

3. Результаты выполненных исследований свидетельствуют о принципиальной возможности и реальной практической эффективности использования в микропроцессорных защитах электроустановок гибких формирователей ортогональных составляющих входных величин.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. S a s h d e v, M. S. A new algorithm for digital impedance relays / M. S. Sashdev, M. A. Baribeau // IEEE Trans. on PAS. – 1979. – Vol. 98, № 6.
2. Р о м а н ю к, Ф. А. Информационное обеспечение микропроцессорных защит электроустановок: учеб. пособие / Ф. А. Романюк. – Минск: Технопринт, 2001. – 133 с.
3. Ш н е е р с о н, Э. М. Цифровая релейная защита / Э. М. Шнеерсон. – М: Энергоатомиздат, 2007. – 547 с.

Представлена кафедрой  
электрических станций

Поступила 06.11.2012

УДК 621.316

### **ОЦЕНКА ЦЕЛЕСООБРАЗНОСТИ СООРУЖЕНИЯ ПОДСТАНЦИЙ НАПРЯЖЕНИЕМ 330 кВ С ТРЕМЯ СИЛОВЫМИ ТРАНСФОРМАТОРАМИ**

**Докт. техн. наук, проф. КОРОТКЕВИЧ М. А.,  
канд. техн. наук СТАРЖИНСКИЙ А. Л.**

*Белорусский национальный технический университет*

При выборе схем распределительных устройств подстанции учитываются число присоединений (количество присоединений линий и трансформаторов), требования надежности электроснабжения потребителей и обеспечения транзита мощности через подстанцию в нормальных, ремонтных и послеаварийных режимах. В Белорусской энергосистеме большое количество подстанций напряжением 330/110/10 кВ имеют три автотрансформатора, один из которых обычно находится в отключенном состоянии (в резерве). Трехтрансформаторные подстанции позволяют снизить не только суммарную, но и, что более существенно, единичную мощность трансформаторов. Это дает возможность проще решать проблемы строительства, эксплуатации и ограничения токов короткого замыкания на шинах вторичного напряжения [1, с. 79].

Оценка эффективности сооружения трехтрансформаторных подстанций напряжением 330/110/10 кВ вместо двухтрансформаторных подстанций аналогичной мощности должна проводиться на основе сравнения капитальных вложений, потерь мощности и электроэнергии в элементах подстанции, а также исходя из достижения максимума надежности подстанции. Капитальные затраты на строительство подстанции без учета стоимости компенсирующих устройств могут быть определены по формуле [2, с. 531]

$$K_{\text{пс}} = \sum_{i=1}^I K_{ti} n_{ti} + \sum_{j=1}^J K_{\text{я}чj} n_{\text{я}чj} + K_{\text{п}}, \quad (1)$$

где  $K_{ti}$ ,  $K_{\text{я}чj}$  – стоимость однотипных трансформаторов (автотрансформаторов) и ячеек распределительных устройств соответственно;  $n_{ti}$ ,  $n_{\text{я}чj}$  – соответственно число однотипных элементов из общего числа  $I$ ,  $J$ .

В стоимость подстанции входит также постоянная составляющая капитальных затрат  $K_{\text{п}}$ , включающая стоимости здания, щита управления, релейной защиты и автоматики, оборудования собственных нужд подстанции, водо- и теплоснабжения, ограждения, дорог, освещения территории и др.

Произведем сравнение капитальных вложений в подстанцию напряжением 330/110/10 кВ в трех- и двухтрансформаторном исполнении при различных схемах распределительных устройств (РУ) 330 кВ [3, с. 354] (табл. 1). При сравнении принималось, что на подстанции установлены элегазовые выключатели напряжением 330 и 110 кВ. Стоимость ячеек выключателей напряжением 10 кВ, одинаковая в сравниваемых вариантах, не учитывалась.

Таблица 1

**Капитальные вложения в подстанцию напряжением 330/110/10 кВ**

Тип электрической схемы РУ	Количество трансформаторов, шт., и их номинальная мощность, МВ·А	Капитальные затраты на строительство подстанции $K_{\text{пс}}$ , приведенные к 2007 г., млн рос. руб.
Трансформаторы – шины с присоединением линий через два выключателя	2×200	488,32
Трансформаторы – шины с присоединением линий через два выключателя	3×125	533,16
Трансформаторы – шины с присоединением линий через два выключателя, третий трансформатор подключен через два выключателя	3×125	545,35
Полуторная схема	2×200	540,17
Полуторная схема, один из трансформаторов подключен через два выключателя	3×125	597,16

Произведем также расчет потерь мощности и электроэнергии для двух и трех работающих автотрансформаторов (время использования наибольшей нагрузки подстанции  $T_{\text{нб}}$  принято 3000 ч) при различной нагрузке подстанции (табл. 2).

