

lightning rod with high resistance. In Proc. 10th Int. Conf. on Atmospheric Electricity, Osaka, Japan, pp. 341-344.

50. Theethayi, N., Rakov, V., and Thottappillil, R. 2008. Responses of Airport Runway Lighting System to Direct Lightning Strikes: Comparisons of TLM Predictions with Experimental Data, IEEE Trans. on EMC, Vol. 50, No. 3, August 2008, pp. 660-668.

51. Uman, M.A., Cordier, D.J., Chandler, R.M., Rakov, V.A., Bernstein, R., and Barker, P.P. 1994b. Fulgurites produced by triggered lightning. Eos Trans. AGU 75 (44), Fall Meet. Suppl., 99.

52. Uman, M.A., Rakov, V.A., Rambo, K.J., Vaught, T.W., Fernandez, M.I., Cordier, D.J., Chandler, R.M., Bernstein, R., and Golden, C. 1997. Triggered-lightning experiments at Camp Blanding, Florida (1993-1995). Trans. IEE Japan 117-B: 446-52.

*Author: Rakov Vladimir is a Professor of the Department «Electrical and Computer Engineering» of the Florida University (USA).*

## Исследование взаимодействия молнии, инициированной запуском ракет с тросом, с различными объектами и системами (Часть 2)

РАКОВ В.А.

*Статья содержит обзор экспериментальных результатов по действию молниевых разрядов, инициированных запуском в грозовое облако ракеты с длинным проводящим шлейфом, на различные объекты и системы. В качестве объектов, находящихся под действием молниевых разрядов, рассматриваются воздушные распределительные сети, подземные кабели, ЛЭП, жилые здания и светосигнальные системы взлетно-посадочных полос аэропортов. Дополнительно дается краткий обзор использования инициированного молниевых разрядов для тестирования компонентов систем питания, различных типов молниеотводов и других объектов, а также для измерений шагового напряжения и исследований фульгуритов.*

*Автор: Раков Владимир — профессор Университета Флориды (США).*

\* \* \*

## Влияние режимов работы автотрансформаторов на качество электроэнергии

ШАРОВ Ю.В., НАСЫРОВ Р.Р., ОЛЕКСЮК Б.В., СИМУТКИН М.Г.,  
ТУЛЬСКИЙ В.Н., ШАМОНОВ Р.Г.

*Представлен анализ влияния силового автотрансформатора на качество электроэнергии по n-й гармонической составляющей напряжения. На математической модели автотрансформатора показаны зависимости генерируемых токов высших гармоник от эквивалентного индуктивного сопротивления системы, наличия в приложенном напряжении высших гармоник, действующего значения приложенного напряжения основной частоты, а также от характера и мощности нагрузки. Показано, что влияние силовых автотрансформаторов на качество электроэнергии по n-й гармонической составляющей напряжения незначительно в отсутствие резонансных явлений в сети.*

*Ключевые слова: силовой автотрансформатор, качество электроэнергии, имитационное моделирование, высшие гармоники тока*

Трансформаторы являются одним из основных элементов электроэнергетических систем. Так в электрических сетях России суммарная установленная мощность силовых трансформаторов и автотрансформаторов примерно в 5 раз превышает суммарную установленную мощность генераторов [1]. В конструкции силовых трансформаторов применяются электротехнические стали различных марок, характеристики намагничивания которых резко нелинейны (например [2]), что при определенных условиях приводит к значительному искажению формы кривой потребляемого тока. Пример

такой осциллограммы тока холостого хода (х.х.) обмотки высшего напряжения (ВН) автотрансформатора (АТ) 220/110 кВ мощностью 125 МВА представлен на рис. 1.

Исследованием влияния трансформаторов на появление высших гармоник тока занимались в разное время как отечественные, так и зарубежные ученые. В [3] приводятся эмпирические соотношения, позволяющие оценить значение второй гармоники тока и напряжения при работе силового трансформатора, подключенного к протяженной линии электропередачи. При этом не приводится

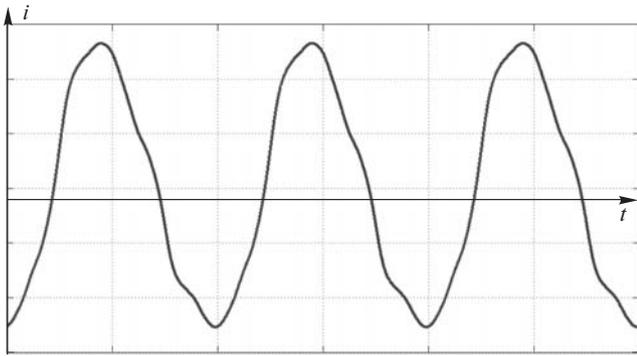


Рис. 1. Осциллограмма тока х.х. автотрансформатора АДЦТН-125000/220/110 (фаза А обмотки ВН)

способов определения возможного спектра тока трансформатора, которые позволили бы учитывать в том числе особенности конструкции машины и характеристику намагничивания используемой электротехнической стали. В [4, 5] представлен способ математического моделирования трансформаторного оборудования с использованием принципа дуальности электрических и магнитных цепей, который позволяет после серии преобразований привести магнитную цепь трансформатора к электрической, после чего получить расчетную форму кривой тока трансформатора с использованием программ расчета переходных процессов в электрических цепях. Однако моделирование трансформаторного оборудования с использованием этого способа весьма трудоемко, особенно в случае машин со сложной конфигурацией электромагнитной части. В [6] предлагается иной подход к моделированию трансформаторов, основанный на

решении системы уравнений, описывающих конструкцию электромагнитной части, представленной в виде графической схемы, соответствующей конструкции трансформатора. Данный способ представляется более удобным в использовании, так как позволяет исключить из процесса создания модели трансформатора эквивалентные преобразования магнитных и электрических цепей, а также позволяет учитывать взаимное расположение обмоток и элементов магнитной системы. С использованием указанного метода разработана имитационная модель (ИМ) АТ 220/110 кВ мощностью 125 МВА, представленная на рис. 2, с помощью которой было исследовано влияние:

- приложенного напряжения основной частоты; эквивалентного индуктивного сопротивления системы;

- нагрузки автотрансформатора и ее характера; искажения синусоидальности формы кривой приложенного напряжения на гармоники тока автотрансформатора и проведена оценка влияния силового автотрансформатора на качество электроэнергии (КЭ) по  $n$ -й гармонической составляющей.

