

УДК 621.314.222.8

Исследование антирезонансного трансформатора напряжения 220 кВ на основе математического моделирования. Сравнительный анализ конструкций

В.Д. Лебедев, канд. техн. наук, А.А. Яблоков, студ.

Приведено сравнение конструкций антирезонансного измерительного трансформатора напряжения 220 кВ. Показаны зависимости амплитудной и фазовой погрешностей трансформатора от наличия и расположения ферромагнитных элементов магнитопровода, количества катушек и их активного сопротивления, а также выбранной номинальной мощности трансформатора.

Ключевые слова: антирезонансный трансформатор, трансформатор с разомкнутым магнитопроводом, каскадный трансформатор напряжения, электронные трансформаторы напряжения, цифровые измерительные трансформаторы.

Researching Antiresonant 220 kV Voltage Transformer on the Basis of Mathematical Modeling. Comparative Analysis of Structures

V.D. Lebedev, Candidate of Engineering, A.A. Yablokov, Student

The authors compare the structures of antiresonant measuring 220 kV voltage transformer. The article shows the dependence of amplitude and phase errors of the transformer based on the presence and the location of the magnetic circuit of ferromagnetic elements, the number of coils and their resistance, and selected nominal power transformer.

Key words: antiresonant transformer, transformer with open magnetic conductor, the cascade voltage transformer, electric voltage transformers, digital measuring transformers.

Введение. Инновационное развитие электроэнергетики направлено на создании интеллектуальных активно-адаптивных сетей [1, 2]. Управление данными сетями основано на первичных данных, которые поступают от измерительных трансформаторов напряжения (ТН) и тока. Работы в этом направлении привели к необходимости разработки новых электронных измерительных трансформаторов, напрямую взаимодействующих с микропроцессорными системами защиты, автоматики и учета электроэнергии. Электронные трансформаторы содержат совместно с первичными высоковольтными преобразователями токов и напряжений электронные блоки, содержащие аналого-цифровые преобразователи, оптоэлектронный передающий тракт. Информация о токах и напряжениях может передаваться непосредственно с первичной стороны (со стороны высокого напряжения) по оптическому волокну, являющемуся изолятором [3]. Оцифровка сигнала непосредственно в измерительном трансформаторе позволяет рассчитывать первичные преобразователи на более низкую нагрузку, что способствует увеличению точности преобразования и открывает возможность использования методов измерения, не получивших до настоящего времени широкого применения в энергетике. В частности, в [4] предложена конструкция цифрового комбинированного трансформатора тока и напряжения 220 кВ, выполненного на базе трансформатора напряжения с разомкнутым магнитопроводом.

Положительными сторонами трансформаторов напряжения с разомкнутыми магнитопроводами являются устойчивость к феррорезонансным явлениям, более компактная конст-

рукция по сравнению с традиционными трансформаторами напряжения [5].

Расчет и оптимизацию параметров трансформаторов напряжения с разомкнутыми магнитопроводами не возможно выполнить на основе стандартных инженерных методик, предназначенных для расчета трансформаторов с замкнутыми магнитными системами. Исследование параметров и моделирование трансформаторов напряжения с разомкнутыми сердечниками следует вести на основе численного моделирования электромагнитного поля. В работах [5–7] представлено краткое описание методов моделирования и моделей, на которых можно проводить расчет с определением метрологических характеристик и выбирать конструктивные параметры трансформатора.

Ниже приводится сравнение результатов расчетов нескольких вариантов конструкций измерительных антирезонансных трансформаторов напряжения по метрологическим характеристикам (амплитудным и фазовым погрешностям основной частоты).

Сравнение конструкций трансформаторов. Экспериментальная конструкция каскадного трансформатора с горизонтальным расположением катушек, изготовленная и испытанная на ОАО Раменский электротехнический завод «Энергия», представлена на рис. 1 (конструкция 1). Сопоставление расчетных и экспериментальных данных показало приемлемую точность выбранных методов исследования конструкций. Варианты конструкции с горизонтальным расположением исследованы нами на основе численного моделирования (рис. 1, конструкции 2–9).

