

## Лимистор — лимитирующий резистор

НАУМКИН И.Е.

Представлено описание нового нелинейного резистора, который до определенного значения напряжения, в частности в диапазоне от наибольшего рабочего до временно допустимого, обладает свойствами линейного резистора, после чего резко снижает свое сопротивление, тем самым ограничивая (лимитируя) напряжение на резисторе. Указанное мгновенное значение напряжения, при котором резистор меняет свои свойства, называется лимитирующим напряжением, и, соответственно, резистор — лимитирующим резистором, сокращенно — лимистором. Приведены примеры применения лимистора в электроэнергетике. Особый интерес представляет его использование в сети 500 кВ для решения актуальной задачи обеспечения коммутационной способности элегазовых выключателей при коммутации компенсированных линий электропередачи.

Ключевые слова: электроэнергетика, нелинейный резистор, ограничение напряжения

Применяемые в электроэнергетике электротехнические устройства по своей физической сущности имеют индуктивный, емкостный или резистивный характер. Резисторы являются такими же ответственными элементами электрических схем, как и генераторы, трансформаторы, конденсаторы. Особенностью резисторов является их целевое предназначение: работа в основном во время аварий для демпфирования электромагнитных переходных процессов. Общеизвестными резистивными устройствами являются линейные силовые резисторы [1] и ограничители перенапряжений нелинейные (ОПН) [2].

Линейные силовые резисторы имеют линейную вольт-амперную характеристику с пропорциональной зависимостью тока через резистор  $I_R$  от приложенного к резистору напряжения  $U_R$ :

$$I_R = \frac{1}{R_0} U_R, \quad (1)$$

где  $R_0$  — активное сопротивление линейного резистора;  $I_R$ ,  $U_R$  — действующие значения синусоидальных токов и напряжений; выражение (1) справедливо также и для мгновенных значений тока  $i_R$  и напряжения  $u_R$ .

Если источник питания имеет сопротивление  $Z_S$  и напряжение источника питания  $U_S$ , то

$$I_R = \frac{1}{|Z_S + R_0|} U_S, \quad (2)$$

при этом

$$U_R = \frac{R_0}{|Z_S + R_0|} U_S. \quad (3)$$

При  $R_0 \ll Z_S$  значение  $U_R \approx U_S$ , при  $R_0 \gg Z_S$  значение  $U_R \approx 0$ , т.е. напряжение на резисторе при

изменении  $R_0$  может изменяться от максимального значения  $U_S$  до 0. Сопротивление может изменяться в зависимости от времени  $R_0(t)$ , частоты  $R_0(\omega)$  либо от приложенного напряжения  $R_0(u_R)$  или протекаемого тока  $R_0(i_R)$ . В последних случаях резисторы представляются как нелинейные.

Нелинейные резисторы типа ОПН обладают нелинейной вольт-амперной характеристикой, обычно представляемой в виде

$$u_n = A i_n^a \quad \text{или} \quad \frac{u_n}{U_b} = \frac{a}{a-1} \frac{i_n}{I_b} \frac{1}{\varphi}, \quad (4)$$

где  $U_b$ ,  $I_b$  — базисные значения напряжения и тока, выбранные на вольт-амперной характеристике ОПН в некоторой определенной точке; показатель степени вольт-амперной характеристики  $a \gg 0,04$ .

Выражение нелинейной зависимости тока от напряжения имеет вид

$$i_n = I_b \frac{a}{a-1} \frac{u_n}{U_b} \frac{1}{\varphi}, \quad (5)$$

а зависимость сопротивления от напряжения

$$R_n = R_b \frac{a}{a-1} \frac{U_b}{u_n} \frac{1}{\varphi}, \quad (6)$$

где  $R_b = U_b / I_b$ .

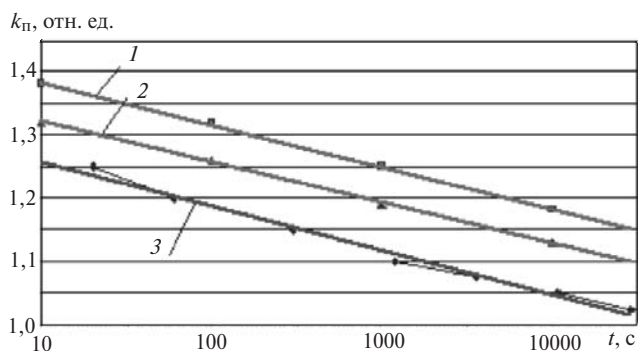
В справочных данных по параметрам ОПН приводятся значения напряжения (называемые «остающимися» напряжениями) при определенных значениях тока коммутационных и грозовых импульсов. За базисные значения  $U_b$ ,  $I_b$  обычно принимаются эти известные значения. Поскольку показатель степени  $(1/a - 1) \gg 24$ , то при  $u_n < U_b$  сопротивление ОПН по отношению к  $R_b$  велико (например, при  $u_n = 0,8U_b$  сопротивление  $R_n = 210R_b$ ),

а при  $u_n > U_b$  сопротивление ОПН по отношению к  $R_b$  резко уменьшается (например, при  $u_n = 1,2U_b$  сопротивление  $R_n = 0,01R_b$ ).