Таблица 2

**Потери мощности и электроэнергии в трансформаторах**

Количество трансформаторов, шт., и их номинальная мощность, МВ·А	Нагрузка подстанции, МВ·А	Нагрузочные потери, МВт	Потери холостого хода, МВт	Потери мощности $\Delta P_{\text{сум}}$ , МВт	Потери электроэнергии, МВт·ч
2×200	120	0,1080	0,360	0,4680	3323,68
	240	0,4320		0,7920	3833,92
3×125	120	0,1136	0,345	0,4586	3200,90
	240	0,4546		0,7996	3737,92

Как видно из табл. 1, 2, стоимости подстанций напряжением 330/110/10 кВ в двух- и трехтрансформаторном исполнении различаются слабо, суммарные потери электроэнергии также находятся примерно на одном уровне (для трехтрансформаторной подстанции потери холостого хода меньше, а нагрузочные потери больше, чем для двухтрансформаторной подстанции).

Определим целесообразность сооружения трехтрансформаторной подстанции, исходя из условия надежности электроснабжения потребителей. Факторы, влияющие на выбор предпочтительной схемы электрических соединений, в ряде случаев трудно формализуемы. В наибольшей степени это проявляется при сопоставлении надежности различных схем, если последняя рассматривается как экономическая категория [4, с. 18].

Задача оценки показателей надежности сводится к расчету конкретных значений вероятностей безотказной работы схемы по информации об усредненных значениях параметра потока отказов для единицы оборудования и среднему времени его восстановления в течение определенного периода. Далее по вероятности безотказной работы (вероятности отказа) того или иного элемента сети (трансформатора, генератора, линии, присоединения) определяются аналогичные показатели для схемы в целом [5, с. 131].

Методы расчета, которые применяются для оценки надежности технических объектов, весьма разнообразны. Все они базируются на теории вероятностей, при этом отказы в работе объекта рассматриваются как случайные события, которые во времени образуют случайный процесс. Каждый метод имеет свои достоинства и недостатки при его использовании для решения конкретных задач. Для оценки надежности схем распределительных устройств электроподстанций в литературе по надежности систем электроснабжения рекомендуется использовать таблично-логический метод расчета [6, с. 255].

Дадим оценку показателей надежности схем электрических соединений подстанций с двумя и тремя трансформаторами таблично-логическим методом с помощью программы TOPAS. Пакет прикладных программ TOPAS, разработанный в Санкт-Петербургском государственном техническом университете на кафедре «Электрические станции» (руководитель разработки – докт. техн. наук, проф. Ю. Б. Гук), позволяет проводить анализ надежности главных схем электрических соединений, включающих в себя распределительные устройства любого класса напряжения, генераторные присоединения, высоковольтные линии электропередачи и т. д.

Вычисление логических показателей надежности главной схемы осуществляется на основе определения количества комбинаций событий (конъюнкций)  $C(k)$ , приводящих к отказу ее функционирования  $k$ -го вида [7, с. 59; 8, с. 129]. В соответствии с намеченными расчетными множествами аварийных состояний схемы рассматриваются конкретные пути их возможной реализации в  $j$ -м режиме работы (нормальном, плановом или аварийном ремонте) при повреждениях ее  $i$ -го оборудования с последующей нормальной локализацией аварии и при отказах в срабатывании  $s$ -х устройств релейной защиты, автоматики и коммутационных аппаратов, а также при переходе к его аварийному восстановлению после проведения оперативных переключений персоналом. Количество комбинаций запишется в виде

$$C(k) = \sum_i \sum_j \sum_s L(i, j, s, k), \quad (2)$$

где  $L(i, j, s, k)$  – логическая функция, принимающая значение 0 или 1.

Вычисление частот отказов функционирования  $k$ -го вида  $\lambda(k)$  и длительностей аварийного восстановления  $T(k)$  в общем случае осуществляется по выражениям [7, с. 59]:

$$\lambda(k) = \sum_j \sum_i q(j)\lambda(i)Q\left(\frac{s}{i}\right)L(k); \quad (3)$$

$$T(k) = \frac{1}{\lambda(k)} \sum_j \sum_i q(j)\lambda(i) \min\left\{\frac{t(j)}{2}; t(i); t_{\text{оп}}\right\} Q\left(\frac{s}{i}\right)L(k), \quad (4)$$

где  $q(j)$  – относительная длительность  $j$ -го ремонтного режима, о. е.;  $\lambda(i)$  – частота повреждения  $i$ -го элемента схемы, 1/год;  $t(i)$  – длительность послеаварийного восстановления  $i$ -го элемента схемы, ч;  $t(j)$  – длительность  $j$ -го ремонтного режима работы схемы;  $t_{\text{оп}}$  – время оперативных переключений, ч;  $Q(s/i)$  – вероятность отказа в срабатывании релейной защиты или коммутационного аппарата.