Для проверки достоверности ИМ АТ были проведены измерения спектра тока х.х. на действующем автотрансформаторе АДЦТН-125000/220/110. В ходе измерений, проведенных испытательной лабораторией по качеству электрической энергии МЭИ, на обмотку ВН отключенного АТ подавалось напряжение от сборных шин (СШ) 220 кВ подстанции, в то время как со стороны среднего и низшего напряжения АТ не подключался к элек-

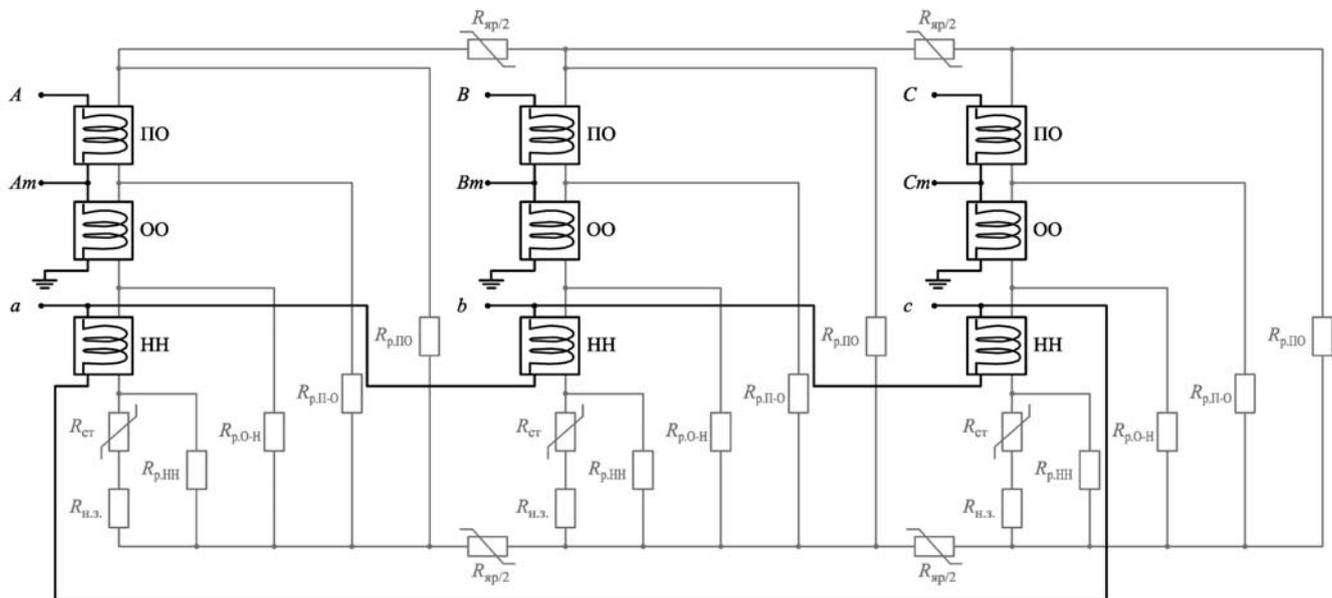


Рис. 2. Общий вид имитационной модели автотрансформатора 220/110 кВ мощностью 125 МВА в программном комплексе Matlab Simulink: — электрическая часть модели — вводы обмоток, обмотки: последовательная (ПО), общая (ОО) и низкого напряжения (НН), а также соединения между ними; — магнитная часть модели: нелинейные магнитные сопротивления стержней ( $R_{ст}$ ) и полярм ( $R_{яр/2}$ ), линейные магнитные сопротивления немагнитных зазоров между стержнями и ярами ( $R_{н.з.}$ ), а также линейные сопротивления каналов рассеяния магнитного потока: между обмоткой НН и стержнем —  $R_{р.НН}$ ; между обмотками ОО и НН —  $R_{р.О-Н}$ ; между обмотками ПО и ОО —  $R_{р.П-О}$ ; вне обмотки ПО —  $R_{р.ПО}$

трической сети. С помощью подключенных к вторичным цепям трансформаторов тока (ТТ) и напряжения (ТН) средств измерения (СИ) показателей качества электрической энергии (ПКЭ) фиксировались значения гармонических составляющих напряжения на шинах подстанции и тока х.х. автотрансформатора (см. рис. 3). В табл. 1 представлены результаты измерений спектра тока х.х., а также полученные на имитационной модели АТ 220/110 кВ мощностью 125 МВА при условиях, аналогичных проведенным измерениям (действующее значение линейного напряжения на шинах подстанции  $U = 230$  кВ, действующее значение периодической составляющей тока трехфазного короткого замыкания (КЗ) 19,6 кА).

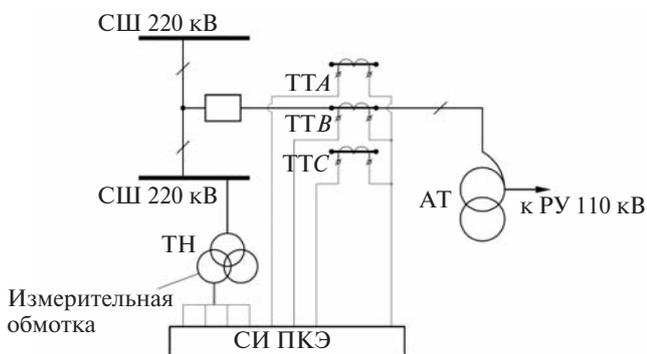


Рис. 3. Схема подключения СИ ПКЭ для измерения спектра тока х.х. действующего автотрансформатора АТДЦТН-125000/220/110

Таблица 1

Номер гармоники $n$	Значение тока $I_{(n)}$ , А (ампл.), для фазы			
	A	B	C	Среднее
ИМ АТ 220/110 кВ мощностью МВА				
3-я	0,062	0,108	0,030	0,067 (4,2%)*
5-я	0,050	0,120	0,067	0,079 (5,0%)
7-я	0,025	0,076	0,050	0,050 (3,2%)
9-я	0,025	0,037	0,005	0,022 (1,4%)
АТДЦТН-125000/220/110				
3-я	0,078	0,011	0,116	0,068 (4,2%)
5-я	0,084	0,098	0,069	0,084 (5,2%)
7-я	0,025	0,035	0,025	0,028 (1,7%)
9-я	0,010	0,011	0,008	0,010 (0,6%)

\* В скобках — среднее значение токов высших гармоник в процентах тока основной частоты.