Ограничители (ОПН) служат защитой от импульсных коммутационных и грозовых перенапряжений, которые характеризуются коэффициентом  $k_{\Pi}$  – отношением максимального мгновенного значения напряжения в точке установки электрооборудования  $u_{\max}$  к амплитудному значению фазного наибольшего рабочего напряжения сети  $U_{\text{мфнр}}$ :

$$k_{\Pi} = \frac{u_{\max}}{U_{\text{мфнр}}}. \quad (7)$$

В электрической сети возможно временное увеличение синусоидального напряжения, превышающего наибольшее рабочее напряжение. На рис. 1 приведены графики допустимого повышения синусоидального напряжения в сети высокого напряжения 110 кВ и выше согласно ГОСТ 1516.3–96 и рекомендуемые стандартом ANSI 62.22 характеристики «допустимое напряжение – время» (TOV) для ОПН.



**Рис. 1.** Графики допустимого повышения синусоидального напряжения в сети высокого напряжения 110 кВ и выше и характеристики «допустимое напряжение – время» (TOV) для ОПН: 1 – TOV без предварительного напряжения; 2 – TOV с предварительным нагружением; 3 – по ГОСТ 1516.3–96

Поскольку характеристика TOV лежит выше прямой допустимого повышения напряжения в сети, то ОПН будет работоспособным при всех допустимых значениях синусоидального напряжения в сети, оставаясь практически нетокопроводным.

При поперечной установке в сети обычного линейного резистора через него будут протекать токи от воздействия всех напряжений: номинальных, наибольших рабочих, временно допустимых, импульсных коммутационных и импульсных грозовых. Представляет интерес создать нелинейный резистор, который до определенного значения напряжения (например, в диапазоне от наибольшего рабочего до временно допустимого) обладал бы свой-

ствами линейного резистора, а после этого напряжения резко снижал свое сопротивление, тем самым ограничивая (лимитируя) напряжение на резисторе. Указанное мгновенное значение напряжения, при котором резистор меняет свои свойства, можно назвать лимитирующим напряжением, а резистор – лимитирующим резистором, сокращенно – лимистором [3].

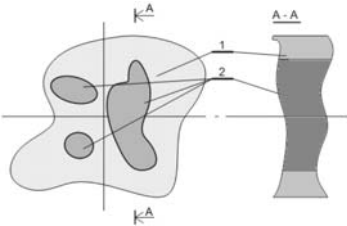
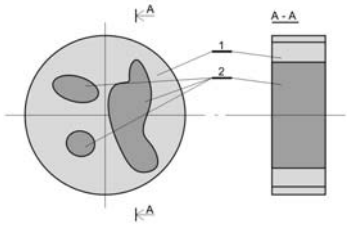
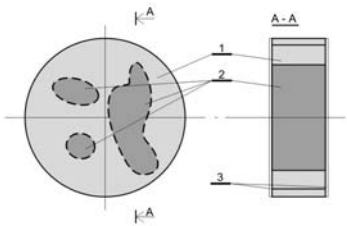
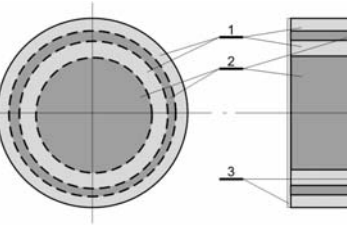
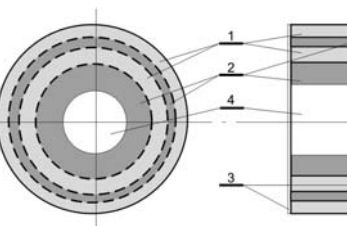
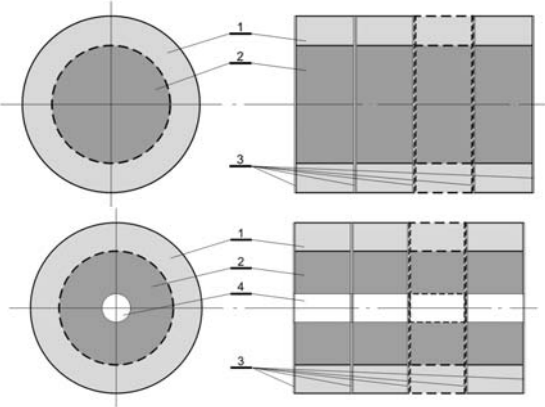
Далее описываются свойства лимистора и условия, при которых он работает; методы выбора ОПН широко известны [4, 5]. В статье показано, что лимистор является новым элементом электроэнергетической сети, выбор и применение которого имеют свою специфику.

Наиболее простой способ создать лимистор – это использовать в его конструкции гетерогенный принцип. В технической литературе приводятся варианты различных гетерогенных нелинейных резисторов, один из них, например, выполнен из двух резистивных материалов [6], в качестве одного из которых используется РТС-полимер – материал с положительным коэффициентом зависимости сопротивления от температуры. Применение такого резистора как продольного элемента электрической сети позволяет ограничивать протекаемые токи.

Поставленная задача решается созданием нелинейного резистора, состоящего из двух резистивных материалов таким образом, что одна составляющая его часть выполнена из резистивного материала с линейными проводящими свойствами, а другая (параллельная составляющая резистора) – из резистивного материала с нелинейными проводящими свойствами, зависящими от приложенного напряжения. Причем при напряжении на резисторе, меньшем некоторого мгновенного значения напряжения (лимитирующего напряжения), сопротивление части резистора с нелинейными проводящими свойствами много больше сопротивления части резистора с линейными проводящими свойствами, а при напряжении на резисторе, большем этого значения, сопротивление части резистора с нелинейными проводящими свойствами равно или меньше сопротивления части резистора с линейными проводящими свойствами.

