

УДК 621.3: 614.841.3

## МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ИССЛЕДОВАНИЯ ТЕПЛОВЫХ РЕЖИМОВ ПРОВОДНИКОВ С ТОКОМ МЕТОДОМ ТКС

Дмитриченко А.С.\*, к.т.н., доцент, Чайчиц Н.И.\*\*

\*Белорусский государственный технологический университет,

\*\*Командно-инженерный институт МЧС Республики Беларусь

e-mail: mikol@tut.by

*Разработана методика экспериментального определения температуры проводника с протекающим по нему переменным током через температурный коэффициент сопротивления. В основу методики положено использование зависимости сопротивления токоведущей жилы проводника от температуры. Проведены экспериментальные исследования, подтверждающие достоверность разработанной методики. Обоснована целесообразность использования данной методики для токоведущих жил малого сечения и скрытых электропроводок.*

*The designed methods of the experimental determination of the temperature of the conductor with running on him alternating current through warm-up factor of the resistance. In base of the methods as one should use to dependencies of the resistance veins of the conductor from the temperature. Experimental studies, confirming validity of the designed methods, are organized. Motivated practicability of the use given methods for veins conductor of the small section and hidden wiring.*

(Поступила в редакцию 13 июля 2010 г.)

### ВВЕДЕНИЕ

При коротких замыканиях и перегрузках в проводнике с током может выделяться значительное количество теплоты, приводящее к пожарам. Одним из способов предотвращения пожаров в электрических сетях является правильный выбор сечений токопроводящих жил. Определение допустимого тока основывается на допустимой температуре нагрева токоведущей жилы проводника.

Анализ существующих математических моделей стационарного нагрева проводника с током [1-4] показывает, что в отдельных случаях наблюдается расхождение результатов расчета и эксперимента. Причиной этого может являться несовершенство как моделирования процесса нагрева проводника, так и методик экспериментального определения температуры токоведущей жилы.

### ОБСУЖДЕНИЕ

Для определения температуры токоведущей жилы, как правило, применяется термометрический метод измерения. В данном методе можно выделить следующие недостатки:

1. Зачеканка термоэлектрических преобразователей на поверхности токоведущей жилы, как требуется по [5], изменяет процесс теплоотдачи от поверхности жилы к изоляции и дальше в окружающую среду, так как фактически нарушается конструкция (внешняя геометрия) проводника, что видно из рис. 1. Особенно это проявляется на токопроводящих жилах малого сечения ( $0,5 \div 2 \text{ мм}^2$ ), т. е. на электропроводах, которые наиболее распространены в жилых зданиях. Способ контакта термоэлектрического преобразователя с поверхностью также приводит к различным результатам измерения, что подтверждается [6].

2. При измерении температуры токоведущих жил, по которым протекает электрический ток свыше 100 А, дополнительную погрешность вносит влияние электромагнитных наводок на термоэлектрический преобразователь со стороны токоведущей жилы.

3. Существующие термоэлектрические преобразователи, имеющие гальваническую развязку по цепи измерения (то есть относительно защищенные от электромагнитных наводок), имеют диаметр измерительного электрода не менее 2 мм, в то время как диаметр токоведущей жилы, например, сечением  $1,5 \text{ мм}^2$  равен 1,35 мм. Измерения при таких соотношениях измеряемого объекта и измерительного электрода являются малодостоверными, так как невозможно обеспечить требуемый контакт термопары с поверхностью токоведущей жилы.



**Рисунок 1 – Крепление термоэлектрического преобразователя к токоведущей жиле методом зачеканки по СТБ 1951 [5]**

Указанные недостатки устраняются в разработанной методике, которая основывается на использовании зависимости сопротивления проводника от его температуры:

$$R_0 = R_0 [1 + \beta(T - T_0)], \quad (1)$$

где  $R, R_0$  – сопротивление проводника, соответственно, при температуре  $T, T_0$ ;

$\beta$  – температурный коэффициент сопротивления (ТКС).

Из (1) следует соотношение для определения текущей температуры проводника:

$$T = T_0 + \frac{R - R_0}{R_0 \beta}. \quad (2)$$

В рассматриваемом методе ТКС температура определяется косвенным образом – путем измерения тока и падения напряжения на рассматриваемом участке цепи и последующего расчета по закону Ома его сопротивления. При этом пренебрегают изменением температуры по сечению проводника.