При сравнении результатов, полученных на модели и на действующем автотрансформаторе (см. табл. 1), можно отметить следующее:

порядок значений токов совпадает для каждой из рассматриваемых гармоник;

преобладающей в спектре тока х.х. является 5-я гармоника;

спектр тока х.х. автотрансформатора-оригинала и модели — затухающий, начиная с 5-й гармоники.

Различия в полученных значениях токов высших гармоник (ВГ) в спектре тока могут объясняться тем, что при моделировании использованы параметры электромагнитной части современного автотрансформатора той же мощности, в то время как измерения спектра тока х.х. проведены на автотрансформаторе, находящемся в эксплуатации более 40 лет.

Результаты моделирования и проведенных измерений спектра тока х.х. автотрансформатора, представленные в табл. 1, позволяют сделать вывод о корректности применения метода ИМ для оценки влияния трансформаторного оборудования на КЭ по  $n$ -й гармонической составляющей.

**Влияние величины приложенного напряжения основной частоты на ВГ тока автотрансформатора.** Исследование влияния приложенного напряжения основной частоты на ток х.х. АТ проведено с использованием ИМ, созданной в программном комплексе Matlab Simulink, на схеме рис. 4. Симметричное синусоидальное напряжение прямой последовательности подается на обмотку ВН автотрансформатора от электрической системы, мощность КЗ в точке присоединения исследуемого АТ к которой на порядок превосходит мощность исследуемого автотрансформатора. Система моделируется эквивалентной индуктивностью  $L_c$ . Обмотки среднего (СН) и низшего напряжения (НН) автотрансформатора не нагружены (автотрансформатор в режиме х.х.). Получаемые в результате моделирования токи фаз трансформатора раскладываются в блоке анализа ВГ в спектр, по которому определяются коэффициенты  $n$ -й гармонической составляющей тока (в %) [7]:

$$K_{I(n)} = \frac{I_{(n)}}{I_{(1)}} \cdot 100, \quad (1)$$

где  $I_{(n)}$ ,  $I_{(1)}$  — действующее значение тока  $n$ -й гармонической составляющей и основной частоты соответственно.

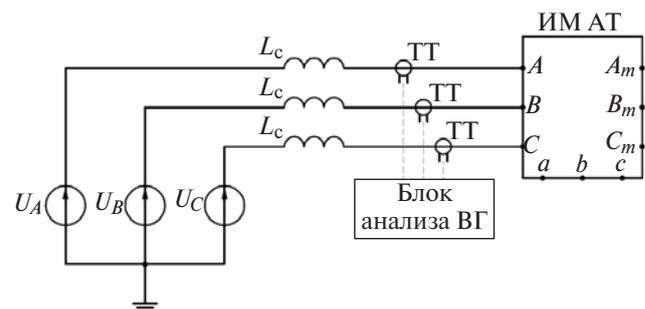


Рис. 4. Схема для исследования влияния приложенного напряжения на уровень высших гармоник тока автотрансформатора

Таблица 2

Значение $U_{ВН}$ , кВ	Фаза	Значение $K_{I(n)}$ для гармоник							
		3-я	среднее	5-я	среднее	7-я	среднее	9-я	среднее
210	A	1,6	1,3	1,1	1,6	0,5	0,9	0,5	0,4
	B	1,9		2,3		1,4		0,7	
	C	0,4		1,5		0,9		0,1	
220	A	2,9	2,5	2,0	3,1	1,1	2,0	1,1	0,8
	B	3,9		4,5		3,0		1,0	
	C	0,7		2,7		2,0		0,3	
230	A	3,2	2,9	2,4	3,7	1,3	2,3	1,2	1,0
	B	4,6		5,4		3,4		1,6	
	C	0,8		3,3		2,3		0,2	
240	A	4,7	4,5	3,9	5,7	2,4	3,9	2,1	1,9
	B	7,2		8,3		5,6		3,0	
	C	1,5		4,8		3,6		0,7	
252	A	4,7	5,0	6,7	8,3	4,1	5,8	2,2	2,1
	B	8,3		11,2		7,9		3,3	
	C	2,1		7,1		5,4		0,9	

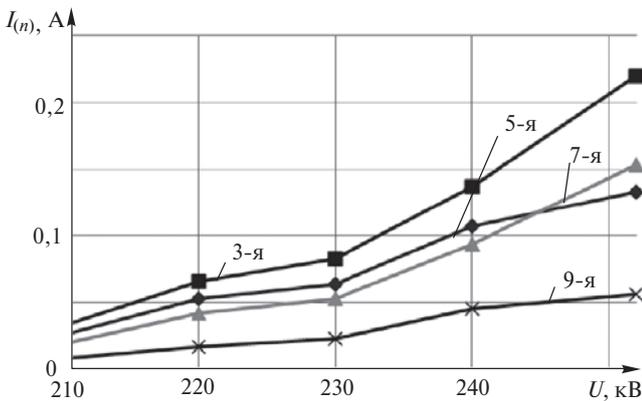


Рис. 5. Зависимость амплитудных значений токов высших гармоник в спектре тока х.х. автотрансформатора от действующего значения линейного напряжения, приложенного к обмотке ВН

Из представленных в табл. 2 и на рис. 5 результатов расчетов следует:

коэффициенты  $n$ -й гармонической составляющей тока х.х. автотрансформатора увеличиваются с ростом приложенного напряжения основной частоты;

искажение формы кривой тока х.х. трех фаз различно, что обусловлено различной длиной пути магнитного потока крайних и средней фазы; форма кривой тока средней фазы (B) искажена в наибольшей степени;

преобладающей в токе х.х. автотрансформатора является 5-я гармоника вне зависимости от приложенного напряжения.