Варианты конструкции лимистора представлены в табл. 1. Цифры на представленных в таблице рисунках означают: 1 – часть лимитирующего резистора из одного резистивного материала; 2 – часть из другого резистивного материала; 3 – контактные металлизированные поверхности; 4 – отверстие в диске; 5 – контакты лимитирующего резистора, соединяющие параллельно резисторные колонки; 6 – корпус для параллельно соединенных резисторных колонок.

Таблица 1

Конструкция	Пояснение
	<p>Общий вид гетерогенного резистора с двумя составляющими проводящего материала 1 и 2.</p>
	<p>Создание лимитирующего резистора в виде круглого диска позволяет упростить технологию его выполнения.</p>
	<p>Создание лимитирующего резистора с металлизированными контактными поверхностями позволяет снизить контактное сопротивление.</p>
	<p>Создание лимитирующего резистора, у которого части диска из разных материалов расположены соосно, позволяет повысить качество его выполнения.</p>
	<p>Выполнение диска со сквозным отверстием по оси позволяет снизить температуру нагрева центральной части резистора.</p>
	<p>Формирование лимитирующего резистора из последовательно соединенных в резисторную колонку как минимум двух одинаковых дисков позволяет расширить диапазон параметров резистора, в частности по максимальному значению прикладываемого к резистору напряжения.</p>

	<p>Формирование лимитирующего резистора из объединенных в одном корпусе параллельно соединенных как минимум двух резисторных колонок позволяет расширить диапазон параметров резистора, в частности по максимальному значению пропускаемого через резистор тока.</p>
	<p>Формирование лимитирующего резистора из объединенных в одном корпусе параллельно соединенных резисторных колонок, диски в которых выполнены из одного резистивного материала, при этом часть резисторных колонок – из дисков, содержащих материал только с линейными проводящими свойствами, другая часть – из дисков, содержащих материал только с нелинейными проводящими свойствами, позволяет расширить класс применяемых материалов и диапазон параметров резистора, в частности лимитирующего напряжения.</p>

В качестве резистивных материалов для изготовления лимитирующего резистора могут использоваться любые токопроводящие материалы, в частности композиционные и керамические [7, 8].

Результатом применения приведенных конструкций является получение у резистора линейной вольт-амперной характеристики до лимитирующего значения напряжения, как у обычного линейного резистора, а после этого – нелинейной характеристики, при которой малому увеличению напряжения соответствует значительное увеличение тока и, соответственно, резкое снижение сопротивления. На рис. 2 приведен пример вольт-амперной

характеристики (ВАХ) лимитирующего резистора, на рис. 3 – зависимость активного сопротивления от напряжения.

Представим условия работы лимистора в сети. В нормальном режиме работы сети (при напряжении на лимисторе  $u \ll U_{\text{тфнр}}$ ) сопротивление нелинейной части лимистора  $R_{\text{нл}}$  много больше сопротивления его линейной части  $R_{\text{л}}$ :

$$R_{\text{нл}} = zR_{\text{л}}, \quad z \gg 1. \tag{9}$$

Начиная с некоторого значения напряжения на лимисторе, например после его повышения сверх наибольшего рабочего

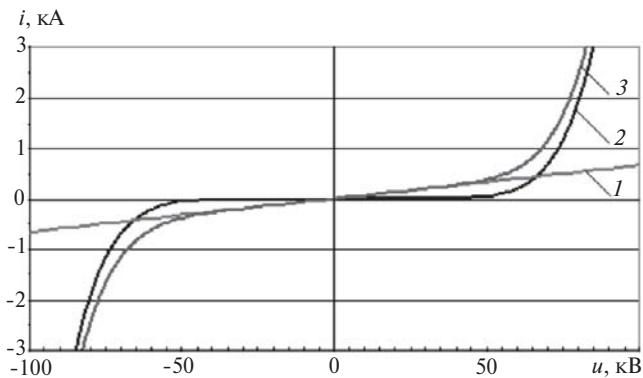


Рис. 2. Вольт-амперная характеристика лимитирующего резистора: 1 – ВАХ линейной части лимистора; 2 – ВАХ нелинейной части лимистора; 3 – ВАХ лимистора

