



О РАЗРАБОТКЕ МЕТОДИКИ ПРИМЕНЕНИЯ ОПН В СЕТЯХ 6–750 кВ

Д.А. Матвеев¹, А.В. Жуйков², М.В. Фролов²

¹ ООО «ФАКТС Плюс», Москва, Россия

**² Национальный исследовательский университет
«Московский энергетический институт»,
Москва, Россия**

Действующие методические указания

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ ПО ПРИМЕНЕНИЮ ОГРАНИЧИТЕЛЕЙ ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЙ НЕЛИНЕЙНЫХ В ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЯХ 6–35 кВ

Разработано: ОАО "Институт "Энергосетьпроект", ОАО ВНИИЭ, НТК "ЭЛ-ПРОЕКТ" при участии ОАО «Институт Теплоэнергопроект».

Исполнители:

Ю.И. Лысков, Н.П. Антонова, О.Ю. Демина, А.В. Зуева - ОАО "Институт Энергосетьпроект"
К.И. Кузьмичева, Н.Н.Беляков - ОАО ВНИИЭ
Подъячев В.Н. – ОАО «Институт Теплоэнергопроект»
А.Г. Тер-Газарян – НТК "ЭЛ-ПРОЕКТ"

Утверждено : Департаментом научно-технической политики и развития РАО "ЕЭС России" 27.04.01г.

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ ПО ПРИМЕНЕНИЮ ОГРАНИЧИТЕЛЕЙ В ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЯХ 110-750 кВ

РАЗРАБОТАНО: ОАО "Институт "Энергосетьпроект", ОАО ВНИИЭ, НТК "ЭЛ-ПРОЕКТ".

ИСПОЛНИТЕЛИ: Ю.И. Лысков, Н.П. Антонова, О.Ю. Демина, А.В. Зуева - ОАО "Институт Энергосетьпроект"; К.И. Кузьмичёва - ОАО ВНИИЭ. При участии: В.Н. Подъячева - АО ТЭП, А.Г. Тер-Газаряна, Ю.И. Грабовского - НТК "ЭЛ-ПРОЕКТ".

УТВЕРЖДЕНО: Департаментом стратегии развития и научно-технической политики РАО "ЕЭС России" 30.09.99 г.

СОГЛАСОВАНО: Департаментом электрических сетей РАО "ЕЭС России".

Требования к новой методике

- ✓ Соответствие новым техническим условиям для ОПН
- ✓ Выполнимость процедуры выбора проектными организациями
- ✓ Упрощенная процедура выбора ОПН для типовых схем и компоновок
- ✓ Быстрый выбор ОПН на замену с возможностью применения аппаратов с отличающимися характеристиками в разных фазах РУ

Характеристики ОПН по ГОСТ Р 52725-2021

1. **Наибольшее длительно допустимое рабочее напряжение ОПН $U_{нр}$** — наибольшее действующее значение напряжения промышленной частоты, которое может быть приложено к выводам ОПН в течение всего срока службы без повреждения и потери тепловой устойчивости ОПН.

2. **Номинальное напряжение U_n** — наибольшее действующее значение напряжения промышленной частоты, которое может быть приложено к выводам ОПН в течение 10 с без повреждения и потери тепловой устойчивости ОПН.

3. **Характеристика «напряжение–время»** — максимальные промежутки времени, в течение которых к ОПН может быть приложено соответствующее повышенное напряжение промышленной частоты, не вызывая повреждения и потери тепловой устойчивости ОПН при определенных условиях испытаний.

4. **Номинальный разрядный ток I_n** — максимальное (амплитудное) значение грозового импульса тока, используемое для классификации ОПН.

Характеристики ОПН по ГОСТ Р 52725-2021

Пропускная способность –

показатель, характеризующий способность ОПН выдерживать многократно повторяющиеся воздействия импульсов тока **при нормированной величине переносимого заряда** без повреждения и недопустимого ухудшения электрических характеристик варисторов.

Тепловая устойчивость –

состояние ОПН, при котором после воздействия тепловой энергии или теплового заряда, приложения повышенного напряжения, вызывающих нагревание ОПН, температура варисторов снижается со временем в процессе приложения к ОПН наибольшего длительно допустимого рабочего напряжения.

Характеристики ОПН по ГОСТ Р 52725-2021

5. Заряд пропускной способности $Q_{пр}$ — нормируемый изготовителем максимальный заряд, который способен пропускать ОПН при многократно повторяющихся воздействиях импульсов тока без повреждения и недопустимого ухудшения электрических характеристик варисторов.

Заряд пропускной способности нормируется как заряд, переносимый через ОПН при одном воздействии тока (одного импульса или группы импульсов тока в течение не более 2 с), которое может повторяться с интервалом времени не менее 60 с.

6. Тепловая энергия W_T — нормируемая изготовителем максимальная энергия, выраженная в кДж/кВ по отношению к U_n , которая может быть выделена в ОПН при воздействии одного или нескольких импульсов тока в течение 3 мин, не вызывая повреждения или потери тепловой устойчивости варисторов при определенных условиях испытаний.

