

УДК 621.316.1.015.3

## **ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК НЕЛИНЕЙНЫХ ОГРАНИЧИТЕЛЕЙ ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЙ**

**В. В. КРОТЕНОК, А. Н. БОХАН**

*Учреждение образования «Гомельский государственный  
технический университет имени П.О. Сухого»,  
Республика Беларусь*

### **Требования к экспериментальной установке**

Для оценки влияния ограничителей перенапряжений нелинейных на снижение перенапряжений при дуговых замыканиях на землю необходимо выполнить экспериментальное исследование вольтамперной характеристики, в том числе и при воздействии напряжения повышенной частоты.

Как известно, частота свободной составляющей переходного процесса на неповрежденных фазах для исследуемых распределительных сетей обычно находится в диапазоне 1–16 кГц [1, с. 90], [2, с. 99], [3].

По этой причине к экспериментальной установке предъявляются следующие требования:

- 1) испытательное напряжение должно приводить к срабатыванию ОПН;
- 2) экспериментальная установка должна подводить испытательное напряжение промышленной и повышенной частоты (0,05–16 кГц);
- 3) экспериментальная установка должна иметь возможность наложения испытательного напряжения повышенной частоты на испытательное напряжение промышленной частоты.

### **Разработка экспериментальной установки**

Сравнительный анализ экспериментальных исследований сетей 6–35 кВ с ОПН и результатов вычислительного эксперимента на математических моделях [4], [1, с. 5] показывает, что величины перенапряжений при исследовании на математических моделях значительно ниже, чем в экспериментальных исследованиях. Это не всегда можно объяснить отличием условий натурального и вычислительного эксперимента. Можно предположить, что разработка достоверной математической модели ОПН позволит с более высокой точностью исследовать перенапряжения в распределительных сетях на математических моделях. Для исследования характеристик ОПН была разработана установка, функциональная схема которой представлена на рис. 1.

В установке использованы резисторы:  $R_1$  – 30 Ом;  $R_2$  – 51 МОм;  $R_3$  – 3,8 кОм. При испытании варисторов 0,4, 3,3, 10 кВ в установке применялись трансформаторы напряжения (ТУ1, ТУ2) НОМ-6 или НОМ-10. В схеме использовался инвертор типа ВVP112-31-115, 1,5 kVA. Сигнал управления на инвертор подается от генератора сигналов специальной формы Г6-37.

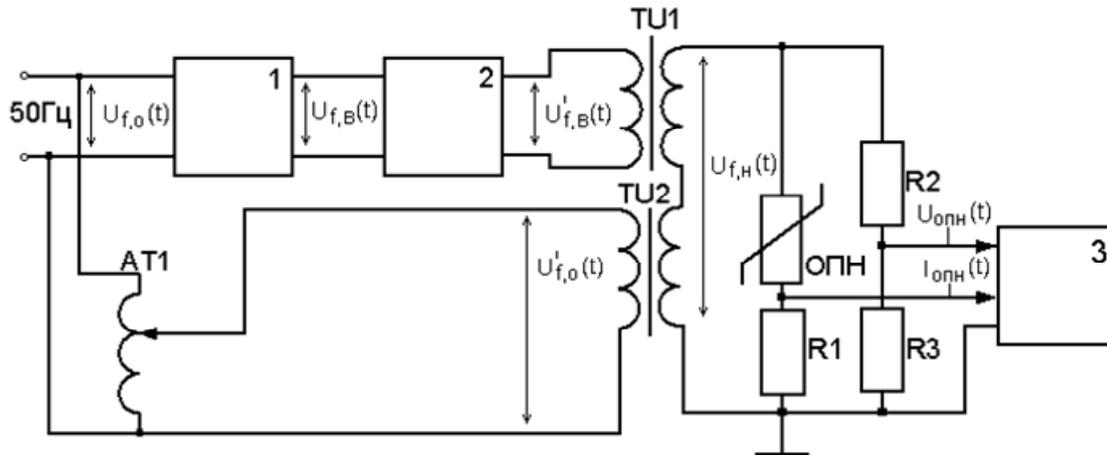


Рис. 1. Функциональная схема экспериментальной установки для испытаний ОПН:  
 1 – инвертор; 2 – полосовой фильтр; TU1, TU2 – трансформаторы напряжения НОМ-6;  
 3 – регистратор

Задача экспериментальной установки: сформировать ряд сигналов различной частоты, соответствующих частотам напряжения, возникающим в реальных распределительных сетях 6–35 кВ при дуговых замыканиях на землю. Причем установка должна формировать испытательное напряжение основной частоты 50 Гц, на которое наложено испытательное напряжение высокой частоты. Напряжение питания установки  $U_{f,o}$  и напряжение питания трансформатора TU2  $U'_{f,o}$  определяются по следующим выражениям:

$$U_{f,o}(t) = U_m \sin(\omega t);$$

$$U'_{f,o}(t) = U_m K_{AT1} \sin(\omega t), \quad (1)$$

где  $U_{f,o}$  – напряжение основной частоты (напряжение сети, питающей установку), кВ;  $U_m$  – амплитуда напряжения основной частоты, кВ;  $\omega$  – угловая частота напряжения основной частоты ( $(\omega = 2\pi f = 2\pi 50 \approx 314; f$  – частота напряжения основной частоты, Гц;  $U'_{f,o}(t)$  – напряжение основной частоты с учетом коэффициента трансформации  $K_{AT1}$  автотрансформатора AT1, кВ.

