

2. Сутью функциональной задачи является расчет блокировочных функций, определяющих:

состояние цепей оперативной блокировки;

ожидаемый и реальный потенциалы на блок-замках коммутационных аппаратов;

условия безопасных переключений.

Расчеты выполняются на основе реальных программных моделей цепей оперативной блокировки, построенных с использованием телесигналов, определяющих пространственное положение коммутационных аппаратов, и эталонных блокировочных функций, формируемых разработчиком или пользователем при конфигурировании системы.

3. Персоналу предоставлены диалоговые средства для запуска задачи, конфигурации данных, просмотра и использования результатов выполнения задачи.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Правила устройства электроустановок. – М.: Энергоатомиздат, 1985.

2. Васильев А. А. и др. Электрическая часть станций и подстанций. – М.: Энергоатомиздат, 1990.

3. Анищенко В. А. Совместный контроль достоверности сигнализации положения коммутационных аппаратов и измерений аналоговых переменных // Энергетика... (Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ). – 1995. – № 3–4.

Поступила 31.07.2001

УДК 621.311.017

## ОБ ОПТИМАЛЬНОЙ ЗАГРУЗКЕ ДИСКРЕТНЫХ ПАРАМЕТРОВ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЕЙ

Канд. техн. наук, доц. ФУРСАНОВ М. И.

*Белорусская государственная политехническая академия*

Оптимальные уровни потерь электрической энергии в сетях могут быть обеспечены только в условиях оптимальных режимов работы отдельных звеньев энергосистем [1, 2]. Для соблюдения таких условий необходимо уметь поддерживать оптимальную загрузку [3] отдельных элементов электрических сетей, которая, учитывая конфигурацию графиков нагрузок, во временных координатах будет различной.

Определим понятие и количественные характеристики искомых параметров.

Известно, что под «оптимальной» понимается величина, соответствующая принятому критерию оптимальности [4].

Исходя из данного положения, оптимальная загрузка функционально разных элементов электрических сетей будет зависеть от рассматриваемых

исходных условий (вид и количество критериев оптимальности, статическая или динамическая постановка задачи и т. д.).

Выполним исследование оптимальных нагрузок основных дискретных параметров электрических сетей энергосистем – трансформаторов и проводов воздушных линий.

**Трансформаторы.** В статической постановке коэффициент  $k$  оптимальной загрузки трансформаторов можно рассчитать:

1) по критерию минимума суммарных потерь активной мощности  $\Delta P$  в трансформаторах  $k_{\Delta P}$

$$\Delta P = \Delta P_0 + \Delta P_{кз} \left( \frac{S}{S_{ном}} \right)^2. \quad (1)$$

Так как

$$k_{\Delta P} = \frac{S}{S_{ном}},$$

$$\Delta P = \Delta P_0 + \Delta P_{кз} k_{\Delta P}^2 \quad (2)$$

или

$$\Delta P_* = \frac{\Delta P_0}{k_{\Delta P}} + \Delta P_{кз} k_{\Delta P}. \quad (3)$$

Тогда из условия

$$\frac{\partial \Delta P_*}{\partial k_{\Delta P}} = -\frac{\Delta P_0}{k_{\Delta P}^2} + \Delta P_{кз} = 0 \quad (4)$$

найдем, что

$$k_{\Delta P} = \sqrt{\frac{\Delta P_0}{\Delta P_{кз}}}. \quad (5)$$

Для примера зависимость суммарных потерь мощности в процентах от загрузки трансформатора 100 кВ·А показана на рис. 1 ( $k_{\Delta P} = 38 \%$ );

2) из условия минимума суммарных потерь электроэнергии  $k_{\Delta W}$  (рис. 2):

для режима максимальных нагрузок:

$$\Delta W = \Delta P_0 T + \Delta P_{кз} \left( \frac{S_{max}}{S_{ном}} \right)^2 \tau; \quad (6)$$

$$\Delta W_* = \frac{\Delta P_0 T}{k_{\Delta W}} + \Delta P_{кз} k_{\Delta W} \tau; \quad (7)$$

$$\frac{\partial \Delta W_*}{\partial k_{\Delta W}} = -\frac{\Delta P_0 T}{k_{\Delta W}^2} + \Delta P_{кз} \tau = 0; \quad (8)$$