7. Тепловой заряд Q_T — нормируемый изготовителем максимальный заряд, который может быть перенесен через ОПН при воздействии двух грозовых импульсов тока в течение 1 мин, не вызывая повреждения или потери тепловой стабильности варисторов при определенных условиях испытаний.

Обновление классификации ОПН

Старая классификация ОПН подразделяла их на пять классов разряда линии (КРЛ) или классов пропускной способности (КПС) – термины соответственно IEC 60099–4:2004 и ГОСТ Р 52725–2007 – по уровню импульса тока пропускной способности и значению удельной энергии (на кВ номинального напряжения), рассеиваемой ОПН при его приложении. Испытание на пропускную способность имитировало разряд ЛЭП через ОПН при ограничении коммутационных перенапряжений.

В обновленном международном стандарте IEC 60099–4:2014 ограничители были разделены на 2 группы (исключая отдельную группу линейных ОПН): «distribution» и «station» или, в переложении на отечественную практику, – для применения в сетях 6–35 кВ и в сетях 110–750 кВ. Первые предназначены для защиты прежде всего от грозových перенапряжений, вторые – как от грозových, так и от коммутационных. В пределах каждой группы ограничители делятся на три подгруппы: для облегченного, нормального и тяжелого режимов эксплуатации (“L”, “M”, “H” – “low”, “medium” and “high” duty).

Сопоставление классификаций ОПН

Новый отечественный стандарт ГОСТ Р 52725–2021 перенял обновленную классификацию IEC в части содержания, но для именования групп и подгрупп как и прежде использованы КПС, что вносит путаницу и способствует впечатлению о соответствии новой и старой классификаций.

Классификация по IEC 60099-4:2014	Distribution			Station		
	DL	DM	DH	SL	SM	SH
КПС по ГОСТ Р 52725-2021	–	1	2	3	4	5
КРЛ по IEC 60099-4:2004	1 2,5 кА	1 5 кА	1	2	3	4/5
Номинальный разрядный ток I_n , кА	2,5	5	10	10	10	20
Заряд пропускной способности $Q_{пр}$, Кл	≥0,1	≥0,2	≥0,4	≥1,0	≥1,6	≥2,4
Тепловая энергия W_T , кДж/кВ	–	–	–	≥4	≥7	≥10
Тепловой заряд Q_T , Кл	≥0,45	≥0,7	≥1,1	–	–	–

О выборе класса пропускной способности

Оценку заряда Q , протекающего через ОПН в сети 110 кВ и выше при разряде линии электропередачи в результате коммутации, а также выделяющейся в нем энергии W , можно выполнить по формулам:

$$Q = 2 \frac{l_{\text{ВЛ}}}{c} \frac{0,816 k_{\text{кп}} U_{\text{нрс}} - U_{\text{ост.к}}}{Z_c}; \quad W = U_{\text{ост.к}} Q,$$

где $l_{\text{ВЛ}}$, Z_c , c – длина ВЛ, волновое сопротивление и скорость распространения волны в ней;

$k_{\text{кп}}$ – кратность неограниченного коммутационного перенапряжения (обычно 3,5 о. е.);

$U_{\text{нрс}}$ – наибольшее рабочее напряжение сети;

$U_{\text{ост.к}}$ – остающееся напряжение при координационном токе для коммутационных перенапряжений

$$I_{\text{к.кп}} = 500 \text{ А}.$$

Расчеты показывают, что при прочих равных энергия W , выделяющаяся в ОПН разных типов с одним КПС, имеет очень незначительный разброс. Это позволяет на этапе проверки энергостойкости при выборе ОПН ограничиваться предъявлением требований к параметрам ограничителя (минимальному значению КПС, тепловой энергии или теплового заряда), не задаваясь конкретным типом.

О выборе класса пропускной способности

Результаты расчета энерговыделения для ОПН 110 кВ (3 КПС); $I_{ВЛ} = 50$ км; $Z_c = 430$ Ом

