

Сохроков А. М.

Sokhrokov A. M.

ВЛИЯНИЕ ОТКАЗОВ УСТРОЙСТВ ЗАЩИТЫ НА НАДЕЖНОСТЬ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННОЙ РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНОЙ СЕТИ

IMPACT OF PROTECTION DEVICE FAILURES ON THE RELIABILITY OF THE AGRICULTURAL DISTRIBUTION NETWORK

В условиях проектирования подстанций низкий уровень информационного обеспечения затрудняет получение достоверных результатов при расчете надежности схем электрических соединений. Доверительные границы для показателей надежности подстанций можно получить лишь на основе статистического моделирования или в процессе эксплуатации. Первый путь сопряжен с рядом трудностей, к числу которых следует отнести недопустимо большое время, необходимое для моделирования процессов. При проектировании часто рассматриваются такие схемы электрических соединений подстанций, которые в массовой эксплуатации еще не были. Поэтому показатели их надежности можно определить только путем соответствующих расчетов.

Исследовалась зависимость показателей надежности подстанций 35/10 кВ от показателей надежности защитного оборудования.

Здесь рассматривается схема подстанции 110–35–10 кВ районной сети, которая отличается числом линий, количеством и типом оборудования. Зависимость надежности этой подстанции от надежности основного оборудования исследовалась с помощью полиномов регрессии. Коэффициенты этих полиномов получены при варьировании значений показателей надежности – по аналогии с опытами факторного эксперимента.

Аналитическое исследование заключалось в расчете основных параметров надежности подстанций, при исходных показателях надежности защищающего оборудования, выбранных на возможных верхних и нижних уровнях и в сочетаниях, определяемых планом многофакторного эффективного эксперимента.

Ключевые слова: надежность, распределительные сети, релейная защита,

массив записей, отключение, авария, режим сети, ремонт линий, электропередача.

In the conditions of substation design, the low level of information support makes it difficult to obtain reliable results when calculating the reliability of electrical connection schemes. Confidence limits for substation reliability indicators can be obtained only on the basis of statistical modeling or during operation. The first way is fraught with a number of difficulties, including the unacceptably long time required for modeling processes. When designing, such schemes of electrical connections of substations are often considered, which have not yet been in mass operation. Therefore, their reliability indicators can only be determined by appropriate calculations.

The dependence of the reliability indicators of 35/10 kV substations on the reliability indicators of protective equipment was studied.

Here we consider the scheme of 110-35-10 kV substations of the district network, which differs in the number of lines, the number and type of equipment. The dependence of the reliability of this substation on the reliability of the main equipment was studied using regression polynomials. The coefficients of these polynomials are obtained by varying the values of the reliability indicators-by analogy with the experiments of the factor experiment.

The analytical study consisted in calculating the main parameters of substation reliability, with the initial indicators of the reliability of protective equipment selected at the possible upper and lower levels and in combinations determined by the plan of a multi-factor effective experiment.

Key words: reliability, distribution networks, relay protection, array of records, disconnection,

Сохроков Артур Мухамедович – кандидат технических наук, доцент кафедры энергообеспечения предприятий, ФГБОУ ВО Кабардино-Балкарский ГАУ, г. Нальчик
Тел.: 8 903 494 71 05
E-mail: ya.kantik-2013@yandex.ru

Sokhrokov Arthur Mukhamedovich – candidate of technical sciences, associate professor of the Department of energy enterprises, FSBEI HE Kabardino-Balkarian SAU, Nalchik
Tel.: 8 903 494 71 05
E-mail: ya.kantik-2013@yandex.ru

Введение. В распределительных сетях 10 и 35кВ надежность электроснабжения каждого потребителя зависит не только от надежности того участка сети, который непосредственно подключен к потребителю, но и от режима работы смежных участков и шин соседних подстанций, используемых в качестве резервного источника питания. При повреждении на смежном участке объем погашений возрастает в случае отказа устройств релейной защиты и может охватить и рассматриваемый нами участок, который будет отключен, несмотря на работоспособное состояние.

При планировании ремонта линий, трансформаторов и шин в сложной сети предусматривают возможность питания через резервные цепи, если они есть. Принимают меры, позволяющие во время ремонта одной из параллельных линий держать ее в состоянии аварийной готовности, с тем, чтобы в случае аварийного отключения работающей линии можно было не позже, чем через два-три часа включить ремонтируемую линию, не заканчивая ремонтные работы.