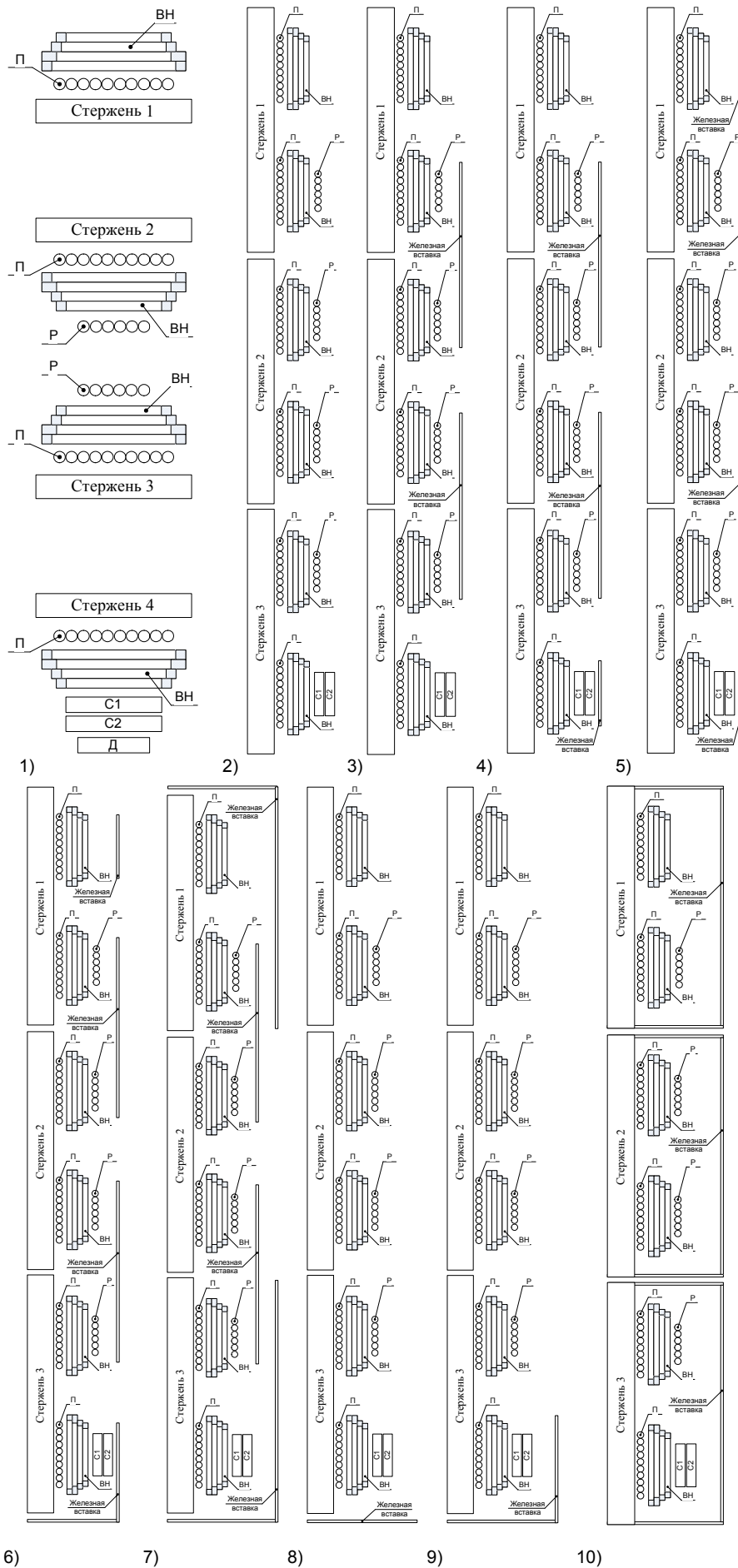


Рис. 1. Схемы конструкций трансформатора

Варианты конструкций обусловлены в основном наличием и расположением кольцеобразных ферромагнитных вставок, выполненных вокруг катушек трансформатора для уменьшения сопротивления обратного замыкания (магнитного потока), реализованных таким образом, чтобы они не мешали выполнению высоковольтной изоляции. Конструкция с полностью замкнутыми магнитопроводами (рис. 1, конструкция 10) приведена исключительно для сравнительного анализа погрешностей и не может быть практически реализована.

