

Новосибирский государственный технический университет



www.nstu.ru



Релейная защита и автоматика энергосистем 2017

Модель надёжности резервированных устройств релейной защиты энергосистем

А.С. Трофимов, Г.С. Нудельман



Всероссийский научно-исследовательский, проектно-конструкторский и технологический институт релестроения

Требования, предъявляемые к релейной защите (РЗ)

1	Селективность
2	Быстродействие
3	Чувствительность
4	Надёжность

Виды надёжности и типы отказов РЗ

Согласно международного стандарт IEC 50 (448)

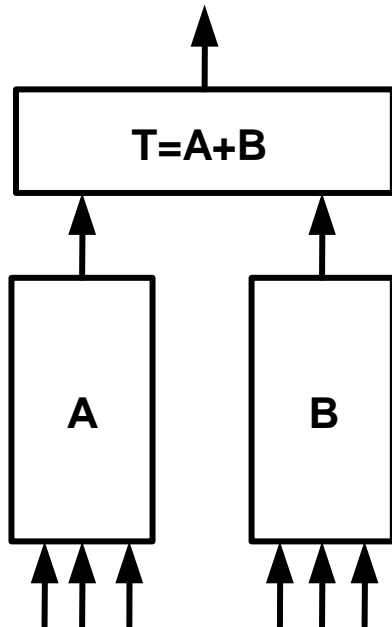
Защита энергетических систем.

Неправильное функционирование	
Отказ в функционировании	Непредусмотренное функционирование
1. Надёжность РЗ	
1.1 Надёжность срабатывания	1.2 Надёжность несрабатывания
<i>- Отказ срабатывания</i>	<i>- Ложное срабатывание</i>
	<i>- Излишнее срабатывание</i>

Виды резервирования систем РЗ

Повышенная надёжность срабатывания

На отключение защищаемого объекта

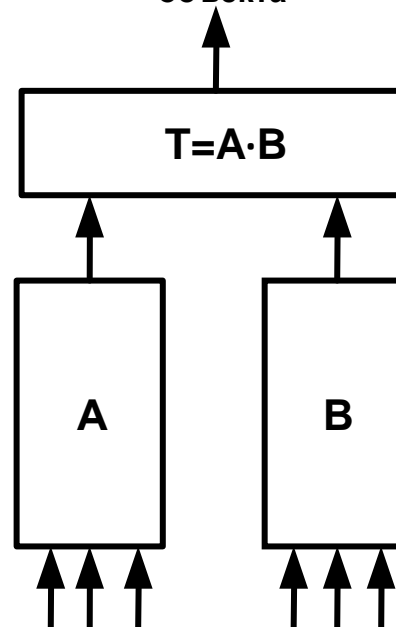


От устройств связи с защищаемым объектом

а

Повышенная надёжность несрабатывания

На отключение защищаемого объекта



От устройств связи с защищаемым объектом

б

Цели и задачи исследования

- Разработать математическую модель функционирования резервированных систем РЗ в условиях периодического контроля работоспособности;
- Рассчитать численные характеристики показателей надёжности резервированных систем РЗ.

Алгоритм расчёта надёжности РЗ

1. провести анализ работы рассматриваемой системы РЗ;



2. выбрать показатели, которые необходимо рассчитать;



3. составить формальное описание системы для расчёта выбранных показателей надёжности;



4. рассчитать показатели надёжности устройства одним из методов: логико-вероятностным, "дерева отказов", методом цепей Маркова или методом имитационного моделирования;

