

УДК 621.316

## ИССЛЕДОВАНИЕ ИМПУЛЬСНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ В ОБМОТКАХ ТРАНСФОРМАТОРОВ С УЧЕТОМ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ УСЛОВИЙ ИХ РАБОТЫ

ВЕЛИЕВА Т.Д.

Азербайджанский Государственный Университет  
Нефти и Промышленности  
E-mail: veliyeva.tarana@mail.ru

Рассмотрены проблемы возникновения импульсных волн напряжений в обмотках силового трансформатора, вызванные грозовыми перенапряжениями, а также способы защиты трансформаторов от волны перенапряжения, набегающего со стороны воздушных линий электропередачи. Проанализирован возникающий электромагнитный переходной процесс, который делится на три стадии: начальный процесс ( $t=0$ ), которому соответствует начальное распределение напряжения вдоль обмотки трансформаторов; установившийся режим ( $t \rightarrow \infty$ ); и переходный процесс, который сопровождается свободными колебаниями ( $0 < t < \infty$ ).

**Ключевые слова:** силовой трансформатор, импульсная волна напряжения, гроза, линия электропередачи, нелинейный ограничитель напряжения, переходной процесс, установившийся режим, линейная изоляция.

В большинстве случаев атмосферный грозовой разряд создаёт в линии электропередач (ЛЭП) перенапряжения, представляющие собой кратковременные импульсы. Причём амплитуда и форма импульсной волны напряжения, возникающего в обмотках трансформатора, значительно зависят от таких факторов как дальность, на котором происходит атмосферный разряд, от принятой защиты трансформаторной подстанции (ПС) от волн перенапряжений, от подходов к принятой защите и других факторов [1,2].

К основным принципам защиты электроустановок электрических подстанций от возникающих перенапряжений грозового характера относятся:

- защита электрических подстанций от прямых ударов молнии (ПУМ) стержневыми и тросовыми молниеотводами;
- защита ПС от импульсных волн, которые набегают с линий электропередачи, вентильными разрядниками (РВ) и нелинейными ограничителями перенапряжений (ОПН).

Влияние рабочего напряжения на импульсное напряжение в обмотках трансформаторов рассмотрено в трёх случаях – для незащищённого трансформатора; для трансформатора, защищённого разрядником серии РВМГ; для трансформатора, защищённого нелинейным ограничителем перенапряжений серии ОПН. Все варианты рассматриваются при отсутствии рабочего напряжения и при его максимальном значении.

Исследование импульсных перенапряжений в обмотках трансформаторов проводится методом математического моделирования с помощью программного комплекса OrCAD, обеспечивающего достаточно быстрое решение задач схемотехнического характера.

*Импульсные напряжения в обмотках незащищённых трансформаторов.* Эквивалентная схема замещения обмотки трансформатора показана на рис.1, где  $R$ ,  $L$ ,  $C$  и  $C_k$  – активное сопротивление, индуктивность, поперечные (относительно заземлённых частей обмотки) и продольные (между дисками, катушками, витками

обмотки) ёмкости,  $R_l$  – волновое сопротивление линии [3]. Расстояние между ОПН и трансформатором вносится в эквивалентную схему «П»-образной схемой замещения с расчётными параметрами  $L_P$  и  $C_P$ , которые определяются по формулам:

$$L_P = L_O \cdot l = 1,33 \cdot 120 = 160 \text{ m} \Omega \quad (1)$$

$$C_P = C_O \cdot l = 8,33 \cdot 120 = 1000 \text{ nF} \quad (2)$$

Здесь  $L_O$  и  $C_O$  – соответственно индуктивность и ёмкость линии длиной 1 м;  $l$  – расстояние между ОПН и трансформатором. Принято, что  $l = 120 \text{ м}$ , что соответствует тупиковым подстанциям.