$$k_{\Delta W} = \sqrt{\frac{\Delta P_0 T}{\Delta P_{кз} \tau}}; \quad (9)$$

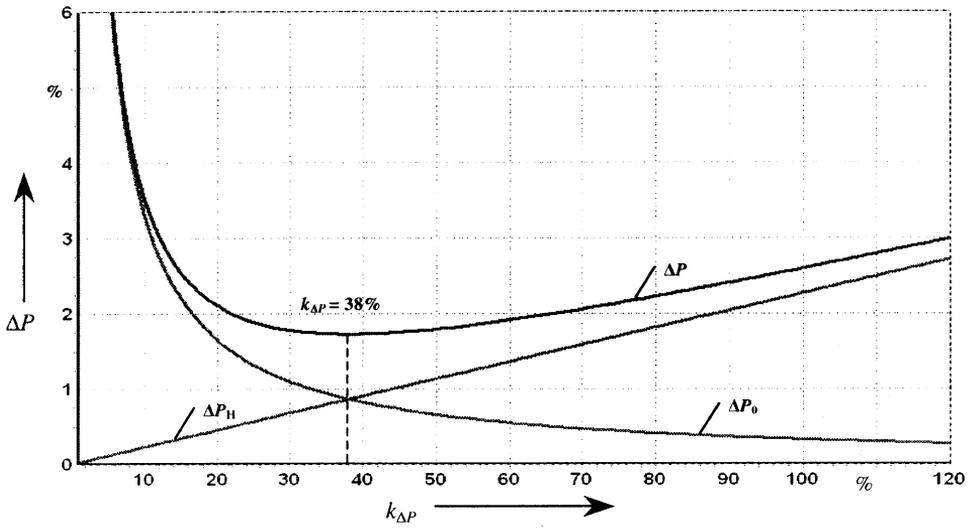


Рис. 1. Зависимости потерь мощности  $\Delta P$  в трансформаторе 100 кВ·А от загрузки  $k_{\Delta P}$

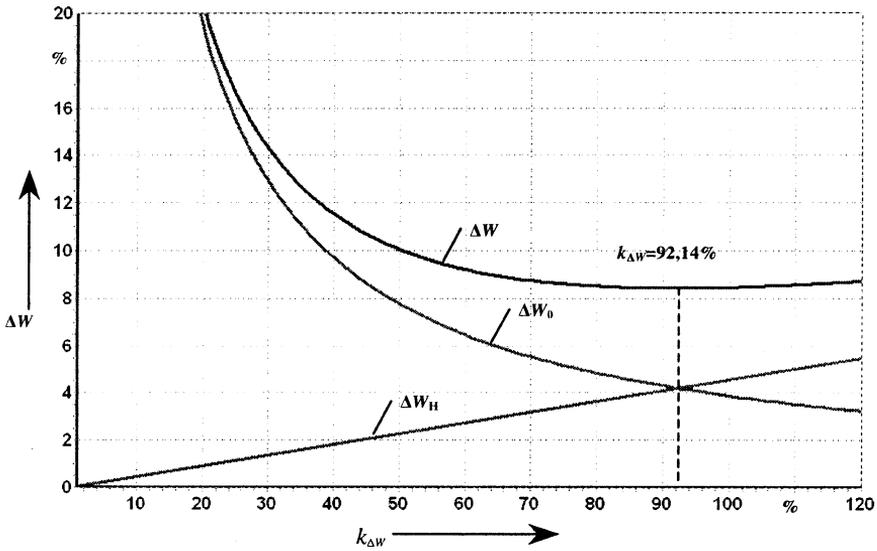


Рис. 2. Зависимости потерь энергии  $\Delta W$  в трансформаторе 100 кВ·А от загрузки  $k_{\Delta W}$

в режиме средних нагрузок  $\bar{k}_{\Delta W}$  :

$$\Delta P_0 T = \Delta P_{кз} \left( \frac{\bar{S}}{S_{НОМ}} \right)^2 k_{\phi}^2 T ; \quad (10)$$

$$\bar{k}_{\Delta W} = \frac{1}{k_{\phi}} \sqrt{\frac{\Delta P_0}{\Delta P_{кз}}} . \quad (11)$$

Так как

$$S_{\max}^2 \tau = \bar{S}^2 k_{\phi}^2 T, \quad (12)$$

$$k_{\phi} = \frac{S_{\max}}{\bar{S}} \sqrt{\frac{\tau}{T}}. \quad (13)$$

Окончательно

$$\bar{k}_{\Delta W} = \frac{\bar{S}}{S_{\max}} \sqrt{\frac{\Delta P_0 T}{\Delta P_{\text{кз}} \tau}}. \quad (14)$$

Сравнивая  $k_{\Delta W}$  и  $\bar{k}_{\Delta W}$ , видим, что

$$\bar{k}_{\Delta W} = \frac{\bar{S}}{S_{\max}} k_{\Delta W}; \quad (15)$$

3) по критерию минимума стоимости трансформации электроэнергии  $k_{C_T}$  (рис. 3):