Исходя из результатов расчета зависимость  $K_{I(n)}$  от отношения напряжения  $U$  и номинального напряжения обмотки ВН АТ  $U_{НОМ}$  может быть представлена в виде степенной функции:

$$K_{I(n)}^U = K_{I(n)}^{U_{НОМ}} (U / U_{НОМ})^{k(n)}. \quad (2)$$

Анализ результатов моделирования показал, что значения показателей степени  $k$  для 3-, 5-, 7- и 9-й гармоник составляют 7,2; 8,5; 9,5 и 9,0 соответственно. Для тока основной частоты показатель степени в выражении  $I_{(1)}^U = I_{(1)}^{U_{НОМ}} (U / U_{НОМ})^k$  составляет 1,6.

Таким образом, при наличии значений коэффициентов  $n$ -й гармонической составляющей тока х.х. автотрансформатора  $K_{I(n)}^{U_{ИЗМ}}$ , измеренных при приложенном к его обмотке ВН напряжении  $U_{ИЗМ}$ , можно оценить значение этих коэффициентов при любом действующем значении приложенного к обмотке ВН напряжения  $U$ , заменив в формуле (2)  $U_{НОМ}$  на  $U_{ИЗМ}$ .

При напряжении 252 кВ (наибольшем рабочем напряжении для электрооборудования сетей 220 кВ [8]) коэффициенты  $n$ -й гармонической составляющей тока х.х. автотрансформатора не превышают 8,3%. Это объясняется тем, что значение магнитной индукции в элементах магнитной системы автотрансформатора при указанном напряжении не достигает индукции насыщения, которое для ис-

пользуемой электротехнической стали составляет 1,75, 1,77 Тл.

**Влияние эквивалентного сопротивления системы на ВГ тока автотрансформатора.** Влияние эквивалентного сопротивления электроэнергетической системы на токи высших гармоник в составе тока х.х. автотрансформатора исследовалось на той же ИМ АТ и схеме сети (рис. 4).

Расчеты проведены для трех значений приложенного к обмотке ВН АТ напряжения (210, 230 и 252 кВ) и семи значений эквивалентного индуктивного сопротивления системы, лежащих в диапазоне от 2,4 до 387 Ом, что соответствует изменению эквивалентной мощности системы от 125 МВА (номинальной мощности автотрансформатора) до 20000 МВА (соответствует верхней границе отключающей способности большинства производимых выключателей 220 кВ – 50 кА [9]). Результаты расчетов представлены в табл. 3.

Из анализа представленных результатов следует, что характер зависимости коэффициентов  $n$ -й гармонической составляющей тока х.х. автотрансформатора от сопротивления системы — сложный. Так, при увеличении мощности КЗ в точке присоединения автотрансформатора от номинальной до 20-кратной номинальной мощности АТ происходит рост токов  $n$ -й гармоники. В области сопротивлений системы, соответствующих значениям перио-

дической составляющей тока трехфазного КЗ порядка 6–12 кА ( $S_{КЗ} = 2500–5000$  МВА), происходит снижение значений токов высших гармоник. При дальнейшем снижении сопротивления сети токи гармоник возрастают, причем при напряжении 210 и 230 кВ этот рост незначителен, а при напряжении 252 кВ отношение коэффициентов  $n$ -й гармонической составляющей, рассчитанных при  $S_{КЗ} = 20000$  МВА и 5000 МВА, составляет порядка 1,1–2,0.

Это свидетельствует о том, что представление гармонических составляющих тока намагничивания источниками тока с не зависящим от сопротивления системы значением создаваемого тока (как предлагалось в [10]) может вносить дополнительную погрешность в результаты расчета, так как изменение эквивалентного сопротивления системы оказывает заметное влияние на значение тока высших гармоник в спектре тока АТ.

**Влияние нагрузки автотрансформатора на высшие гармоники тока.** Исследование влияния нагрузки автотрансформатора и ее характера (активно-индуктивная, активная и активно-емкостная) осуществляется на электрической схеме, показанной на рис. 6. Автотрансформатор при номинальном напряжении на обмотке ВН нагружен симметричной линейной нагрузкой, мощность которой определя-

Таблица 3

Значение напряжения $U_{ВН}$ , кВ	$n$	Средние значения коэффициента $n$ -й гармонической составляющей тока х.х. трех фаз автотрансформатора (%) при различных значениях эквивалентного индуктивного сопротивления системы $x_c$ , Ом ( $S_{ЭКВ}$ , МВА)							
		2,4 (20000)	4,8 (10000)	9,7 (5000)	19,4 (2500)	38,7 (1250)	77,4 (625)	193,6 (250)	387,2 (125)
210	3	0,2	0,1	0,1	1,1	0,4	0,3	0,3	0,2
	5	0,4	0,4	0,4	1,2	0,6	0,5	0,4	0,4
	7	0,1	0,1	0,1	0,7	0,3	0,1	0,1	0,1
	9	менее 0,05	менее 0,05	менее 0,05	0,4	0,1	менее 0,05	менее 0,05	менее 0,05
230	3	0,4	0,3	0,3	1,4	1,1	0,7	0,4	0,5
	5	0,7	0,8	0,8	2,0	1,7	1,4	0,8	0,7
	7	0,1	0,2	0,2	1,2	1,0	0,7	0,2	0,1
	9	менее 0,5	0,1	0,1	0,6	0,5	0,3	0,1	0,1
252	3	1,8	1,3	1,2	1,4	1,2	1,2	2,1	2,1
	5	3,4	3,2	3,2	3,7	3,6	3,4	3,2	3,1
	7	2,1	1,9	1,9	2,3	2,3	2,1	1,9	1,8
	9	0,6	0,4	0,3	0,5	0,5	0,5	0,8	0,7

ется по формуле  $S_H = k_H S_{\text{НОМ}}$  при трех значениях коэффициента нагрузки  $k_H = 0,2; 0,5$  и  $0,7$  (большие значения коэффициента нагрузки не рассматривались ввиду того, что при большей нагрузке в случае выхода резервирующего трансформатора из работы оставшийся в работе будет существенно перегружен [11, 12], что может привести к сокращению его срока эксплуатации). Принимается, что нагрузка распределена между обмотками СН и НН пропорционально их номинальной мощности, т.е. для рассматриваемого АТ мощности нагрузки обмоток соотносятся как 2:1. Для каждого из коэффициентов нагрузки определяются действующие значения высших гармоник тока для пяти значений коэффициента мощности нагрузки:  $\cos j_H = 0,7$  (индуктивная и емкостная нагрузка);  $\cos j = 0,85$  (индуктивная и емкостная нагрузка) и  $\cos j = 1,0$ . Результаты расчетов представлены в табл. 4.