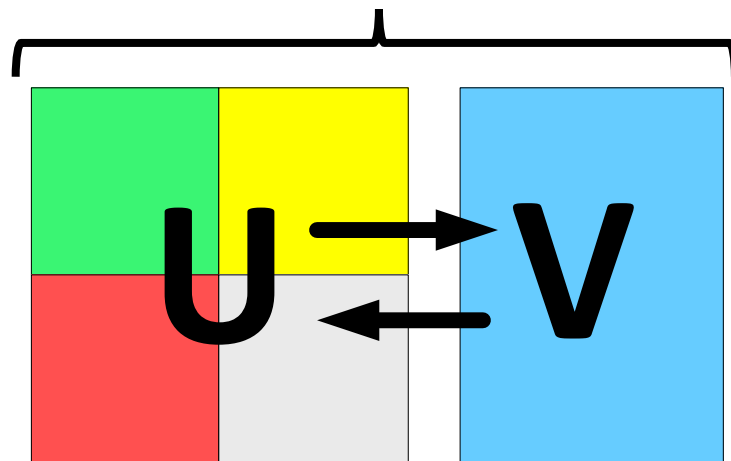
Исходные значения интенсивностей событий комплекта защиты ВЛ 500 кВ

№ п/п	Наименование	Обозначение	Значение, 1/год
1	Интенсивность ложных срабатываний	$\lambda_{л.А} = \lambda_{л.В} = \lambda_{л}$	0,006
2	Интенсивность излишних срабатываний	$\lambda_{и.А} = \lambda_{и.В} = \lambda_{и}$	0,104
3	Интенсивность отказов в срабатывании	$\lambda_{о.А} = \lambda_{о.В} = \lambda_{о}$	0,012
4	Интенсивность периодической проверки	$\lambda_{п}$	1-0,08
5	Интенсивность внешних КЗ	$\nu_{и}$	2,7
6	Интенсивность внутренних КЗ	$\nu_{о}$	2,45