Коэффициент неготовности потребителей  $K_n$  вычисляется по выражению [7, с. 73]

$$K_n = \frac{T(k)\lambda}{8760}. \quad (5)$$

В табл. 3 приведены данные по надежности элементов схем распределительных устройств напряжением 330 кВ [5, с. 136; 9, с. 269–270].

Таблица 3

Показатели надежности элементов

Элемент РУ	Частота отказа $\lambda$ , 1/год	Время послеаварийного восстановления $T_v$ , ч	Частота планового ремонта $\lambda_{\text{рем}}$ , 1/год	Длительность планового ремонта $T_{\text{рем}}$ , ч
Трансформатор 330 кВ	0,0200	200,0	0,170	350
Элегазовый выключатель напряжением 330 кВ	0,0150	36,8	0,080	200
Элегазовый выключатель напряжением 110 кВ	0,0100	30,7	0,080	100
Сборные шины 330 кВ (на одно присоединение)	0,0130	5,0	0,166	3
Сборные шины 110 кВ (на одно присоединение)	0,0160	5,0	0,166	4
Линия электропередачи на 1 км	0,0025	13,6	0,350	20

Оценим надежность схем электрических соединений одной подстанции Белорусской энергосистемы напряжением 330/110/10 кВ при различном количестве автотрансформаторов и различных схемах электрических соединений распределительного устройства напряжением 330 кВ, представленных на рис. 1, 2.