Дополнительным параметром в предложенном методе является температурный коэффициент сопротивления материала токоведущей жилы. Анализ отечественной и зарубежной нормативной документации показывает существенный разброс значений ТКС. Так, например, для меди указанный параметр по разным источникам лежит в интервале  $0,038 \div 0,043 \text{ град}^{-1}$  (относительное отклонение более 10 %), а для алюминия –  $0,042 \div 0,049 \text{ град}^{-1}$  (относительное отклонение более 16 %). Причиной расхождения справочных данных может являться использование различных сплавов меди и алюминия при определении ТКС. Следовательно, для определения температуры предложенным методом необходимо предварительно определить ТКС исследуемого проводника.

ТКС определялся по следующей методике. Исследуемый проводник предварительно помещался в термостат (рис. 2, 3).

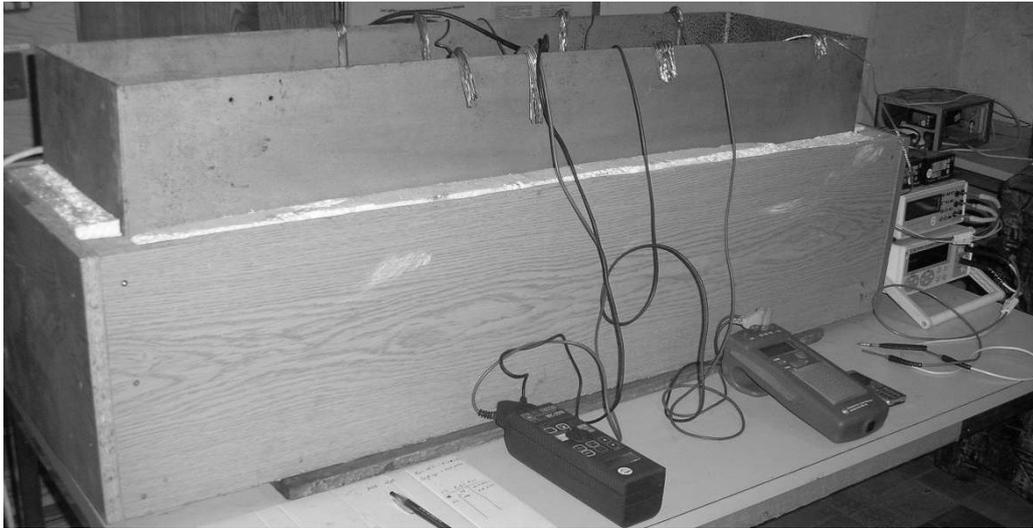


Рисунок 2 – Общий вид испытательной установки по определению ТКС

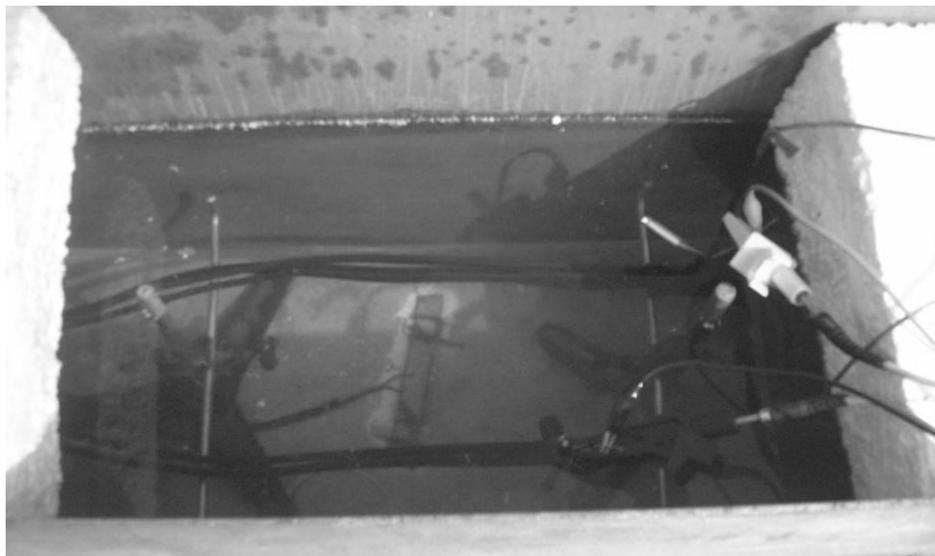


Рисунок 3 – Укладка испытательного образца в камеру и подключение к измерительной цепи