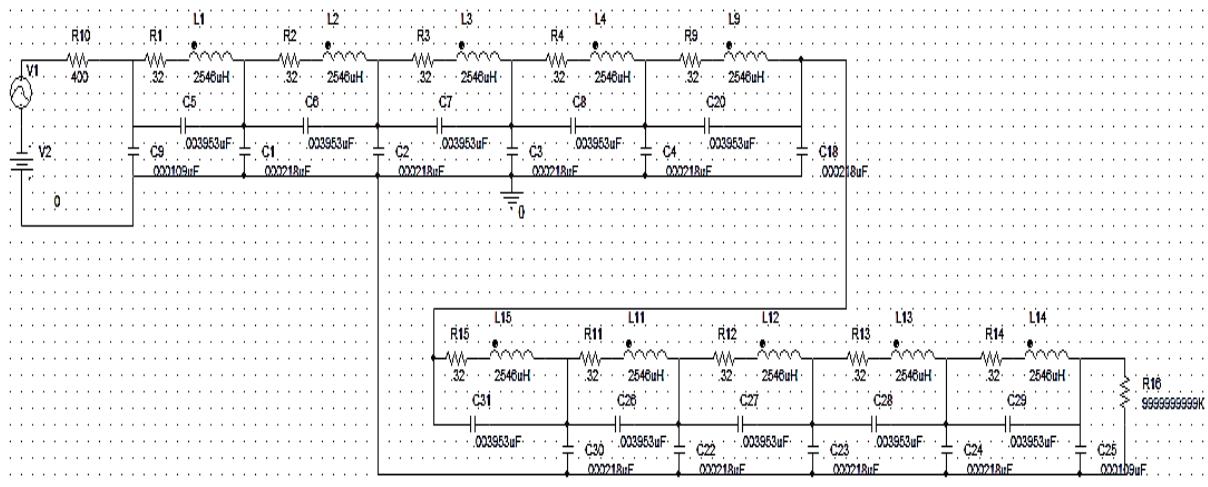


Рис.1. Эквивалентная схема замещения обмотки трансформатора.

Таблица 1.

Результаты всех этих расчётов приведены в таблице 1.

Напряжение на разряднике и на входе трансформатора, кВ	Без разрядника			С разрядником РВМГ-110			С ОПН-110		
	0	+U <sub>Ф</sub>	-U <sub>Ф</sub>	0	+U <sub>Ф</sub>	-U <sub>Ф</sub>	0	+U <sub>Ф</sub>	-U <sub>Ф</sub>
U <sub>РАЗ</sub>	-	-	-	231	231	231	225	227	223
U <sub>ВХ.ТР.</sub>	1154	1218	1091	388	429	372	341	301	367

Как видно из таблицы, при отсутствии защиты трансформатора и при не учёте влияния рабочего напряжения, напряжение на входе трансформатора  $U_{\text{ВХ.ТР.}}=1154 \text{ кВ}$ . Отметим, что амплитуда приходящей с ЛЭП импульсного напряжения равна 1360 кВ, то есть несколько меньше удвоенного значения напряжения перекрытия линейной изоляции класса напряжения 110 кВ.

Если импульсная волна напряжения воздействует в момент, когда в обмотке рабочее напряжение имеет положительный максимум, то на входе трансформатора напряжение достигает значения 1218 кВ. Если импульсная волна напряжения

воздействует в момент отрицательного максимального рабочего напряжения, то напряжение на входе трансформатора будет иметь значение  $U_{\text{вх.тр.}}=109 \text{ кВ}$ .

Сравнивание значений напряжения на входе трансформатора показывает, что наибольшее значение этого напряжения равно 1154 кВ и имеет место при положительном максимальном рабочем напряжении обмотки. Кривые напряжения на входе трансформатора показаны на рис. 2.

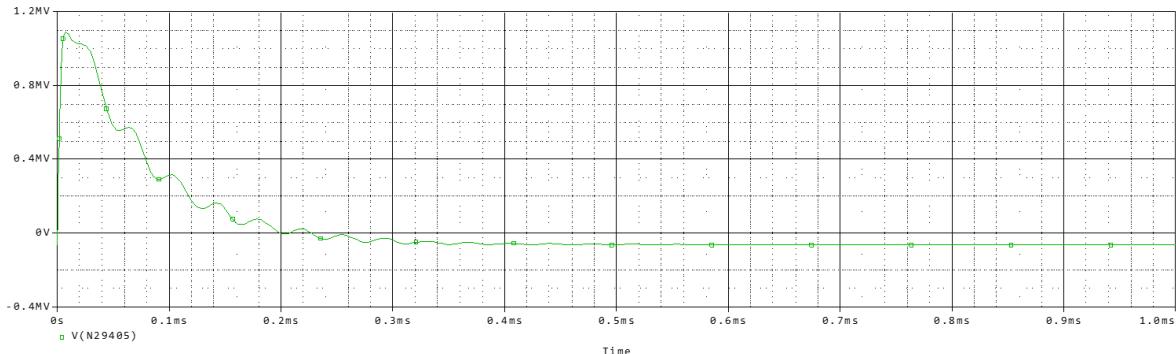


Рис.2. Кривые напряжения на входе трансформатора.

