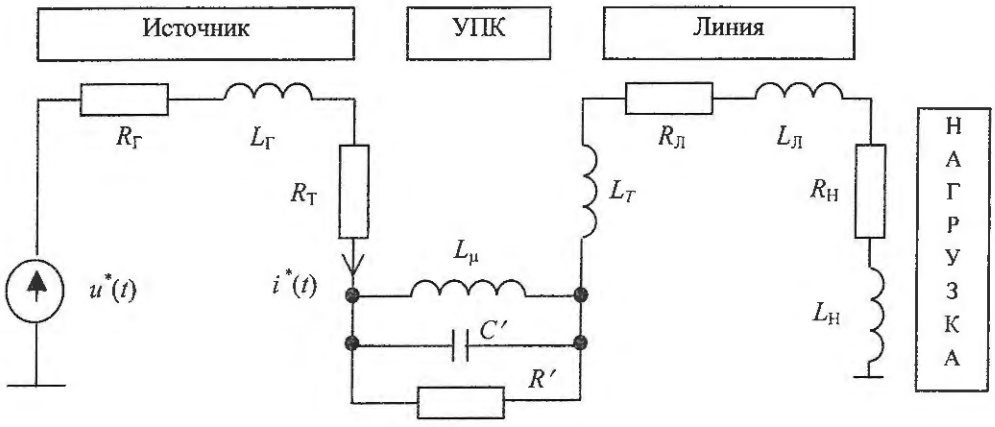


Рис. 1. Схема замещения линии с трансформаторной установкой продольной компенсации

режиме пуска используется схема продольной компенсации (рис.1), обеспечивающая требуемый уровень напряжения на зажимах двигателя за счет уменьшения реактивного сопротивления линии.

Трансформатор служит для преобразования емкостного сопротивления конденсатора X_C, включенного во вторичную цепь, исходя из условия $X'_C \le X_л$, где $X'_C = X_C n^{-2}$, $X_л$ – индуктивное сопротивление линии, n – коэффициент трансформации. В стационарном режиме конденсаторы переключаются на схему поперечной компенсации, обеспечивающей снижение тока источника; согласующий трансформатор переключается на режим вольтодобавочного.

При составлении уравнений цепи потери в стали не учитывались, вебер-амперная характеристика магнитопровода $i_μ = f(Φ)$ аппроксимировалась неполным полиномом третьей степени, продольная ветвь схемы замещения трансформатора отнесена к внешнему относительно ветви намагничивания контуру. Базовые значения тока $I_б$, потокосцепления $Φ_б$ и напряжения $U_б$ выбраны из условия равенства амплитуд емкостного тока и тока ветви намагничивания:

$$I_б = a_1 Φ_б + a_3 Φ_б^3;\ I_б = ω C' U_б;\ U_б = ω Φ_б,$$

где a_1 и a_3 – коэффициенты аппроксимации; ω – круговая частота.

Безразмерное уравнение нелинейного трансформатора относительно потокосцепления $Φ^* = ΦΦ_б^{-1}$ получено на основе законов Кирхгофа и закона полного тока в предположении, что ток линии $i^* = I_m^* \sin(τ + ψ_i)$, где $τ = ω t$, задан. Тогда

$$\frac{d^2Φ^*}{dτ^2} + δ\frac{dΦ^*}{dτ} + i_μ^*(τ) = i^*(τ); \qquad (1)$$

$$i_μ^*(τ) = d_1 Φ^* + d_3 Φ^{*3},$$

где $i_μ^*$ – ток намагничивания; $δ = ω CR$ – постоянная затухания; R – сопротивление резистора, шунтирующего конденсатор; d_1 и d_3 – безразмерные коэффициенты,

$$d_1 = \frac{a_1}{ω^2 C'};\ d_3 = d_1 \frac{a_3}{a_1} Φ_б^{*2}.$$

Связь тока с параметрами цепи вытекает из уравнения равновесия напряжений в контуре, образованном эквивалентным источником, согласующим трансформатором, линией и нагрузкой:

$$\frac{di^*}{dτ} = \frac{X'_C}{X_{L_э}} u^*(τ) - i^* \frac{R_э}{X_{L_э}} - \frac{X'_C}{X_{L_э}} \frac{dΦ^*}{dτ}, \qquad (2)$$

где $X_{L_э}$ и $R_э$ – индуктивное и активное сопротивление цепи относительно ветви намагничивания.