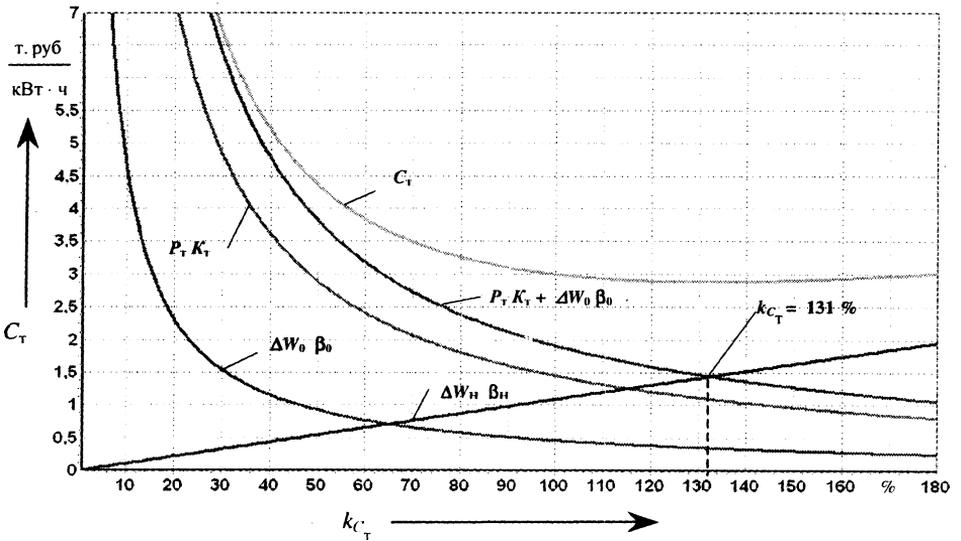


Рис. 3. Изменение стоимости трансформации электрической энергии  $C_T$  в трансформаторе 100 кВ·А от загрузки  $k_{C_T}$

для режима максимальных нагрузок:

$$C_T = \frac{p_T K_T + \Delta W_0 \beta_0}{W} + \frac{\Delta W_H \beta_H}{W} = \frac{p_T K_T + \Delta W_0 \beta_0}{W} + \frac{\beta_H}{W} \Delta P_{\text{кз}} \left( \frac{S_{\max}}{S_{\text{ном}}} \right)^2 \tau; \quad (16)$$

$$C_{T.} = \frac{p_T K_T + \Delta W_0 \beta_0}{W k_{C_T}} + \frac{\beta_H}{W} \Delta P_{\text{кз}} k_{C_T} \tau; \quad (17)$$

$$\frac{\partial C_{\tau}}{\partial k_{C_{\tau}}} = -\frac{p_{\tau}K_{\tau} + \Delta W_0\beta_0}{k_{C_{\tau}}^2} + \beta_{\text{н}}\Delta P_{\text{кз}}\tau = 0; \quad (18)$$

$$k_{C_{\tau}} = \sqrt{\frac{p_{\tau}K_{\tau} + \Delta P_0 T \beta_0}{\Delta P_{\text{кз}}\tau\beta_{\text{н}}}}; \quad (19)$$

для режима средних нагрузок  $\bar{k}_{C_{\tau}}$  :

$$C_{\tau} = \frac{p_{\tau}K_{\tau} + \Delta W_0\beta_0}{W} + \frac{\beta_{\text{н}}}{W}\Delta P_{\text{кз}}\left(\frac{\bar{S}}{S_{\text{НОМ}}}\right)^2 k_{\phi}^2 T; \quad (20)$$

$$C_{\tau} = \frac{p_{\tau}K_{\tau} + \Delta W_0\beta_0}{Wk_{C_{\tau}}} + \frac{\beta_{\text{н}}}{W}\Delta P_{\text{кз}}\bar{k}_{C_{\tau}}k_{\phi}^2 T; \quad (21)$$

$$\frac{\partial C_{\tau}}{\partial \bar{k}_{C_{\tau}}} = -\frac{p_{\tau}K_{\tau} + \Delta W_0\beta_0}{\bar{k}_{C_{\tau}}^2} + \beta_{\text{н}}\Delta P_{\text{кз}}k_{\phi}^2 T = 0; \quad (22)$$

$$\bar{k}_{C_{\tau}} = \frac{1}{k_{\phi}}\sqrt{\frac{p_{\tau}K_{\tau} + \Delta P_0 T \beta_0}{\Delta P_{\text{кз}}\beta_{\text{н}}T}}. \quad (23)$$

В динамической постановке задача усложняется из-за учета фактора времени. Поэтому здесь оптимальная нагрузка трансформаторов будет не дискретной, а интервальной величиной (рис. 4).

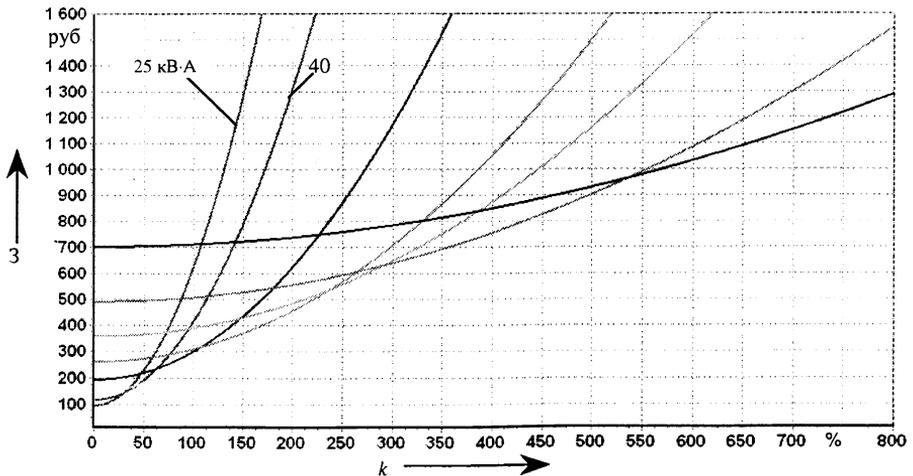


Рис. 4. Зависимости затрат  $Z$  на трансформацию электроэнергии от загрузки  $k$ :  
 ТМ-25 – до 126 %, ТМ-40 – 78,5...111 %, ТМ-63 – 70,47...141 %, ТМ-100 – 88,6 ... 108 %, ТМ-160 – 67,5 ... 149 %, ТМ-250 – 95,2 ... 117 %, ТМ-400 – 73...134 %, ТМ-630 – от 85,2 %

Проанализируем конкретные значения исследуемых величин на численных примерах. Все необходимые для расчетов исходные данные по трансформаторам 6–330 кВ взяты из [5].