Высокочастотная составляющая испытательного напряжения, частота которой задается инвертором 1 (рис. 1), определяется по формуле

$$U_{f,b}(t) = U_m \sin(\omega_{вч} t), \quad (2)$$

где  $U_{f,b}(t)$  – напряжение высокой частоты, кВ;  $\omega_{вч}$  – угловая частота напряжения высокой частоты (1–16 кГц),  $c^{-1}$ .

Напряжение  $U_{f,b}(t)$ , прошедшее полосовой фильтр  $U'_{f,b}(t)$ , подается на трансформатор TU1, напряжение  $U'_{f,o}(t)$  – на трансформатор TU2. Так как последние трансформаторы включены последовательно, испытательное напряжение  $U_{f,h}(t)$ , подаваемое на варистор, определяется выражением

$$U_{f,h}(t) = U'_{f,b}(t) + U'_{f,o}(t). \quad (3)$$

Поскольку коэффициенты трансформаторов TU1, TU2 равны 60 либо 100, напряжения  $U'_{f,в}(t)$  и  $U'_{f,о}(t)$  повышаются до уровней, необходимых для срабатывания ОПН. Например, для исследования динамических свойств ОПН 0,4 кВ, установленного в сеть с собственной частотой колебаний, при коротких замыканиях на землю, равной 2 кГц, напряжение, подаваемое на ОПН  $U_{f,н}(t)$ , будет определяться выражением

$$U_{f,н}(t) = 600\sin(2\pi 50t) + 600\sin(2\pi 2000t).$$

Графическое отображение временной диаграммы сигнала  $U_{f,н}(t)$  представлено на рис. 2.

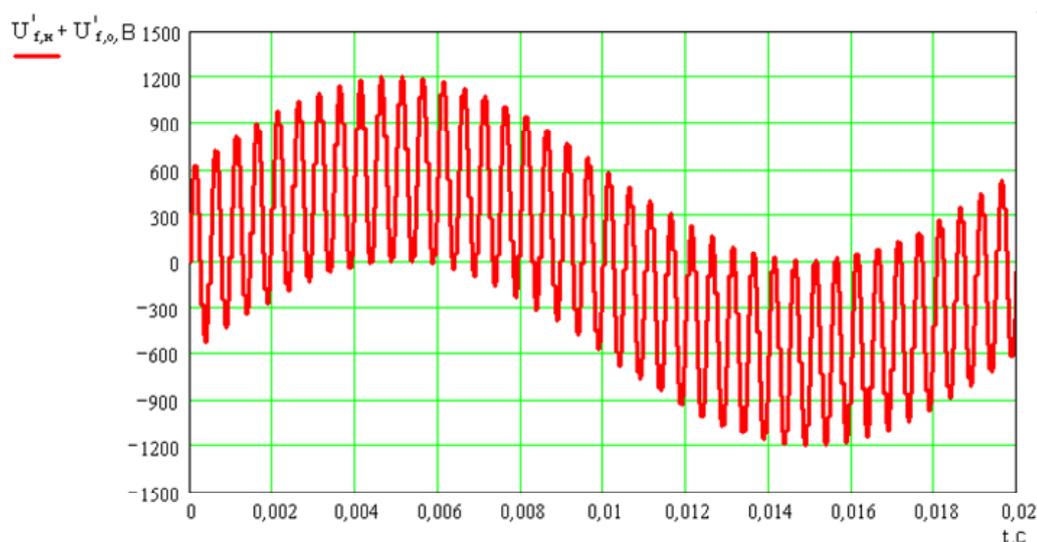


Рис. 2. Временная диаграмма сигнала испытательного напряжения, подаваемого на исследуемый ОПН

Для регистрации электрических характеристик ОПН сигнал высокого напряжения с помощью делителей напряжения понижается до уровня номинального напряжения регистрирующего прибора. Делитель напряжения, представляющий собой цепочку последовательно соединенных резисторов  $R2$ ,  $R3$ , является датчиком напряжения. Датчик напряжения преобразует высокое напряжение  $U_{f,н}(t)$  в напряжение той же формы и частоты, уменьшенное в  $K_U$  раз по амплитуде, для регистрации прибором. Преобразованное напряжение  $U_{ОПН}(t)$  и коэффициент  $K_U$  определяются по выражениям:

$$U_{ОПН}(t) = \frac{U_{f,н}(t)R3}{R2 + R3}; \tag{4}$$

$$K_U = \frac{R2}{R3}. \tag{5}$$

В качестве датчика тока используется включенный последовательно с ОПН резистор  $R1$ . Ток, протекающий по резистору  $R1$ , совпадает по фазе с напряжением ОПН, поэтому его можно определить по формуле

$$I_{ОПН} = \frac{U_{R1}}{R1}. \tag{6}$$

Резистор  $R_2$  марки С5–24 0,5 W 51 МОм предназначен для работы в цепях постоянного и переменного тока прецизионной измерительной и вычислительной аппаратуры. Сопротивление изоляции в нормальных климатических условиях – не менее  $5 \cdot 10^{11}$  Ом. Предельное рабочее напряжение резистора – 5000 В [11, с. 169].

Регистратором электрических сигналов в основном является аттестованный заводом-изготовителем цифровой запоминающий осциллограф С8-23, для которого допустимое значение основной погрешности коэффициентов отклонения каждого из каналов А и Б равно  $\pm 3\%$  [6, с. 5]. Осциллограммы фотографировались и для занесения в отчет на ПЭВМ сканировались.