Полученное уравнение нелинейного двухполюсника (1) является разновидностью уравнения Дуффинга [4, 5]. Вынужденное решение определялось методом гармонической линеаризации [1], в соответствии с которым в решении учитывалась только первая гармоника спектра реакции $\Phi^*(\tau) = \Phi_m^* \sin(\tau + \theta)$. Такой режим при условии обеспечения емкостного характера входного сопротивления двухполюсника является основным для УПК. Амплитудная $\Phi_m^*(I_m^*)$ и фазовая $\theta(I_m^*)$ характеристики УПК при $\psi_i = 90°$ имеют вид:

$$I_m^2 = \Phi_m^{*2}\left[d_3^2\left(\frac{3}{4}\Phi_m^{*2} - 1\right)^2 + \delta^2 \right];$$

$$\theta = \operatorname{arctg}\frac{d_3\left(\frac{3}{4}\Phi_m^{*2} - 1\right)}{\delta}. \qquad (3)$$

Из рассмотрения семейства амплитудных характеристик (рис.2), построенных в относительных единицах для $d_1 = 0{,}1$, $d_3 = 0{,}9$ и различных значений δ, следует, что при достижении током критического значения происходит скачок потокосцепления и соответствующего ему напряжения. При этом, как следует из выражения (3), емкостной характер цепи переходит в индуктивный. Такой режим противоречит назначению УПК и должен быть исключен. Наличие в многозначной характеристике двухполюсника участка с отрицательной производной свидетельствует о существовании области неустойчивости режима первой гармоники.

Устойчивость исследовалась методом медленно меняющихся амплитуд Ван-дер-Поля [1, 4], с помощью которого система сведена к автономной. Применение критерия Гурвица к системе дифференциальных уравнений относительно приращений позволило определить область устойчивости:

$$\left(\delta^2 + \frac{27}{16}d_3^2\Phi_m^{*4} - 3d_3^2\Phi_m^{*2} + d_3^2\right) > 0.$$

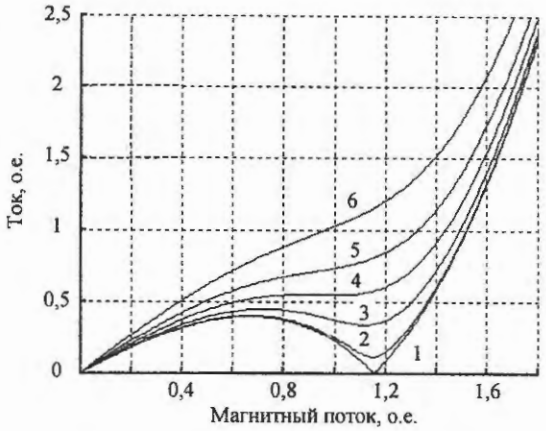


Рис.2. Амплитудная характеристика нелинейной цепи при различных значениях коэффициента затухания δ

1, 2, 3, 4, 5 и 6 – при δ, равном соответственно 0; 0,1; 0,3; 0,5; 0,7 и 1,0

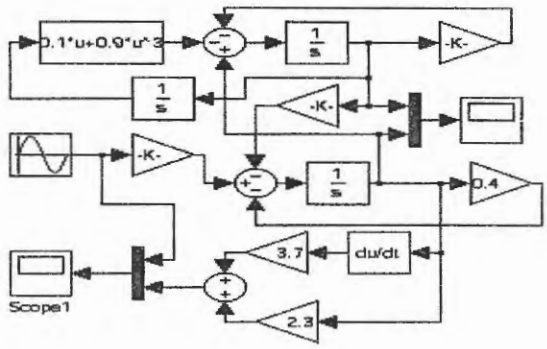


Рис.3. Структурная схема решения дифференциальных уравнений

Для определения характера колебаний в области неустойчивости уравнение (1) исследовалось численно в соответствии со структурной схемой его решения (рис.3), в которой учтено также и уравнение (2).

Компьютерный эксперимент, выполненный с помощью пакета прикладных программ MATLAB [3], показал чувствительность реакции системы к начальной фазе тока ψ_i. При $\delta = 0{,}1$ критические значения токов для $\psi_i = 0°$ и $\psi_i = 90°$ отличаются на 40 %: $I_m^*(0°) = 0{,}26$ и $I_m^*(90°) = 0{,}36$. В момент скачка, напряжение двухполюсника возрастает в 3-4 раза в зависимости от значения ψ_i.

а *б*

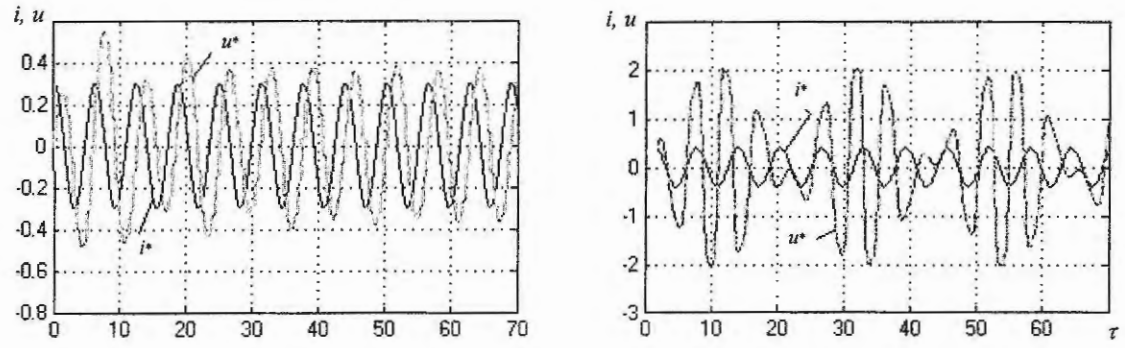


Рис.4. Осциллограмма токов и напряжений: *а* – при одномодовом режиме ($I_m^* = 0{,}3$, $\psi_i = 1{,}57$, $\delta = 0{,}1$);

