

## МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ РЕЖИМОВ УСТРОЙСТВ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКИ

*Бочарников Илья Сергеевич, Бучин Александр Александрович, магистранты 1 года обучения института механики и энергетики имени В.П. Горюхина, ФГБОУ ВО РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева, [alexbuch4@gmail.com](mailto:alexbuch4@gmail.com)*

*Научный руководитель – Забудский Е.И., профессор кафедры автоматизации и роботизации технологических процессов имени акад. Н.Ф. Бородина, ФГБОУ ВО РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева, web-сайт <http://zabudsky.ru>*

**Аннотация:** Создана на основе теории нелинейных электрических и магнитных цепей обобщенная математическая модель электромагнитных режимов устройств с шихтованным магнитопроводом произвольной конструкции и уложенными на нем обмотками. Разработаны алгоритм и программная реализация модели. Проанализированы режимы работы насыщающегося реактора.

**Ключевые слова:** математическая модель, насыщающийся реактор, устройство электроэнергетики, электромагнитный режим.

Рассмотрено устройство электроэнергетики – средство автоматического регулирования реактивной мощности. Им является насыщающийся реактор (НР) необходимый для управления режимами электроэнергетических систем. Реактор – это статическое нелинейное устройство, работа которого основана на явлении электромагнитной индукции. Реактивная мощность, потребляемая насыщающимся реактором, плавно регулируется за счет изменения насыщения магнитопровода переменным магнитным полем.

Разработан трехфазный насыщающийся реактор, предназначенный для использования, например, в схеме параметрического стабилизатора напряжения (ПСН, рисунок 1). Основной функцией его является стабилизация напряжения в системах электроснабжения с резко переменным характером нагрузки [1].

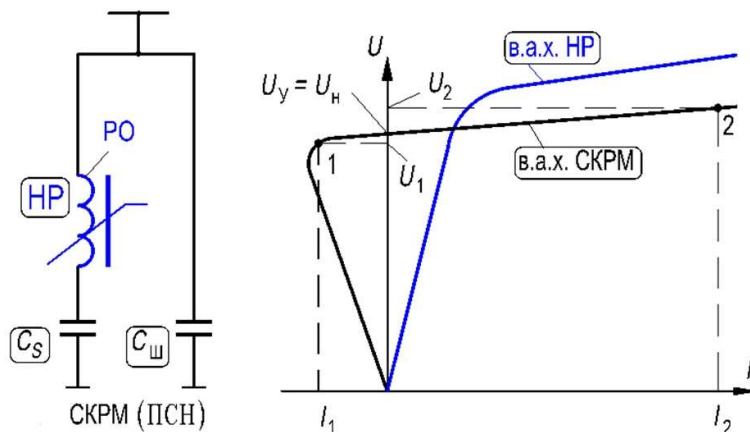


Рисунок 1 – Структурная схема параметрического стабилизатора напряжения и его вольт-амперная характеристика

Реактор, состоит из трех одинаковых модулей (рисунок 2). Их отличают невысокая стоимость, долговечность, простота устройства, надежность и приемлемые технико-экономические показатели. Конструкция одного модуля подобна устройству силового трансформатора. Производство НР может быть освоено на заводах трансформаторов без изменения технологического цикла.

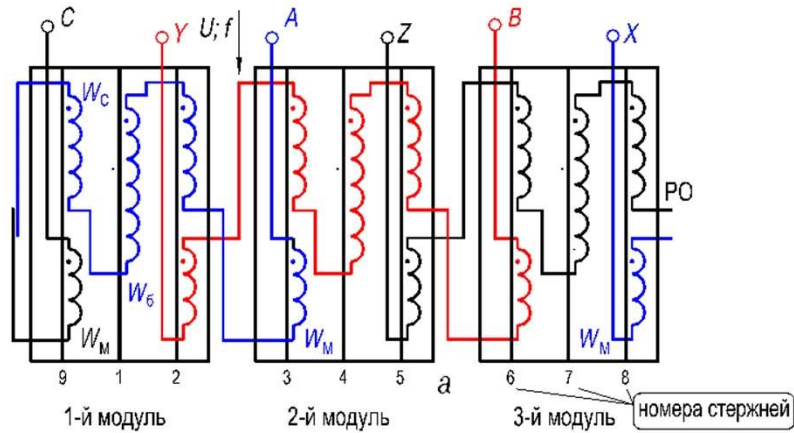


Рисунок 2 – Электромагнитная схема трёхфазного НР

Математическая модель электромагнитных режимов НР составлена на основе представления устройства электрической и магнитной схемами замещения с нелинейными сосредоточенными параметрами (рисунки 3).