Измерение тока, напряжения и температуры ОПН реализовано на основе датчиков тока, напряжения и датчика температуры, выходы которых подключены к цифровому регистратору, работающему совместно с ПЭВМ. Цифровой регистратор записывает данные, полученные по всем каналам измерения в память жесткого диска ПЭВМ. Имеется возможность предоставлять и обрабатывать данные с помощью специализированных математических программ.

Полученные с датчиков сигналы оцифровывались с последующим занесением в ПЭВМ с помощью АЦП модели ADC100K/12–8/DAC/12 [7]. Структурная схема цифрового регистратора приведена на рис. 3.

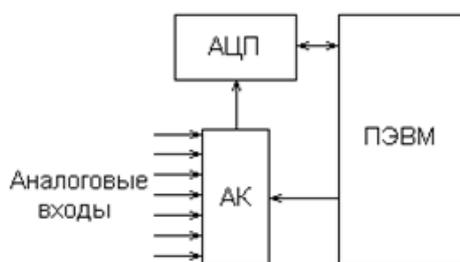


Рис. 3. Структурная схема цифрового регистратора

Регистратор имеет 7 аналоговых входов, сигналы от которых через аналоговый коммутатор АК поступают на вход аналого-цифрового преобразователя АЦП. ПЭВМ управляет работой АЦП и АК, а также считывает полученный двоичный код от цифровых выходов АЦП.

Цифровые данные, представленные в десятичной системе исчисления, записываются в энергонезависимую память ПЭВМ. Компьютерная обработка сигналов велась с помощью ряда специализированных прикладных математических программ MathCad, MatLab [8, с. 420], [5].

Экспериментальная установка, функциональная схема которой представлена на рис. 1, внедрена в учебный процесс на кафедре «Электроснабжение» в Гомельском государственном техническом университете имени П. О. Сухого.

### Результаты исследований динамических характеристик ОПН

Экспериментальные исследования ОПН проводились в Гомельском государственном техническом университете имени П. О. Сухого на кафедре «Электроснабжение». Схема экспериментальной установки соответствовала функциональной схеме, приведенной на рис. 1.

Измерения проводились с ОПН разного класса напряжения: ОПН-Н/TEL 0,4/0,45 УХЛ2, ОПН-КР/TEL 10/10,5(11/12) УХЛ1, HSRA15B 12kV~10 kA фирмы «Rauchem» и др.

Осциллограмма тока и напряжения ОПН–КР/TEL 10/10,5 УХЛ1 при приложенном напряжении 14,600 кВ промышленной частоты и токе срабатывания 0,001 А (режим длительной работы ОПН) приведена на рис. 4.

Длительный ток ограничителя (обычно не превышает 0,001 А) протекает при приложении к нему длительного рабочего напряжения. Он зависит от технологии изготовления варисторов, температуры, паразитной емкости и степени загрязнения внешней изоляции аппарата. Из рис. 4 видно, что ток ОПН имеет преимущественно емкостную составляющую. Данный ток практически не вызывает нагрева варистора.

Появление активной составляющей в токе означает вступление ОПН в проводящее состояние. На рис. 5 приведена осциллограмма тока и напряжения ОПН-КР/TEL 10/10,5 УХЛ1 при приложенном к его зажимам напряжении 15,8 кВ промышленной частоты. Амплитуда тока ОПН составляет в данном случае 0,003 А. Режимная точка варистора находится на участке ограничения напряжения, и при этом появилась активная составляющая тока ОПН. Значение и длительность активного тока определяют интенсивность нагрева ОПН.

При подаче испытательного напряжения на зажимы ОПН-КР/TEL 10/10,5 УХЛ1 с амплитудой 20 кВ ОПН вступает в режим ограничения. Амплитуда приложенного напряжения превышает пороговое значение срабатывания ОПН в 1,1 раза. При этом ток, протекающий через ОПН, весьма мал (0,1 А), но срез напряжения весьма заметен, что видно из рис. 6.

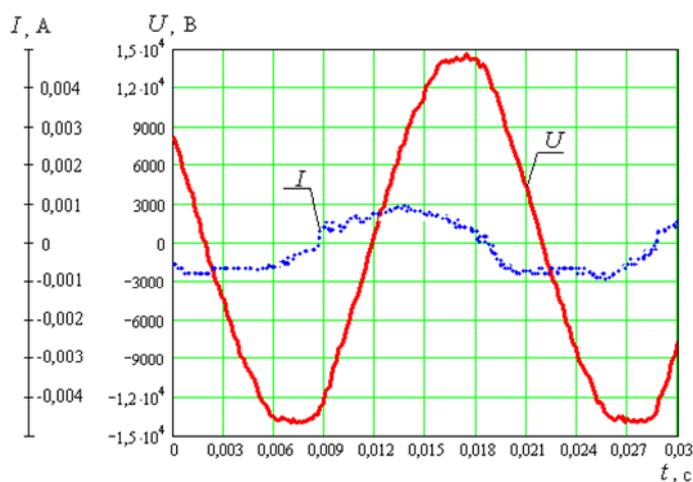


Рис. 4. Осциллограмма тока и напряжения ОПН-КР/TEL 10/10,5 УХЛ1 при приложенном напряжении промышленной частоты и длительном режиме работы ОПН