В обобщенном виде результаты расчетов приведены в табл. 1. В ней указаны значения исследуемых величин  $k_{\Delta P}$ ,  $k_{\Delta W}$  и  $k_{C_T}$ , для двух граничных значений времени потерь в режимах максимальных  $S_{\max}$  и средних  $\bar{S}$  нагрузок в статической постановке. По данным обследования одного из предприятий электрических сетей Белорусской энергосистемы, отношение  $\bar{S}/S_{\max} = 0,625$ . Оно и использовалось при определении значений  $k$  в режиме средних нагрузок.

Таблица 1

Обобщенные результаты расчетов коэффициентов оптимальной загрузки трансформаторов 6–330 кВ

$U_{\text{ном}}, \text{кВ}$	$\tau, \text{ч}$	$S$	$k_{\Delta P}, \text{о. е.}$	$k_{\Delta W}, \text{о. е.}$	$k_{C_T}, \text{о. е.}$
6–20	400	$S_{\max}$	0,42	1,95	2,33
		$\bar{S}$	0,42	1,22	1,46
	1500	$S_{\max}$	0,42	1,00	1,43
		$\bar{S}$	0,42	0,63	0,89
35	1500	$S_{\max}$	0,48	1,15	1,96
		$\bar{S}$	0,48	0,72	1,23
	3000	$S_{\max}$	0,48	0,82	1,65
		$\bar{S}$	0,48	0,51	1,03
110	1500	$S_{\max}$	0,51	1,23	2,23
		$\bar{S}$	0,51	0,77	1,40
	3000	$S_{\max}$	0,51	0,87	1,89
		$\bar{S}$	0,51	0,54	1,18
220	1500	$S_{\max}$	0,57	1,38	1,95
		$\bar{S}$	0,57	0,86	1,22
	3000	$S_{\max}$	0,57	0,98	1,65
		$\bar{S}$	0,57	0,61	1,03
330	1500	$S_{\max}$	0,59	1,42	2,01
		$\bar{S}$	0,59	0,89	1,25
	3000	$S_{\max}$	0,59	1,00	1,70
		$\bar{S}$	0,59	0,63	1,06

**Провода воздушных линий 110–220 кВ.** В статической постановке оптимальную загрузку проводов воздушных линий  $k_{C_T}$  можно определить аналогично приведенным выше рассуждениям:

$$C_{л} = \frac{p_{л}K_{л} + \Delta W_{кор} \beta_{кор}}{W} + \frac{\Delta W_{н} \beta_{н}}{W} = \frac{p_{л}K_{л} + \Delta W_{кор} \beta_{кор}}{W} + \frac{3I_{\max}^2 \rho \frac{l}{F} \tau_{л} \beta_{н}}{W} =$$

$$= \frac{p_{л}K_{л} + \Delta W_{кор} \beta_{кор}}{W} + \frac{3 \frac{I_{\max}^2}{F^2} F \rho l \tau_{л} \beta_{н}}{W}; \quad (24)$$

$$C_{л.} = \frac{p_{л}K_{л} + \Delta W_{кор} \beta_{кор}}{W k_{C_{л.}}} + \frac{3k_{C_{л.}} F \rho l \tau_{л} \beta_{н}}{W}. \quad (25)$$

Теперь из условия  $\frac{\partial C_{л.}}{\partial k_{C_{л.}}} = 0$  найдем  $k_{C_{л.}}$  на один километр линии:

$$\frac{\partial C_{л.}}{\partial k_{C_{л.}}} = \frac{1}{W} \left( -\frac{p_{л}K_{л} + \Delta W_{кор} \beta_{кор}}{k_{C_{л.}}^2} + 3F \rho l \tau_{л} \beta_{н} \right) = 0; \quad (26)$$

$$k_{C_{л.}} = \sqrt{\frac{p_{л}K_{л} + \Delta W_{кор} \beta_{кор}}{3F \rho l \tau_{л} \beta_{н}}}. \quad (27)$$

Исходные данные и численные значения  $k_{C_{л.}}$  для проводов воздушных линий 110–220 кВ приведены в табл. 2.