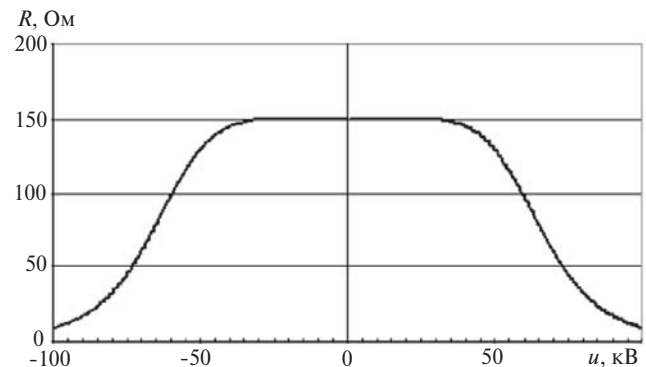


Рис. 3. Зависимость сопротивления лимистора от напряжения

$$u_{\text{lim}} = hU_{m\text{фнр}}, \quad (10)$$

в частности  $1 < h < 2$ , сопротивление нелинейной части лимистора  $R_{\text{нл}}$  сравнивается с сопротивлением линейной части  $R_{\text{л}}$ :

$$R_{\text{нл}} = R_{\text{л}}. \quad (11)$$

С учетом (6) соотношения (9) и (11) будут иметь вид:

$$R_{\text{л}} \frac{U_b}{hU_{m\text{фнр}}} \frac{1}{a} = zR_{\text{л}}; \quad (12)$$

$$R_{\text{л}} \frac{U_b}{hU_{m\text{фнр}}} \frac{1}{a} = zR_{\text{л}}. \quad (13)$$

Из (12) и (13) следует, что показатель степени вольт-амперной характеристики нелинейной части сопротивления лимистора должен удовлетворять выражению

$$a = \frac{\ln h}{\ln h + \ln z}. \quad (14)$$

Значения показателя степени вольт-амперной характеристики, вычисленные по (14), представлены в табл. 2.

Таблица 2

Значение z	Показатель степени a при h, равном						
	1,2	1,4	1,6	1,8	2,0	2,2	2,4
10	0,073	0,127	0,170	0,203	0,231	0,255	0,275
20	0,057	0,101	0,136	0,164	0,188	0,208	0,226
30	0,051	0,090	0,121	0,147	0,169	0,188	0,205
40	0,047	0,084	0,113	0,137	0,158	0,176	0,192
50	0,045	0,079	0,107	0,131	0,151	0,168	0,183
60	0,043	0,076	0,103	0,126	0,145	0,161	0,176
70	0,041	0,073	0,100	0,122	0,140	0,157	0,171
80	0,040	0,071	0,097	0,118	0,137	0,152	0,167
90	0,039	0,070	0,095	0,116	0,133	0,149	0,163
100	0,038	0,068	0,093	0,113	0,131	0,146	0,160

Из табл. 2 видно, что значение показателя степени вольт-амперной характеристики нелинейной части лимистора лишь в частном случае совпадает с показателем степени вольт-амперной характеристики ОПН.

Если задать базисное напряжение

$$U_b = hU_{m\text{фнр}}, \quad (15)$$

то определяются базисные значения сопротивления и тока:

$$R_b = R_{\text{л}}; I_b = \frac{hU_{m\text{фнр}}}{R_{\text{л}}}. \quad (16)$$

Таким образом, выражения (14)–(16) однозначно определяют вольт-амперную характеристику нелинейной части лимистора.

Поскольку для активного сопротивления справедливо выражение

$$R = r \frac{l}{S}, \quad (17)$$

где  $r$  – удельное сопротивление резистивного материала, Омж;  $l$  – длина резистора, м;  $S$  – площадь сечения резистора, м<sup>2</sup>, то из (10) и (11) следует:

$$r_{\text{нл}} (hU_{m\text{фнр}}) \frac{l}{S_{\text{нл}}} = r_{\text{л}} \frac{l}{S_{\text{л}}}, \quad (18)$$

откуда получаем условие для площадей линейной и нелинейной частей лимистора:

$$\frac{S_{\text{л}}}{S_{\text{нл}}} = \frac{r_{\text{л}}}{r_{\text{нл}} (hU_{m\text{фнр}})}, \quad (19)$$

т.е. соотношение площадей определяют удельные сопротивления применяемых резистивных материалов, при этом удельное сопротивление нелинейного резистивного материала выбирается при напряжении в соответствии с (10).

При формировании лимистора посредством параллельного соединения  $N$  ( $N^3 l$ ) линейных и  $M$  ( $M^3 l$ ) нелинейных сопротивлений, выполненных в виде колонок из дисков (с возможными отверстиями по оси, в частном случае одинаковых размеров), изготовленных из электропроводного материала только с линейными и только с нелинейными свойствами, общее сопротивление колонок с линейными свойствами

$$R_{\text{л}} = \frac{l}{\sum_{i=1}^N \frac{S_{\text{ли}i}}{r_{\text{ли}i}}}, \quad (20)$$

с нелинейными свойствами

$$R_{\text{нл}} = \frac{l}{\sum_{i=1}^M \frac{S_{\text{нли}i}}{r_{\text{нли}i}}}, \quad (20)$$

поэтому аналогом соотношению (19) будет условие:

$$\sum_{i=1}^N \frac{S_{\text{ли}i}}{r_{\text{ли}i}} = \sum_{i=1}^M \frac{S_{\text{нли}i}}{r_{\text{нли}i} (hU_{m\text{фнр}})}. \quad (21)$$

В частном случае использования одинаковых материалов для всех линейных и нелинейных со-

противлений получается соотношение, аналогичное (19):

$$\frac{\sum_{i=1}^N \dot{a} S_{ли}}{\sum_{i=1}^M \dot{a} S_{нли}} = \frac{r_{л}}{r_{нл} (hU_{мфнр})} \quad (21)$$

Если диаметры всех дисков равны, то число колонок с линейными и нелинейными свойствами должно удовлетворять условию:

$$\frac{N}{M} = \frac{r_{л}}{r_{нл} (hU_{мфнр})} \quad (22)$$

Во всех случаях свойства материала, из которого выполнены нелинейные резисторы, должны удовлетворять условиям (14)–(16).