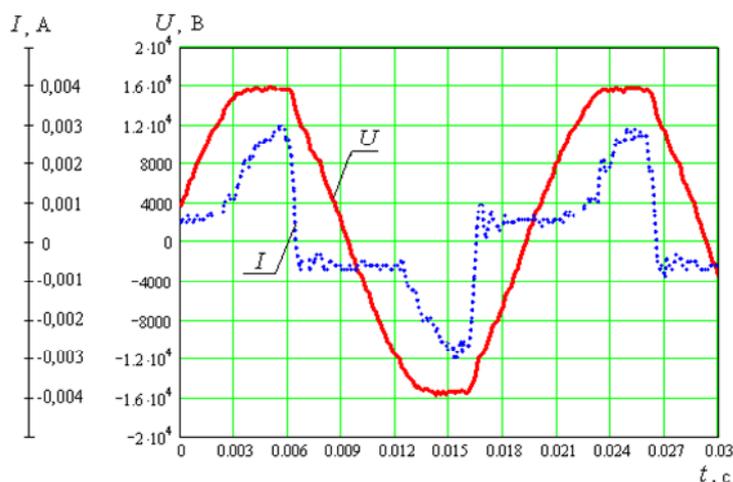


Рис. 5. Осциллограмма тока и напряжения ОПН-КР/TEL 10/10,5 УХЛ1 при приложенном напряжении промышленной частоты и видимой активной составляющей тока ОПН

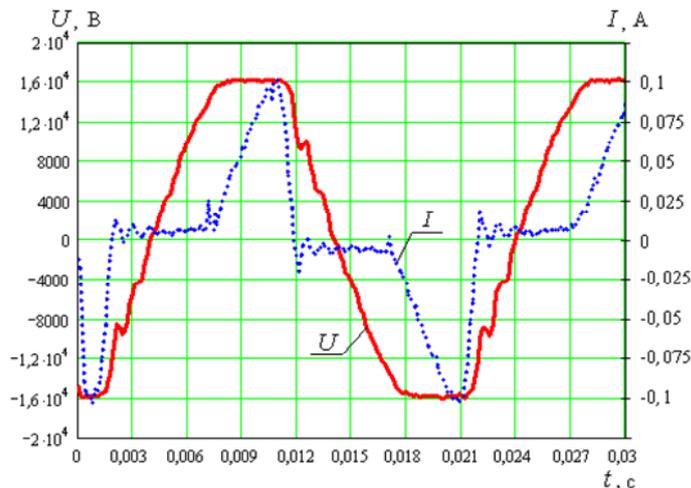


Рис. 6. Осциллограмма тока и напряжения ОПН-КР/TEL 10/10,5 УХЛ1 при приложенном напряжении промышленной частоты, превышающем пороговое значение срабатывания ОПН в 1,1 раза

Из осциллограмм 5 и 6 видно, что на участке ограничения ток ОПН имеет активную составляющую. Изменение тока ОПН на участке ограничения происходит несимметрично. Скорость нарастания разрядного тока меньше, чем убывания. Это дает основание судить о замедленной реакции ОПН на перенапряжение.

Осциллограмма тока и напряжения ОПН-Н/TEL 0,4/0,45 УХЛ2 при приложенном напряжении промышленной частоты показана на рис. 7. Из рис. 6 и 7 видно, что замедленная реакция ограничителя на перенапряжение имеет место для разных типов ОПН.

При коммутациях и дуговых замыканиях на землю в распределительных сетях возникают перенапряжения, имеющие свободную высокочастотную составляющую. Как известно, частота свободной составляющей переходного процесса для исследуемых распределительных сетей обычно находится в диапазоне 1–16 кГц. Для выяснения, как ведет себя ОПН при высокочастотном испытательном напряжении, наложенном на напряжение промышленной частоты, экспериментальной установкой было сформировано испытательное напряжение, форма которого представлена на рис. 2.

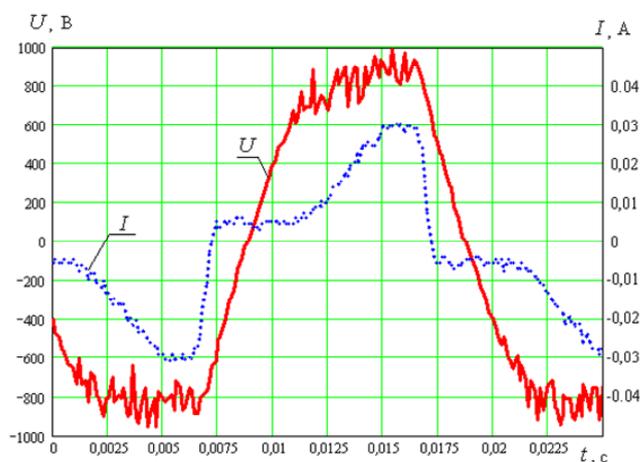
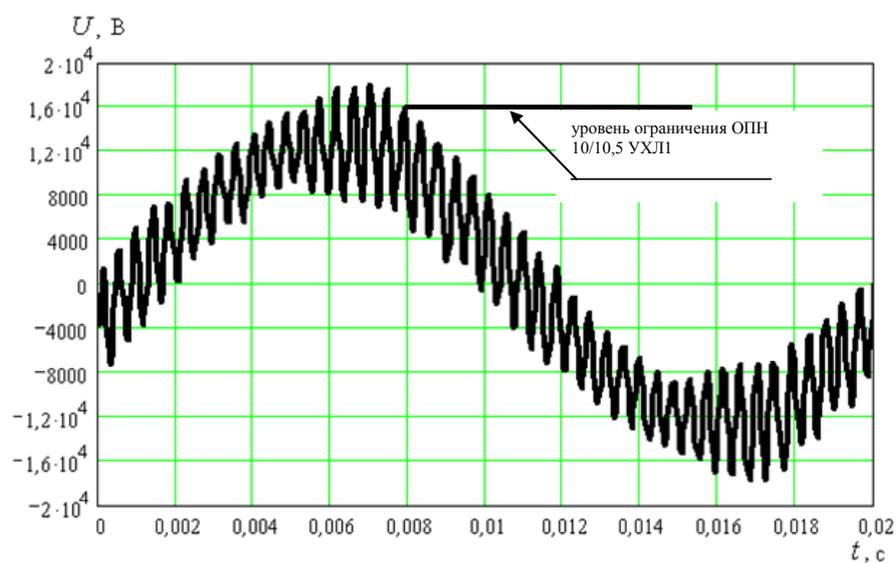