аб в

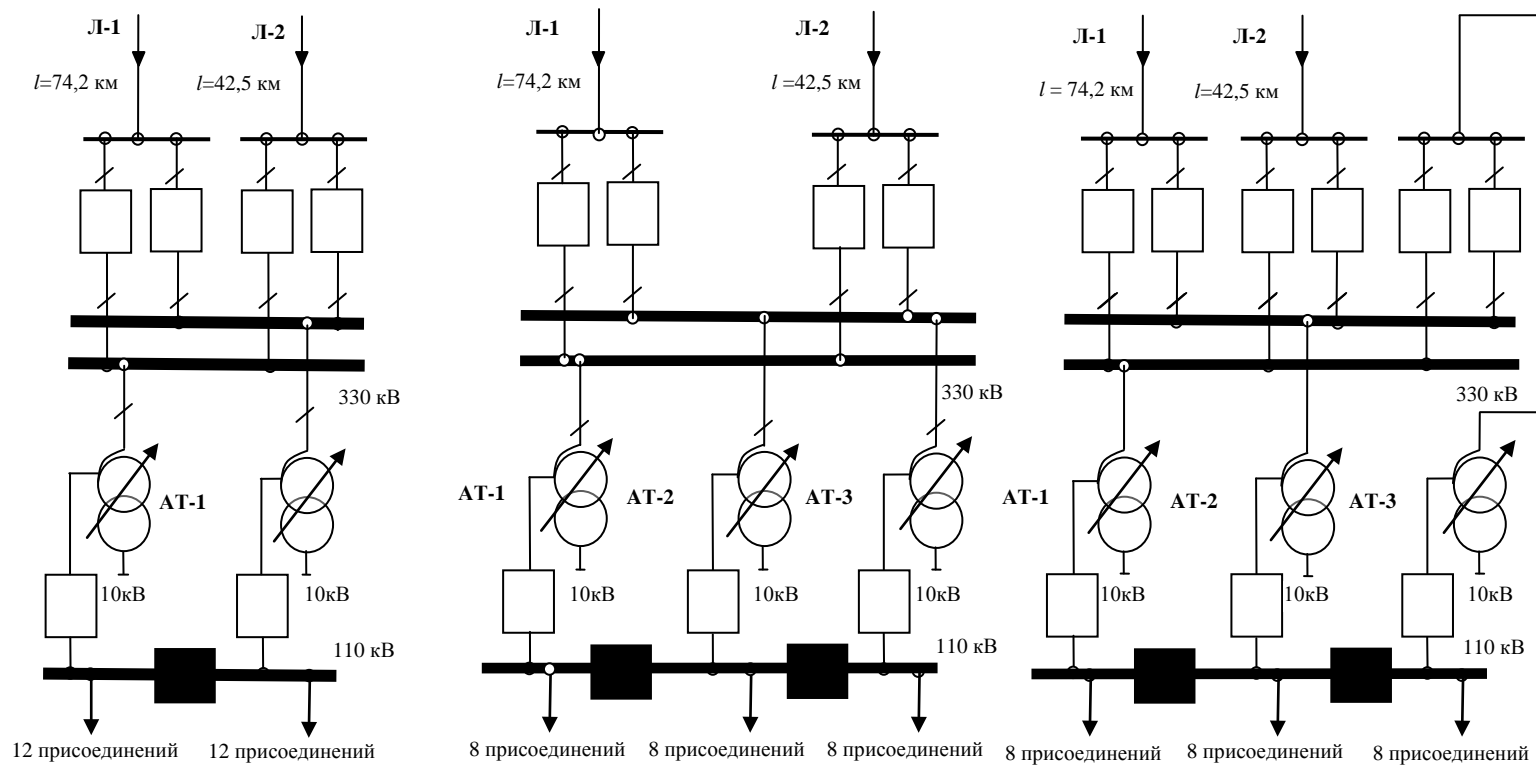


Рис. 1. Схема подстанции напряжением 330/110/10 кВ с присоединением линий напряжением 330 кВ по полусторонней схеме:  
а – при 12 присоединениях на одну секцию напряжением 110 кВ и двух автотрансформаторах на подстанции;  
б – при 8 присоединениях на одну секцию напряжением 110 кВ и трех автотрансформаторах на подстанции

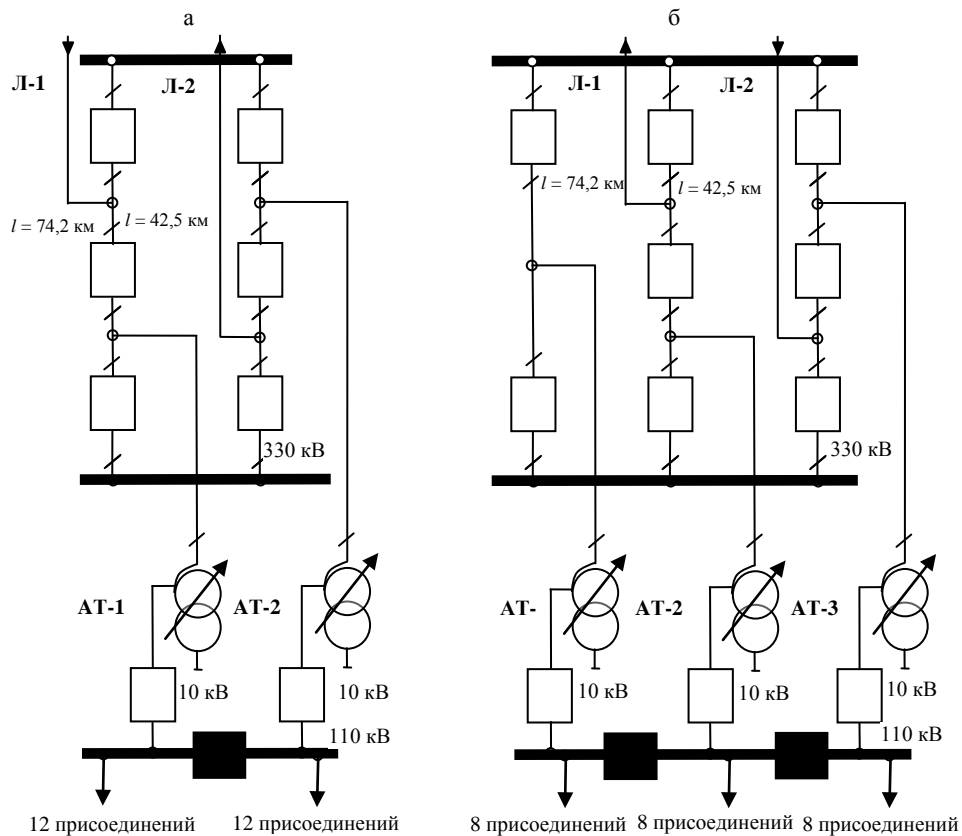


Рис. 2. Схема подстанции напряжением 330/110/10 кВ с присоединением линий напряжением 330 кВ по полуторной схеме: а – при 12 присоединениях на одну секцию напряжением 110 кВ и двух автотрансформаторах на подстанции; б – при 8 присоединениях на одну секцию напряжением 110 кВ и трех автотрансформаторах на подстанции

Вероятность отказа выключателя при отключении короткого замыкания была принята 0,002. Время оперативных переключений в расчетах принято 0,5 ч. Результаты вычислений представлены в табл. 4