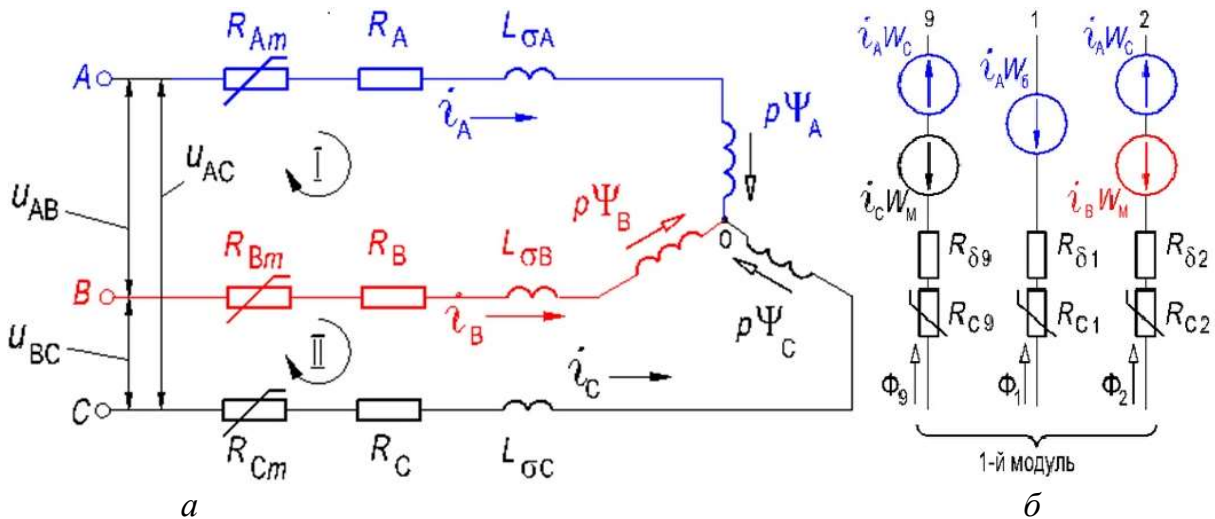


Рисунок 3 – Схема замещения НР: электрическая – (а); магнитная (б)

Математическая модель электромагнитных режимов НР – это система обыкновенных дифференциальных уравнений (1) с нелинейными коэффициентами. Искомые величины в ней являются мгновенные значения токов и магнитных потоков. Составлены алгоритм и программная реализация модели [1].

Для различных устройств (1) будет отличаться лишь число уравнений и порядком заполнения матрицы и векторов-столбцов, который определяется их конструктивными и схемотехническими особенностями. Поэтому программная реализация модели устройств не претерпевает принципиальных изменений.

Выполнен анализ нормальных рабочих и переходных режимов реактора, анализ влияния несимметрии устройства, первичного напряжения и нагрузки.