При различных температурах жидкости в термостате по проводнику пропускался постоянный электрический ток плотностью не более  $0,5 \text{ А/мм}^2$ , что соответствовало требованиям [7]. Данная величина тока практически не приводит к изменению температуры электропроводника. Для ограничения величины силы тока через испытуемый образец до заданной величины использовался балластный реостат с диапазоном регулировки сопротивления  $0\text{--}30 \text{ Ом}$ . Сопротивление реостата устанавливалось таким образом, чтобы величина силы тока, проходящего через образец в процессе испытания, не превышала  $0,5 \text{ А/мм}^2$ .

Сопротивление проводника рассчитывалось как отношение падения напряжения на измеряемом образце к величине, протекающей через образец силы тока. Для получения достоверных данных по току и напряжению использовались измерительные приборы с классом точности  $0,1$  [7].

Численное значение ТКС определялось по следующему соотношению:

$$\beta = \frac{R_i - R_0}{R_0(T_i - T_0)}, \quad (3)$$

где  $R_i, T_i$  – текущие значения сопротивления и температуры.

Результаты расчета приведены в табл. 1.

Таблица 1 – Экспериментальные значения температурного коэффициента сопротивления токоведущих жил проводников

Наименование проводника	Температура испытания, °С	Удельное сопротивление, мОм/м	Расчетное значение ТКС $\beta$ , 1/°С
ВВГп 3×1,5 (ПВ1 1,5)	20	11,5664	0,003968
	87,5	14,6642	
АВВГп 2×2,5 (АПВ1 2,5)	21	11,6034	0,004224
	91,1	15,0416	
ВВГ 4×2,5 (ПВ1 2,5)	20	7,2614	0,003906
	84,8	9,1202	
ПВ3 1×6	20,5	2,8988	0,004105
	86,3	3,6818	
АВВГ 3×6 (АПВ1 6)	20	4,6515	0,004063
	86,5	5,9083	
АВВГ 4×10 (АПВ1 10)	20,5	3,0284	0,004124
	85,6	3,6277	
АПВ1 1×16	20,46	1,9639	0,004055
	90,65	2,5229	
АПВ1 1×50	20,46	0,58156	0,004184
	90,9	0,76581	

Следует отметить, что для повышения точности измерения ТКС по проводнику пропускался постоянный ток. В реальных условиях электропроводники жилых зданий питаются от электросети переменного тока. В этом случае увеличивается полное сопротивление проводника за счет реактивной составляющей.

Сопротивление жилы переменному току на единицу длины во всех случаях, за исключением кабелей в трубопроводах, рассчитывается по методике, изложенной в [8]:

$$R = R'(1 + y_s + y_p), \quad (4)$$

где  $R$  – сопротивление жилы переменному току, Ом/м;

$R'$  – сопротивление жилы постоянному току, Ом/м;

$y_s$  – коэффициент поверхностного эффекта;

$y_p$  – коэффициент эффекта близости.

Коэффициент поверхностного эффекта определяется по формуле

$$y_s = \frac{x^4}{192 + 0,8x^4}, \quad (5)$$

где  $x^2 = \frac{8\pi f}{R'} \cdot 10^{-7}$ ;

$f$  – частота переменного тока, Гц.

Коэффициент эффекта близости для двух одножильных проводников определяется по формуле

$$y_p = \frac{2,9x^4}{192 + 0,8x^4} \left(\frac{d_{ж}}{L}\right)^2, \quad (6)$$

где  $d_{ж}$  – диаметр токоведущей жилы;

$L$  – расстояние между осями жил (при проведении экспериментальных исследований  $L$  было принято равным 0,1 м).

Общее увеличение сопротивления переменному току составит:

$$y = y_s + y_p = \frac{x^4}{192 + 0,8x^4} \left(1 + \frac{2,9d_{ж}^2}{L^2}\right). \quad (7)$$

Результаты расчета для образцов, представленных в табл. 1, приведены в табл. 2.