Определение амплитудных и фазовых погрешностей исследуемых конструкций ТН выполнено расчетным путем методом обобщенного численного моделирования электромагнитного поля совместно с расчетом электрической цепи. Режимы работы моделей выбраны аналогичными работе физических моделей, как это требуют нормативные документы по испытанию трансформаторов напряжения (ГОСТ 1983-2001, ГОСТ 8.216–88). В частности, погрешности трансформаторов определялись при значениях первичного напряжения, равных 20, 50, 80, и 120 % номинального значения, при значениях полной мощности, отдаваемой исследуемым трансформатором в цепь нагрузки

вторичных обмоток, равных $0,25 \cdot S_{\text{НОМ}} \left(\frac{U_1}{U_{1\text{НОМ}}} \right)^2$

и $S_{\text{НОМ}} \left(\frac{U_1}{U_{1\text{НОМ}}} \right)^2$ (при номинальном коэффициенте мощности 0,8), для каждого значения напряжения (рис. 2).

В результате вычислительных экспериментов было установлено, что амплитудные и фазовые погрешности зависят от количества катушек, их активного и реактивного сопротив-

лений (количества витков, геометрических параметров катушек), формы магнитной системы ТН (см. таблицу). Отдельно отметим зависимость погрешности от выбранной номинальной мощности ТН, которая, по результатам расчетов, подчиняется графику, приведенному в Приложении А ГОСТ 1983–2001.

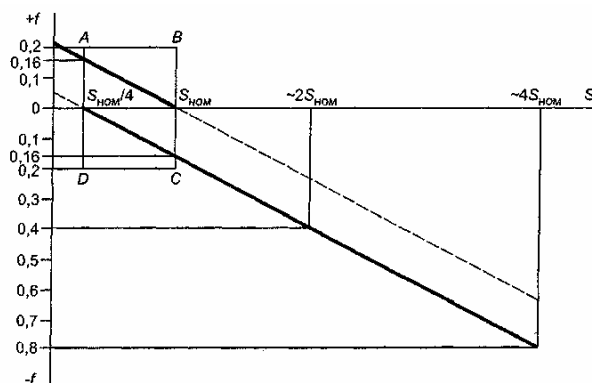


Рис. 2. Зависимости погрешности от номинальной мощности ТН (f – погрешность напряжения, %; $S_{\text{НОМ}}$ – номинальная мощность для высшего класса точности, В·А).

Для наглядного анализа результаты моделирования трансформаторов представлены с помощью гистограмм (рис. 3–8), на которых по оси x отложены номера конструкций трансформаторов (см. рис. 1). Амплитудные и фазовые погрешности конструкций ТН представлены на рис. 3–6, исходя из номинальных мощностей 100 и 10 Вт. Средние значения магнитной индукции и амплитуды токов, протекающих через обмотку высокого напряжения, представлены соответственно на рис. 7 и 8 при номинальной мощности трансформатора 10 Вт.

Характеристики различных конструкций трансформатора

№ конструкции	Количество витков в катушках ВН	Номинальная мощность 100 Вт				Номинальная мощность 10 Вт			
		Амплитудная погрешность, %	Фазовая погрешность, мин	Средняя магнитная индукция стержней, Тл	Ток через катушки ВН, А	Амплитудная погрешность, %	Фазовая погрешность, мин	Средняя магнитная индукция стержней, Тл	Ток через катушки ВН, А
1	60690	3,317	57,018	0,69437	0,16197	0,13368	2,66	0,69423	0,16135
2	62847	5,45254	118,146	0,51396	0,02533	0,54847	10,967	0,51377	0,02579
	30000	1,19625	21,279	1,07608	0,10971	0,11807	2,078	1,07608	0,10928
3	62847	5,6368	120,586	0,51345	0,02491	0,56518	11,218	0,51323	0,02529
	30000	1,19751	20,601	1,07517	0,10365	0,11794	2,014	1,07499	0,10316
4	62847	5,66981	133,653	0,51357	0,02467	0,56051	13,766	0,51377	0,02516
	30000	1,21665	21,205	1,07298	0,10153	0,11974	2,069	1,07298	0,10103
5	62847	5,8589	137,789	0,51305	0,02429	0,57899	14,202	0,51323	0,0248
	30000	1,25991	21,879	1,07115	0,09969	0,12402	2,136	1,07115	0,09918
6	62847	4,94171	103,871	0,51505	0,02088	0,4433	9,561	0,51487	0,02007
	30000	1,08739	19,41	1,07535	0,08776	0,10768	1,903	1,07535	0,08718
7	62847	5,86122	116,918	0,51724	0,01723	0,54664	11,872	0,51742	0,01727
	30000	1,17297	18,046	1,08283	0,07031	0,11441	1,75	1,08283	0,06975
8	30000	1,01925	16,796	1,08119	0,09509	0,1005	1,645	1,08119	0,09456
9	30000	0,98574	15,976	1,08082	0,09032	0,09657	1,576	1,08082	0,08968
10	30000	0,1773	4,557	1,08739	0,0579	0,01772	0,457	1,08739	0,0579