Для уменьшения объема погашений при повреждениях секций сборных шин на подстанциях питающие линии подключают к разным секциям. Линии, отходящие к одному и тому же потребителю, не присоединяют к одной секции или системе шин. На подстанциях с упрощенными схемами устанавливают секционирующие аппараты: выключатели или отделители.

Результаты исследования. Показателями надежности электроснабжения в распределительной сети являются частота $\Lambda(k_l)$, а также средняя и относительная длительность отключений потребителей – $\tau(k_l)$ и $q(k_l)$ [1, 2]. Код k определяется перечнем отключенных потребителей.

Индекс l означает характер отключения: плановое («пл»), аварийное длительное на время аварийного ремонта («в.р»), аварийное длительное на время включения по аварийной готовности («а.г»), аварийное кратковременное на время оперативных переключений («о.п»), аварийное кратковременное на время ликвидации последствий отказов устройств РЗ и А («о.с.»).

Для определения показателей $\Lambda(k_l)$, $\tau(k_l)$, $q(k_l)$ с помощью ЭВМ был разработан формализованный алгоритм на основе теории распознавания образов и формул таблично-логического метода.

Все расчетные элементы сети, за исключением выключателей, получают номера от 01 до 99, начиная с секции. Нумерация выключателей производится независимо от других элементов также двузначным числом от 01 до 99. Пример нумерации приведен на рис. 1, где изображена тестовая схема.

Для всех элементов схемы, согласно [3, 4] записываются расчетные значения показателей надежности: λ_i – частота отказов, год⁻¹; τ_i – среднее время восстановления, год; λ_{nli} – частота плановых ремонтов, год⁻¹; τ_{nli} – средняя длительность плановых ремонтов, год; $\tau_{o.ni}$ – средняя длительность оперативных переключений при восстановлении электроснабжения (если это возможно в случае повреждения i -го элемента); $\tau_{a.zi}$ – среднее время включения по аварийной готовности (если она предусмотрена) при производстве планового ремонта i -го элемента.

Записываются расчетные значения условных вероятностей отказа в срабатывании устройств релейной защиты

при отказе элемента i – линии, трансформатора, секции шин, выключателя (табл. 1).

Определяются схемы коммутации режимов для выполнения профилактических и аварийно-восстановительных работ на всех элементах и вычисляется относительная длительность этих работ q_j . Для всех расчетных режимов указываются номера

отключенных выключателей, причем номера выключателей, выведенных в ремонт, помечаются верхней чертой. Сокращенная запись (код) называется «образом режима» и имеет вид $B_j = j, \beta_j$, в котором β_j представляет собой последовательность номеров отключенных выключателей, записанных в порядке возрастания [5, 6].

Таблица 1 – Показатели надежности устройств релейной защиты в распределительной сети (рис. 1)

Тип устройства	Условная вероятность отказа срабатывания	Защищаемые элементы сети
ДФЗ-2	0,002	1-3
ДЗШ	0,030	25-32, 60
ДЗТ	0,020	10-17, 21-24
МТЗ	0,001	7-9, 18-20, 40-43, 90, 93, 94