Для удобства средние для трех фаз значения ВГ тока АТ представлены в отн. ед. к среднему для трех фаз значению тока соответствующей гармоники  $n$  в спектре тока х.х. при номинальном напряжении, приложенном к обмотке ВН ( $I_{(n)}^{\text{х.х.НОМ}}$ ):

$$I_{(n)} = I_{(n)}^{\text{наг}} / I_{(n)}^{\text{х.х.НОМ}}, \text{ отн. ед.} \quad (3)$$

Результаты расчетов показывают, что при одном и том же коэффициенте нагрузки значения токов гармоник меньше при индуктивном характере нагрузки и больше при емкостном. При этом снижение значений токов гармоник при индуктивной

нагрузке и повышение значений токов гармоник при емкостной нагрузке выражены тем сильнее, чем выше нагрузка автотрансформатора. Это обусловлено тем, что при емкостном характере тока нагрузки, протекающего по обмоткам автотрансформатора, создаваемое им магнитное поле приводит к увеличению магнитной индукции в элементах магнитной системы (намагничивающий эффект нагрузки). Соответственно, чем выше значения тока нагрузки, тем сильнее намагничивание стали и, следовательно, выше искажение формы кривой тока. При индуктивном характере нагрузки возникает обратный (размагничивающий) эффект – снижение значений магнитной индукции в магнитной системе автотрансформатора, приводящее к снижению нелинейных искажений его тока. При различном характере нагрузки обмоток НН и СН результирующий эффект нагрузки – намагничивающий или размагничивающий – определяется эффектом преобладающей относительной нагрузки обмотки, т.е. отношения фактической мощности нагрузки обмотки к ее номинальной мощности, который ослаблен противоположным эффектом нагрузки обмотки с меньшей относительной нагрузкой. Так например, при работе подключенного к обмотке НН АТ синхронного компенсатора или статического тиристорного компенсатора в режиме генерации реактивной мощности можно ожидать большего искажения формы кривой тока АТ при меньшей активно-индуктивной нагрузке обмотки СН и наоборот.

Таблица 4

Коэффициент нагрузки $k_H$	Номер гармоники $n$	Значения тока $n$ -й гармонической составляющей (отн. ед.) при различных значениях $\cos j_H$ и различном характере нагрузки				
		0,7	0,85	1,0	0,85	0,7
		индуктивная нагрузка			емкостная нагрузка	
0,2	3	0,59	0,59	0,86	1,09	1,06
	5	0,42	0,44	1,02	1,22	1,22
	7	0,26	0,24	1,10	1,62	1,71
	9	0,25	0,28	0,73	2,77	3,29
0,5	3	0,56	0,56	1,12	2,06	2,58
	5	0,40	0,42	1,00	2,02	2,81
	7	0,26	0,28	1,47	4,67	7,51
	9	0,26	0,26	0,81	4,02	3,45
0,7	3	0,54	0,56	2,16	4,18	6,65
	5	0,38	0,40	1,47	3,59	7,06
	7	0,25	0,30	2,84	7,92	8,92
	9	0,23	0,27	1,80	4,08	7,20

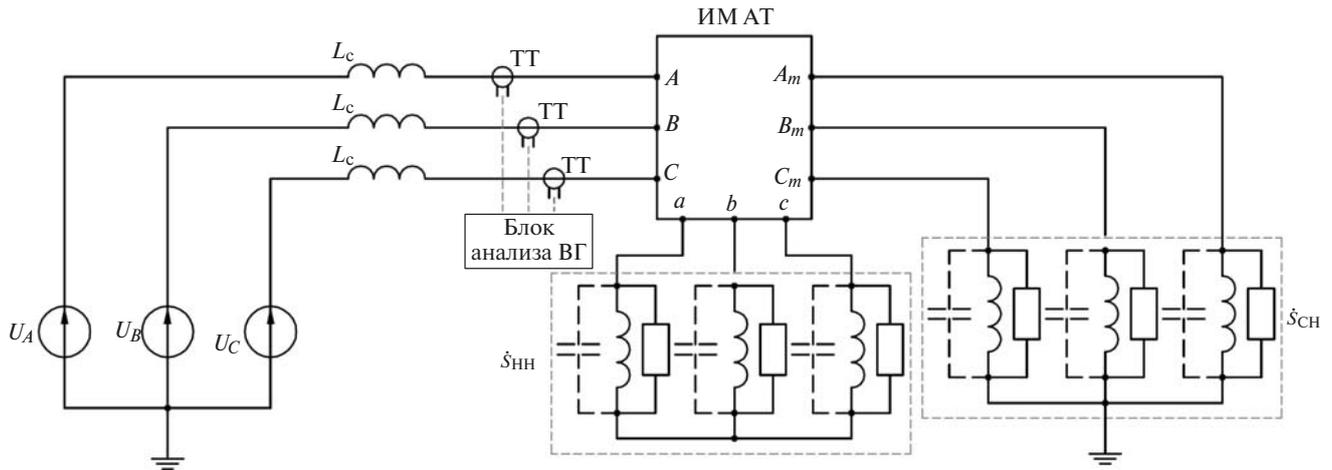


Рис. 6. Схема для исследования влияния нагрузки автотрансформатора и ее характера на обусловленные им ВГ тока

**Влияние искажения кривой приложенного напряжения на ВГ тока автотрансформатора.** Для исследования этого влияния использована схема, представленная на рис. 7. Исследуемый АТ в режиме х.х. подключен к сети, в каждой фазе которой последовательно к источнику ЭДС основной частоты включен источник ЭДС  $n$ -й гармоники ( $n = 3, 5, 7$ ). Фаза ЭДС каждой гармоники  $j_{0(n)}$  относительно фазы ЭДС основной частоты изменяется от  $0$  до  $180^\circ$  с шагом в  $30^\circ$  (с соответствующим номеру гармоники фазовым сдвигом векторов ЭДС гармоник в трех фазах сети). Действующее значение ЭДС основной частоты соответствует номинальному фазному напряжению обмотки ВН АТ, а действующие значения ЭДС 3-, 5- и 7-й гармоник рассчитаны по предельным значениям коэффициентов  $n$ -й гармонической составляющей напряжения для сетей 220 кВ и составляют 1,49, 2,99 и 1,99 кВ соответственно [7].

