

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ РАСЧЕТА ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ В НЕЛИНЕЙНОЙ ТРЕХФАЗНОЙ СЕТИ

Показана математическая модель для исследования электромагнитных переходных процессов в трехфазных сетях с резонансным токоограничивающим устройством (РТУ) на основе применения метода переменных состояния в сочетании с методом припасовывания и Рунге Кутты.

Ключевые слова: электромагнитные процессы, трехфазная сеть, токоограничивающее устройство, генераторы, трансформаторы, двигатели.

MATHEMATICAL MODEL OF CALCULATION OF ELECTROMAGNETIC TRANSIENT PHENOMENA ON A NON-LINEAR THREE-PHASE NETWORK

The mathematical model for a research of electromagnetic transient phenomena on three-phase networks with the resonant current-limiting device (RCLD) on the basis of application of a method of state variables in combination with method of alignment and Runge Kutt is shown.

Keywords: electromagnetic processes, three-phase network, current-limiting device, generators, transformers, engines.

Увеличение числа и единичной мощности электростанций, внедрение мощных генераторов, трансформаторов, двигателей и повышение плотности нагрузки сопровождаются естественным ростом токов короткого замыкания (КЗ). Возрастающие аварийные токи в сетях и сверхтоки на межсистемных связях приводят к нарушению электроснабжения потребителей, к значительному увеличению расходов на дорогие мероприятия по усилению и сохранению устойчивости электроэнергетической системы. В связи с этим все острее ощущается необходимость в исследовании и применении новых перспективных средств ограничения токов КЗ, на базе нелинейных устройств. Одним из таких средств является резонансное токоограничивающее устройство (РТУ) [1,2].

РТУ при соответствующем выборе параметров элементов могут выполнять функции системных элементов многоцелевого назначения – регулировать напряжение в сети, ограничивать ток КЗ. Схема РТУ показано на рис. 1. В ней x_L - линейный реактор, по сопротивлению равной сопротивлению x_C ; $x_{H,P}$ - нелинейный реактор; R_d - значительное активное сопротивление [2].

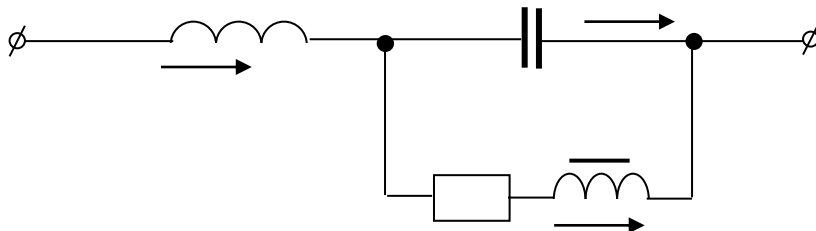


Рис. 1 Схема резонансно – токоограничивающего устройства (РТУ)

В нормальных режимах напряжение на емкости U_C недостаточно для насыщения реактора $x_{H,P}$. При КЗ сильно растут значения U_C и это приводит к повышению $I_{H,P}$ в параллельной цепи, реактор $x_{H,P}$ насыщается, его сопротивление $x_{H,P}$ уменьшается, резонанс нарушается и общее сопротивление всей схемы РТУ сильно возрастает, таким образом, ограничивается ток КЗ. При отключении КЗ восстанавливается нормальная схема резонансного состояния. Данная статья посвящена разработке математической модели для исследования переходных процессов в трехфазных сетях, содержащих РТУ.

В отличие от линейных трехфазных цепей трехфазные нелинейные цепи нельзя рассматривать как наложение трех однофазных цепей даже при полной симметрии, так как в этих цепях проявляются все характерные особенности электроферромагнитных цепей со многим степенями свободы. Для расчета электромагнитных переходных процессов в таких цепях целесообразно применять метод переменных состояния [2].