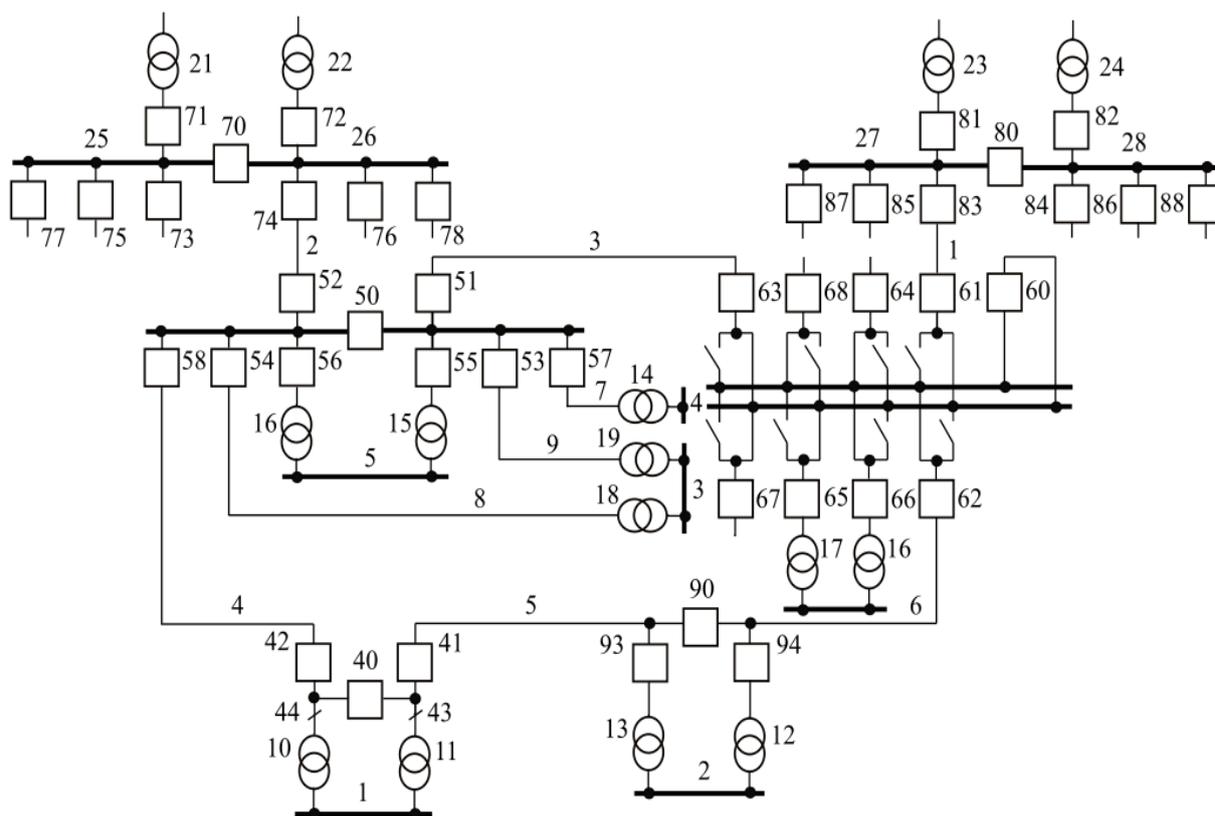


Рисунок 1 – Схемы распределительной сети 110 кВ

Для отказов расчетных элементов сети записывается образ отключений в виде, например, кода $A_i = i, \alpha_i$, в котором α_i представляет собой последовательность номеров отключаемых выключателей, записанных в порядке возрастания. В случае отказа выключателя его номер записывается

в образе вместе с отключаемыми от защиты (табл. 2).

Наложения отказов на режимы могут быть представлены образами наложений в виде кода N_{ij} , который составляется из образов A_i и B_j в котором номера

выключателей записываются в порядке возрастания:

$$A_i \cup \dots \cup v_{ij},$$

$$v_{ij} = \alpha_i \vee \beta_j$$

Здесь \cup – знак объединения образов; \vee – знак дизъюнкции.

Множество наложений $\{N_{ij}\}$ формируется последовательным перебором

всех возможных сочетаний отказов и режимов [6].

Для отказов расчетных элементов, сопровождаемых отказами устройств релейной защиты, образ отключений записывается в виде кода $A_{o.ci} = i_{o.c}, \alpha_{o.ci}$, где $\alpha_{o.ci}$ – последовательность номеров выключателей, отключаемых при отказе защиты поврежденного элемента действием резервной защиты смежных элементов.