*Импульсные напряжения в обмотках трансформаторов защищённых разрядниками типа РВМГ. Схема замещения обмотки трансформатора вместе со схемой его защиты приведена на рис. 3.*

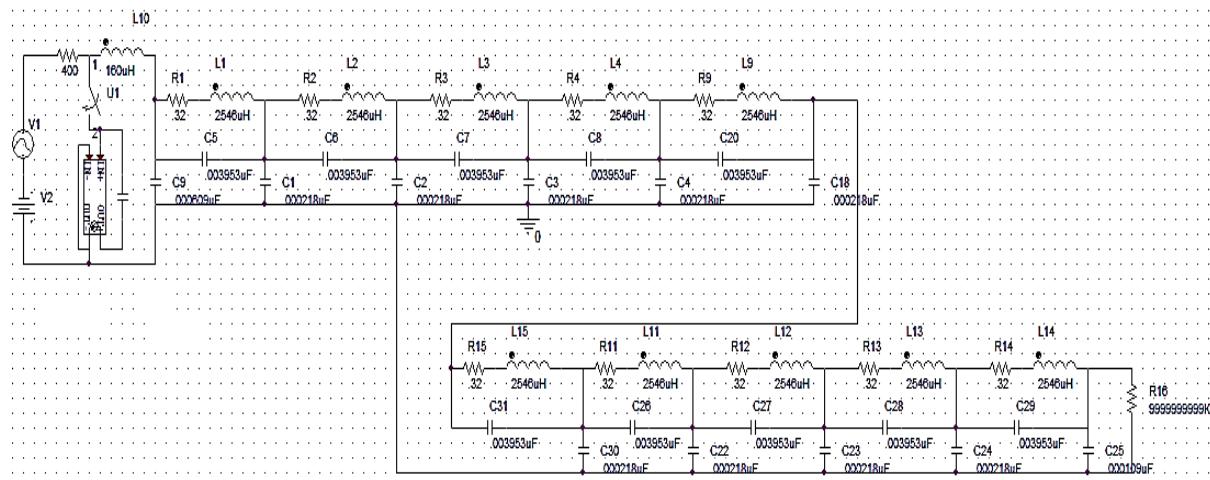


Рис.3. Схема замещения обмотки трансформатора, защищённого разрядником типа РВМГ.

Вентильный разрядник типа РВМГ-110 вносится в расчётную схему с вольт-амперной и вольт-секундной характеристиками [4,5]. Из вольт-секундной характеристики видно, что при наличии рабочего напряжения значение пробивного напряжения разрядника изменяется. При положительной полярности рабочего напряжения пробивное напряжение разрядника увеличивается, а при отрицательной полярности, наоборот, уменьшается (рис.4.).