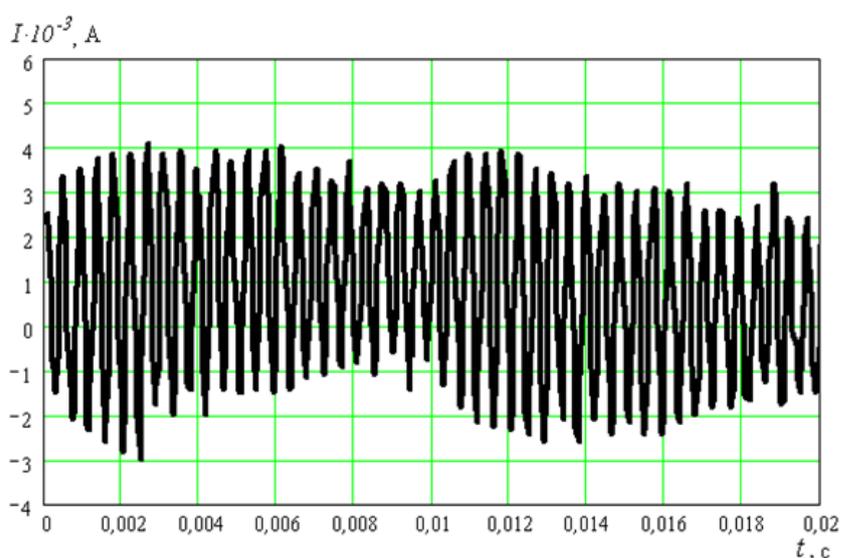
Рис. 7. Осциллограмма тока и напряжения ОПН-Н/TEL 0,4/0,45 УХЛ2 при приложенном напряжении промышленной частоты

На рис. 8 представлены осциллограммы напряжения (а) и тока (б) ОПН-КР/TEL 10/10,5 УХЛ1. Амплитуда напряжения (18,5 кВ), приложенного к ОПН, превышает уро-

вень ограничения в 1,16 раза. В испытательном напряжении амплитуда основной гармоники с частотой 50 Гц составляет 12,7 кВ, а высокочастотной составляющей 2,4 кГц – 5,8 кВ. В режим ограничения ОПН не вступил из-за замедленной реакции ОПН на перенапряжение, кристаллы оксида цинка не успевают перейти в проводящее состояние при такой частоте. Для того чтобы ОПН вступил в проводящее состояние, необходимо увеличить напряжение промышленной частоты до уровня начала ограничения (16 кВ).



а)



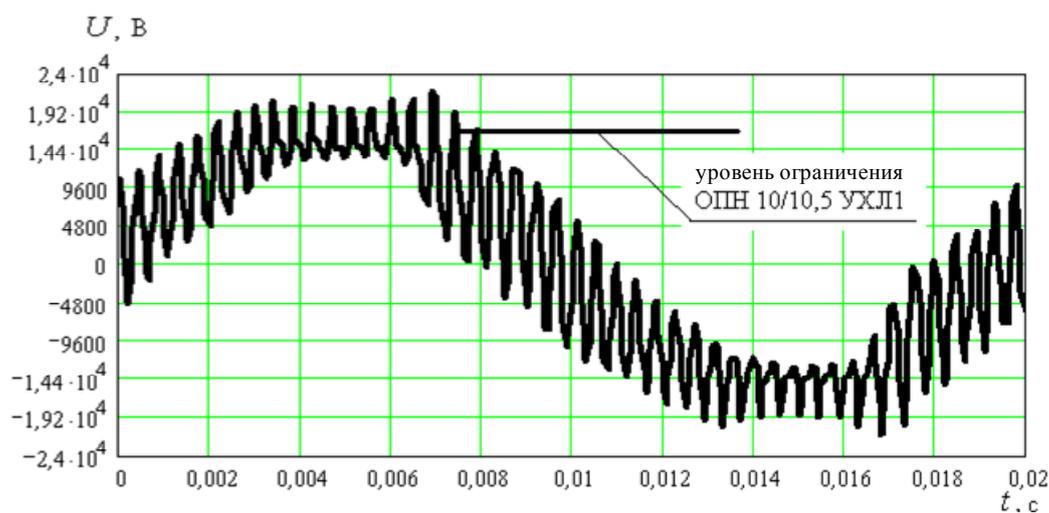
б)

Рис. 8. Осциллограмма напряжения (а) и тока (б) ОПН-КР/TEL 10/10,5 УХЛ1, испытательное напряжение состоит из высокочастотной составляющей (2,4 кГц), наложенной на напряжение промышленной частоты