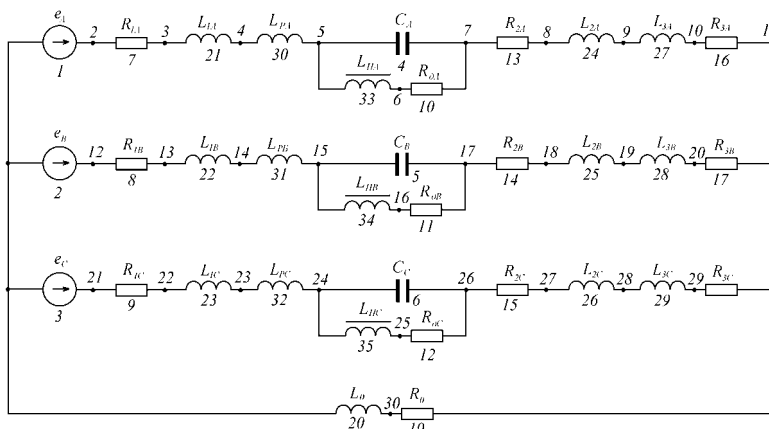
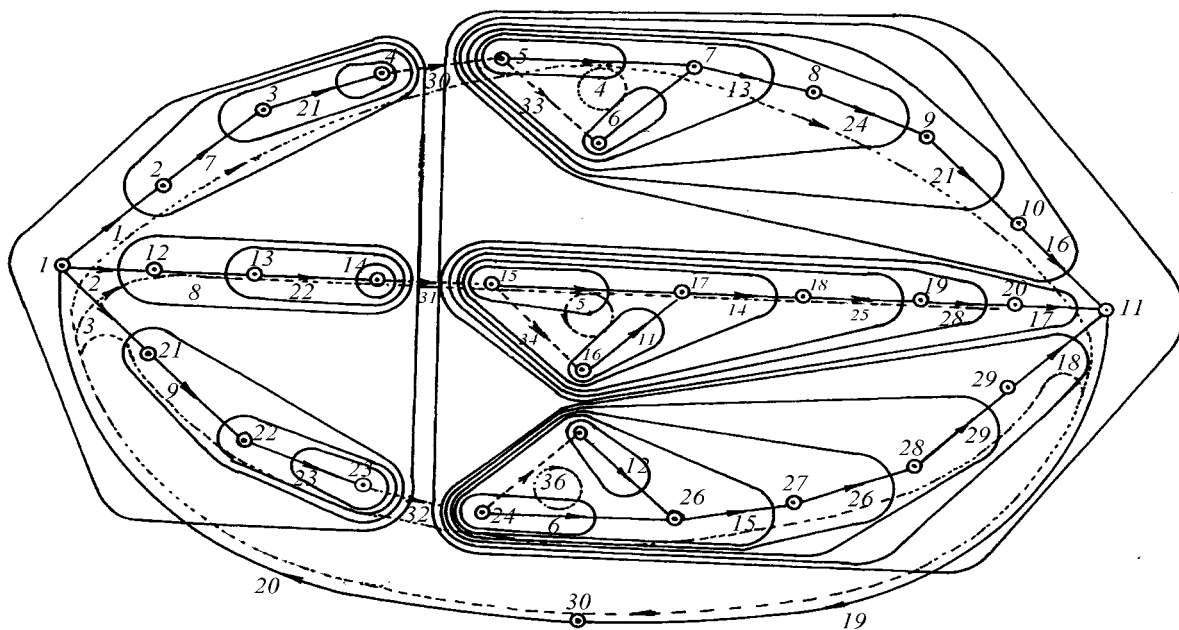


Рис. 2. Трехфазная электрическая схема с РТУ

Трехфазная цепь рассмотрена как разветвленная цепь с несколькими однофазными источниками (рис.2). Топология этой схемы показаны на рис.3 и состоит из 35 ветвей, связывающих 30 узлов. Выбранное дерево показано сплошными линиями, а ветви связей пунктирными. Главное сечение показано сплошными тонкими линиями, а главные контуры пунктирными.