Таблица 4

**Показатели надежности типовых электрических схем распределительного устройства напряжением 330 кВ при изменении количества трансформаторов на подстанции**

Тип электрической схемы РУ	Количество трансформаторов, шт.	$\lambda_{\Sigma}$ , 1/год	$T_{в\Sigma}$ , ч	$K_n$ , о. е.
Трансформаторы – шины с присоединением линий через два выключателя	2	0,0115	0,50	$656,4 \cdot 10^{-9}$
Трансформаторы – шины с присоединением линий через два выключателя	3	$0,6320 \cdot 10^{-3}$	0,54	$38,96 \cdot 10^{-9}$
Трансформаторы – шины с присоединением линий через два выключателя, третий трансформатор подключен через два выключателя	3	$0,6440 \cdot 10^{-3}$	0,51	$37,5 \cdot 10^{-9}$
Полуторная схема	2	0,0111	0,50	$633,56 \cdot 10^{-9}$
Полуторная схема, один из трансформаторов подключен через два выключателя	3	$0,9970 \cdot 10^{-4}$	0,50	$5,69 \cdot 10^{-9}$

## ВЫВОДЫ

Как видно из табл. 4, полное погашение схемы исследуемой подстанции с тремя установленными трансформаторами (рис. 1б) (отключение двух линий и всех трансформаторов) приводит к снижению коэффициента неготовности в 18,2 раза по сравнению со схемой с двумя трансформаторами (рис. 1а). При подключении третьего трансформатора через два выключателя (рис. 1в) коэффициент неготовности практически не изменяется.

При использовании полуторной схемы распределительного устройства 330 кВ при двух трансформаторах на подстанции (рис. 2а) коэффициент неготовности снижается незначительно (в 1,04 раза) по сравнению со схемой «трансформаторы – шины с присоединением линий через два выключателя» (рис. 1а). При подключении одного из трансформаторов через два выключателя, при полуторной схеме распределительного устройства 330 кВ (рис. 2б), коэффициент неготовности снижается в 6,6 раза по отношению к схеме распределительного устройства 330 кВ «трансформаторы – шины с присоединением линий через два выключателя» при трех трансформаторах (рис. 1в).

Для повышения надежности системообразующих сетей напряжением 330 кВ использование третьего трансформатора на подстанции является целесообразным, так как приводит к снижению коэффициента неготовности схемы подстанции более чем в 18,2 раза.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Малкин, П. А. Применение трехтрансформаторных подстанций 110 кВ для обеспечения надежного электроснабжения потребителей / П. А. Малкин // Методические вопросы исследования надежности больших систем энергетики. – Иркутск: ИСЭМ СО РАН, 2011. – Вып. 61. – С. 79–82.
2. Герасименко, А. А. Передача и распределение электрической энергии / А. А. Герасименко, В. Т. Федин. – 2-е изд. – Ростов н/Д: Феникс, 2008. – 715 с.
3. Справочник по проектированию электрических сетей / под ред. Д. Л. Файбисовича. – 3-е изд. перераб. и доп. – М.: Энас, 2009. – 392 с.
4. Балаков, Ю. Н. Проектирование схем электроустановок / Ю. Н. Балаков, М. Ш. Мисриханов, А. В. Шунтов. – М.: Издательский дом МЭИ, 2006. – 288 с.
5. Папков, Б. В. Методика оценки надежности схем электрических соединений энергообъектов / Б. В. Папков, С. П. Крайнов // Методические вопросы исследования надежности больших систем энергетики. – Иркутск: ИСЭМ СО РАН, 2009. – Вып. 59. – С. 131–140.
6. Скопинцев, В. А. Качество электроэнергетических систем: надежность, безопасность, экономичность, живучесть / В. А. Скопинцев. – М.: Энергоатомиздат, 2009. – 332 с.
7. Черновец, А. К. Элементы САПР электрической части АЭС на персональных компьютерах / А. К. Черновец. – СПб.: Санкт-Петербург. гос. техн. ун-т, 1992. – 89 с.
8. Гук, Ю. Б. Теория надежности в электроэнергетике / Ю. Б. Гук. – Л.: Энергоатомиздат, Ленингр. отд-ние, 1990. – 208 с.
9. Электротехнический справочник: в 4 т. / под общ. ред. В. Г. Герасимова [и др.] (гл. ред. А. И. Попов). – 9-е изд., стер. – М.: Изд-во МЭИ, 2004. – Т. 3: Производство, передача и распределение электрической энергии. – 964 с.

Представлена кафедрой  
электрических систем

Поступила 10.10.2012