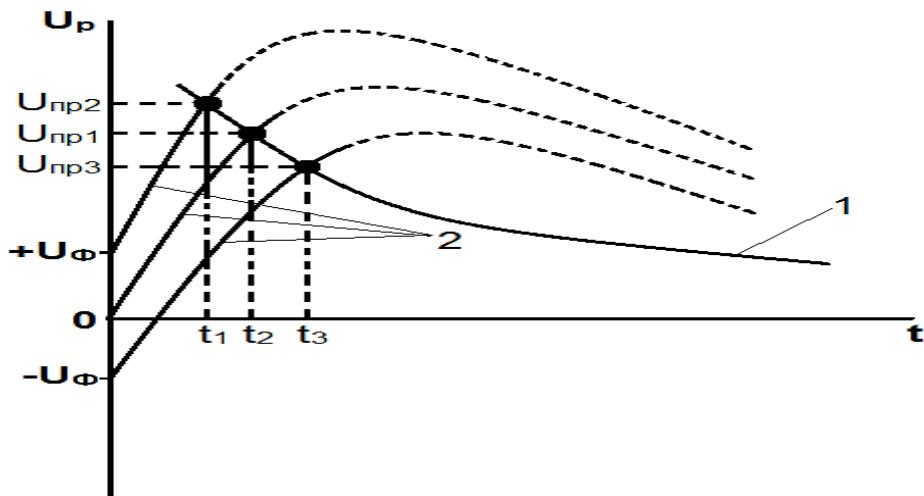


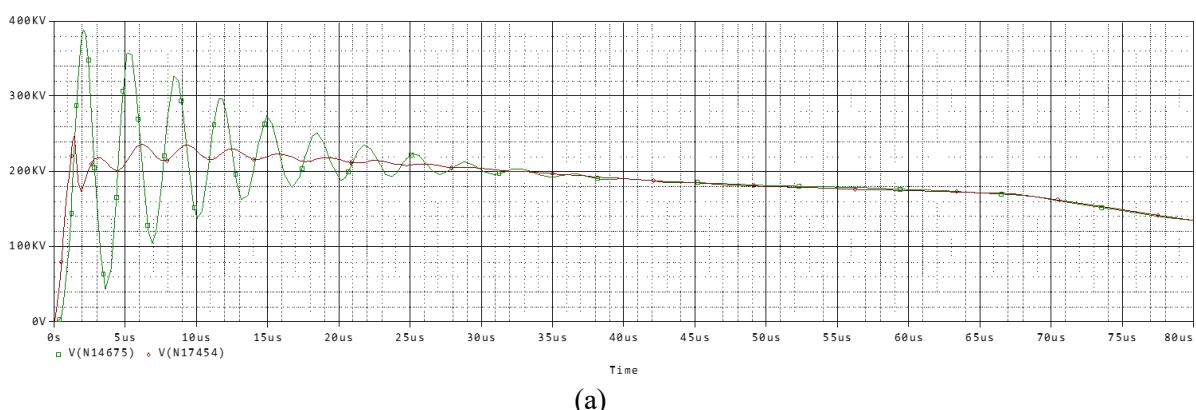
Рис.4. Определение пробивного напряжения разрядника при различных значениях рабочего напряжения: 1 – вольт-секундная характеристика разрядника; 2 – воздушная импульсная волна напряжения.

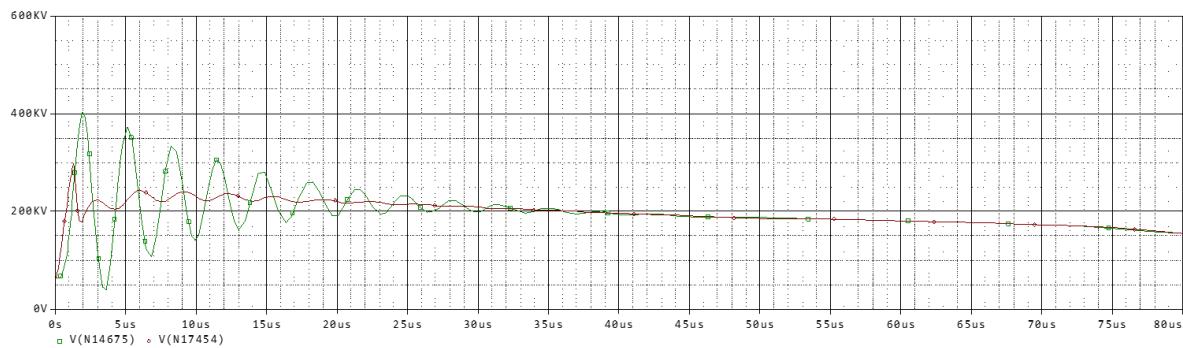
Изменение пробивного напряжения разрядника изменяет напряжение на входе трансформатора. Результаты расчёта приведены в таблице 1.

При защите трансформатора разрядником типа РВМГ-110 и при отсутствии рабочего напряжения, напряжение на входе трансформатора равно  $U_{\text{вх.тр.}}=388 \text{ кВ}$ . При наличии в обмотке трансформатора положительного максимального рабочего напряжения, на входе трансформатора напряжение равно 429 кВ, а при наличии отрицательного максимального рабочего напряжения равно 372 кВ.