Модель циклического функционирования системы P3

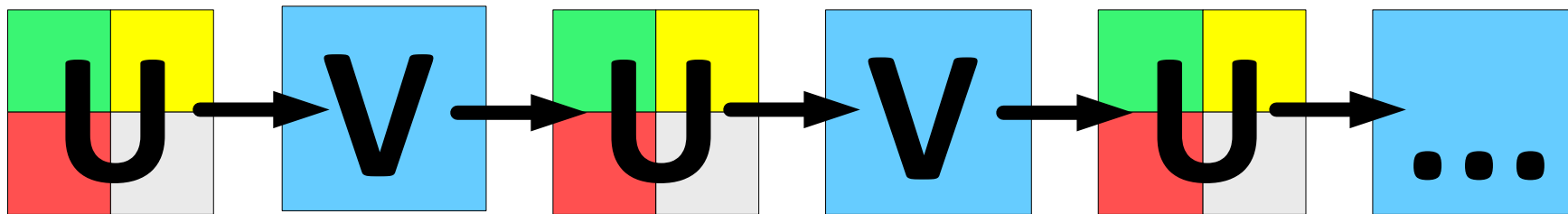
Множество состояний системы P3

$$W = U + V$$

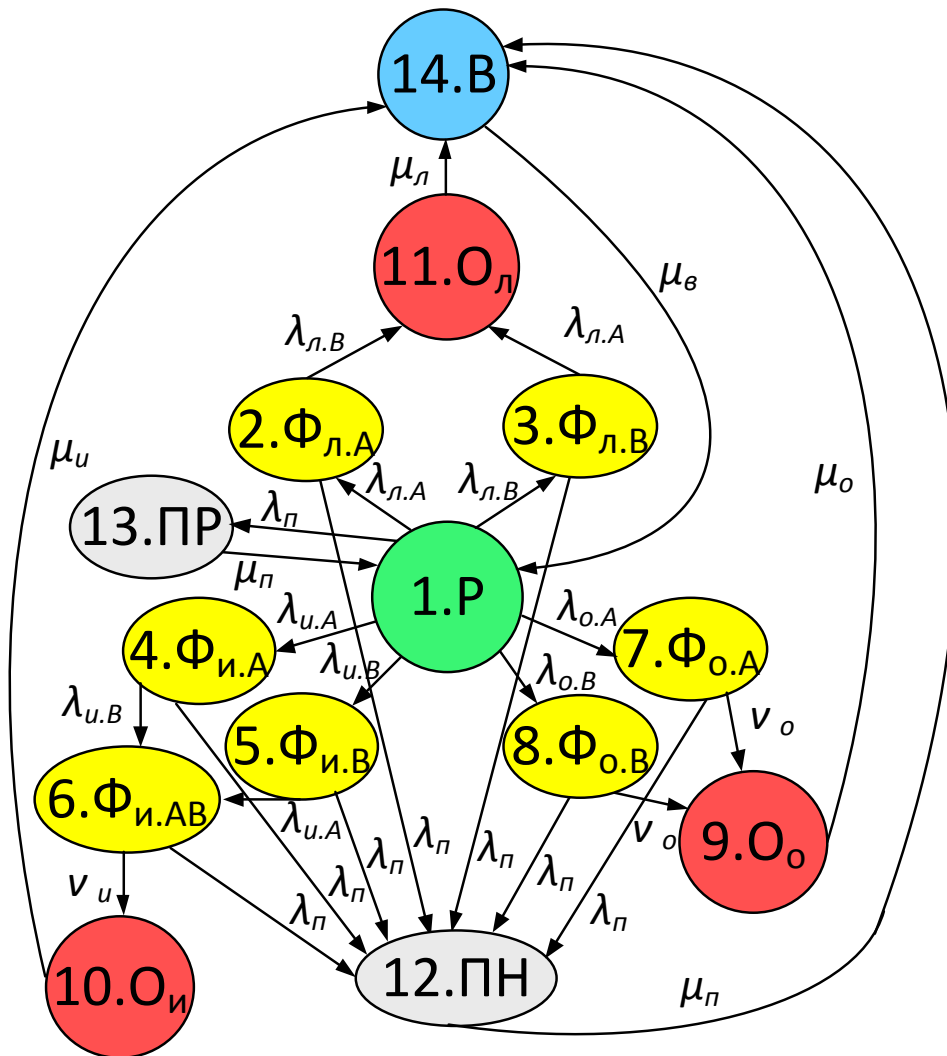


Подмножества работоспособных и неработоспособных состояний системы P3

Эволюционирование системы P3 во времени можно представить последовательными переходами из одного подмножества в другое, UV – цикл.



Граф состояний и переходов системы РЗ с резервированием «по несрабатыванию»



1.P	работоспособное состояние системы РЗ, состоящей из двух работоспособных комплектов защиты А и В;
2.Ф _{л.А}	функционирование системы РЗ при условии ложного срабатывания комплекта А;
3.Ф _{л.В}	функционирование системы РЗ при условии ложного срабатывания комплекта В;
4.Ф _{и.А}	функционирование системы РЗ с наличием дефекта опасного с точки зрения излишнего срабатывания комплекта А;
5.Ф _{и.В}	тот же дефект комплекта В;
6.Ф _{и.АВ}	тот же дефект комплектов А и В;
7.Ф _{о.А}	функционирование системы РЗ с наличием дефекта опасного с точки зрения отказа в срабатывании комплекта А;
8.Ф _{о.В}	тот же дефект комплекта В;
9.О _о	отказ в срабатывании системы РЗ;
10.О _и	излишнее срабатывание системы РЗ;
11.О _л	ложное срабатывание системы РЗ;
12.ПН	проверка системы РЗ, находящейся в неработоспособном состоянии;
13.ПР	проверка системы РЗ, находящейся в работоспособном состоянии;
14.В	восстановление работоспособности системы РЗ.

Матрица вероятностей проходов между состояниями

$$P = \begin{pmatrix} 0 & p_{12} & p_{13} & p_{14} & p_{15} & p_{16} & p_{17} & 0 & 0 & 0 & 0 & p_{112} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & p_{410} & p_{411} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & p_{510} & p_{511} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & p_{68} & 0 & 0 & p_{611} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & p_{78} & 0 & 0 & p_{711} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & p_{89} & 0 & p_{811} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