Для удобства средние для трех фаз значения тока ВГ при работе АТ под несинусоидальным приложенным напряжением представлены в виде диаграмм на рис. 8 в отн. ед. к среднему для трех фаз значению тока соответствующей гармоники  $n$  в

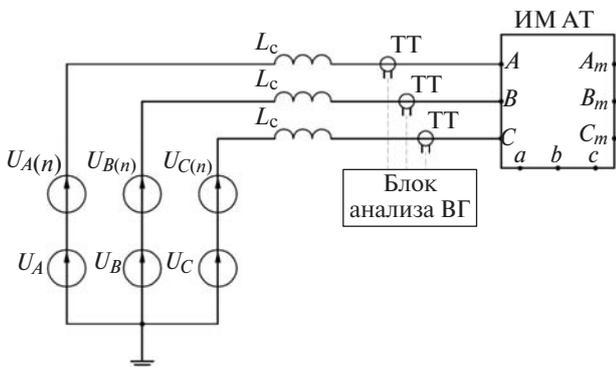


Рис. 7. Схема для исследования влияния искажения формы кривой приложенного напряжения на обусловленные автотрансформатором ВГ тока

спектре тока х.х. при синусоидальном номинальном напряжении:

$$I_{(n)}^* = I_{(n)} / I_{(n)}^{x.x.ном}, \text{ отн. ед.} \quad (4)$$

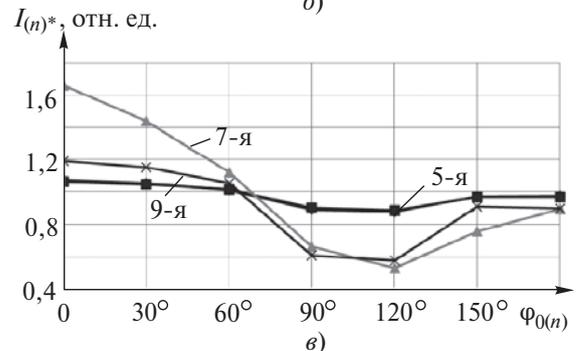
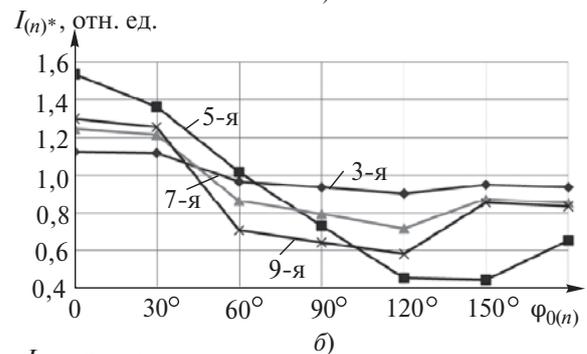
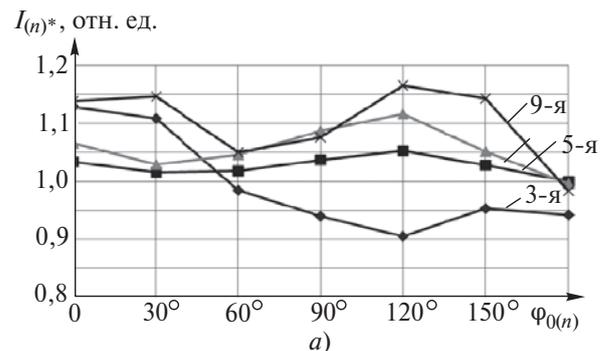


Рис. 8. Средние для трех фаз значения тока  $n$ -й гармонической составляющей при наличии в спектре приложенного напряжения: а – 3-й гармоники; б – 5-й; в – 7-й

Как видно из рис. 8, ВГ в спектре напряжения сети, приложенного к обмотке ВН автотрансформатора, влияют на значения ВГ тока х.х.:

гармонические составляющие любого порядка в спектре приложенного напряжения оказывают влияние на весь спектр генерируемых автотрансформатором гармоник тока;

характер (усиление или ослабление) и степень влияния гармоник напряжения на ВГ тока определяются не только амплитудой напряжений ВГ, но и их фазой относительно фазы напряжения основной частоты;

наибольшее усиление гармоник тока наблюдается при нулевой фазе напряжения ВГ относительно напряжения основной частоты (до 1,6 раз при предельно допустимом содержании гармоник в спектре напряжения [7]);

наибольшее ослабление гармоник тока наблюдается при фазе гармоники напряжения  $120^\circ$  относительно фазы напряжения основной частоты (снижение значений высших гармоник тока х.х. АТ до 2 раз относительно их уровня при синусоидальном приложенном напряжении).

**Оценка вклада автотрансформатора в искажение формы кривой напряжения в электрической сети.** Для оценки вклада ВГ тока АТ в ухудшение КЭ по  $n$ -й гармонической составляющей использован расчетный метод, основанный на том, что, считая сопротивление автотрансформатора стремящимся к бесконечности (что допустимо в случаях, когда мощность трансформатора существенно меньше мощности КЗ системы в точке присоединения), его вклад в создание  $n$ -й гармонической составляющей напряжения можно определить через эквивалентное сопротивление системы и ток  $n$ -й гармоники автотрансформатора:

$$U_{(n)тр} = I_{(n)тр} x_c n. \quad (5)$$

Значение внутреннего индуктивного сопротивления системы  $x_c$  может быть определено из известного значения тока трехфазного короткого замыкания  $I_K^{(3)}$  на шинах подстанции, к которым присоединен автотрансформатор:

$$x_c = \frac{U_{ном}}{\sqrt{3} I_K^{(3)}}, \quad (6)$$

где  $U_{ном}$  — номинальное напряжение в рассматриваемом узле сети.