Таблица 2

Экономическая загрузка проводов воздушных линий 110–220 кВ  
( $p_{л} = 0,178$ ;  $\beta_{кор} = 0,0175$  у. е./кВт·ч)

$F, \text{ мм}^2$	$K_0, \text{ тыс. руб/км}$	$\Delta P_{кор}, \text{ кВт/км}$	$\tau_{л}, \text{ ч}$	$\beta_{н}, \text{ руб/(кВт·ч)}$	$k_{C_{л.}}$	
					без учета $\Delta W_{кор}, \text{ о. е.}$	с учетом $\Delta W_{кор}, \text{ о. е.}$
70	0,663		1500	0,030	0,63	
			3000	0,021	0,53	
95	0,923		1500	0,030	0,64	
			3000	0,021	0,54	
120	1,170		1500	0,030	0,64	
			3000	0,021	0,54	
150	1,444		1500	0,030	0,64	
			3000	0,021	0,54	
185	1,800		1500	0,030	0,64	
			3000	0,021	0,54	
240	2,290	2,7	1500	0,030	0,63	0,90
			3000	0,021	0,53	0,76
300	2,860	2,5	1500	0,030	0,63	0,84
			3000	0,021	0,53	0,71
400	3,800	1,7	1500	0,030	0,63	0,74
			3000	0,021	0,53	0,63

Выше рассчитаны и проанализированы экстремальные значения оптимальных нагрузок линий и трансформаторов, рассматриваемых изолированно вне реальных условий эксплуатации электрических сетей. Для линий электропередачи такие идеализированные условия практически не встречаются, так как изменение нагрузки трансформаторов всегда влечет за собой изменение нагрузки линий для трансформаторов. К таким условиям можно отнести их эксплуатацию на повышающих подстанциях электростанций и в качестве трансформаторов для собственных нужд. Во всех других случаях речь идет исключительно об оптимальной нагрузке сети в целом, а не ее отдельных элементов.

Ниже проведено небольшое исследование оптимальной загрузки основных дискретных параметров в реальных условиях эксплуатации электрических сетей, т. е. при совместной работе линий и трансформаторов в сети. В статической постановке оптимальную загрузку участка сети, состоящего из одиночных линии и трансформатора, можно также рассчитать:

- 1) из условия минимума суммарных потерь электроэнергии в сети  $k_{\Delta W}^c$  :  
в режиме максимальных нагрузок

$$\Delta W = \Delta P_0 T + \Delta P_{кз} \left( \frac{S_{\max}}{S_{\text{НОМ}}} \right)^2 \tau_{\tau} + \frac{S_{\max}^2}{U^2} R_{\text{л}} \tau_{\text{л}} = \quad (28)$$

$$= \Delta P_0 T + \Delta P_{кз} (k_{\Delta W}^c)^2 \tau_{\tau} + (k_{\Delta W}^c)^2 \frac{S_{\text{НОМ}}^2}{U^2} R_{\text{л}} \tau_{\text{л}};$$

$$\frac{\partial \Delta W_*}{\partial k_{\Delta W}^c} = - \frac{\Delta P_0 T}{(k_{\Delta W}^c)^2} + \Delta P_{кз} \tau_{\tau} + \frac{S_{\text{НОМ}}^2}{U^2} R_{\text{л}} \tau_{\text{л}} = 0. \quad (29)$$

Откуда при  $l = 1$  км

$$k_{\Delta W}^c = \sqrt{\frac{\Delta P_0 T}{\Delta P_{кз} \tau_{\tau} + \frac{S_{\text{НОМ}}^2}{U^2} r_0 \tau_{\text{л}}}}. \quad (30)$$

Априори видно, что значение  $k_{\Delta W}^c$  всегда будет меньше  $k_{\Delta W}$ , и зависит это прежде всего от конструктивного исполнения сети: ее конфигурации, марок и длин проводов (кабелей), числа и номинальных мощностей трансформаторов.

Несложно видеть, что в режиме средних нагрузок

$$\bar{k}_{\Delta W}^c = \frac{1}{k_{\Phi}} \sqrt{\frac{\Delta P_0}{\Delta P_{кз} + \frac{S_{\text{НОМ}}^2}{U^2} r_0}}; \quad (31)$$

2) по критерию минимума стоимости передачи электрической энергии  $k_{C_n}^c$ :

в режиме максимальных нагрузок

$$C_{II} = \frac{p_T K_T + \Delta W_0 \beta_0}{W} + \frac{p_L K_L + \Delta W_{кор} \beta_{кор}}{W} + \frac{\beta_{HT}}{W} \Delta P_{кз} \left( \frac{S_{max}}{S_{ном}} \right)^2 \tau_T + \frac{\beta_{нл}}{W} \left( \frac{S_{max}}{S_{ном}} \right)^2 \frac{S_{ном}^2}{U^2} R_L \tau_L. \quad (32)$$

Из условия  $\partial C_{II} / \partial k_{C_n} = 0$  можно получить

$$k_{C_n}^c = \sqrt{\frac{p_T K_T + \Delta P_0 T \beta_0 + p_L K_L + \Delta P_{кор} T \beta_{кор}}{\Delta P_{кз} \tau_T \beta_{HT} + \frac{S_{ном}^2}{U^2} r_0 \tau_L \beta_{нл}}}. \quad (33)$$

После вывода (33) выражение для определения значения  $\bar{k}_{C_n}$  в режиме средних нагрузок становится очевидным.