	$\bar{L}^1 Z$	\dot{a}_{93}	$\frac{1}{L_{HC}}$	да	10
		\dot{a}_{44}	$\frac{R_A(L_0^2 - L_B L_C) + R_0(L_0 L_C + L_0 L_B - 2L_0^2)}{\Delta}$	нет	11
		\dot{a}_{45}	$\frac{R_B(L_0 L_C - L_0^2) + R_0(L_0 L_B - L_B L_C)}{\Delta}$	нет	12
		\dot{a}_{46}	$\frac{R_C(L_0 L_B - L_0^2) + R_0(L_0 L_C - L_A L_B)}{\Delta}$	нет	13
		\dot{a}_{54}	$\frac{R_{\dot{A}}(L_0 L_C - L_0^2) + R_0(L_0 L_{\dot{A}} - L_{\dot{A}} L_C)}{\Delta}$	нет	14
		\dot{a}_{55}	$\frac{R_B(L_0^2 - L_A L_C) + R_0(L_0 L_C + L_0 L_A - 2L_0^2)}{\Delta}$	нет	15
A	$\bar{L}^1 Z$	\dot{a}_{56}	$\frac{R_C(L_0 L_A - L_0^2) + R_0(L_0 L_C - L_A L_C)}{\Delta}$	нет	16
		\dot{a}_{64}	$\frac{R_A(L_0 L_B - L_0^2) + R_0(L_0 L_A - L_A L_B)}{\Delta}$	нет	17
		\dot{a}_{65}	$\frac{R_B(L_0 L_A - L_0^2) + R_0(L_0 L_B - L_A L_B)}{\Delta}$	нет	18
		\dot{a}_{66}	$\frac{R_C(L_0^2 - L_A L_B) + R_0(L_0 L_B + L_0 L_A - 2L_0^2)}{\Delta}$	нет	19
		\dot{a}_{77}	$-\frac{R_{\ddot{a}}}{L_{HA}}$	да	20
		\dot{a}_{88}	$-\frac{R_{\ddot{a}}}{L_{H\dot{A}}}$	да	21
		\dot{a}_{99}	$-\frac{R_{\ddot{a}}}{L_{H\ddot{N}}}$	да	22
B	L^1	\hat{a}_{44}	$\frac{L_{\dot{A}} L_C - L_0^2}{\Delta}$	нет	23
		\hat{a}_{45}	$\frac{L_0^2 - L_0 L_C}{\Delta}$	нет	24
		\hat{a}_{46}	$\frac{L_0^2 - L_0 L_{\dot{A}}}{\Delta}$	нет	25
		\hat{a}_{55}	$\frac{L_{\dot{A}} L_C - L_0^2}{\Delta}$	нет	26
		\hat{a}_{56}	$\frac{L_0^2 - L_0 L_{\dot{A}}}{\Delta}$	нет	27
		\hat{a}_{66}	$\frac{L_{\dot{A}} L_{\dot{A}} - L_0^2}{\Delta}$	нет	28

Здесь:
 $\Delta = L_{AB} L_{AC} - L_A^2$

$$R_A = R_{1A} + R_{2A} + R_{3A}$$

$$R_B = R_{1B} + R_{2B} + R_{3B}$$

$$R_C = R_{1C} + R_{2C} + R_{3C}$$

$$L_A = L_{1A} + L_{2A} + L_{3A} + L_{D\dot{A}}$$

$$L_B = L_{1B} + L_{2B} + L_{3B} + L_{D\dot{A}}$$

$$L_C = L_{1C} + L_{2C} + L_{3C} + L_{A\ddot{N}}$$

Выражения для элементов матрицы и алгоритм решения уравнения состояния (1), основанный на методе припасовывания в сочетании с методом Рунге-Кутты, приведены в работе (2). Таким образом, получена математическая модель, позволяющая рассчитать переходные процессы в трехфазных сетях с заземленными нейтральными, содержащими РТУ.

В соответствии с приведенной математической моделью (1) составлена программа на языке Турбо-Паскаль и адаптирована на ЭВМ [2,3].

Для проверки и подтверждения теоретических выводов был проведен эксперимент.

Принципиальная схема электроустановки приведена на рис.4.