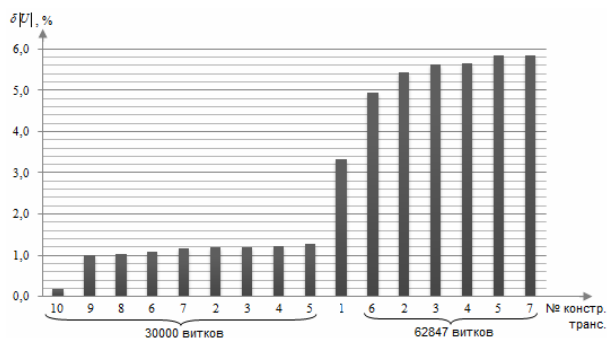


Рис. 3. Гистограмма амплитудной погрешности при мощности 100 Вт

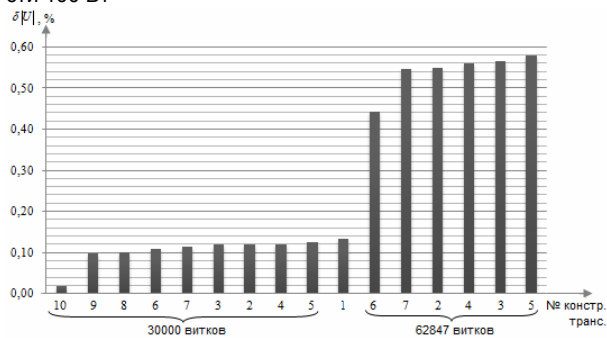


Рис. 4. Гистограмма амплитудной погрешности при мощности 10 Вт

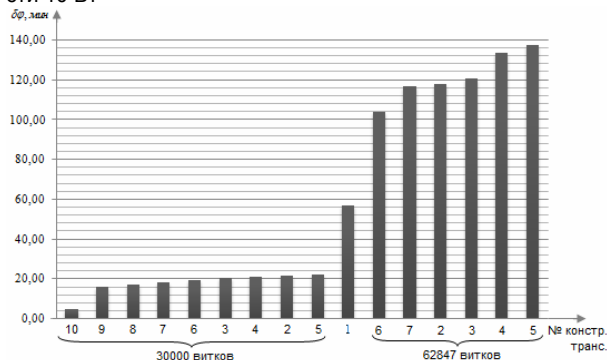


Рис. 5. Гистограмма фазовой погрешности при мощности 100 Вт

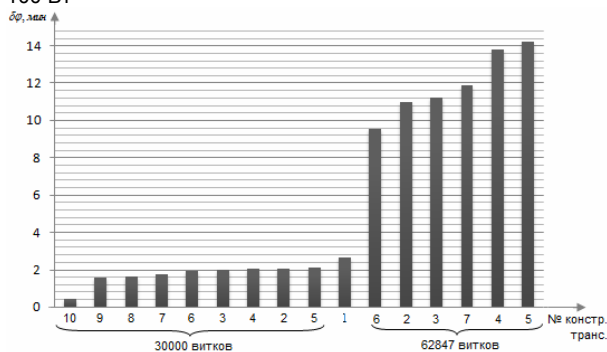


Рис. 6. Гистограмма фазовой погрешности при мощности 10 Вт

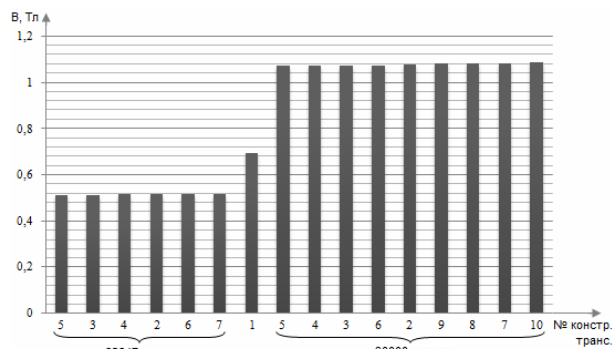


Рис. 7. Гистограмма средней магнитной индукции при мощности 10 Вт

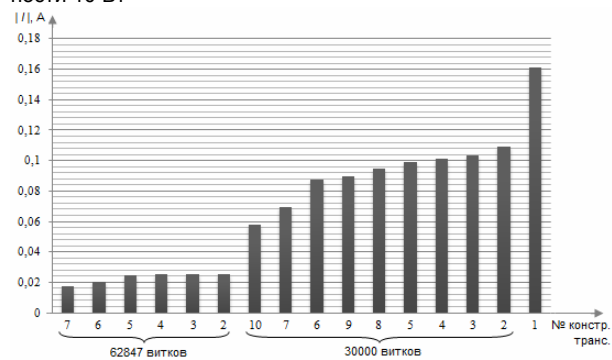


Рис. 8. Гистограмма амплитуды тока, протекающего через катушки ВН, при мощности 10 Вт

Анализируя результаты расчетов (см. таблицу, рис. 3–8), можно подтвердить известные положения и сделать дополнительные выводы:

1. ТН с разомкнутым магнитопроводом уступают по точности трансформаторам с замкнутым магнитопроводом.

2. ТН с меньшим значением активного сопротивления катушек ВН имеют более высокий класс точности, но при этом и большее значение средней индукции магнитного поля в стержнях магнитопровода.

3. Добавление цилиндрических ферромагнитных вставок в верхнюю часть трансформаторов не способствует уменьшению амплитудной и фазовой погрешностей. Среди исследуемых конструкций ТН наибольший класс точности имеет конструкция 9 (рис. 1).

4. Ток, протекающий через катушки ВН трансформатора, уменьшается при добавлении ферромагнитных вставок. Среди конструкций антирезонансного трансформатора наименьший ток протекает в конструкции 7 (рис. 1).

5. Среднее значение магнитной индукции в стержнях практически не зависит от выбранной номинальной мощности и количества и расположения дополнительных ферромагнитных вставок.

6. Чем меньше мощность, на которую рассчитан трансформатор, тем выше его класс точности.

В заключение отметим, что использование разомкнутой магнитной системы позволяет получить трансформатор с необходимым классом точности при невысокой номинальной