$R_{C9}^+ + R_{\delta 9}$														$-W_C$	$W_M$	$p\Phi_9$
	$R_{C1}^+ + R_{\delta 1}$													$W_B$		$p\Phi_1$
		$R_{C2}^+ + R_{\delta 2}$												$-W_C$	$W_M$	$p\Phi_2$
			$R_{C3}^+ + R_{\delta 3}$											$W_M$	$-W_C$	$p\Phi_3$
				$R_{C4}^+ + R_{\delta 4}$										$W_B$		$p\Phi_4$
					$R_{C5}^+ + R_{\delta 5}$									$-W_C$	$W_M$	$p\Phi_5$
						$R_{C6}^+ + R_{\delta 6}$								$W_M$	$-W_C$	$p\Phi_6$
							$R_{C7}^+ + R_{\delta 7}$								$W_B$	$p\Phi_7$
								$R_{C8}^+ + R_{\delta 8}$	$W_M$						$-W_C$	$p\Phi_8$
$W_C$	$-W_B$	$W_{CM}$	$-W_{CM}$	$W_B$	$-W_C$	$W_M$	$-W_M$	$L_{\sigma A}$	$-L_{\sigma B}$			$p^i i_A$	$u_{AB} - i_A(R_A + R_{AM}) + i_B(R_B + R_{BM})$			
$W_M$	$-W_M$	$W_C$	$-W_B$	$W_{CM}$	$-W_{CM}$	$W_B$	$-W_C$		$L_{\sigma B}$	$-L_{\sigma C}$		$p^i i_B$	$u_{BC} - i_B(R_B + R_{BM}) + i_C(R_C + R_{CM})$			
												$p^i i_C$				

(1)

На рисунке 4 представлена графическая интерпретация части результатов: форма кривых токов гармоническая; при обрыве одной из фаз в других форма тока искажается за счет 3-й гармоники; время переходных процессов  $\leq 0,02$  с.

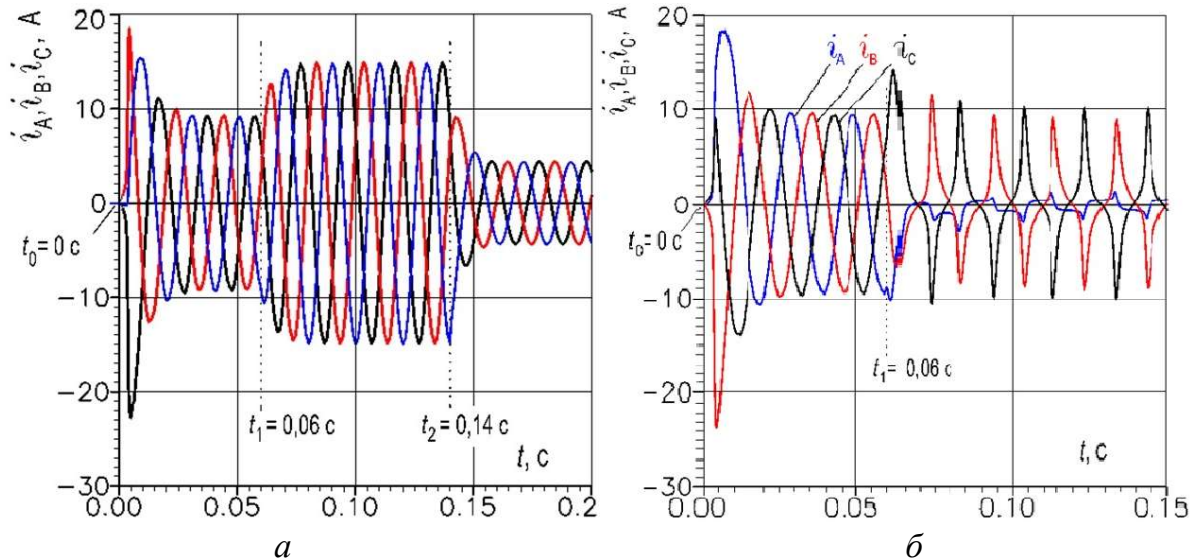


Рисунок 4 – **Изменение токов рабочей обмотки НР в переходных режимах:**  
 начинающихся в моменты времени  $t_0, t_1, t_2$  – (а); при обрыве одной фазы  
 питающего напряжения в момент времени  $t_1$  – (б)

Благодаря быстрому параметрическому изменению реактивной мощности реактора и отсутствию параллельных ветвей в обмотке, НР обладает практически безынерционным принципом действия, что делает эффективным его использование для стабилизации напряжения в сети с резко переменной нагрузкой. Вследствие пониженного содержания высших гармоник, а также других положительных качеств, НР является наиболее часто используемым типом реакторов.

### Библиографический список

1. Забудский Е.И. Математическое моделирование управляемых электромагнитных реакторов: Монография. – М.: ООО «Мегаполис», 2018. – 356 с.