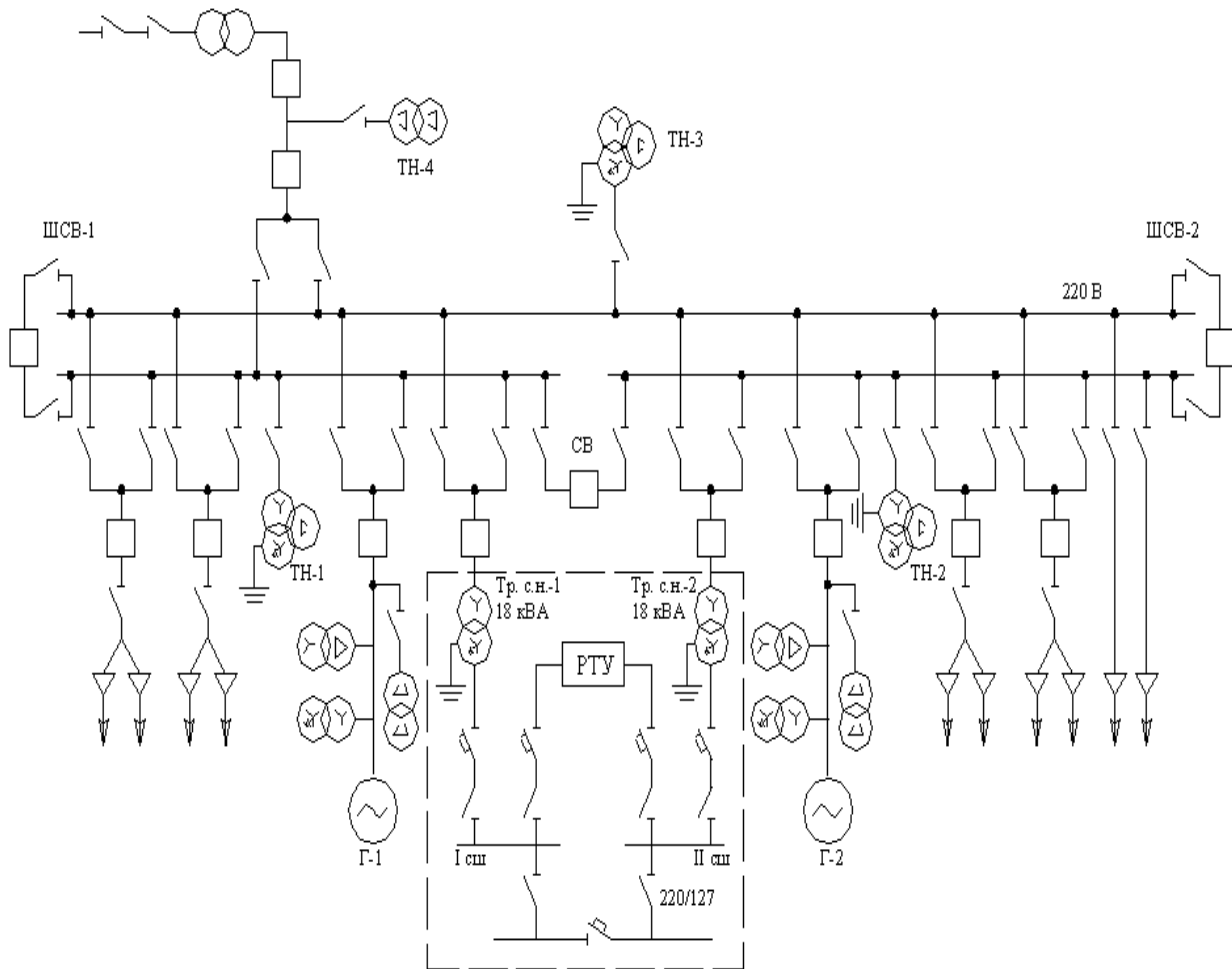


Рис.4. Принципиальная схема электроустановки с РТУ

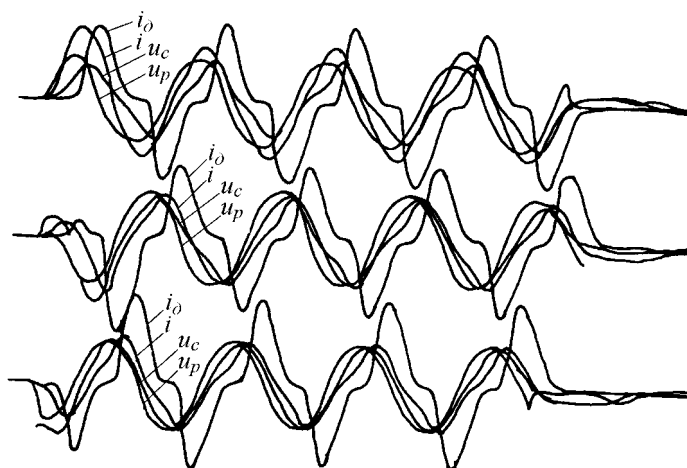


Рис.5

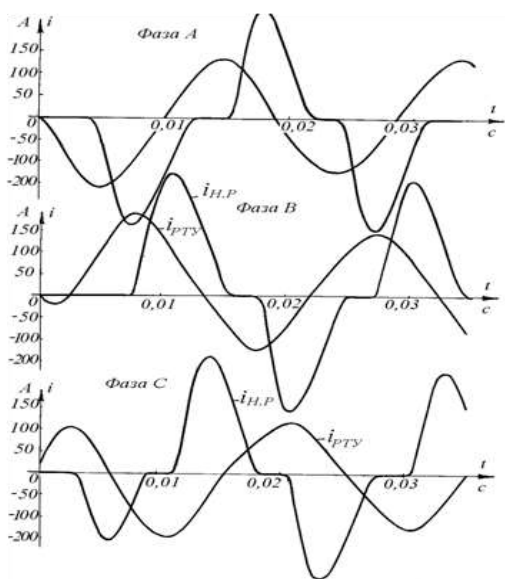


Рис.6

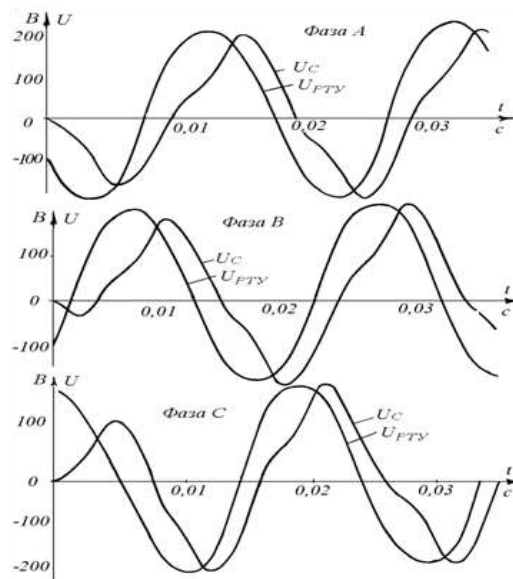


Рис.7

На рис.5 приведены осциллограммы, снятые с экспериментальной установки для сети с заземленными нейтралью; на рис.6 и 7 – графики, построенные по результатам изложенной выше математической модели (1).

Сравнение экспериментальных осциллограмм с графиками, полученными теоретически, свидетельствует о хорошем качественном и количественном совпадении теоретических результатов с экспериментальными.

В результате проведенного анализа можно сделать следующие выводы:

1. В трехфазных сетях с РТУ проявляются все характерные особенности электроферромагнитных цепей со многими степенями свободы, что вынуждает рассматривать сеть, при нестационарных режимах, как разветвленную цепь с несколькими однофазными источниками.
2. Математическая модель трехфазной системы, основанная на методе припасовывания в сочетании с методом Рунге-Кутты может быть использован для расчетов симметричных и несимметричных к.з. в трехфазных сетях, содержащих РТУ с нелинейными элементами.
3. В трехфазных сетях с резонансным токоограничивающим устройством при электромагнитных переходных процессах на форму и величину кривых токов и напряжений влияют режим нейтрали сети.

Литература:

1. Апышев Дж.А., Неклепаев Б.Н. Анализ переходных процессов в схеме с резонансным безынерционным токоограничивающим устройством. – Электричество, 1980, №4, с. 62-64.
 2. Апышев Дж.А., Бакасова А.Б. Нелинейности в электроэнергетике. – Бишкек. Техник, 2003.
 3. Воронков В.Н., Елгаев Ю.А., Неклепаев Б.Н., Кочетов В.Ф. Расчет выполнения и исследования режимов работы трехфазного резонансного БТУ. – «Труды МЭИ», 1973, вып.162, с.28-34.
-