б – при режиме автомодулированных колебаний ($I_m^* = 0{,}4$, $\psi_i = 0$, $\delta = 0{,}01$)

а *б*

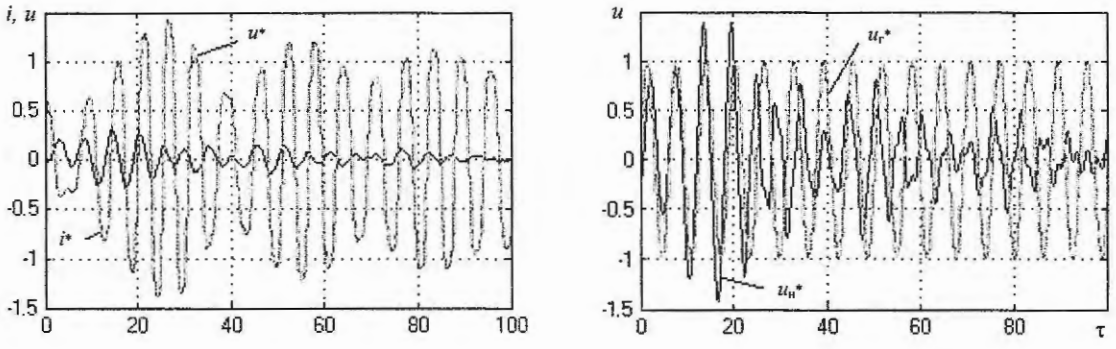


Рис.5. Осциллограммы аномального режима трансформаторной УПК при $u^*(\tau) = U_m^* \sin(\tau + \psi_u)$,

$U_m^* = 1$, $\psi_u = 0$: *а* – напряжение и ток УПК; *б* – напряжение источника и напряжение нагрузки

При малых значениях коэффициента затухания $\delta < 0{,}1$ в цепи возникают субгармонические колебания с дробной кратностью 3, которые модулируют колебания основной частоты (рис.4). Возникновение нелинейных колебаний сопровождается увеличением напряжения в 7-8 раз до уровня $U_m^* = 1{,}7 \div 1{,}9$. Как и релейный эффект, явление автомодуляции зависит не только от амплитуды, но и фазы тока. Поэтому выбор параметров УПК следует производить, исходя из наиболее неблагоприятных начальных условий.

Исследование режимов работы линии с трансформаторной УПК при питании цепи от эквивалентного источника напряжения производилось на основе численного решения уравнений (1) и (2) для следующих значений параметров схемы: сопротивление нагрузки $Z_н = (0{,}223 + 0{,}128j)$ Ом, собственное сопротивление эквивалентного источника $Z_г = (0{,}015 + 0{,}005j)$ Ом, сопротивление линии, включая сопротивление силового и согласующего трансформаторов, $Z_л = (0{,}095 + 0{,}068j)$ Ом.

Анализ осциллограмм показал, что при правильно выбранных параметрах УПК напряжение нагрузки практически совпадает с напряжением источника. При недостаточном шунтировании конденсатора ($\delta' < 0{,}1$) и увеличении напряжения источника компенсация напряжения нарушается из-за возник-

новения в УПК субгармонических колебаний (рис.5). В этом случае напряжение нагрузки составляет 30 % от напряжения источника.

Подавление субгармонических колебаний достигается за счет коэффициента затухания $\delta = 0{,}1\text{-}0{,}15$, значение которого ограничено активной составляющей сопротивления, вносимого в линию. Кроме того, для устранения нежелательных режимов (нелинейный эффект, автомодуляция) необходимо выбирать параметры магнитопровода трансформатора таким образом, чтобы при максимальном возмущении рабочая точка вебер-амперной характеристики находилась вне области насыщения. При заданной кривой намагничивания $B(H)$ это может быть достигнуто соответствующим выбором сечения магнитопровода.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Данилов Л.В.* Теория нелинейных электрических цепей / Л.В.Данилов, П.Н.Матханов, Е.С.Филиппов. Л.: Энергоиздат, 1990.

2. *Дацис Я.Б.* Емкостная компенсация реактивных нагрузок мощных токоприемников промышленных предприятий / Я.Б.Дацис, Г.М.Жилов. Л.: Энергия, 1980.

3. *Медведев В.С.* Control System Toolbox / В.С.Медведев, В.Г.Потемкин; МИФИ. М., 1999.

4. *Филиппов Е.* Нелинейная электротехника. М.: Энергия, 1968.

5. *Хьюз В.* Нелинейные электрические цепи. М.: Энергия, 1967.