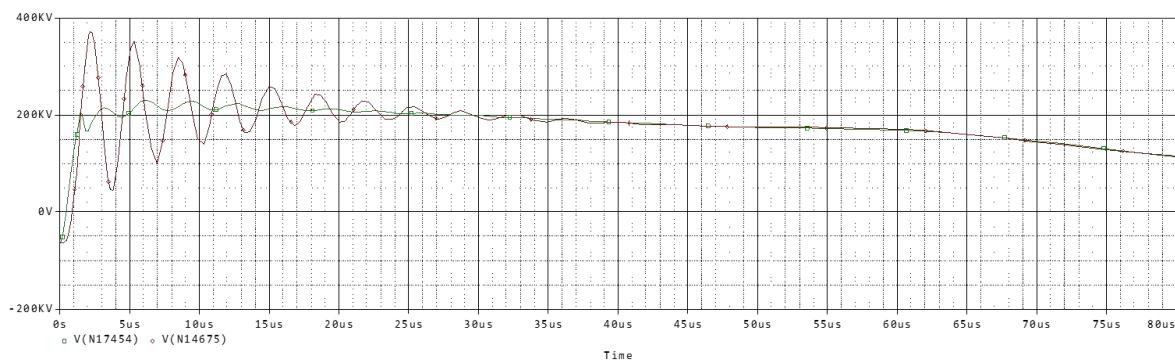
Как видно, увеличению пробивного напряжения разрядника из-за влияния положительного рабочего напряжения соответствует увеличение напряжения на входе трансформатора до 429 кВ. При уменьшении пробивного напряжения разрядника (из-за наличия отрицательного максимального рабочего напряжения), напряжение на входе трансформатора также увеличивается до значения 372 кВ, т.е. здесь сказывается уменьшение действующего напряжения на трансформатор и перезаряд обмотки от  $-U_{\Phi}$  до  $+372 \text{ кВ}$ .

Кривые напряжения на разряднике РВМГ-110 и на входе трансформатора показаны на рис.5.





(6)



(b)

Рис.5. Напряжение на входе трансформатора, защищенного разрядником типа РВМГ:  
 а – при отсутствии рабочего напряжения,  
 б – при наличии положительного рабочего напряжения,  
 в – при наличии отрицательного рабочего напряжения.

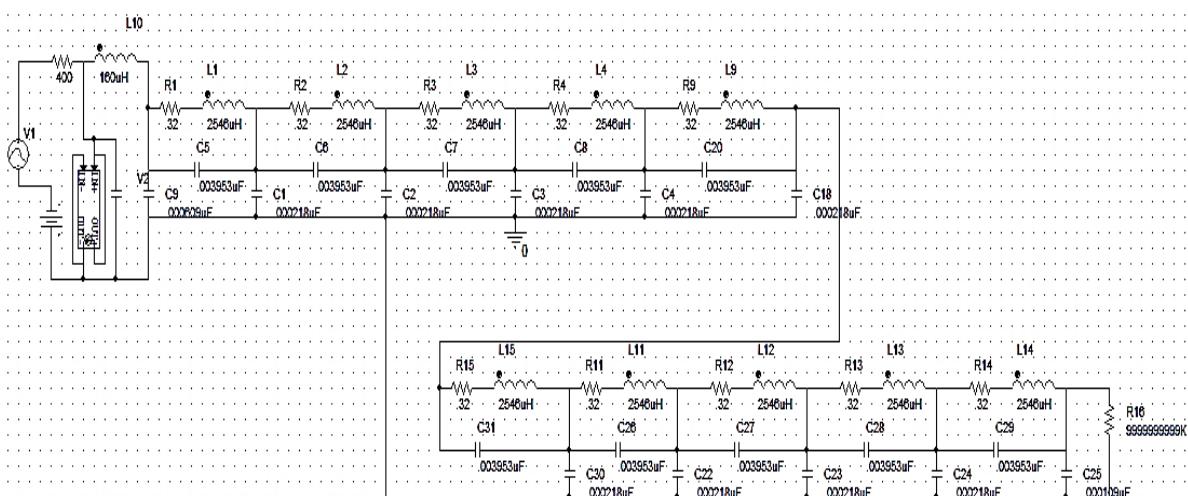
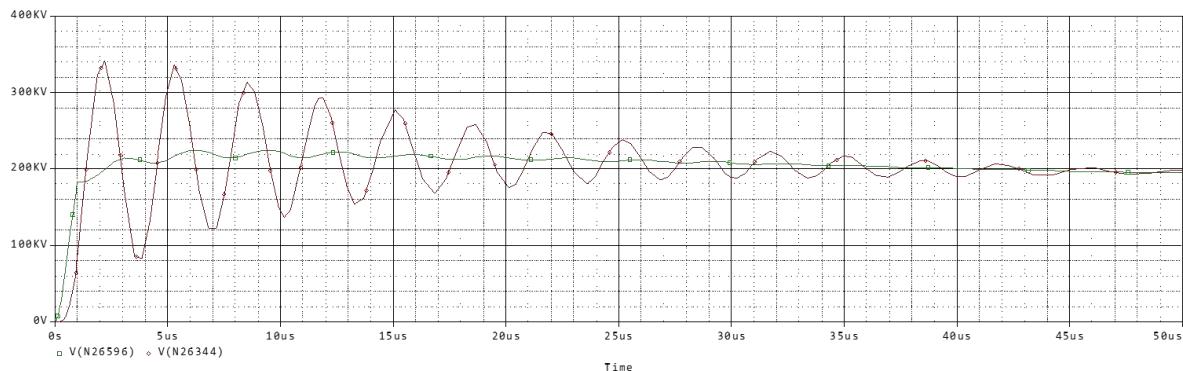
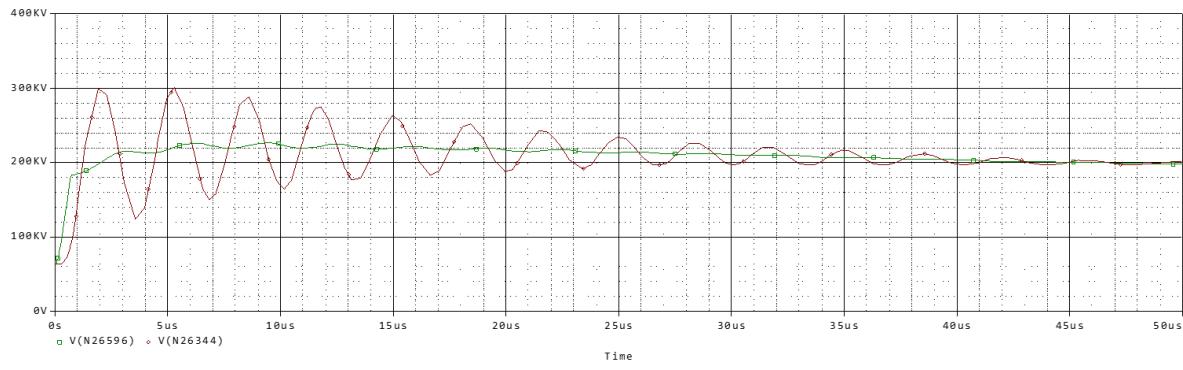