Производитель	Тип	$U_{нр}$, кВ	$U_{н}$, кВ	$I_{н}$, кА	$U_{ост}$, кВ	W , кДж	$U_{1с}$, кВ	$U_{10с}$, кВ	I_k , А
Hitachi-ABB	EXLIM R090-CH100	72	90	10	186	25,1	98,8	92,9	433
Таврида-Электрик	ОПН-РК-110/73-10-760 УХЛ1	73	91,3	10	188,2	25,0	97,8	93,1	438
Siemens	3EL1 096-1PK2х-...	77	96	10	188	25,0	103,2	96,0	437
Hitachi-ABB	EXLIM R096-CH100	77	96	10	198	24,8	105,0	99,1	460
Полимер-Аппарат	ОПНп-110/680/77-10-III	77	96,3	10	188	25,0	110,5	105,5	437
Таврида-Электрик	ОПН-РК-110/77-10-760 УХЛ1	77	96,3	10	198,2	24,8	103,2	98,2	461
Феникс-88	ОПН-110/73-10/650(II) 2 УХЛ1	73	96,4	10	178	25,1	105,0	99,0	414
Феникс-88	ОПН-110/77-10/650(II) 2 УХЛ1	77	102	10	187	25,1	111,0	104,0	435
Siemens	3EL1 102-1PK2х-...	82	102	10	200	24,8	109,7	102,0	465
Таврида-Электрик	ОПН-РК-110/83-10-760 УХЛ1	83	103,8	10	217,4	24,0	111,2	105,8	506
Полимер-Аппарат	ОПНп-110/680/84-10-III	84	105	10	205	24,6	120,5	115,1	477
Феникс-88	ОПН-110/80-10/650(II) 2 УХЛ1	80	106	10	195	24,9	115,0	108,0	453
Siemens	3EL1 108-1PK2х-...	86	108	10	212	24,3	116,1	108,0	493
Hitachi-ABB	EXLIM R108-CH145	86	108	10	223	23,7	118,0	111,0	519
Феникс-88	ОПН-110/83-10/650(II) 2 УХЛ1	83	110	10	202	24,7	120,0	113,0	470
Полимер-Аппарат	ОПНп-110/680/88-10-III	88	110	10	215	24,1	126,3	120,6	500
Таврида-Электрик	ОПН-РК-110/88-10-760 УХЛ1	88	110	10	222,3	23,7	117,9	112,2	517
Феникс-88	ОПН-110/88-10/650(II) 2 УХЛ1	88	116	10	214	24,2	127,0	119,0	498

О выборе класса пропускной способности

Результаты расчета энергоснабжения для ОПН 110 кВ (4 КПС); $I_{\text{ВЛ}} = 50$ км; $Z_c = 430$ Ом

Производитель	Тип	$U_{\text{нр}}, \text{кВ}$	$U_{\text{н}}, \text{кВ}$	$I_{\text{н}}, \text{кА}$	$U_{\text{ост}}, \text{кВ}$	$W, \text{кДж}$	$U_{1с}, \text{кВ}$	$U_{10с}, \text{кВ}$	$I_{\text{к}}, \text{А}$
Hitachi-ABB	EXLIM Q090-EN100	72	90	10	174	25,1	98,5	92,7	405
Феникс-88	ОПН-110/73-10/900(III) 2 УХЛ1	73	94	10	179	25,1	105,0	99,0	416
Siemens	3EL2 096-2PJ3х-...	77	96	10	180	25,1	103,2	96,0	419
Hitachi-ABB	EXLIM Q096-EN100	77	96	10	185	25,1	104,0	98,9	430
Siemens	3EL1 096-1PN3х-...	77	96	10	188	25,0	103,2	96,0	437
Полимер-Аппарат	ОПНп-110/1000/77-10-IV	77	96	10	189	25,0	110,5	105,5	440
Феникс-88	ОПН-110/77-10/900(III) 2 УХЛ1	77	99	10	189	25,0	111,0	104,0	440
Siemens	3EL2 102-2PJ3х-...	82	102	10	192	25,0	109,7	102,0	447
Siemens	3EL1 102-1PN3х-...	82	102	10	200	24,8	109,7	102,0	465
Феникс-88	ОПН-110/80-10/900(III) 2 УХЛ1	80	103	10	197	24,9	115,0	108,0	458
Полимер-Аппарат	ОПНп-110/1000/84-10-IV	84	105	10	207	24,5	120,5	115,1	481
Феникс-88	ОПН-110/83-10/900(III) 2 УХЛ1	83	107	10	204	24,6	120,0	113,0	474
Siemens	3EL2 108-2PJ3х-...	86	108	10	203	24,7	116,1	108,0	472
Hitachi-ABB	EXLIM Q108-EN145	86	108	10	208	24,5	117,0	110,0	484
Siemens	3EL1 108-1PN3х-...	86	108	10	212	24,3	116,1	108,0	493
Полимер-Аппарат	ОПНп-110/1000/88-10-IV	88	110	10	217	24,0	126,3	120,6	505
Феникс-88	ОПН-110/88-10/900(III) 2 УХЛ1	88	113	10	216	24,1	127,0	119,0	502

О выборе класса пропускной способности

Результаты расчета энергоснабжения для ОПН 220 кВ (3 КПС); $l_{\text{ВЛ}} = 150$ км; $Z_c = 370$ Ом

Производитель	Тип	$U_{\text{нр}}, \text{кВ}$	$U_{\text{н}}, \text{кВ}$	$I_{\text{н}}, \text{кА}$	$U_{\text{ост}}, \text{кВ}$	$W, \text{кДж}$	$U_{1с}, \text{кВ}$	$U_{10с}, \text{кВ}$	$I_{\text{к}}, \text{А}$
Siemens	3EL1 192-1PK2х-...	154	192	10	392	347	206	192	1059
Феникс-88	ОПН-220/146-10/650(II) 2 УХЛ1	146	193	10	368	350	210	198	995
Полимер-Аппарат	ОПНп-220/680/154-10-IV	154	193	10	396	346	221	211	1070
Siemens	3EL1 198-1PK2х-...	158	198	10	404	345	213	198	1092
Полимер-Аппарат	ОПНп-220/680/163-10-IV	163	204	10	419	341	234	223	1132
Феникс-88	ОПН-220/156-10/650(II) 2 УХЛ1	156	206	10	393	347	225	212	1062
Полимер-Аппарат	ОПНп-220/680/176-10-IV	176	220	10	453	327	253	241	1224
Феникс-88	ОПН-220/176-10/650(II) 2 УХЛ1	176	232	10	444	331	253	239	1200