Таблица 2 – Показатели надежности и образы отключений расчетных элементов

Элемент	$\lambda_i, \text{год}^{-1}$	$\tau_{в.р}, \text{год}$	i	α_i
Линия 35кВ	1,00	0,001	1	61, 83
			2	52, 74
			3	51, 63
			4	42, 58
			5	41, 90, 93
Трансформатор 35/10 кВ	0,01	0,030	10	40, 42
			11	40, 41
			12	94
			13	93
			14	56
Трансформатор 10/0,4кВ	0,02	0,060	21	71
			22	72
			23	81
			24	82
Секция шин 10кВ	0,01	0,0005	25	70, 71, 73, 75, 77
			26	70, 72, 74, 76, 78
			27	80, 81, 83, 85, 87
			28	80, 82, 84, 86, 88
			29	50, 51, 53, 55, 57
			30	50, 52, 54, 56, 58
			31	60, 61, 63, 65, 67
Выключатель линейный 10кВ	0,04	0,010	32	60, 62, 64, 66, 68
			61	60, 61, 63, 65, 67
			67	60, 61, 63, 65, 67
			62	60, 62, 64, 66, 68
			68	60, 62, 64, 66, 68
			73	70, 71, 73, 75, 77
			77	70, 71, 73, 75, 77
			74	70, 72, 74, 76, 78
Выключатель трансформатора 10 кВ	0,01	0,010	78	70, 72, 74, 76, 78
			83	80, 81, 83, 85, 87
			85	80, 81, 83, 85, 87
			40	40, 41, 42
			93	41, 90, 93
			94	62, 90, 94
			55	50, 51, 53, 55, 57
Выключатель межсекционный 10 кВ	0,01	0,010	56	50, 52, 54, 56, 58
			65	60, 61, 63, 65, 67
			66	60, 62, 64, 66, 68
			72	70, 72, 74, 76, 78
			50	50, 51, 52, 53, 54, 55, 56, 57, 58
60	60, 61, 62, 63, 64, 65, 66, 67, 68			
70	70, 71, 72, 73, 74, 75, 76, 77, 78			
80				

				80, 81, 82, 83, 84, 85, 86, 87, 88
--	--	--	--	---------------------------------------

Примечание: $\tau_{a.e} = 0,0003$ год; $\tau_{o.n} = 0,00005$ год

Наложение отказов элементов и отказов защиты на расчетные режимы записываются в виде:

$$A_{o.ci} \cup \dots \cup A_{o.cij}$$

Множество $\{N_{o.cij}\}$ формируется последовательным перебором всех возможных сочетаний [7].

Для распознавания расчетных аварий различного класса (k) в массивах образов наложений $\{N_{ij}\}$ и $\{N_{o.cij}\}$ необходимо составить массив образов аварий. В связи с этим рассматриваются возможные сочетания отключенных выключателей, приводящие к погашению определенного потребителя (секции) или группы потребителей. Существует множество кодов $\{H_k\}$, отражающих упорядоченные последовательности номеров выключателей, отключение которых ведет к погашению вида k . Для выявления элементов этого множества намечаются точки разрезания сети – от вводных выключателей данной

секции или подстанции до выключателей источников питания.

Составив массив $\{H_k\}$ в порядке возрастания номеров выключателей, получаем массив (словарь) образов аварий $\langle\{H_k\}\rangle$, с помощью которого распознавание класса аварии в образе наложения записывается в виде:

$$\{A_i \cup \dots \cup A_j\} \cap \{N_{o.cij}\} \cap \{N_{ij}\} \cap \{H_k\} \quad (\wedge j = k_j),$$

$$i \in S_i \quad j \in S_j \quad k \in S_k$$

где:

\cap – знак пересечения множеств;

\wedge – знак конъюнкции.

Таким образом, распознавание класса аварии является логической операцией. Эта операция аналогична переводу массива слов $\{N_{ij}\}$ с помощью словаря. Алфавитная запись v_{ij} позволяет быстро и без ошибок найти адекватный по составу номеров выключателей η_k код из множества $\langle\{H_k\}\rangle$ [8].

Таблица 3 – Формирование множества образцов наложения и распознавание классов аварий в сети

Наложение	$i \wedge j$	$v_{ij} = \alpha_i \vee \beta_j$	$\{\eta_k\}$	k
Повреждение ВЛ на ремонтные режимы	1Λ2	52, 61, 74, 83	52, 61; 52; 83; 61, 74; 74, 83	78
	2Λ1	52, 61, 74, 83	52, 61; 52, 83; 61, 74; 74, 83	78
	4Λ2	41, 42, 58	41, 42	1
	4Λ6	42, 58, 62	42, 62; 58, 62	12
	5Λ4	41, 42, 58, 90, 93	41, 42; 42, 90; 58, 90	1
	5Λ6	41, 62, 80, 93	41, 62; 62, 90, 93	2
	6Λ4	42, 58, 62, 90, 94	42, 62; 58, 62; 58, 90, 94	12
	6Λ6	41, 62, 90, 94	41, 62; 41, 90, 94	2
	8Λ9	53, 54	53, 54	3
	9Λ8	53, 54	53, 54	3
	4Λ27	42, 58, 90	42, 90; 53, 90	1
	6Λ13	62, 90, 93, 93, 94	62, 90, 93; 93, 94	2
	5Λ12	41, 90, 94, 93, 94	41, 90, 94, 93, 94	2
	7Λ7	57	57	4
6Λ22	40, 62, 90, 94	40, 62	2	
Повреждение ВЛ и отказ ее защиты на ремонтные режимы	1Λ4	42, 58, 60, 61, 63, 65, 67, 80, 81, 83, 85, 87	42, 61; 63; 58, 63, 83	61
	1Λ5	41, 60, 61, 63, 65, 67, 80,	41, 63, 63; 41, 63, 83	26