Принимая значение  $I_K^{(3)} = 6,6$  кА на шинах 220 кВ подстанции (что соответствует эквивалентной мощности системы, при которой искажение формы кривой тока х.х. наибольшее — см. табл. 3), к

которым подключен исследуемый автотрансформатор, можно вычислить действующие значения создаваемых током автотрансформатора высших гармоник напряжения на шинах подстанции по формулам (5) и (6). В расчетах принималось, что напряжение основной частоты на шинах 220 кВ подстанции составляет 252 кВ (наибольшее рабочее напряжение), что соответствует наибольшему искажению формы кривой тока АТ. Результаты расчетов представлены в табл. 5.

Таблица 5

Номер гармоники $n$	Ток автотрансформатора $I_{(n)}$ , мА	Напряжение автотрансформатора $U_{(n)тр}$ , В	Коэффициент $K_{U(n)}$ , %	
			расчетный	нормально допустимый
3-я	125,5	7,2	0,006	1,5
5-я	147,7	14,3	0,012	1,5
7-я	98,7	13,4	0,011	1,0
9-я	48,6	8,5	0,007	0,4

Из представленных результатов следует, что при указанных условиях исследуемый АТ вызывает незначительные искажения формы кривой напряжения. Рассчитанные коэффициенты  $n$ -й гармонической составляющей напряжения в точке присоединения автотрансформатора к сети, создаваемые его током, на два порядка ниже нормально допустимых значений [8].

При наличии в электрической сети емкостных элементов, таких как батареи статических конденсаторов или распределенная емкость фаз высоковольтных линий электропередачи, создаются предпосылки для возникновения резонансных явлений на частотах ВГ, когда возможно существенное увеличение напряжений и токов ВГ. Для исследования влияния силового трансформаторного оборудования на КЭ в этом случае требуется применение детальных схем электрических сетей совместно с ИМ трансформаторов.

**Выводы.** 1. Проведенный анализ результатов моделирования и измерения спектра тока х.х. действующего силового автотрансформатора подтверждает достоверность имитационной модели и применимость способа имитационного моделирования для оценки влияния силовых трансформаторов на КЭ по  $n$ -й гармонической составляющей напряжения.

2. Значения генерируемых трансформаторным оборудованием ВГ тока зависят от:

действующего значения приложенного к обмоткам напряжения основной частоты;

эквивалентного индуктивного сопротивления системы в узле подключения трансформатора к электрической сети;

наличия высших гармоник в спектре приложенного к обмоткам трансформатора напряжения; нагрузки трансформатора и ее характера.

3. В отсутствие резонансных явлений в электрической сети значения создаваемых трансформаторным оборудованием ВГ напряжения в узлах сети существенно ниже допустимых.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Электротехника** / Под общ. ред. И.А. Федоровой. Изд. 2-е, испр. и доп. — Минск: «Высшая школа», 1977, 392 с.
2. **Прокат** холоднокатаный тонколистовой из электротехнической анизотропной стали. Каталог продукции. URL: <http://nlmk.com/docs/treeu/трансформаторный-прокат/B1bbb92CB3D94A67A4729E940E9010B991EE85C283B3E9.pdf>
3. **Либкинд М.С.** Высшие гармоники, генерируемые трансформаторами. — М: Изд-во Академии наук СССР, 1962, 105 с.
4. **Mork, B.A., Gonzalez, F., Ishchenko, D., Stuehm, D.L., Mitra, J.** Hybrid Transformer Model for Transient Simulation. Part I: Development and Parameters. — IEEE Transactions on Power Delivery, Jan. 2007, vol. 22, № 1, pp. 248—255.
5. **Mork B.A., Gonzalez F., Ishchenko D., Stuehm D.L., Mitra, J.** Hybrid Transformer Model for Transient Simulation. Part II: Laboratory Measurements and Benchmarking. — IEEE Transactions on Power Delivery, Jan. 2007, vol. 22, № 1, pp. 256—262.
6. **Лучко А.Р., Попова Т.В.** Имитационное моделирование электромагнитных процессов в магнитосвязанных электрических цепях. — *Электротехника та електроенергетика*, 2009, № 1, с. 16—22.
7. **ГОСТ 13109-97.** Межгосударственный стандарт. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. — Минск: ИПК «Изд-во стандартов», 1998.
8. **ГОСТ 721-77.** Межгосударственный стандарт. Системы электроснабжения, сети, источники, преобразователи и приемники электрической энергии. Номинальные напряжения свыше 1000 В. — М.: ИПК «Изд-во стандартов», 1978.
9. **Справочник** по проектированию электрических сетей/Под ред. Д.Л. Файбисовича. Изд. 4-е, перераб. и доп. — М.: НЦ ЭНАС, 2012, 376 с.
10. **Нгуен Динь Дык.** Разработка методики исследования распространения высших гармоник в электроэнергетических системах: дис. ... канд. техн. наук. 05.14.02. — Москва, 2008, 143 с.
11. **ГОСТ 14209-85.** Трансформаторы силовые масляные общего назначения. Допустимые нагрузки. — М.: Госстандарт, 1985.
12. **Правила** технической эксплуатации электроустановок потребителей (ПТЭЭП). — М.: ЗАО «Энергосервис», 2003, 286 с.

[06.02.14]

*Авторы: Шаров Юрий Владимирович окончил Московский энергетический институт (МЭИ) в 1986 г. В 1993 г. защитил диссертацию «Разработка методов и средств оценки эффективности управления переходными режимами электроэнергетических систем при больших возмущениях» в МЭИ. Заведующий кафедрой электроэнергетических систем «НИУ «МЭИ».*

*Насыров Ринат Ришатович окончил МЭИ (ТУ) в 2010 г. В 2013 г. защитил диссертацию «Разработка системы активно-адаптивного регулирования напряжения в распределительных электрических сетях» в «НИУ «МЭИ». Младший научный сотрудник кафедры электроэнергетических систем «НИУ «МЭИ».*

*Олексюк Борис Викторович окончил МЭИ (ТУ) в 2010 г. Инженер кафедры электроэнергетических систем «НИУ «МЭИ».*

*Симуткин Максим Геннадьевич окончил «НИУ «МЭИ» в 2012 г. Инженер кафедры электроэнергетических систем «НИУ «МЭИ».*