мощности. Низкая номинальная мощность накладывает ограничение на традиционное использование таких ТН. С другой стороны, если ТН с разомкнутым магнитопроводом является составной частью электронного трансформатора и имеет в качестве нагрузки только свою, практически не потребляющую энергии нагрузку – электронный преобразователь (к тому же с заранее согласованным входным сопротивлением), то проблема и само понятие номинальной мощности отпадает.

Список литературы

1. **Основные** положения (концепция) технической политики в электроэнергетике России на период до 2030 г. ОАО РАО «ЕЭС России». – 2008 г. – 90 с. // http://www.rao-ees.ru/ru/invest_inov/concept_2030.pdf.

2. **Кобец Б.Б., Волкова И.О.** Инновационное развитие электроэнергетики на базе концепции Smart Grid. – М.: ИАЦ «Энергия», 2010. – 208 с.

Лебедев Владимир Дмитриевич,

ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,
кандидат технических наук, доцент кафедры теоретических основ электротехники и электротехнологий,
телефон (4932) 26-99-53,
e-mail: VD_Lebedev@mail.ru

Яблоков Андрей Анатольевич,

ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,
студент,
e-mail: AndrewYablokov@yandex.ru

3. **Гречухин В.Н.** Электронные трансформаторы тока и напряжения. Состояние, перспективы развития и внедрения на ОРУ 110–750 кВ станций и подстанций энергосистем // Вестник ИГЭУ. – 2006. – Вып. 4. – С. 35–42.

4. **Гречухин В.Н., Лебедев В.Д.** Цифровой комбинированный трансформатор тока и напряжения на базе стандартного трансформатора напряжения // Известия вузов. Электромеханика. Спецвыпуск. Диагностика электрооборудования. – 2010. – С. 98–99.

5. **Федотов С.П., Лебедев В.Д.** Разработка антирезонансного индуктивного трансформатора напряжения // Вестник ИГЭУ. – 2009. – Вып. 2. – С. 102–105.

6. **Федотов С.П., Лебедев В.Д.** Антирезонансный индуктивный трансформатор напряжения // Электромеханика. – 2008. – Спец. вып. 2. – С. 69–70.

7. **Лебедев В.Д., Яблоков А.А.** Определение параметров элементов антирезонансного трансформатора напряжения на основе компьютерного полевого моделирования (методы моделирования и исследование вычислительных погрешностей) // Вестник научно-промышленного общества. – М.: Алев-В, 2010. – Вып. 14. – С. 51–59.