О выборе класса пропускной способности

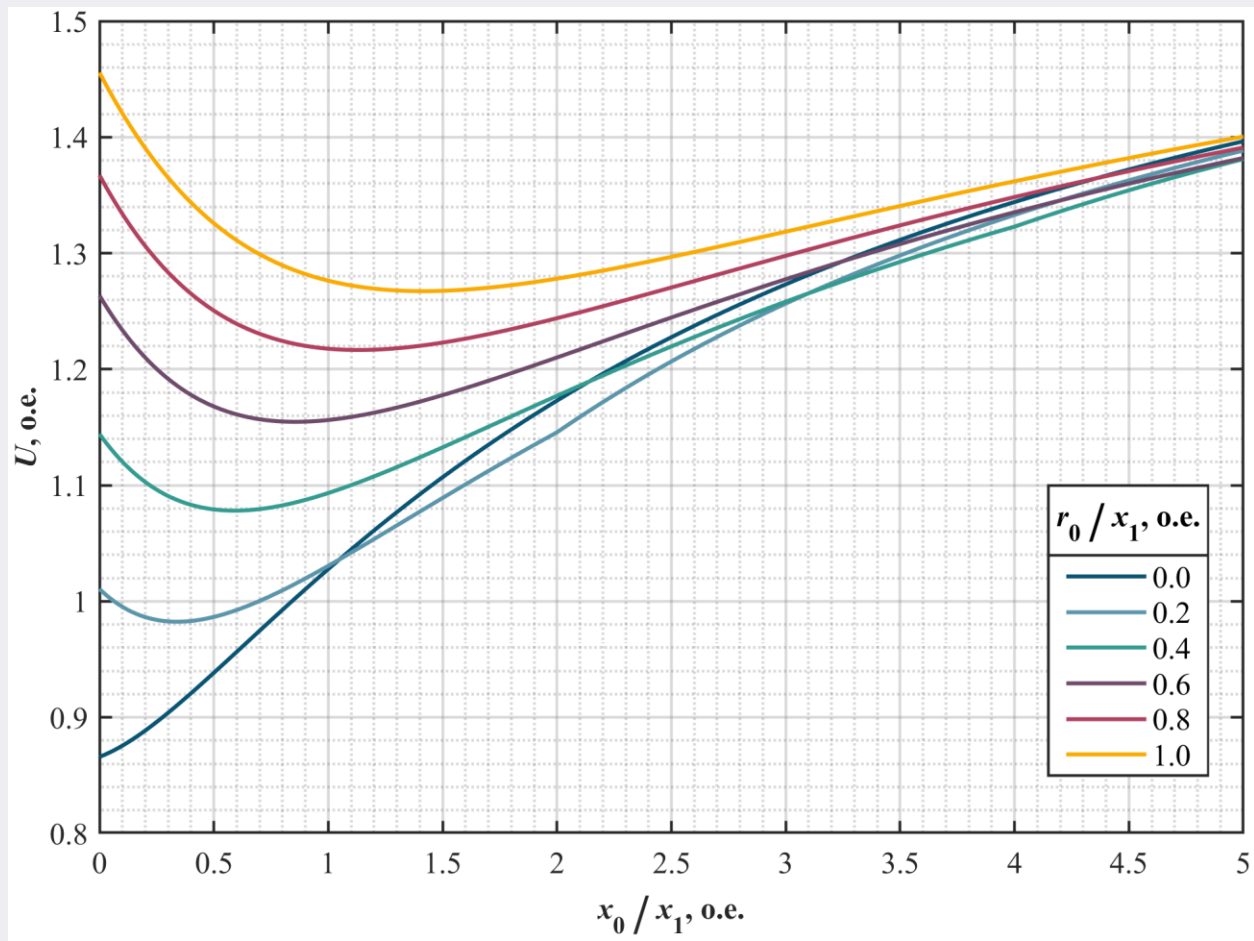
Результаты расчета энергоснабжения для ОПН 220 кВ (4 КПС); $I_{ВЛ} = 150$ км; $Z_c = 370$ Ом