Таблица 2 – Результаты расчета удельного сопротивления переменному току

Наименование проводника	Температура, $T$ , °C	$R'$ , мОм/м	Диаметр жилы, м	$y_s$	$y_p$	$R$ , мОм/м	$\Delta$ , %
ВВГп 3×1,5 (ПВ1 1,5)	20	11,5671	0,00345	0,00006	0,0000002	11,5678	0,006
	87,5	14,6648	0,00345	0,00004	0,0000001	14,6654	0,004
АВВГп 2×2,5 (АПВ1 2,5)	21	11,604	0,00175	0,00006	0,0000001	11,6047	0,006
	91,1	15,0422	0,00175	0,00004	0,0000000	15,0427	0,004
ВВГ 4×2,5 (ПВ1 2,5)	20	7,2625	0,00175	0,00016	0,0000001	7,2636	0,016
	84,8	9,1386	0,00175	0,00010	0,0000001	9,1395	0,010
ПВ3 1×6	20,5	2,9017	0,0028	0,00098	0,0000022	2,9045	0,098
	86,3	3,684	0,0028	0,00061	0,0000014	3,6862	0,061
АВВГ 3×6 (АПВ1 6)	20	4,6133	0,00275	0,00039	0,0000008	4,6151	0,039
	86,5	5,9097	0,00275	0,00024	0,0000005	5,9111	0,024
АВВГ 4×10 (АПВ1 10)	20,5	3,0311	0,00345	0,00089	0,0000031	3,0338	0,090
	85,6	3,8434	0,00345	0,00056	0,0000019	3,8455	0,056
АПВ1 1×16	20,46	1,9681	0,00425	0,00212	0,0000111	1,9723	0,213
	90,65	2,5262	0,00425	0,00129	0,0000067	2,5295	0,129
АПВ1 1×50	20,46	0,5954	0,0078	0,02278	0,0004019	0,6092	2,265
	90,9	0,7764	0,0078	0,01350	0,0002381	0,7871	1,355

Как видно, влиянием переменного тока на сопротивление проводника при сечениях до 16 мм<sup>2</sup>, характерных для жилых зданий, можно пренебрегать.

Для оценки достоверности разработанной методики был проведен сравнительный анализ метода ТКС и терморпарного метода [5].

Экспериментальные исследования проводниковой продукции проводились на базе испытательной установки ТВХ, которая предназначена для проведения испытаний проводов и кабелей по определению токовременных характеристик пожарной опасности, определяемых в соответствии с СТБ 1951-2009 в диапазоне испытательных токов до 1500 А. Дополнительно установка была оснащена оборудованием, регистрирующим в автоматическом режиме результаты экспериментальных исследований.

Укрупненная структурная схема испытательной установки приведена на рис. 4. Расположение испытуемого образца проводникового изделия с подключенными измерительными приборами приведено на рис. 5.