$$\begin{aligned} p_{12} &= \lambda_{л.А} / \lambda_{11}; p_{13} = \lambda_{л.В} / \lambda_{11}; p_{14} = \lambda_{и.А} / \lambda_{11}; p_{15} = \lambda_{и.В} / \lambda_{11}; \\ p_{16} &= \lambda_{о.А} / \lambda_{11}; p_{17} = \lambda_{о.В} / \lambda_{11}; p_{112} = \lambda_{п} / \lambda_{11}; \\ p_{410} &= v_{и} / \lambda_{44}; p_{510} = v_{и} / \lambda_{55}; p_{411} = \lambda_{п} / \lambda_{44}; p_{511} = \lambda_{п} / \lambda_{55}; p_{68} = \lambda_{о.В} / \lambda_{66}; \\ p_{78} &= \lambda_{о.А} / \lambda_{77}; p_{611} = \lambda_{п} / \lambda_{66}; p_{89} = v_{о} / \lambda_{88}; p_{711} = \lambda_{п} / \lambda_{77}; p_{811} = \lambda_{п} / \lambda_{88}. \end{aligned}$$

Матрицы вероятностей прохождений на подмножествах U и V

В подмножестве U система P3 функционирует	В подмножестве V система P3 восстанавливается
U = {1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12}	V = {13}

$$P_{UU} = \begin{pmatrix} 0 & p_{12} & p_{13} & p_{14} & p_{15} & p_{16} & p_{17} & 0 & 0 & 0 & 0 & p_{112} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & p_{410} & p_{411} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & p_{510} & p_{511} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & p_{68} & 0 & 0 & p_{611} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & p_{78} & 0 & 0 & p_{711} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & p_{89} & 0 & p_{811} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

$$P_{VV} = (0)$$

Матрицы относительных частот N_U и N_V на подмножествах U и V

$$N_U = \|n_U(i,j)\| = (E - P_{UU})^{-1}$$

$$N_V = \|n_V(i,j)\| = (E - P_{VV})^{-1}$$

Первая строка матрицы N_U имеет вид:

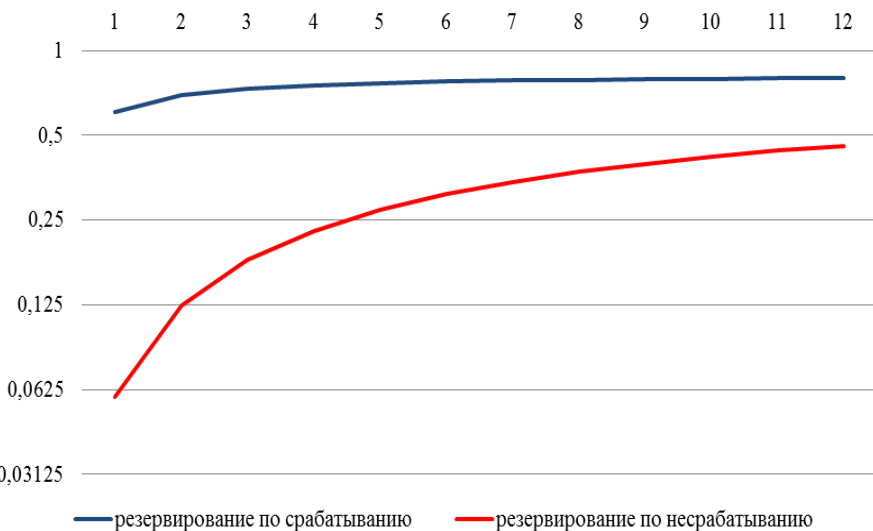
$$\bar{n}_1 = \|n_U(1,j)\| =$$

$$= \frac{1}{\lambda_\Sigma} \left(\frac{\lambda_\Sigma + \lambda_\Pi}{2} \quad \frac{\lambda_\Pi}{2} \quad \frac{\lambda_\Pi}{2} \quad \frac{\lambda_\Pi}{2} \quad \frac{\lambda_\Pi}{2} \quad \frac{\lambda_\Pi}{2} \quad \frac{\lambda_\Pi}{2} \quad \frac{\lambda_\Pi^2}{\lambda_{66}} \quad \frac{v_\Pi \cdot \lambda_\Pi^2}{\lambda_{88} \cdot \lambda_{66}} \quad \frac{v_\Pi \cdot \lambda_\Pi}{\lambda_{44}} \quad \frac{\lambda_\Pi \cdot A}{\lambda_{44} \cdot \lambda_{66} \cdot \lambda_{88}} \quad \frac{\lambda_\Pi}{2} \right)$$