Приведенные рассуждения и полученные формулы относятся к простейшей электрической сети. В разветвленной сети рассматриваемая задача усложняется и ее решение в общем виде выходит за рамки данной статьи. Здесь отметим следующее.

В значительной степени загрузка электрических сетей энергосистем определяется загрузкой распределительных сетей 6–20 кВ. Для этих сетей в рамках существующего уровня их режимной обеспеченности можно судить лишь об оптимальной загрузке отдельной распределительной линии в целом, вычисляемой через отношение  $S_{max} / S_{ном}$  и представленной в виде последовательной цепочки двух индивидуальных эквивалентных сопротивлений: линейных участков схемы РЛ  $r_{эл}$  и трансформаторных  $r_{эт}$  (здесь и далее все величины относятся к одной РЛ, в частности,  $S_{max}$  – полная мощность на головном участке РЛ,  $S_{ном}$  – суммарная установленная мощность присоединенных к РЛ трансформаторов). С учетом сказанного можно записать, что

$$\begin{aligned} \Delta W &= \Delta P_0 T + \frac{S_{max}^2}{U^2} r_{эт} \tau_T + \frac{S_{max}^2}{U^2} r_{эл} \tau_L = \\ &= \Delta P_0 T + k_{\Delta W}^2 \frac{S_{ном}^2}{U^2} r_{эт} \tau_T + k_{\Delta W}^2 \frac{S_{ном}^2}{U^2} r_{эл} \tau_L; \end{aligned} \quad (34)$$

$$\frac{\partial \Delta W_*}{\partial k_{\Delta W}} = -\frac{\Delta P_0 T}{k_{\Delta W}^2} + \frac{S_{ном}^2}{U^2} r_{эт} \tau_T + \frac{S_{ном}^2}{U^2} r_{эл} \tau_L, \quad (35)$$

откуда искомое значение  $k_{\Delta W}$  в максимальном режиме будет равно

$$k_{\Delta W} = \frac{U}{S_{\text{НОМ}}} \sqrt{\frac{\Delta P_0 T}{r_{\text{ЭТ}} \tau_{\text{T}} + r_{\text{ЭЛ}} \tau_{\text{Л}}}}, \quad (36)$$

а «средняя» нагрузка РЛ составит

$$\bar{k}_{\Delta W} = \frac{U \bar{S}}{S_{\text{НОМ}} S_{\text{МАХ}}} \sqrt{\frac{\Delta P_0 T}{r_{\text{ЭТ}} \tau_{\text{T}} + r_{\text{ЭЛ}} \tau_{\text{Л}}}}. \quad (37)$$

По (36), (37) определяется нагрузка распределительных линий по критерию минимума суммарных потерь электроэнергии. Руководствуясь аналогичными рассуждениями, можно получить аналитические соотношения для вычисления искомых значений  $k_{C_n}$ ,  $\bar{k}_{C_n}$  из условия минимальной стоимости передачи электрической энергии:

$$k_{C_n} = \frac{U}{S_{\text{НОМ}}} \sqrt{\frac{p_{\text{T}} K_{\text{T}} + \Delta P_0 T \beta_0 + p_{\text{Л}} K_{\text{Л}}}{r_{\text{ЭТ}} \tau_{\text{T}} \beta_{\text{T}} + r_{\text{ЭЛ}} \tau_{\text{Л}} \beta_{\text{Л}}}}; \quad (38)$$

$$\bar{k}_{C_n} = \frac{U \bar{S}}{S_{\text{НОМ}} \bar{S}_{\text{МАХ}}} \sqrt{\frac{p_{\text{T}} K_{\text{T}} + \Delta P_0 T \beta_0 + p_{\text{Л}} K_{\text{Л}}}{r_{\text{ЭТ}} \tau_{\text{T}} \beta_{\text{T}} + r_{\text{ЭЛ}} \tau_{\text{Л}} \beta_{\text{Л}}}}. \quad (39)$$

Многочисленные расчеты, проведенные автором в энергосистемах, а также анализ формул (36), (37) показывают, что в значительной степени значения  $k_{\Delta W}$  и  $k_{C_r}$  распределительных линий зависят от отношения  $k_r$  индивидуальных эквивалентных сопротивлений  $r_{\text{ЭЛ}}$  и  $r_{\text{ЭТ}}$ , причем чем больше  $k_r = r_{\text{ЭЛ}} / r_{\text{ЭТ}}$ , тем меньше оптимальная нагрузка сети. Подтвердим сказанное расчетом. Примем:  $\tau_{\text{T}} = \tau_{\text{Л}}$ ;  $\beta_{\text{T}} = \beta_{\text{Л}} = 1$ ;  $r_{\text{ЭТ}} = 1$ , а значения  $k_{\Delta W}$  и  $k_{C_r}$  равными средним значениям этих коэффициентов для сети 6–20 кВ (табл. 1). Тогда при  $\tau = 1500$  ч:

$$k_{\Delta W} = \sqrt{\frac{1}{1+k_r}}; \quad k_{C_r} = 1,43 \sqrt{\frac{1}{1+k_r}},$$

при  $\tau = 400$  ч:

$$k_{\Delta W} = 1,95 \sqrt{\frac{1}{1+k_r}}; \quad k_{C_r} = 2,33 \sqrt{\frac{1}{1+k_r}}.$$

Построим графики функций  $k_{\Delta W} = f(k_r)$  и  $k_{C_r} = f(k_r)$  (рис. 5) в диапазоне  $k_r = 0,25 \dots 9$  по данным табл. 3.