*Тульский Владимир Николаевич окончил МЭИ (ТУ) в 2001 г. В 2004 г. защитил диссертацию «Развитие методики определения фактического вклада при оценке качества электрической энергии в точке общего присоединения» в МЭИ (ТУ). Заместитель заведующего кафедрой электроэнергетических систем «НИУ «МЭИ».*

*Шамонов Роман Геннадьевич окончил МЭИ в 2000 г. В 2003 г. защитил диссертацию «Разработка методики оценки влияния качества электроэнергии на потери мощности и энергии в электрических сетях» в МЭИ (ТУ). Заместитель начальника службы организации систем оперативно-диспетчерского управления ОАО «ФСК ЕЭС».*

## Effect of Operating Modes of Autotransformers on Power Quality

Yu. V. SHAROV, R. R. NASYROV, B. V. OLEKSYUK, M. G. SIMUTKIN, V. N. TUL'SKII and R. G. SHAMONOV

*The effect the power transformer equipment has on the electric power quality with respect to the n-th harmonic component of voltage is analyzed. The dependences of the generated higher harmonic components of currents on the equivalent system reactance, on the presence of higher harmonic components in the applied voltage, on the effective value of the applied power frequency voltage, and on the nature and capacity of load are shown on the autotransformer model. It is demonstrated that power transformers have*

*insignificant influence on the electric power quality with respect to the  $n$ -th harmonic component of voltage provided that there are no resonance phenomena in the network.*

*Key words: power transformer, quality of electric power, simulation, higher harmonic components of current*

## REFERENCES

1. **Elektrotehnika / Pod red. I.A. Fedorovoi.** (Electrical Engineering). Minsk. Publ. «Vysheishaya shkola», 1977, 392 p.
2. **Prokat kholodnokatanyi tonkolistovoi iz elektrotekhnicheskoi anizotropnoi stali. Katalog produktii** (Cold-Rolled Thin-Sheet Articles Made of Anisotropic Electrical Steel. Product Catalogue). URL: <http://nlmk.com/docs/treeu/трансформаторный-прокат/B1bbb92CB3D94A67A4729E940E9010B991EE85C283B3E9.pdf>
3. **Libkind M.S. Vysshiye garmoniki generiruyemye transformatorami** (Higher Harmonic Components Generated by Transformers). Moscow. Publ. «Akademiya nauk SSSR», 1962, 105 p.
4. **Mork, B.A., Gonzalez, F., Ishchenko, D., Stuehm, D.L., Mitra, J.** Hybrid Transformer Model for Transient Simulation. Part I: Development and Parameters. — IEEE Transactions on Power Delivery, Jan. 2007, vol. 22, № 1, pp. 248–255.
5. **Mork B.A., Gonzalez F., Ishchenko D., Stuehm D.L., Mitra, J.** Hybrid Transformer Model for Transient Simulation. Part II: Laboratory Measurements and Benchmarking. — IEEE Transactions on Power Delivery, Jan. 2007, vol. 22, № 1, pp. 256–262.
6. **Luchko A.R., Popova T.V. Elektrotehnika ta Elektroenergetika** (Electrical Engineering and Electrical Power Engineering), 2009, № 1, pp. 16–22.
7. **GOST 13109–97. Mezghosudarstvennyi standart. Normy kachestva elektricheskoi energii v sistemakh elektrosnabzheniya**

*obshchego naznacheniya* (Interstate Standard. Power Quality Limits in Public Electrical Systems). Minsk. Publ. «Izd-vo standartov», 1998.

8. **GOST 721–77. Mezghosudarstvennyi standart. Sistemy elektrosnabzheniya, seti, istochniki, preobrasovateli i priemniki elektricheskoi energii. Nominal'nyye napryazheniya svyshe 1000 V.** (Interstate Standard. Power Supply Systems, Networks, Sources, Converters and Receivers of Electric Energy. Rated Voltages above 1000 V). Moscow. Publ. «Izd-vo standartov», 1978.

9. **Spravochnik po proektirovaniyu elektricheskikh setei** (A Handbook on Designing Electric Networks)/Pod red. D.L. Faibisovicha. Moscow. NTs. ENAS, 2012, 376 p.

10. **Nguen Din'Dyk. Razrabotka metodiki issledovaniya rasprostraneniya vysshykh garmonik v elektroenergeticheskikh sistemakh** (Development of a Procedure for Studying Propagation of Higher Harmonic Components in Electric Power Systems: Candidate's Dissertation in Technical Sciences). Moscow. MPEI, 2008, 143 p.

11. **GOST 14209–85. Transformatory silovyye maslyanyye obshchego naznacheniya. Dopustimyye nagruzki** (General-Purpose Oil-Immersed Power Transformers. Permissible Loads). Moscow. Izd-vo «Gosstandart», 1985.

12. **Pravila technicheskoi ekspluatatsii elektroustanovok potrebitelei** (Regulations for Operation of Consumer Electrical Installations. JSC Energoservis). Moscow. JSC «Energoservis», 2003, 286 p.

*Authors: Sharov Yurii Vladimirovich graduated from Moscow Power Engineering Institute (MPEI) in 1986. In 1993 he received the degree of Cand. Tech. Sci. from MPEI. He is Head of the Electric Power System Department (EPSD) at MPEI.*

*Nasyrov Rinat Rishatovich graduated from MPEI in 2010. In 2013 he received the degree of Cand. Tech. Sci. from MPEI. He is a Junior Scientific Researcher of the EPSD at MPEI.*

*Oleksyuk Boris Victorovich graduated from MPEI in 2010. He is Engineer of the EPSD at MPEI.*

*Simutkin Maksim Gennad'yevich graduated from MPEI in 2012. He is a Engineer of the EPSD at MPEI.*

*Tul'skii Vladimir Nikolayevich graduated from MPEI in 2001. In 2004 he received the degree of Cand. Tech. Sci. from MPEI. He is Deputy Head of the EPSD at MPEI.*

*Shamonov Roman Gennad'yevich graduated from MPEI in 2000. In 2003 he received the degree of Cand. Tech. Sci. from MPEI. He is Deputy Head of the Control service organization of JSC «FSK EES».*