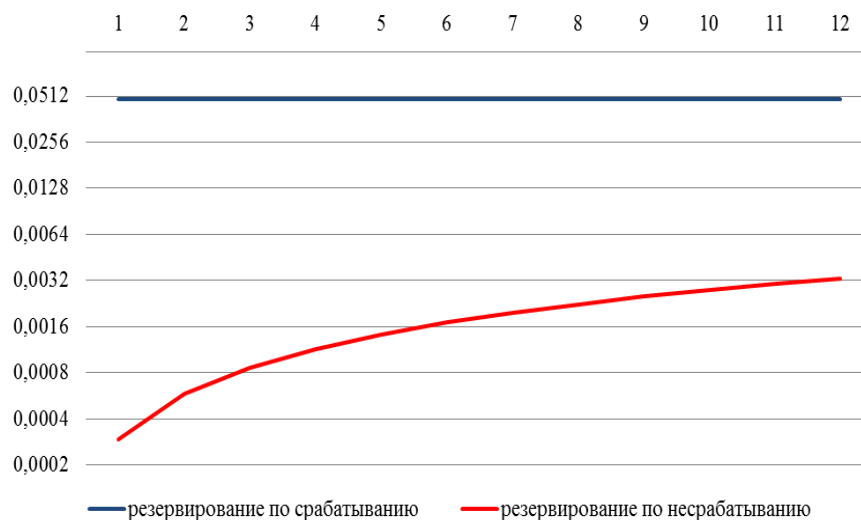
$$N_V = (1)$$

Относительные частоты отказов системы РЗ

Излишние срабатывания



Ложные срабатывания



Отказы в срабатывании



Матрица средних времён нахождения системы РЗ в состояниях подмножества U

$$\Theta_U = \begin{pmatrix} \frac{1}{\lambda_{11}} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{\lambda_{44}} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{\lambda_{55}} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{\lambda_{66}} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{\lambda_{77}} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{\lambda_{88}} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

Строка средних времён нахождения в состояниях подмножества U на одном цикле имеет вид:

$$\bar{t}_U = \|t_U(1, j)\| = \bar{n}_1 \cdot \Theta_U =$$

$$= \frac{1}{(\lambda_{II} + \lambda_{II} + \lambda_o)} \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & \frac{\lambda_{II}}{2 \cdot (v_{II} + \lambda_{II})} & \frac{\lambda_{II}}{2 \cdot (v_{II} + \lambda_{II})} & \frac{\lambda_o}{2 \cdot (\lambda_o + \lambda_{II})} & \frac{\lambda_o}{2 \cdot (\lambda_o + \lambda_{II})} & \frac{\lambda_o^2}{(\lambda_o + \lambda_{II}) \cdot (v_{II} + \lambda_{II})} & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

Определение показателей надёжности системы РЗ

Среднее время нахождения в подмножестве U:

$$t_U = \bar{t}_U \cdot \dot{e} = \frac{1}{(\lambda_{\text{И}} + \lambda_{\text{П}} + \lambda_{\text{О}})} \cdot \left(1 + \frac{\lambda_{\text{И}}}{2 \cdot (v_{\text{И}} + \lambda_{\text{П}})} + \frac{\lambda_{\text{И}}}{2 \cdot (v_{\text{И}} + \lambda_{\text{П}})} + \frac{\lambda_{\text{О}}}{2 \cdot (\lambda_{\text{О}} + \lambda_{\text{П}})} + \frac{\lambda_{\text{О}}}{2 \cdot (\lambda_{\text{О}} + \lambda_{\text{П}})} + \frac{\lambda_{\text{О}}^2}{(\lambda_{\text{О}} + \lambda_{\text{П}}) \cdot (v_{\text{И}} + \lambda_{\text{П}})} \right)$$