Производитель	Тип	$U_{нр}$, кВ	U_n , кВ	I_n , кА	$U_{ост}$, кВ	W , кДж	$U_{1с}$, кВ	$U_{10с}$, кВ	I_k , А
Hitachi-ABB	EXLIM Q180-DH245	144	180	10	356	350	196	185	962
Siemens	3EL2 192-2PQ3х-...	154	192	10	370	350	206	192	1000
Hitachi-ABB	EXLIM Q192-DH245	154	192	10	380	349	209	197	1027
Полимер-Аппарат	ОПНп-220/1000/154-10-IV	154	193	10	395	347	221	211	1068
Siemens	3EL2 198-2PQ3х-...	158	198	10	382	349	213	198	1032
Hitachi-ABB	EXLIM Q198-DH245	156	198	10	392	347	216	203	1059
Феникс-88	ОПН-220/156-10/900(III) 2 УХЛ1	156	200	10	397	346	225	212	1073
Полимер-Аппарат	ОПНп-220/1000/163-10-IV	163	204	10	418	341	234	223	1130
Hitachi-ABB	EXLIM Q210-DH245	156	210	10	416	341	229	216	1124
Hitachi-ABB	EXLIM Q216-DH300	173	216	10	427	338	236	222	1154
Hitachi-ABB	EXLIM Q219-DH245	156	219	10	433	336	239	225	1170
Полимер-Аппарат	ОПНп-220/1000/176-10-IV	176	220	10	452	327	253	241	1222
Hitachi-ABB	EXLIM Q222-EH245	156	222	10	439	333	242	228	1186
Феникс-88	ОПН-220/176-10/900(III) 2 УХЛ1	176	226	10	447	329	253	239	1208

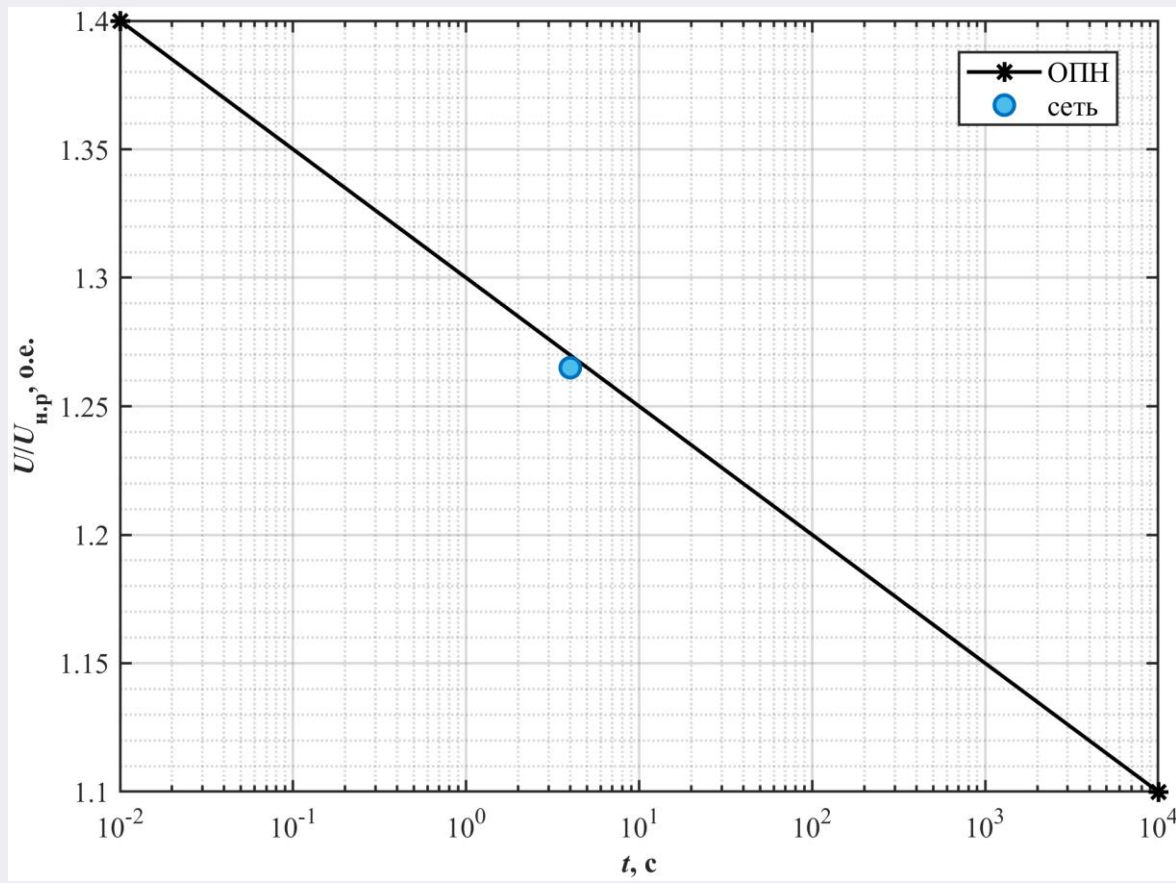
Последовательность выбора ОПН

- Требования к $U_{нр}$
- Требования к U_n и характеристике «допустимое напряжение–время»
- Требования к пропускной способности и тепловой устойчивости
- Требования к защитному уровню при коммутационных перенапряжениях
- Проверка защитного уровня при грозовых перенапряжениях