Приведем некоторые интересные свойства лимистора.

Рассмотрим две простейшие схемы с генератором тока амплитудой  $I_m$  ( $\omega = 314,159$  рад/с). В первой схеме к генератору подключен линейный резистор сопротивлением  $R_0 = 1$  Ом, во второй – лимистор с сопротивлением линейной части  $R_{л} = 1$  Ом и сопротивлением нелинейной части с параметрами  $U_b = 1$  кВ,  $I_b = 1$  кА,  $a = 0,1$ .

На рис. 4 представлены расчетные осциллограммы токов через линейный резистор и лимистор с составляющими через его линейную и нелинейную части при  $I_m = 1$  и  $I_m = 2$  кА. Показан пропорциональный характер протекающего тока по линейному резистору и перераспределение токов по линейной и нелинейной частям лимистора в зависимости от падения напряжения на лимисторе. При малых значениях падения напряжения ток через лимистор протекает только через его линейную часть, совпадая с током, протекающим через линейный резистор (на рис. 4 – совпадение токов  $i_3$  с  $i_1$  и  $i_4$  с  $i_2$ ). При превышении падения напряжения на лимисторе значения лимитирующего напряжения начинает протекать ток в нелинейной части лимистора, при этом чем выше это превышение, тем большая составляющая тока лимистора проте-

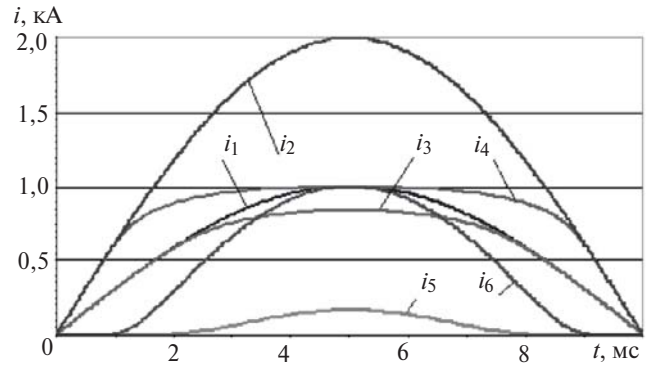


Рис. 4. Токи через линейный резистор и лимистор с его составляющими через линейную и нелинейную части:  $i_1, i_2$  – токи через линейный резистор;  $i_3, i_4$  – токи через линейную часть лимистора;  $i_5, i_6$  – токи через нелинейную часть лимистора ( $i_1, i_3, i_5$  – при  $I_m = 1$  кА;  $i_2, i_4, i_6$  – при  $I_m = 2$  кА)

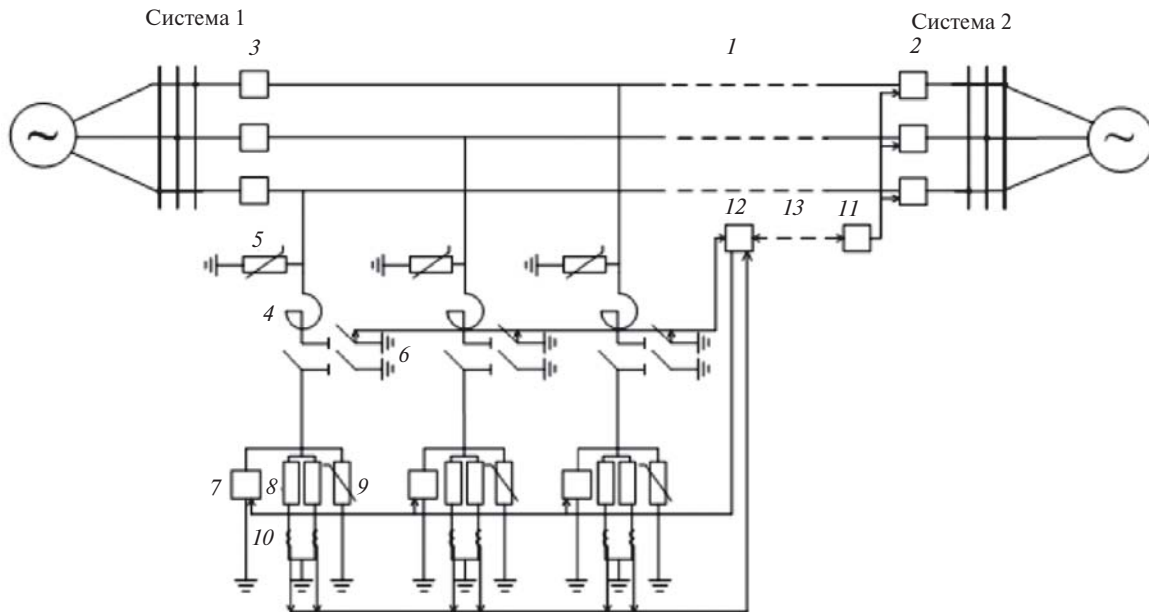
кает по его нелинейной части (на рис. 4 – ток  $i_5$  в сравнении с током  $i_6$ ).