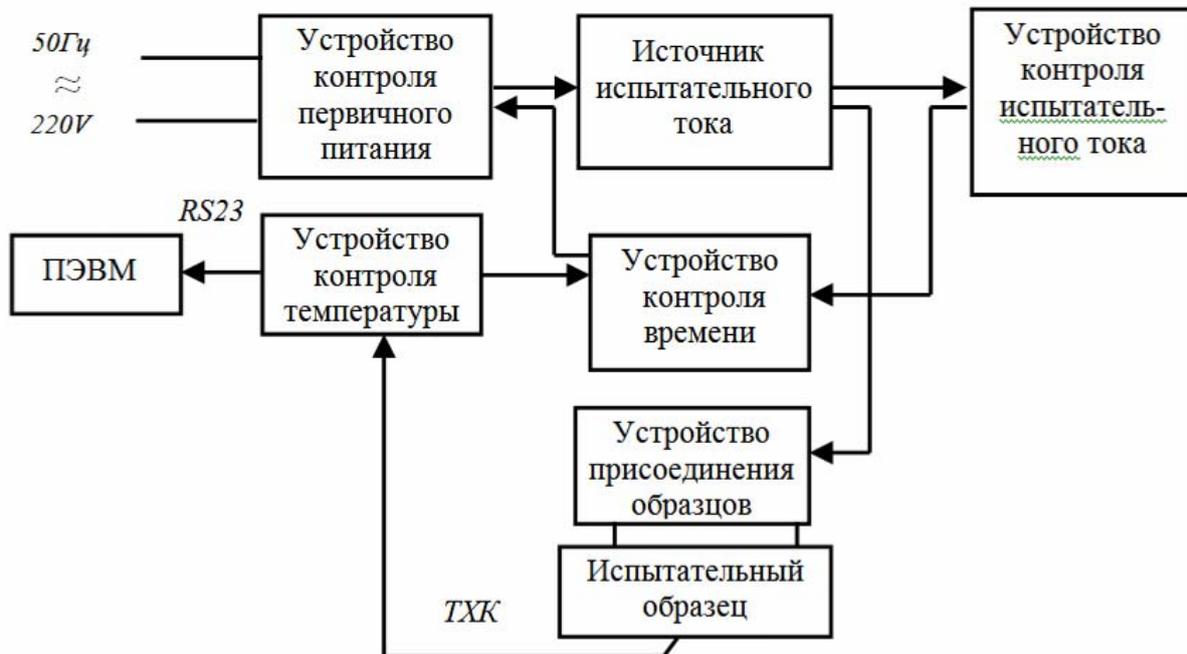


Рисунок 4 – Структурная схема испытательной установки

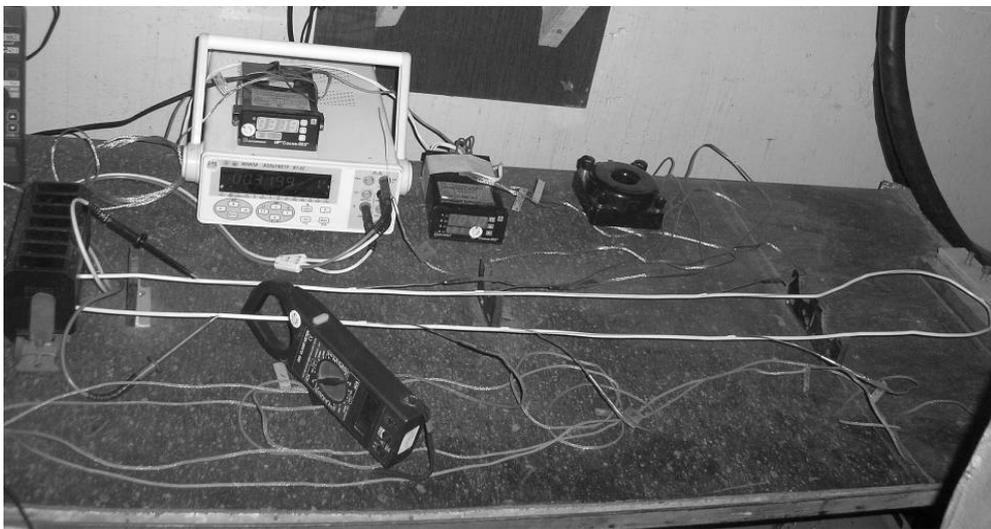


Рисунок 5 – Расположение испытуемого образца проводникового изделия с подключенными измерительными приборами

Питание установки ТВХ осуществлялось от однофазной сети переменным напряжением 220 В. Точность измерения испытательного тока – не хуже 1 %. Количество измеряемых каналов по температуре – 4. Дискретность отсчета температуры – 1 °С.

*Средства измерений и измерительное оборудование, применявшиеся при проведении испытаний, имели действующие аттестаты, свидетельства о поверке или калибровке или клейма.*

Дополнительно установка была укомплектована устройством считывания и запоминания информации (ПЭВМ) по измеряемой температуре с использованием протокола обмена данными по каналам связи RS232.

При испытаниях исследовались проводники сечением  $2.5 \div 16 \text{ мм}^2$ , что обеспечивало возможность достижения необходимого контакта между термопарой и исследуемым проводником. Для повышения точности измерения термопара крепилась к проводнику в соответствии с [6].

Результаты экспериментальных исследований приведены на рис. 6. Линии соответствуют результатам расчета по методу ТКС, маркеры – результатам эксперимента по термопарному методу.