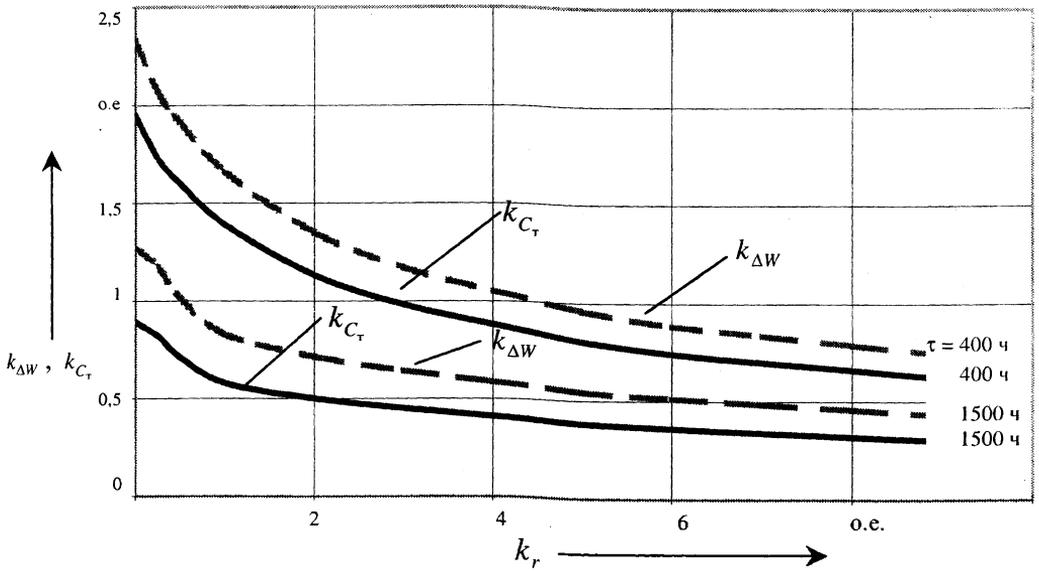


Рис. 5. Зависимости  $k_{\Delta W} = f(k_r)$  и  $k_{C_T} = f(k_r)$

Таблица 3

$k_r$	$k_{\Delta W}$ , $\tau = 1500$ ч	$k_{\Delta W}$ , $\tau = 400$ ч
0	0,89	1,95
0,25	0,82	1,73
0,5	0,71	1,60
1	0,58	1,39
2	0,5	1,13
3	0,45	0,98
4	0,41	0,88
5	0,38	0,80
6	0,36	0,74
7	0,34	0,70
8	0,32	0,66
9	0,30	0,62

## ВЫВОДЫ

1. Оптимальный уровень потерь в электрических сетях зависит от принятого критерия оптимальности – суммарных потерь мощности, электроэнергии – или экономического критерия. При использовании формулы (5) коэффициент загрузки  $k_{\Delta P}$  находится в пределах 0,42...0,59: для трансформаторов 6–20 кВ – 0,42; 35 кВ – 0,48; 110 кВ – 0,51; 220 кВ – 0,57 и 330 кВ – 0,59.

2. Оптимальная нагрузка трансформаторов по критерию минимума потерь электроэнергии  $k_{\Delta W}$  по (9) больше, чем  $k_{\Delta P}$  по (5) в  $\sqrt{\frac{T}{\tau}}$  раз. Для городских и распределительных сетей 6–20 кВ при значениях  $\tau = 400 \dots 1500$  ч, характерных для этих сетей, максимальный коэффициент загрузки  $k_{\Delta W}$  должен быть в пределах  $k_{\Delta W} = 1,00 \dots 1,95$ .

Коэффициент загрузки трансформаторов 6–20 кВ по формуле (11) меньше максимального в  $S_{\max} / \bar{S}$  раз и составляет  $\bar{k}_{\Delta W} = 0,63 \dots 1,22$ .

3. Для трансформаторов 35–330 кВ  $\tau = 1500 \dots 3000$  ч, отношение  $\Delta P_{кз} / \Delta P_0 = 3,0 \dots 4,4$ , значения  $k_{\Delta W} = 0,82 \dots 1,42$ , а  $\bar{k}_{\Delta W} = 0,51 \dots 0,89$ .