Нелинейность лимистора существенно образом влияет на энергетические процессы. В табл. 3 представлены результаты расчета выделившейся энергии за полупериод тока в линейном резисторе и лимисторе, соответственно, при  $I_m = 0,5$  кА;  $I_m = 1,0$  кА;  $I_m = 2,0$  кА;  $I_m = 4,0$  кА.

Если выделение энергии в линейном резисторе  $R_0$  с увеличением амплитуды тока растет пропорционально квадрату ее значения ( $W_0 \sim I_m^2$ ), то для лимистора скорость роста существенно снижается (в диапазоне 0,5, 1,0 кА выполняется зависимость  $W_{лим} \sim I_m^{1,845}$ , в диапазоне 2,0, 4,0 кА –  $W_{лим} \sim I_m^{1,2}$ ). При увеличении амплитуды тока происходит относительное уменьшение выделившейся в лимисторе энергии с перераспределением ее от линейной к нелинейной части лимистора. Так, если при  $I_m = 0,5$  кА в лимисторе выделилось 99,91% (99,82% в линейной части, 0,09% – в нелинейной) энергии от выделившейся в  $R_0$ , то при  $I_m = 4$  кА в лимисторе выделилось 33,62% энергии (12,20% в линейной части, 21,42% – в нелинейной). Таким образом, нелинейные свойства лимистора приводят к принципиально новым результатам при его работе в электрической цепи.

Таблица 3

Амплитуда $I_m$ , кА	Выделившаяся энергия $W_0$ в линейном резисторе $R_0$ , кДж	Выделившаяся энергия в лимисторе, кДж		
		В линейной части $W_{л}$	В нелинейной части $W_{нл}$	Суммарная $W_{лим}$
0,5	1,25	1,2478	0,0011	1,2489
1,0	5,00	4,0354	0,4476	4,4830
2,0	20,00	7,1124	4,5952	11,7076
4,0	80,00	9,7638	17,1349	26,8987



**Рис. 5.** Схема пофазного включения резисторной установки в нейтрали ШР: 1 – ВЛ 500 кВ; 2, 3 – линейные выключатели 500 кВ; 4 – шунтирующий реактор 500 кВ; 5 – ОПН 500 кВ для защиты ШР от перенапряжений; 6 – разьединитель 35 кВ с заземляющими ножами (при заземленных ножах разьединителя блок автоматики резисторной установки дает запрет на ТАПВ); 7 – вакуумный выключатель 35 кВ; 8 – резисторная установка с двумя параллельными цепями (производство ООО «Болид», Россия); 9 – ОПН 35 кВ для защиты нейтрали ШР от перенапряжений; 10 – трансформатор тока 35 кВ; 11 – РЗА Системы 2; 12 – цифровой блок автоматики резисторной установки; 13 – линия связи между Системами 1 и 2

Представим вариант применения лимистора в схемах, решающих актуальную практическую задачу обеспечения отключающей способности элегазовых выключателей при коммутации компенсированных линий электропередачи. В качестве эффективной меры, позволяющей демпфировать апериодическую составляющую тока через выключатель и тем самым обеспечивать его безаварийную работу, применяется пофазное включение резисторных установок в цепи шунтирующих реакторов [9].

Резисторная установка включается по схеме на рис. 5.

В условиях нормальной работы ЛЭП выключатель 7, шунтирующий резисторную установку 8, находится во включенном положении. В случае возникновения КЗ на линии релейная защита подает команду на отключение ВЛ с двух сторон. Одновременно подается команда на отключение шунтирующего выключателя 7, тем самым резистор 8 вводится в работу. В случае успешного двустороннего включения линии в транзит подается импульс на включение шунтирующего выключателя 7.

Сопротивление резистора должно выбираться таким, чтобы напряжение на нейтрали шунтирующего реактора не превысило максимально допустимых значений напряжений для изоляции нейтрали ШР. Для отечественных шунтирующих реакторов 500–750 кВ класс изоляции нейтрали ШР составляет 35 кВ, для которого ГОСТ Р 1516.3–96 нормирует наибольшее рабочее напряжение 40,5 кВ и одномоментное испытательное напряжение нейтрали  $U_{и(1)}$  85 кВ.

Для установившегося режима из условия работы ШР с временно включенным (<1 мин) в нейтрали сопротивлением  $R_{рез}$  его значение сопротивления можно рассчитать по формуле (при пренебрежении активным сопротивлением ШР):

$$R_{рез} \leq \frac{X_p}{\sqrt{(U_{пр.ф} / U_{Nдоп})^2 - 1}}, \quad (23)$$

где  $U_{Nдоп} = k_{к.и} k_3 U_{и(1)}$ ;  $k_{к.и}$  – коэффициент координации изоляции;  $k_3$  – коэффициент запаса. Для электропередачи 500 кВ сопротивление резисторной установки согласно (23) составит при  $U_{Nдоп} = 57$  кВ ( $k_{к.и} = 0,9$ ;  $k_3 = 0,75$ ) и  $U_{н.р} = 525\sqrt{3}$  кВ:

$$R_{рез} \leq \frac{X_p}{\sqrt{(303,1 / 57)^2 - 1}} = 0,191 X_p,$$

при  $X_p = 917$  Ом значение  $R_{рез} \leq 176$  Ом.