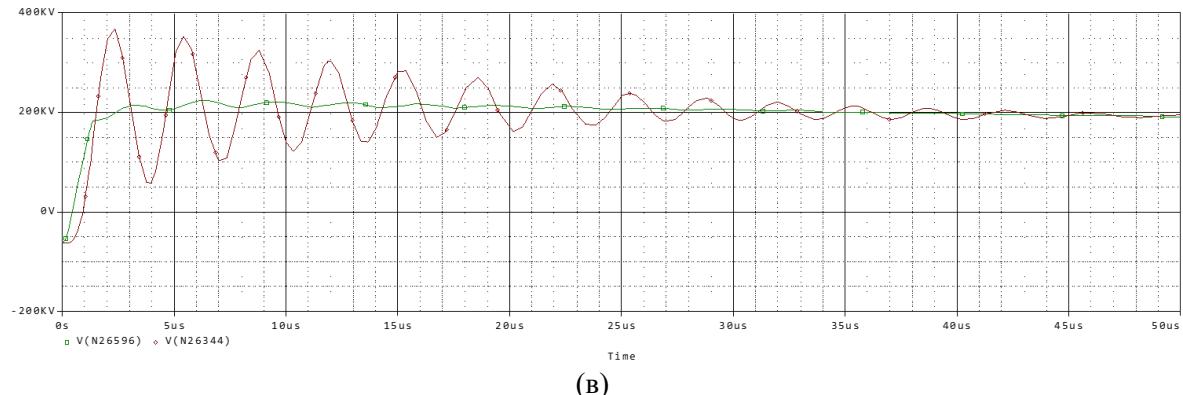
Рис.6. Схема замещения обмотки трансформатора, защищенного  
 нелинейным ограничителем перенапряжений серии ОПН.



(a)



(6)



(b)

Рис.7. Напряжение на входе трансформатора, защищенного ОПН:

а – при отсутствии рабочего напряжения,

б – при наличии положительного рабочего напряжения ( $+U_\Phi$ ),в – при наличии отрицательного рабочего напряжения ( $-U_\Phi$ ).