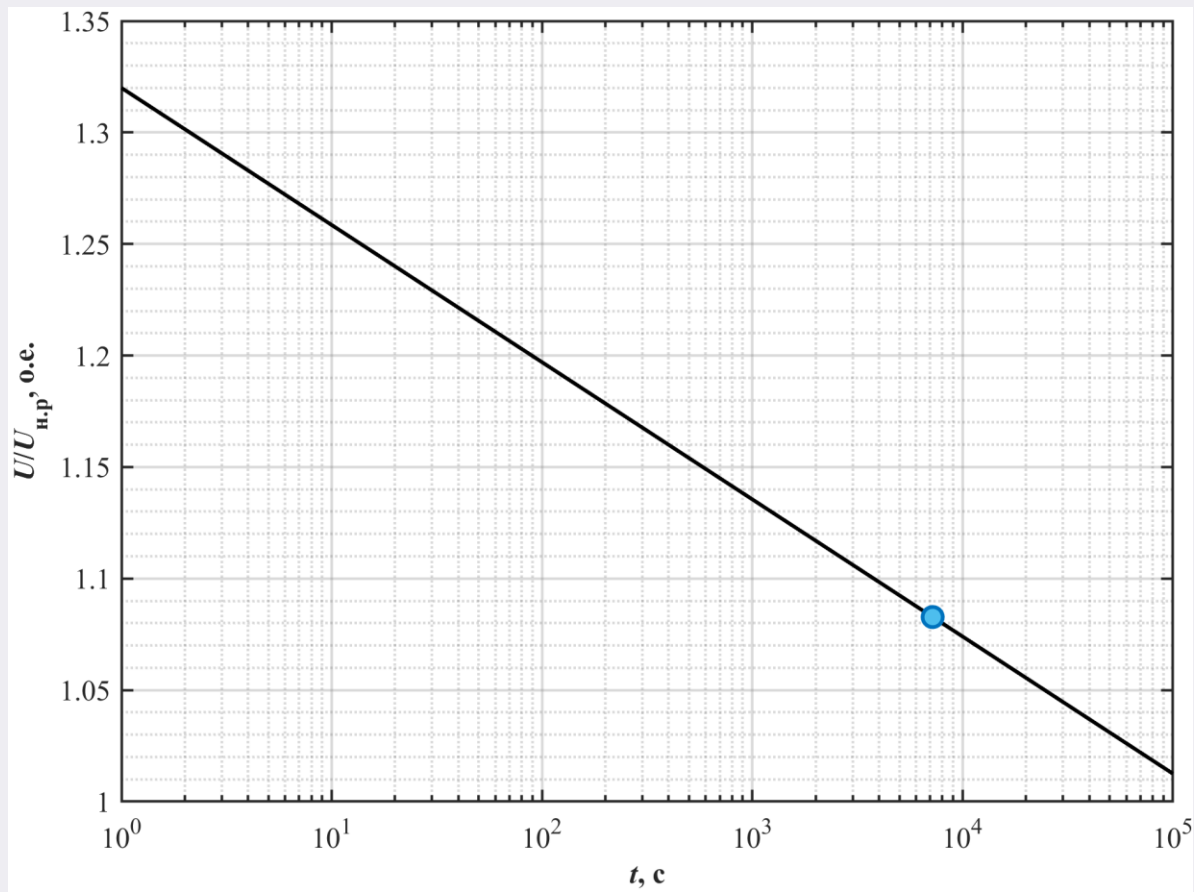
Повышения напряжения при однофазном КЗ



Однофазное КЗ на характеристике «допустимое напряжение–время»



ОЗЗ на характеристике «допустимое напряжение–время» (изолированная нейтраль)



Допустимые коммутационные перенапряжения

В.1.1 Для оборудования классов напряжения 6–220 кВ допустимый уровень коммутационных перенапряжений определяется по формуле:

$$U_{\text{доп.кп}} = \sqrt{2} U_{\text{исп.50}} k_{\text{имп}} k_{\text{к}}, \quad (\text{В.1})$$

где

$U_{\text{исп.50}}$ – испытательное кратковременное переменное напряжение по ГОСТ Р 55195;

$k_{\text{имп}}$ – коэффициент импульса, учитывающий для импульса коммутационного перенапряжения увеличение электрической прочности изоляции по сравнению с испытательным воздействием;

$k_{\text{к}}$ – коэффициент кумулятивности, учитывающий снижение электрической прочности изоляции в эксплуатации при ее старении в условиях кумулятивного воздействия перенапряжений.

Для маслонаполненного оборудования $k_{\text{имп}} = 1,35$ и $k_{\text{к}} = 0,8$.

Для остального оборудования, в том числе с твердой изоляцией, $k_{\text{имп}} = 1,0$ и $k_{\text{к}} = 0,9$.

В.1.2 Для оборудования классов напряжения 330 кВ и выше допустимый уровень коммутационных перенапряжений определяется по формуле:

$$U_{\text{доп.кп}} = 0,85 U_{\text{исп.к}}, \quad (\text{В.2})$$

где $U_{\text{исп.к}}$ – испытательное напряжение коммутационных импульсов по ГОСТ Р 55195.