Однако из-за наличия переходного тока в цепи ШР на резисторе (соответственно на ШР со стороны нейтрали) первый пик напряжения достигает значения 125 кВ (рис. 6), что недопустимо, так как  $125 > 57\sqrt{2} = 80$  кВ. Поэтому необходимо либо уменьшать сопротивление резистора (что не всегда возможно из-за ослабления действия на апериодическую составляющую тока), либо предпринимать другие меры.

Рассмотрим применение лимистора вместо линейного резистора. Параметры нелинейной части лимистора:  $U_b = 80$  кВ;  $I_b = 0,454$  кА;  $a = 0,176$ .

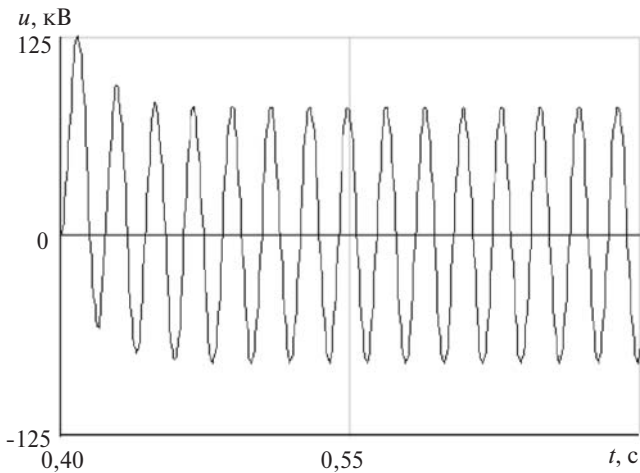


Рис. 6. Напряжение на нейтрали ШР в переходном режиме при установке линейного резистора

Напряжение на нейтрали ШР представлено на рис. 7.

Как видно из представленной на рис. 7 осциллограммы напряжения на нейтрали ШР, на первом полупериоде напряжение ограничивается приемлемым значением 76 кВ, а далее действие лимистора не отличается от действия обычного линейного резистора.

При параллельном включении лимистора и ОПН их работа разделяется. На графике изменения

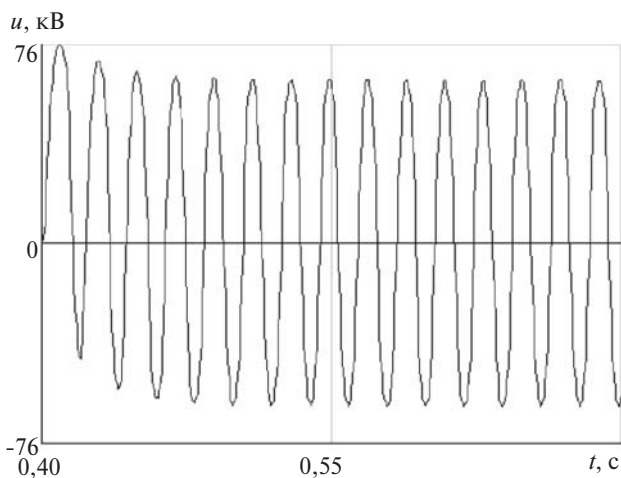


Рис. 7. Напряжение на нейтрали ШР в переходном режиме при установке лимистора

сопротивлений лимистора и ОПН для напряжения 35 кВ (рис. 8) видно, что до напряжения 50, 60 кВ сопротивление лимистора изменяется незначительно и близко к значению сопротивления его линейной части, сопротивления нелинейной части лимистора и ОПН очень велики. В диапазоне напряжения 60, 76 кВ происходит плавное уменьшение сопротивления лимистора и стремительное падение сопротивления ОПН, при 78 кВ их сопротивления выравниваются. Характер падения напряжения после 78 кВ сохраняется, однако сопротивление ОПН становится значительно меньше сопро-

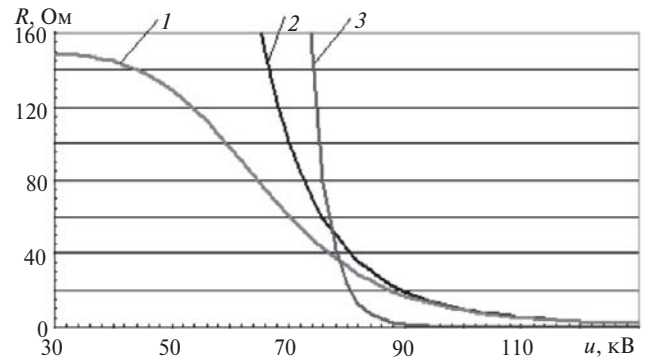


Рис. 8. Сопротивление лимистора (1), его нелинейной части (2), ОПН (3)

тивления лимистора. После 90, 100 кВ (области остающегося напряжения ОПН) значение сопротивления ОПН намного меньше сопротивления лимистора. Таким образом происходит разделение зон работы лимистора (работа в диапазоне наибольшего рабочего напряжения) и ОПН (работа в диапазоне коммутационных и грозовых перенапряжений).