*Импульсные напряжения в обмотках трансформаторов, защищённых ОПН.* Ограничители перенапряжений нелинейные не имеют искровых промежутков, поэтому при защите трансформаторов ОПН, на трансформаторы воздействует остающееся напряжение на ОПН [6].

Схема замещения обмотки трансформатора, защищенного нелинейным ограничителем перенапряжений серии ОПН, приведена на рис. 6.

Результаты этого расчёта приведены в таблице 1. Как видно из таблицы, при защите трансформаторов ОПН, напряжение на входе трансформатора остаётся неизменным при указанных значениях рабочего напряжения ( $0, +U_\Phi, -U_\Phi$ ), так как, любая комбинация импульсного напряжения с рабочим напряжением срезается ОПН до

определенного значения, и это значение напряжения воздействует на вход трансформатора. Кривые этих напряжений показаны на рис.7.

Таким образом, анализ результатов расчёта влияния рабочего напряжения на перенапряжения в обмотках трансформаторов показывает, что при защите трансформатора разрядниками типа РВМГ, наибольшее напряжение на входе трансформатора имеет место при положительной полярности рабочего напряжения, а при защите трансформатора ОПН, влияние рабочего напряжения отсутствует.

- 
1. *Кабышев А.В.* Молниезащита электроустановок систем электроснабжения: учебное пособие. Томск: Изд-во ТПУ, 2006 – 124 с.
  2. *Дмитриев М.В.* Грозовые перенапряжения на оборудовании РУ 35-750 кВ и защита от них. Санкт-Петербург, 2006 - 44 с.
  3. *Важов В.Ф.* Техника высоких напряжений: курс лекций / В.Ф. Важов, В.А. Лавринович. Томск: Изд-во ТПУ, 2008. - 150 с.
  4. *Гольдштейн М.Е.* Атмосферные и коммутационные перенапряжения в электрических системах: учебное пособие к лабораторным работам / М.Е. Гольдштейн, Ю.В. Коровин, А.В. Прокудин. Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ, 2010. - 75 с.
  5. *Паперный Л. Е., Алейникова М. В.* Область применения, выбор и расчет ОПН, установленных в сети 0,4-750 кВ. Минск, БНТУ, 2015 – 234 с.
  6. *Брагин А.А.* Разработка конструкции ОПН-ИП-110 кВ для защиты от грозовых и внутренних перенапряжений сетей 110 кВ с феррорезонансными перенапряжениями. Диссертация на соискание ученой степени магистра. Санкт-Петербург, 2016 -127 с.

## İSTİSMAR İŞ ŞƏRAİTİNİN NƏZƏRƏ ALINMAQLA TRANSFORMATORUN SARĞILARINDA İMPULSLU GƏRGİNLİYİN TƏDQİQİ

### VƏLİYEVA T.D.

Tufan gərginlik həddindən güc transformatorun sarğılarında impulslu dalğaların yaranma problemlərinə və transformatorların həddindən artıq gərginlik dalgasından müdafiə üsullarına baxılıb. Yaranan elektromaqnit keçid prosesi üç mərhələdən ibarətdir: ilkin proses ( $t=0$ ), qərarlaşmış iş rejimi ( $t \rightarrow \infty$ ) və keçid prosesi ( $0 < t < \infty$ ).

**Açar sözlər:** güc transformatoru, impulslu gərginlik dalğası, tufan, elektrik xətti, geyri-xətti gərginlik məhdudlaşdırıcı, keçid prosesi, qərarlaşmış iş rejimi, xətti izolyasiya.

## STUDY OF PULSE VOLTAGES IN TRANSFORMER WINDINGS BEARING IN MIND THE OPERATING CONDITIONS OF THEIR WORK

### VELİYEVA T.D.

The problems of impulse waves stress in windings of power transformer caused by storm surge, as well as ways to protect the transformer from overvoltage wave, free from the overhead lines electricity transmission. Analyzed the resulting electromagnetic transition process which is divided into three stages: the initial process ( $t = 0$ ), which corresponds to the primary voltage distribution along the winding transformers; load ( $t \rightarrow \infty$ ); and the transition process, which is accompanied by free ( $0 < t < \infty$ ).

**Keywords:** power transformer, voltage impulse wave, storm, power line, non-linear voltage limiter, transitional process, stationary mode, linear isolation.