	1Л6	81, 83, 85, 87 61, 62, 63, 65, 67, 80, 81, 83, 85, 87	61, 62, 63	6
--	-----	---	------------	---

В результате последовательного сравнения всех образов N_{ij} с образами словаря $\langle\{H_k\}\rangle$ определяются классы аварий. Если в состав кода v_{ij} входят номера выключателей из какого-либо кода η_k образа H_k , то наложение N_{ij} классифицируется как авария k . Образующийся при сравнении N_{ij} с $\langle\{H_k\}\rangle$ массив кодов $\{k\}_{ij}$ следует упорядочить. Каждая авария должна быть представлена одним кодом, для чего одинаковые коды k , кроме одного, вычеркиваются из массива $\{k\}_{ij}$. Вычеркиваются также коды погашений отдельных потребителей, если в массиве $\{k\}_{ij}$ есть коды групповых погашений, которые включают в себя упомянутые погашения отдельных потребителей.

Распознавание длительности погашений (l) осуществляется на стадии формирования образов N_{ij} . Пример формирования множества образов и распознавания класса аварий приведен в таблице 3, словарь $\langle\{H_k\}\rangle$ – в таблице 4.

Полученные выражения: $\alpha_j \vee \beta_j = v_{ijl}$ сравниваются со всеми строками табл. 4. Каждое сравнение дает запись $(i \wedge j)l = k_l$.

Сортировка массива записей $\{(i \wedge j)l = k_l\}$ по k и по l дает таблицу расчетных связей, которая позволяет вычислить показатели надежности по формулам таблично-логического метода.

В таблице 5 приведены результаты расчета частоты погашений подстанций в сети 35кВ.

Таблица 4 – Массив образов аварий в сети

η_k	k	Номера отключаемых подстанций	η_k	k	Номера отключаемых подстанций
40, 41, 42	1	1	51, 53, 74	50	3, 4, 5
40, 42, 43	1	1	51, 61, 90, 93	26	2, 6
40, 44, 90	1	1	51, 62, 74	52	1, 2, 3, 4, 5
40, 51, 52	50	3, 4, 5	52, 61	78	1, 2, 3, 4, 5, 6
40, 62	2	2	52, 62, 63	52	1, 2, 3, 4, 5
41, 42	1	1	52, 83	78	1, 2, 3, 4, 5, 6
41, 51, 52	51	1, 3, 4, 5	53, 54	3	3
41, 51, 61	26	2, 6	53, 54, 57	34	3, 4
41, 51, 74	51	1, 3, 4, 5	55, 56	5	5
41, 51, 83	26	2, 6	55, 56, 57	45	4, 5
41, 52, 63	51	1, 3, 4, 5	57	4	4
41, 61, 63	26	2, 6	57, 65, 66	46	4, 6
41, 62	2	2	58, 62	12	1, 2
41, 63, 83	26	2, 6	58, 63, 83	61	1, 2, 6
41, 90, 94	2	2	58, 90	1	1
42, 51, 52	50	3, 4, 5	53, 90, 94	12	1, 2
42, 61, 63	61	1, 2, 6	61, 62, 63	6	6
42, 62	12	1, 2	61, 62, 73, 93, 94	26	2, 6
42, 90	1	1	61, 74	78	1, 2, 3, 4, 5, 6
42, 90, 94	12	12	62, 90, 93	2	2
51, 52, 53	50	3, 4, 5	63, 83, 90, 93	26	2, 6

51, 52, 58, 62	52	1, 2, 3, 4, 5	65, 66	6	6
51, 52, 90	51	1, 3, 4, 5	74, 83	78	1, 2, 3, 4, 5, 6
51, 52, 90, 94	52	1, 2, 3, 4, 5	93, 94	2	2