4. Загрузка по экономическому критерию (минимуму стоимости трансформации электрической энергии) всегда несколько выше, чем по минимуму суммарных потерь электроэнергии:

Таблица 4

$U_{\text{ном}}, \text{кВ}$	$k_{\Delta W}$	$k_{C_T}$
6–20	1,00...1,95	1,43...2,33
35	0,82...1,15	1,65...1,96
110	0,87...1,23	1,89...2,23
220	0,98...1,38	1,65...1,95
330	1,00...1,42	1,70...2,01

5. При принятых исходных условиях экономическая нагрузка проводов воздушных линий 110–220 кВ составила 0,62. Учет потерь на корону увеличивает нагрузку проводов до 0,76.

6. С увеличением коэффициента  $k_r$  оптимальная нагрузка сети как по критерию минимума суммарных потерь электроэнергии, так и по экономическому критерию снижается:

$k_{\Delta W}$  – со 100 % при  $k_r = 0$  до 30 % при  $k_r = 9$ ,  $\tau = 1500$  ч; со 195 до 62 % при  $\tau = 400$  ч;

$k_{C_T}$  – со 143 до 43 % при  $\tau = 1500$  ч; с 233 до 73 % при  $\tau = 400$  ч.

При этом зависимости  $k_{\Delta W} = f(k_r)$  и  $k_{C_T} = f(k_r)$  носят плавно убывающий характер.

7. Значительное влияние на нагрузку сети оказывает конфигурация графиков нагрузки. С уменьшением  $\tau$  нагрузка сети увеличивается.

#### Условные обозначения

$\Delta P_0$  – потери мощности холостого хода (потери в стали);  $\Delta P_{кз}$  – потери мощности короткого замыкания;  $S$  – нагрузка (полная мощность) трансформатора;  $S_{\text{ном}}$  – номинальная мощность трансформатора;  $\Delta P_s$  – суммарные потери активной мощности в относительных единицах;  $k_{\Delta W}$  – максимальный коэффициент оптимальной загрузки трансформаторов по критерию минимума суммарных потерь электроэнергии;  $T$  – расчетный период;  $S_{\max}$  – максимальная нагрузка трансформатора;  $\tau$  – время потерь для данного графика нагрузки трансформатора;  $\Delta W_s$  – потери электроэнергии в относительных единицах;  $\bar{k}_{\Delta W}$  – опти-

мальный коэффициент загрузки в режиме средних нагрузок;  $\bar{S}$  – средняя нагрузка трансформатора;  $k_{\phi}$  – коэффициент формы графика нагрузок;  $C_T$  – стоимость трансформации электроэнергии;  $k_{C_T}$  – максимальный коэффициент оптимальной загрузки трансформаторов по критерию минимума  $C_T$ ;  $p_T$  – суммарный коэффициент отчислений от стоимости трансформатора  $K_T$ ;  $\Delta W_0$  – потери электроэнергии холостого хода;  $\beta_0$  – стоимость 1 кВт·ч  $\Delta W_0$ ;  $\Delta W_n$  – нагрузочные потери электроэнергии;  $\beta_n$  – стоимость 1 кВт·ч  $\Delta W_n$ ;  $W$  – пропуск активной энергии;  $C_{T_n}$  – значение  $C_T$  в относительных единицах;  $\bar{k}_{C_T}$  – средний коэффициент оптимальной загрузки трансформаторов по критерию минимума  $C_T$ ;  $C_n$  – стоимость передачи электроэнергии по линии;  $k_{C_n}$  – максимальный коэффициент загрузки провода по критерию минимума  $C_n$ ;  $p_n$  – суммарный коэффициент отчислений от стоимости линии  $K_n$ ;  $\Delta W_{кор}$  – потери электроэнергии на корону;  $\beta_{кор}$  – стоимость 1 кВт·ч  $\Delta W_{кор}$ ;  $I_{max}$  – нагрузка (максимальный ток) провода;  $\rho$  – удельное сопротивление материала провода;  $l$  – длина линии;  $F$  – сечение провода;  $t, л$  – индексы трансформаторов и линий;  $c$  – индекс сети;  $r_0$  – сопротивление 1 км провода.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Фурсанов М. И. Методология и практика расчетов потерь электроэнергии в электрических сетях энергосистем. – Мн.: Тэхналогія, 2000. – 247 с.
2. Фурсанов М. И., Макаревич В. В. Об оптимальных уровнях потерь в электрических сетях 6–20 кВ // Энергосбережение. Электроснабжение. Автоматизация: Сб. науч. тр. – Гомель: Гомельский государственный технический университет имени П. О. Сухого. – Гомель, 2001.
3. Фурсанов М. И. Об оптимальной загрузке дискретных параметров электрических сетей // Энергосбережение. Электроснабжение. Автоматизация: Матер. междунар. науч.-техн. конф., Гомель, 22–23 нояб. 2001 г. – Гомель: Гомельский государственный технический университет имени П. О. Сухого, 2001. – С. 40–42.
4. Костевич Л. С., Лапко А. А. Теория игр. Исследование операций: Учеб. пособие для экономических специальностей вузов. – Мн.: Выш. шк., 1981. – 231 с.
5. Будзко И. А., Зуль Н. М. Электроснабжение сельского хозяйства. – М.: Агропромиздат, 1990. – 496 с.

Представлена кафедрой  
электрических сетей

Поступила 5.12.2001