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Врублевский Л.Е., Зайцев Ю.В., Тихонов А.И. Силовые резисторы. – М.: Энергоатомиздат, 1991, 256 с.
2. Hinrichsen V. Metal-Oxide Surge Arresters in High-Voltage Power Systems. Fundamentals. 3rd edition. Siemens AG, 2012: [www.siemens.com/energy/arrester](http://www.siemens.com/energy/arrester)
3. Патент № 143414 (РФ). Лимитирующий резистор/ И.Е. Наумкин. – БИ, 2014, № 20.
4. Методические указания по применению ограничителей в электрических сетях 110–750 кВ. – М.: РАО «ЕЭС России», 200, 68 с.
5. Методические указания по применению ограничителей перенапряжений нелинейных в электрических сетях 6–35 кВ. – М.: РАО «ЕЭС России», 2001, 73 с.
6. Patent US № 20030154591 (A1). Method of producing a ptc-resistor device / R. Strumpler, R. Loitzl-Jelenic, J. Glatz-Reichenbach.
7. Композиционный материал «ЭККОМ»: <http://pnpbolid.com/ru/products/ecom>
8. Ceramic Carbon Resistor: <http://www.hvrint.com>
9. Naumkin I.Ye., Pod'yachev V.N., Sarin L.I., Kochura D.V. Methods of Performance Assurance for SF6 Circuit-breakers at Switchings of Compensated 500–1150 kV Overhead Power Lines. – Intern. Conf. on Power Systems Transients (IPST2013). Vancouver (Canada), 18–20 July, 2013: <http://pnpbolid.com/subdmn/static/pdf/eng/IPST2013-92.pdf>

[24.07.14]

Автор: Наумкин Иван Егорович окончил в 1971 г. физико-технический факультет Томского государственного университета. В 1983 г. в Сибирском НИИ энергетики защитил кандидатскую диссертацию «Определение отключающей способности высоковольтных воздушных выключателей в электрических сетях на основе математического моделирования процесса дугогашения». Заместитель директора по науке ООО «Болд» (Новосибирск).



## The Limistor: A Limiting Resistor

E. NAUMKIN

*The article describes a new nonlinear resistor, a device that has the properties of a linear resistor to a certain voltage level, in particular, in the range from the maximal operating voltage to its temporarily permissible value, after which its resistance shows a drastic drop, thus limiting the voltage across the resistor. The above-mentioned instantaneous voltage at which the resistor changes its properties is called the limiting voltage, and the resistor is accordingly called a limiting resistor or limistor. Examples of using the limistor in electric power engineering are given. Of special interest is its use in a 500 kV network for solving a topical problem of ensuring the switching capacity of SF6 circuit breakers in making switching operations in compensated power lines.*

**Key words:** *nonlinear resistor, voltage limitation, electric power engineering*

### REFERENCES

1. **Vrublevskii L.E., Zaitsev Yu.V., Tikhonov A.I.** *Silovye rezistory* (Power resistors). Moscow, Publ. Energoatomizdat, 1991, 256 p.
2. **Hinrichsen V.** Metal-Oxide Surge Arresters in High-Voltage Power Systems. Fundamentals. 3rd edition. Siemens AG, 2012: [www.siemens.com/energy/arrester](http://www.siemens.com/energy/arrester)
3. **Patent RF No. 143414.** Limitizuyushchii resistor (Patent RF No. 143414. Limiting resistor)/I.E. Naumkin. Bulletin of inventions, 2014, No. 20.
4. **Metodicheskiye ukazaniya po primeneniyu ogranichitelei v elektricheskikh setyakh 110–750 kV** (Methodical Guidelines on Applying Nonlinear Voltage Limiters in 6–35 kV Networks). Moscow, Publ. JSC «Unified Energy System of Russia», 2000, 68 p.
5. **Metodicheskiye ukazaniya po primeneniyu ogranichitelei perenapryazhenii nelineinykh v elektricheskikh setyakh 6–35 kV** (Methodical Guidelines on Applying Nonlinear Voltage Limiters in 6–35 kV Networks). Moscow, Publ. JSC «Unified Energy System of Russia», 2001, 73 p.
6. **Patent US № 20030154591 (A1).** Method of producing a ptc-resistor device / R. Strumpler, R. Loitzl-Jelenic, J. Glatz-Reichenbach.
7. **Kompozitsionnyi material «EKOM»:** <http://pnpbolid.com/ru/products/ecom>
8. **Ceramic Carbon Resistor:** <http://www.hvrint.com>
9. **Naumkin I.Ye., Pod'yachev V.N., Sarin L.I., Kochura D.V.** Methods of Performance Assurance for SF6 Circuit-breakers at Switchings of Compensated 500–1150 kV Overhead Power Lines. – Intern. Conf. on Power Systems Transients (IPST2013). Vancouver (Canada), 18–20 July, 2013: <http://pnpbolid.com/subdmn/static/pdf/eng/IPST2013-92.pdf>

*Author: Naumkin Ivan Egorovich (Novosibirsk, Russia) – Cand. Sci. (Eng.), Duty Director, LLC «Bolid» (Novosibirsk).*

\* \* \*

### Уважаемые авторы!

Редакция публикует при каждой статье краткие сведения об авторах. В связи с этим просим вас при направлении статьи в редакцию сообщать (желательно и на английском языке):

- полные имена и отчества всех авторов;
- какой факультет, какого вуза и когда закончил;
- когда получил ученую степень, где и по какой тематике (теме) была защита;
- место работы и должность.

Кроме того, напоминаем, что на каждую статью следует представлять реферат (не менее 100 слов) на русском и английском языках (включая название), а также ключевые слова.