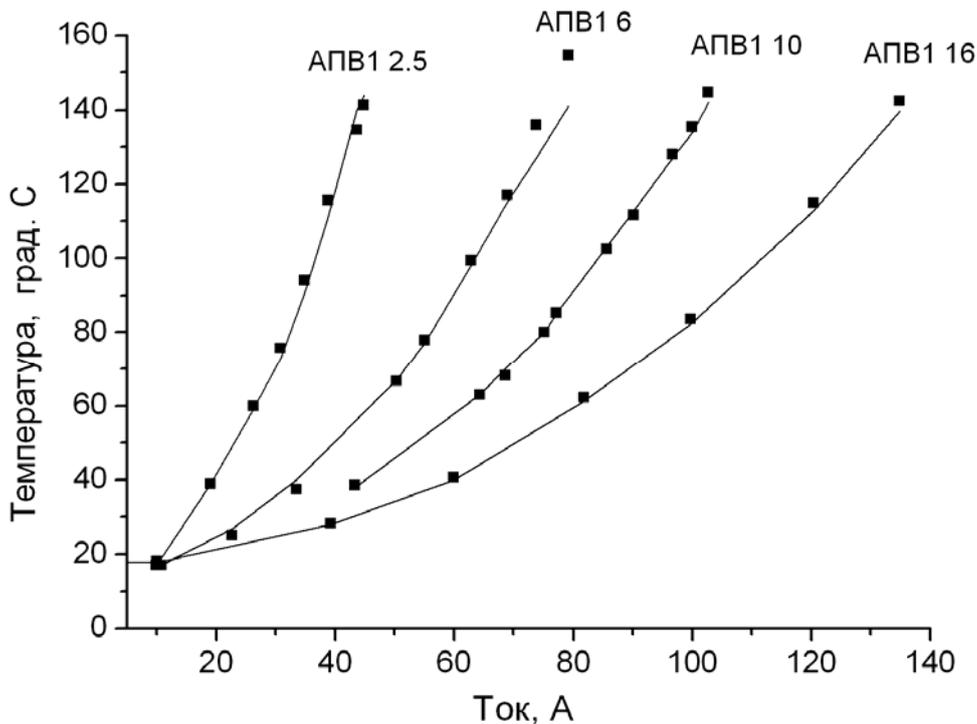


Рисунок 6 – Зависимость температуры провода АПВ от протекающего тока

Значения температур, полученных методом ТКС и термопарным методом для испытанных электропроводников сечением  $2,5\text{--}16 \text{ мм}^2$ , практически совпадают. Максимальное отклонение лежит в пределах до 3,2 % в диапазоне температур до  $120 \text{ }^\circ\text{C}$  и до 4 % в диапазоне температур до  $150 \text{ }^\circ\text{C}$ .

### ВЫВОД

Использование метода ТКС допустимо при исследовании температурных характеристик проводников, и наиболее целесообразно при жилах небольшого сечения. Данный метод также можно использовать при определении температур токоведущих жил проводников скрытых электропроводок, при условии, что в процессе измерения будет возможность определения протекающего тока через проводник и падение напряжения на нем.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Коваль, О.М. Математичне моделювання нагріву провідників електричним струмом / О.М. Коваль, Д.В. Столяр, О.І. Дворянин. – Львів, 2006.
2. Смелков, Г.И. Пожарная опасность электроустановок / Г.И. Смелков // Пожарная профилактика в электроустановках : сб. науч. тр. – Вып. 1. – М. : ВНИИПО, 1979. – С. 3–33.

3. Отчет о научно-исследовательской работе «Разработка математической модели токовременных характеристик электропроводок, электронных таблиц и номограмм». – Минск, 2006.
4. Мисюкевич, Н.С. Автоматизация предотвращения пожаров кабельных сооружений и электрических проводок : диссертация / Н.С. Масюкевич. Минск, 1998.
5. СТБ 1951-2009 Кабели и провода электрические. Показатели пожарной опасности и методы испытаний.
6. Махров, В.В. Учебное пособие по курсу основы экспериментальной теплофизики: Методы исследования теплофизических свойств веществ / В.В. Махров. – М. : Московск. энергетич. ин-т, 1987. – 84 с.
7. ГОСТ 7229-76\* Кабели, провода и шнуры. Метод определения электрического сопротивления токопроводящих жил и проводников.
8. ГОСТ Р МЭК 60287-1-1-2009 Кабели электрические. Расчет номинальной токовой нагрузки. Часть 1-1 Уравнения для расчета номинальной токовой нагрузки (100 %-ный коэффициент нагрузки) и расчет потерь. Общие положения.