Типовые решения выбора ОПН

Выбор параметров ограничителей традиционно основывается на совместной расчетной оценке их защитных уровней и энергетических воздействий на них. Однако на сегодняшний день накоплен значительный опыт применения ОПН, позволяющий в большинстве случаев **исключить необходимость выполнения расчетных оценок**. В стандарте для типовых схем планируется **применение упрощенной процедуры выбора ОПН**, основанной на применении заранее рассчитанных справочных зависимостей.

К типовым решениям по применению ОПН относятся случаи защиты электрооборудования 35 кВ и выше с уровнем изоляции «а» по [1] в типовых схемах распределительных устройств (РУ) по [2] при условиях, что подходящие к РУ участки ВЛ снабжены тросовой защитой, а значения сопротивления заземления опор в их пределах не превышают 20 Ом.

[1] ГОСТ Р 55195–2012 Электрооборудование и электроустановки переменного тока на напряжения от 1 до 750 кВ. Требования к электрической прочности изоляции

[2] ГОСТ Р 59279–2012 Схемы принципиальные электрические распределительных устройств от 35 до 750 кВ подстанций. Типовые решения. Рекомендации по применению

Последовательность выбора для типовых решений

1 Выбирается КПС ограничителя, минимальные значения приведены в таблице

Класс напряжения, кВ	35	110	150	220	330	500
Минимальный КПС	3	4	4	4	5	5

2 Выбирается место установки ОПН, определяется наибольшее расстояние до защищаемого оборудования по ошиновке, включая длину отводов.

3 Устанавливаются требования к наибольшему длительно допустимому рабочему напряжению $U_{нр}$. Минимальные допустимые значения $U_{нр}$ приведены в таблице

Класс напряжения, кВ	35	110	150	220	330	500
min допустимое значение $U_{нр}$, кВ	44	83	110	168	220	318

4 Максимальное допустимое значение $U_{нр}$ выбирается по расчетным кривым зависимости допустимого расстояния между ОПН и защищаемым оборудованием от числа грозových часов в году $N_{г.ч}$ для различных значений $U_{нр}$, числа подходящих к РУ линий электропередачи, их типа, компоновок РУ.

Оценка защитных свойств при грозовых воздействиях

Для типовых случаев применения ОПН были выполнены расчеты кривых зависимостей допустимого расстояния между ОПН и защищаемым электрооборудованием от числа грозовых часов в году. Кривые обобщают результаты статистического расчета надежности защиты изоляции электрооборудования с моделированием набегания волн грозового происхождения на типовые РУ 35 кВ и выше в специализированной программе расчета режимов электрических цепей EMTLab.

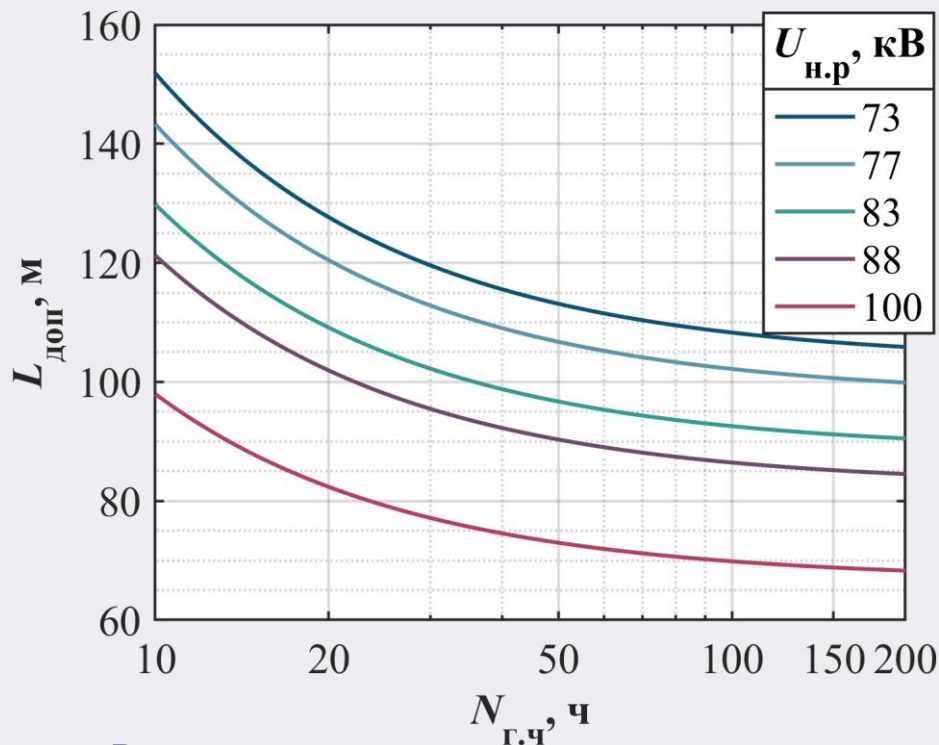
Целевые значения надежности защиты изоляции электрооборудования от набегающих грозовых волн приняты в соответствии с рекомендациями [3], в таблице приведены соответствующие значения числа лет безаварийной работы.