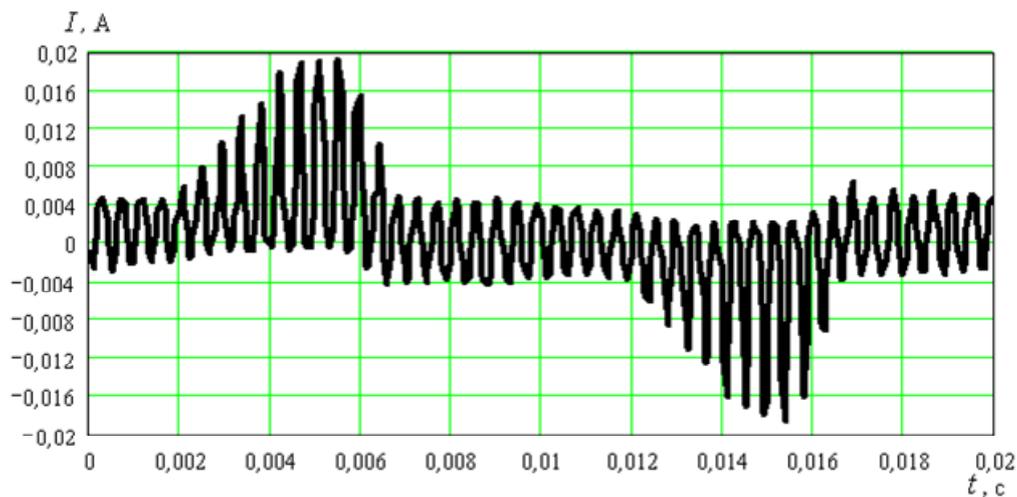
На рис. 9 показаны осциллограммы напряжения (а) и тока (б) ОПН-КР/TEL 10/10,5 УХЛ1 при воздействии повышенного уровня напряжения основной гармоники, который равен 16,8 кВ. Амплитуда высокочастотной составляющей осталась неизменной (5,8 кВ). На участках осциллограммы, где амплитуды мгновенных значений напряжения превышают порог срабатывания ОПН, ограничение

напряжения происходит неравномерно. Наиболее эффективно срез напряжения происходит в области, где амплитуда основной гармоники превышает порог срабатывания ОПН.

Результаты эксперимента дают основание предположить, что при высокой скорости изменения напряжения ОПН не успевает реагировать на высокочастотные составляющие перенапряжения заданной амплитуды. При работе ОПН в указанных зонах варистор не успевает перейти в проводящее состояние из-за инерционности ориентирования доменов структуры варистора.



а)

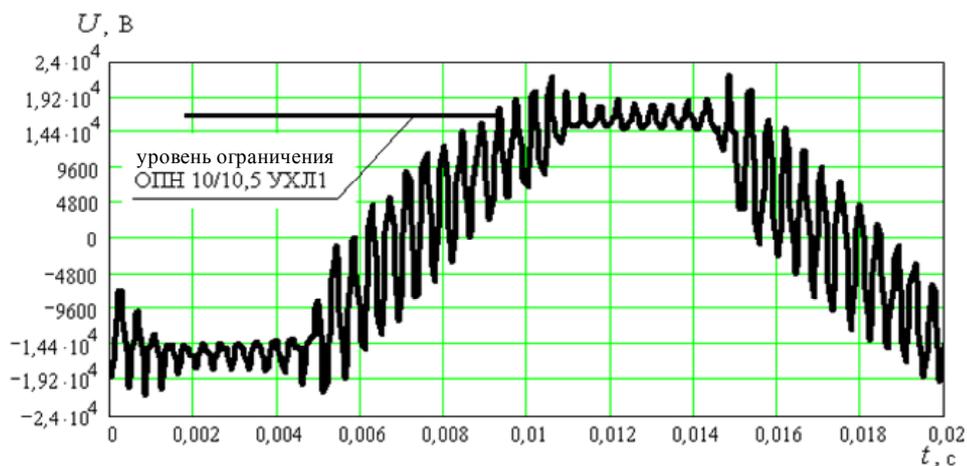


б)

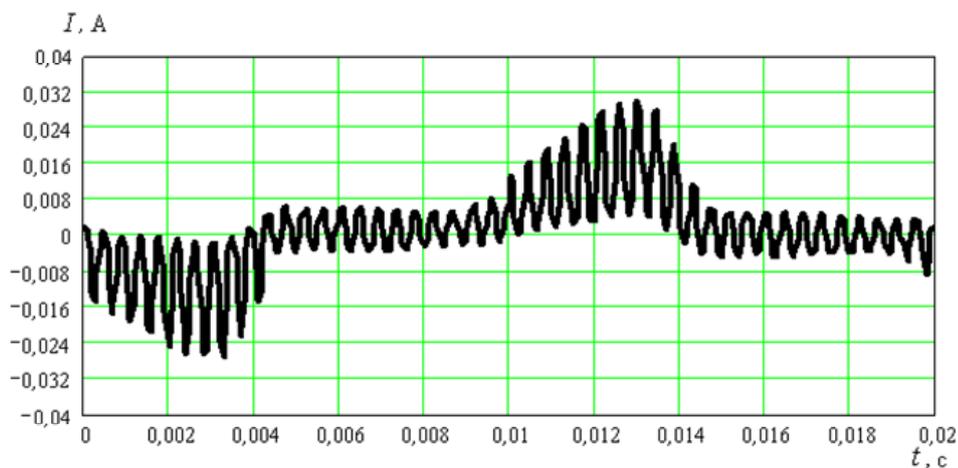
Рис. 9. Осциллограмма напряжения (а) и тока (б) ОПН-КР/TEL 10/10,5 УХЛ1 при суммарном воздействии составляющих напряжения (амплитуда напряжения основной гармоники составляет 16,8 кВ)

Если увеличить амплитуду основной гармоники до 18 кВ, то в местах, где мгновенное значение напряжения превышает порог срабатывания ОПН, срез напряжения высокочастотной составляющей происходит более эффективно. На рис. 10 приведены осциллограммы напряжения (а) и тока (б), где амплитуда основной гармоники подаваемого напряжения равна 18 кВ.