Среднее время UV-цикла составляет: $t_{UV} = t_U + t_V$

Среднее суммарное время нахождения в неработоспособных состояниях 4, 5, 6, 7, 8 на одном UV – цикле:

$$t_{\text{Н}} = t_U(1,4) + t_U(1,5) + t_U(1,6) + t_U(1,7) + t_U(1,8) =$$

$$= \frac{1}{(\lambda_{\text{И}} + \lambda_{\text{П}} + \lambda_{\text{О}})} \cdot \left(\frac{\lambda_{\text{И}}}{2 \cdot (v_{\text{И}} + \lambda_{\text{П}})} + \frac{\lambda_{\text{И}}}{2 \cdot (v_{\text{И}} + \lambda_{\text{П}})} + \frac{\lambda_{\text{О}}}{2 \cdot (\lambda_{\text{О}} + \lambda_{\text{П}})} + \frac{\lambda_{\text{О}}}{2 \cdot (\lambda_{\text{О}} + \lambda_{\text{П}})} + \frac{\lambda_{\text{О}}^2}{(\lambda_{\text{О}} + \lambda_{\text{П}}) \cdot (v_{\text{И}} + \lambda_{\text{П}})} \right)$$

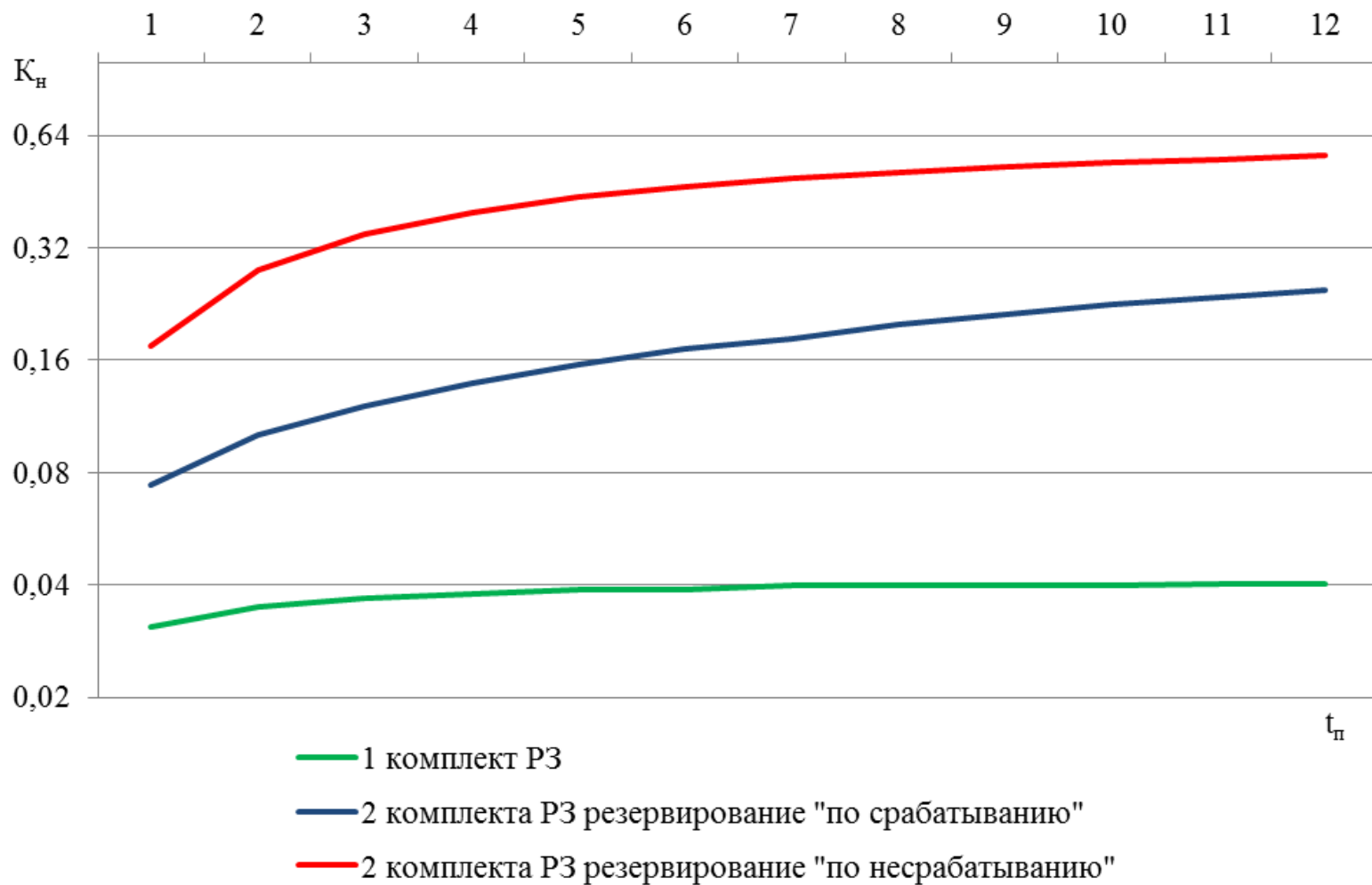
Коэффициент неготовности, вычисленный в соответствии с [ГОСТ Р 53480-2009]:

$$K_{\text{Н}} = \frac{t_{\text{Н}}}{t_{UV}} = \frac{t_{\text{Н}} / t_U}{1 + t_V / t_U}$$

Значения показателей эксплуатации и надёжности системы РЗ в зависимости от времени между проверками

t_n (год)	λ_n (1/год)	резервирование «по срабатыванию»					резервирование «по несрабатыванию»				
		t_{UV} (год)	ω_{UV} (1/год)	K_n	n_n	ω_n (1/год)	t_{UV} (год)	ω_{UV} (1/год)	K_n	n_n	ω_n (1/год)
1	1	4,42	0,226	0,074	4,43	1	4,97	0,1984	0,175	4,97	1
2	0,5	4,56	0,219	0,101	2,28	0,5	5,69	0,1710	0,279	2,84	0,5
3	0,333	4,67	0,214	0,121	1,56	0,333	6,29	0,1528	0,349	2,10	0,333
4	0,25	4,77	0,209	0,139	1,19	0,25	6,82	0,1396	0,399	1,71	0,25
5	0,2	4,85	0,205	0,156	0,97	0,2	7,28	0,1297	0,437	1,46	0,2
6	0,167	4,95	0,202	0,172	0,83	0,167	7,69	0,1219	0,467	1,28	0,167
7	0,143	5,03	0,199	0,186	0,72	0,143	8,05	0,1156	0,491	1,15	0,143
8	0,125	5,12	0,195	0,199	0,64	0,125	8,37	0,1104	0,510	1,05	0,125
9	0,111	5,21	0,192	0,212	0,58	0,111	8,67	0,1060	0,527	0,96	0,111
10	0,1	5,29	0,189	0,225	0,53	0,1	8,94	0,1023	0,541	0,89	0,1
11	0,09	5,37	0,186	0,236	0,49	0,09	9,18	0,0989	0,553	0,83	0,09
12	0,08	5,44	0,184	0,247	0,45	0,08	9,41	0,0961	0,564	0,78	0,08

Зависимость коэффициента неготовности системы РЗ от среднего времени между проверками



Заключение

- Разработана модель цикла функционирования системы РЗ на основе теории полумарковских процессов.
- Модель позволяет рассчитать и спрогнозировать ряд показателей эксплуатации и надёжности.
- На основе приведенной модели можно выявить факторы, влияющие на надёжность системы РЗ, а также оценить надёжность альтернативных схем резервирования.
- На основе приведённой модели могут быть сформулированы требования к периодичности регулярных проверок.

Новосибирский государственный технический университет



www.nstu.ru



Релейная защита и автоматика энергосистем 2017

Модель надёжности резервированных устройств релейной защиты энергосистем

А.С. Трофимов, Г.С. Нудельман



Всероссийский научно-исследовательский, проектно-конструкторский и технологический институт релестроения