Таблица 5 – Частота погашений подстанций в сети 35кВ

Подстанция	Отключение на время				
	аварийно-восстановительного ремонта	включения ремонтируемой линии по аварийной готовности	оперативных переключений	поиска неисправности и переключений после отказа срабатывания	переключений при групповых погашениях
1	0,006	0,025	0,010	0,002	0,063
2	0,014	0,025	0,040	0,004	0,064
3	-	0,027	0,001	0,00003	0,053
4	1,076	-	0,087	0,003	0,055
5	0,0003	-	0,0003	0,00003	0,0419
6	0,0004	-	0,0135	0,014	0,0378

Примечание: 1. Подстанция 5, кроме того, отключается на время плановых ремонтов линии. 2. Частота одновременных погашений шести подстанций (на время оперативных переключений) – 0,04.

Область применения. Проектирование линий и подстанций распределительных электрических сетей, и исследование их надежности.

Выводы. Анализируя результаты исследований, можно отметить понижение надежности в случае применения двух систем шин на стороне 35кВ и схемы

мостика с выключателями в цепи трансформатора, причем в первом случае – из-за возможности развития аварии вследствие отказов релейной защиты. В остальных случаях влияние отказов устройств защиты на частоту отключений незначительно.

Литература

1. Анищенко В.А., Колосова И.В. Основы надежности систем электроснабжения: учебное пособие. – Минск: БНТУ, 2007. – 151 с.
2. Волков Н.Г. Надежность функционирования систем электроснабжения: учебное пособие. – Томск: Изд-во ТПУ, 2005. – 157 с.
3. Гук Ю.Б. Анализ надежности электроэнергетических установок. – Л.: Энергоатомиздат. Ленингр. отд-ние, 1988. – 224 с.
4. Двоскин Л.И. Схемы и конструкции распределительных устройств. – М.: Энергоатомиздат, 1985. – 286 с.
5. Сохроков А.М. Влияние атмосферных факторов на работу воздушных линий напряжением 10 кВ // Известия Кабардино-Балкарского ГАУ. – 2016. – № 4. – С. 81-86.
6. Koepfinger J.H. Reliability of electrical substation protection systems. // IEEE Trans. 1979. Vol. PAS-98.No 1. P. 299 – 307.
7. Сохроков А.М., Тхазеплов А.Ж. Эффективность использования СИП при эксплуатации распределительных сетей // Энергосбережение и энергоэффективность:

проблемы и решения. – Нальчик, 2020. – С. 278-281.

8. Лебедев М.М., Нейшатадт И.С., Ташевский В.В. О топологических методах анализа надежности распределительных устройств. //Известия АН СССР. Энергетика и транспорт, 1971. – №3. С. 39-44.

References

1. Anishchenko V.A., Kolosova I.V. Osnovy nadezhnosti sistem elektrosnabzheniya: uchebnoe posobie. – Minsk: BNTU, 2007. – 151 s.
2. Volkov N.G. Nadezhnost' funkcionirovaniya sistem elektrosnabzheniya: uchebnoe posobie. – Tomsk: Izd-vo TPU, 2005. – 157 s.
3. Guk Y.B. Analiz nadezhnosti elektroenergeticheskikh ustanovok. – L.: Energoatomizdat. Leningr. otd-nie, 1988. – 224 s.
4. Dvoskin L.I. Skhemy i konstrukcii raspreditel'nyh ustrojstv. – M.: Energoatomizdat, 1985. – 286 s.
5. Sohrokov A.M. Vliyanie atmosferynykh faktorov na rabotu vozdushnykh linij napryazheniem 10 kV // Izvestiya Kabardino-Balkarskogo GAU. – 2016. – № 4. – S. 81-86.

6. *Koepfinger J.H.* Reliability of electrical substation protection systems. // IEEE Trans. 1979. Vol. PAS-98.No 1. P. 299 – 307.

7. *Sohrokov A.M., Thazeplov A.Z.* Effektivnost' ispol'zovaniya SIP pri ekspluatacii raspredelitel'nyh setej // Energoberezhenie i energoeffektivnost': problemy i resheniya.– Nal'chik, 2020. – S. 278-281.

8. *Lebedev M.M, Nejshtadt I.S., Tashevskij V.V.* O topologicheskikh metodah analiza nadezhnosti raspredelitel'nyh ustrojstv // Izvestiya AN SSSR. Energetika i transport, 1971. – №3. S. 39-44.