Для ОПН-Н/TEL 0,4/0,45 УХЛ2 были проведены подобные опыты. Результаты экспериментальных исследований показали те же динамические свойства ОПН. На рис. 11 показаны осциллограммы напряжения (а) и тока (б) ОПН-Н/TEL 0,4/0,45 УХЛ2. Амплитуда суммарного напряжения (2,2 кВ), приложенного к ОПН, превышает уровень ограничения в 2,6 раза. В испытательном напряжении амплитуда основной гармоники с частотой 50 Гц составляет 0,95 кВ, а высокочастотной составляющей 2400 Гц – 1,25 кВ.

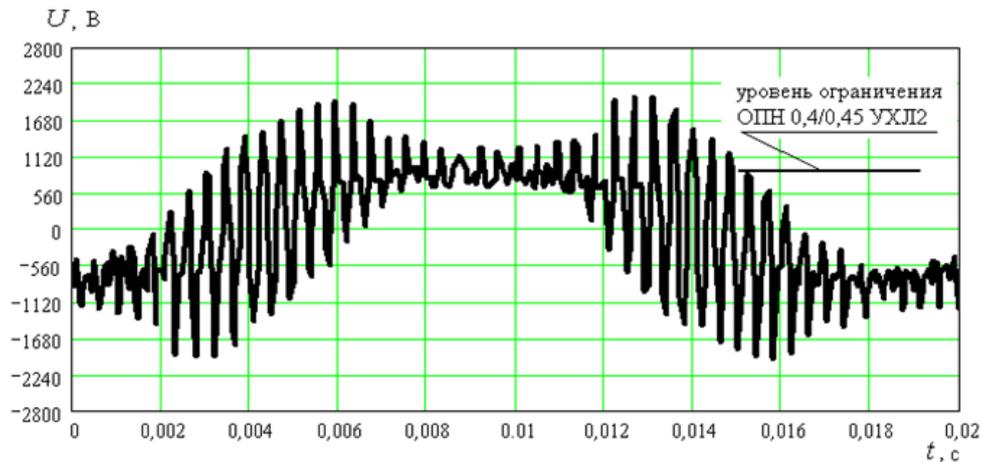


а)

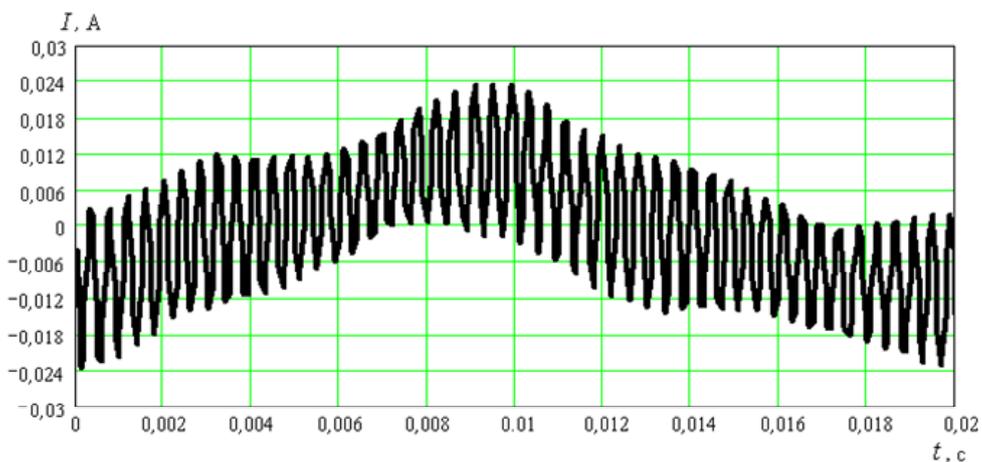


б)

Рис. 10. Осциллограмма напряжения (а) и тока (б) ОПН-TEL 10/10,5 УХЛ1 при суммарном воздействии составляющих напряжения (амплитуда напряжения основной гармоники – 18 кВ)



а)



б)

Рис. 11. Осциллограмма напряжения и тока ОПН-TEL 0,4/0,45 УХЛ2 при суммарном воздействии составляющих напряжения (амплитуда напряжения основной гармоники – 0,95 кВ)

Проведен ряд экспериментов над ОПН разного класса напряжений (0,4, 6, 10 кВ). Зависимость между собой (корреляция) экспериментальных данных производилась следующим образом. Определить коэффициент корреляции [10] можно по формуле

$$R(\xi, \eta) = \frac{\text{cov}(\xi, \eta)}{\sqrt{D\xi} \cdot \sqrt{D\eta}}, \quad (7)$$

где  $R$  – коэффициент корреляции случайных величин;  $\text{cov}(\xi, \eta)$  – ковариация двух случайных величин;  $D\xi$ ,  $D\eta$  – дисперсия случайных величин  $\xi$ ,  $\eta$ .

Определить ковариацию двух случайных величин можно по выражению

$$\text{cov}(\xi, \eta) = E((\xi - E\xi)(\eta - E\eta)), \quad (8)$$

где  $E$  – математическое ожидание.