Класс напряжения, кВ	35	110	150	220	330	500	750
Число лет безаварийной работы, годы	300	400	500	600	800	1000	1200

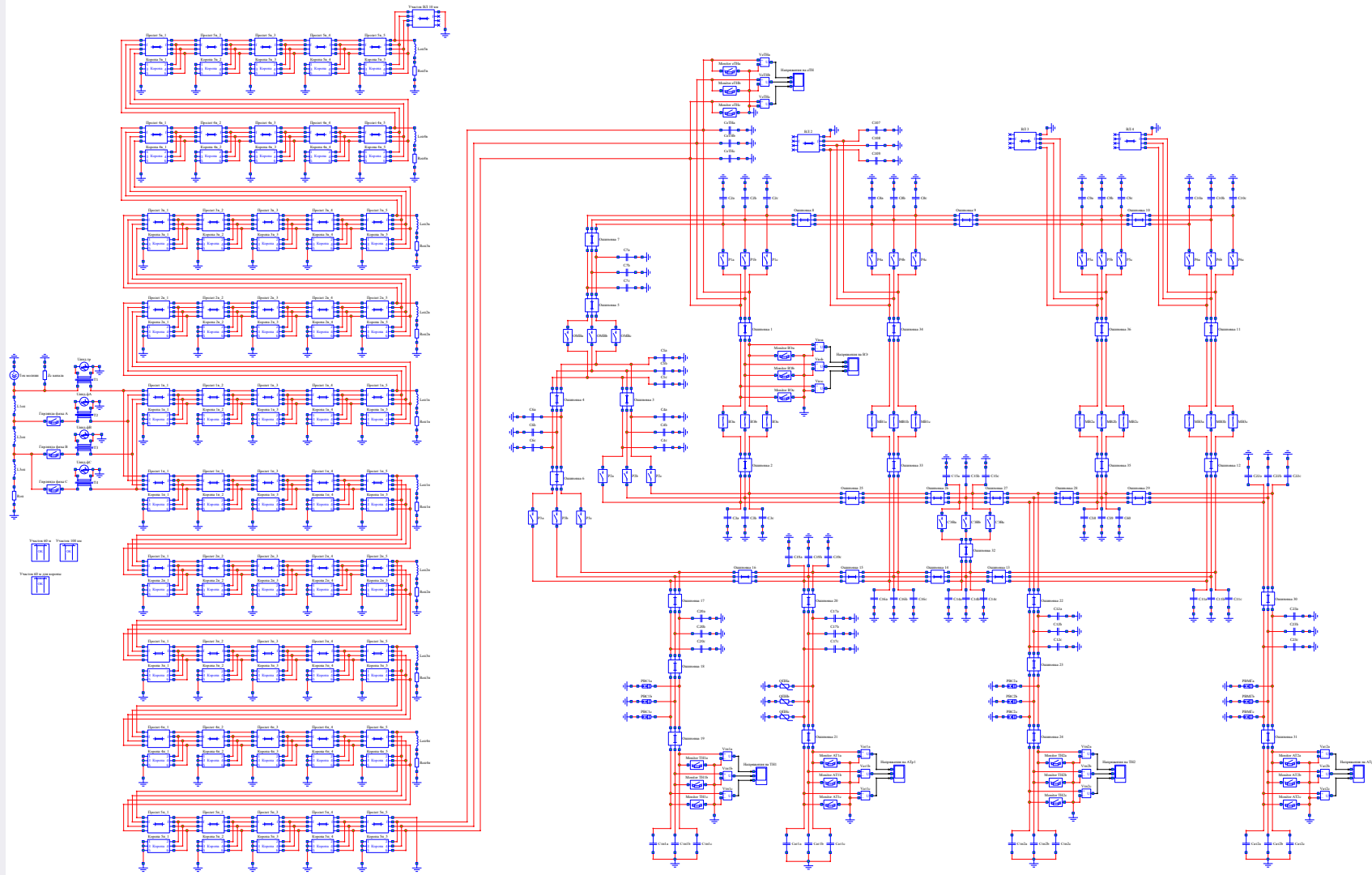
[3] РД 153-34.3-35.125-99 Руководство по защите электрических сетей 6–1150 кВ от грозовых и внутренних перенапряжений

Оценка защитных свойств при грозовых воздействиях

Для выбора значения $U_{н.р}$ необходимо отметить на графике точку, соответствующую максимальному расстоянию между ОПН и оборудованием и среднегодовому числу грозовых часов в районе расположения объекта $N_{г.ч}$. Значения $U_{н.р}$, соответствующие кривым, проходящим выше этой точки, являются допустимыми. Допускается выбирать ОПН с промежуточным значением $U_{н.р}$, применяя линейную интерполяцию расчетных кривых.



Расчетные зависимости допустимого расстояния до ОПН $L_{доп}$ от среднегодового числа грозовых часов $N_{г.ч}$ для РУ 110 кВ с шестью подходящими ВЛ



Спасибо за внимание!

dmatveev@tvn-moscow.ru