Рассчитаем дисперсию случайной величины  $\xi$ :

$$D\xi = E(\xi - E\xi)^2. \quad (9)$$

Если принять случайные величины  $\xi$  и  $\eta$  как вектора одинакового размера  $x_1$  и  $x_2$ , то с учетом (7)–(9) коэффициент корреляции можно определить по формуле

$$R(x_1, x_2) = \frac{\frac{1}{N} \cdot \sum_{i=0}^{N-1} (x_{1i} - \frac{1}{N} \cdot \sum_{i=0}^{N-1} x_{1i})(x_{2i} - \frac{1}{N} \cdot \sum_{i=0}^{N-1} x_{2i})}{\sqrt{\frac{1}{N} \cdot \sum_{i=0}^{N-1} \left( x_{1i} - \left( \frac{1}{N} \cdot \sum_{i=0}^{N-1} x_{1i} \right) \right)^2} \cdot \sqrt{\frac{1}{N} \cdot \sum_{i=0}^{N-1} \left( x_{2i} - \left( \frac{1}{N} \cdot \sum_{i=0}^{N-1} x_{2i} \right) \right)^2}}. \quad (10)$$

В качестве векторов  $x_1$  и  $x_2$  были использованы оцифрованные данные, полученные с экспериментальной установки. Коэффициент корреляции определялся отдельно для векторов значений напряжения и для векторов значений тока. Для результатов экспериментальных исследований ОПН при воздействии напряжения промышленной частоты коэффициент корреляции составил 0,99. Для экспериментальных исследований при суммарном воздействии напряжений промышленной частоты и высокочастотной составляющей 2,4 кГц коэффициент корреляции составил 0,96. Статистический анализ показал достаточно высокую достоверность выполненных экспериментальных исследований.

### Заключение

1. Выполненные экспериментальные исследования ОПН при воздействии напряжения частотой 50 Гц, а также высокой частоты и комбинированном воздействии показали, что моделирование ОПН статической характеристикой не позволяет получать достоверные результаты при исследовании переходных процессов в сетях с ОПН.

2. Анализ экспериментальных исследований показал, что при воздействии на ОПН напряжений, превышающих уровень ограничения, переход варисторов в проводящее состояние происходит с замедленной реакцией. Замедленная реакция ОПН на перенапряжения заметнее с ростом частоты воздействующего напряжения.

3. Экспериментальная установка позволяет исследовать статические и динамические характеристики ОПН, а также остающееся напряжение на ОПН при переходных процессах, характерных для внутренних перенапряжений в распределительных сетях. Разработанная экспериментальная установка позволяет выполнять диагностику ОПН. Это способствует оптимизации выбора параметров ОПН, устанавливаемых в КРУ, и повышению качества выпускаемой продукции.

### Литература

1. Евдокунин, Г. А. Современная вакуумная коммутационная техника для сетей среднего напряжения (технические преимущества и эксплуатационные характеристики) / Г. А. Евдокунин, Г. Тилер. – СПб. : Изд-во Сизова М. П., 2000. – С. 114.
2. Кузьмин, С. В. Электромагнитная совместимость высоковольтных электроприводов с коммутационными аппаратами / С. В. Кузьмин, В. Н. Язев, Р. С. Кузьмин // Автоматизированный электропривод : тез. докл. для междунар. науч.-техн. студен. конф., 2007 г., Санкт-Петербург. – 2007. – № 2. – С. 486–487.
3. Сивокобыленко, В. Ф. Анализ процессов дуговых замыканий на землю в сетях собственных нужд ТЭС и АЭС / В. Ф. Сивокобыленко // Донбас. Ассоц. Развития Интернет [Электронный ресурс]. – 2005. – Режим доступа: <http://www.uran.donetsk.ua/~masters/2001/eltf/dey/ellib/ct2.htm>. – Дата доступа: 02.02.2006.

4. Беляков, Н. Н. Ограничение перенапряжений при дуговых замыканиях на землю в сети 6 кВ собственных нужд электростанций с помощью ОПН / Н. Н. Беляков, К. И. Кузьмичева, А. Ивановски // Электрич. станции. – 1999. – № 4. – С. 25–30.
5. Справочник по электрическим установкам высокого напряжения / под ред. И. А. Баумштейна, С. А. Бажанова. – М. : Энергоатомиздат, 1989. – С. 768.
6. Технический паспорт и инструкция по эксплуатации платы многоканального аналого-цифрового преобразователя: ADC100K/12–8/DAC/12, 1995. – С. 12.
7. Техническое описание и инструкция по эксплуатации осциллографов запоминающих: С8-23, С8-23/1. Часть I (411161.003 ТО), 1998. – С. 83.
8. Дьяконов, В. П. MathCad 7 в математике, физике и в Internet / В. П. Дьяконов, И. В. Абраменкова. – М. : Нолидж, 1998. – С. 243.
9. Черных, И. В. Simulink: среда создания инженерных приложений / И. В. Черных ; под общ. ред. В. Г. Потемкина. – М. : ДИАЛОГ-МИФИ, 2003. – С. 496.
10. Гусак, А. А. Высшая математика : в 2 т. / А. А. Гусак. – Л. : Энергия, 1972. – С. 442.
11. Резисторы : справочник / В. В. Дубровский [и др.] ; под ред. И. И. Четверткова и В. М. Терехова. – 2-е изд., перераб. и доп. – М. : Радио и связь, 1991. – С. 528.

*Получено 19.03.2013 г.*