

науч. тр. фа-та предпринимательства и управления БГАТУ / А.А. Зеленовский, В.П. Степанцов; редкол. И.М. Морозова и [др.]. – Мн.: БГАТУ, 2012. – 262 с.

2. Методические рекомендации по составлению технико-экономических обоснований для энергосберегающих мероприятий. – Мн.: Белэнергосбережение, 2003. – 60 с.

3. Козловская, В.Б. Электрическое освещение: справоч. / В.Б. Козловская, В.Н. Радкевич, В.Н. Сацукевич. – 2-е изд. – Мн.: Техноперспектива, 2008. – 271 с.

4. Степанцов, В.П. Светотехника: учеб. пособ. / В.П. Степанцов, Р.И. Кустова. – Минск, БГАТУ, 2012. – 568 с.: ил.

5. Лоскутов, А.Б. Методика расчета экономии электроэнергии в действующих осветительных установках помещений при проведении энергетического аудита /

А. Б. Лоскутов, А. С. Шевченко [Электронный ресурс]. – 2012. – Режим доступа: <http://www.marketelectro.ru>. – Дата доступа: 19.10.2012.

6. Айзенберг, Ю.Б. Справочная книга по светотехнике / Ю.Б. Айзенберг. – М.: Энергоатомиздат, 1995. – 528 с.: ил.

7. Естественное и искусственное освещение. Строительные нормы проектирования: ТКП 45-2.04-153-2009. – Мн.: Мин-во архитектуры и строительства, 2009. – 59 с.

8. Канакин, Н.С. Техничко-экономические вопросы электрификации сельского хозяйства / Н.С. Канакин, Ю.М. Коган. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 192 с.

9. Кунгс, Я.А. Автоматизация управления электрическим освещением / Я.А. Кунгс. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 112 с.

УДК 621.365

ПОСТУПИЛА В РЕДАКЦИЮ 27.11.2012

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МЕТОДА ЭЛЕКТРОТЕПЛОВОЙ АНАЛОГИИ ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ ТЕПЛОПЕРЕДАЧИ ЭЛЕКТРИЧЕСКИМИ ЦЕПЯМИ С НЕЛИНЕЙНЫМИ РЕЗИСТИВНЫМИ ЭЛЕМЕНТАМИ

А.И. Шакирин, канд. техн. наук, доцент (БГАТУ)

### Аннотация

*Приведена методика моделирования стационарных процессов теплопередачи в изотропных материалах с помощью электрических цепей с нелинейными резистивными элементами, позволяющая учесть нелинейную зависимость коэффициента теплопроводности от температуры. Предложенная методика позволяет повысить точность моделирования процессов теплопередачи, особенно при использовании современных материалов.*

*A method for modeling steady-state heat transfer processes in isotropic materials using electrical circuits with nonlinear resistive elements, which allows taking into account the nonlinear dependence of thermal conductivity on temperature, is proposed in the article. The proposed method allows more accurate modeling of heat transfer, especially when using modern materials.*

### Введение

Повышение качества, надежности и долговечности традиционных и вновь создаваемых строительных, конструкционных, тепло- и электроизоляционных материалов требуют совершенствования известных и создания новых методов расчета.

При расчете стационарных процессов теплопередачи в изотропных материалах часто применяют метод электротепловой аналогии [1-3], который основан на использовании закона теплопроводности Фурье и применении методов расчета резистивных электрических цепей [3]. При использовании этой методики предполагается, что коэффициент теплопроводности является постоянной величиной, а закон Фурье не учитывает инерционность процесса теплопередачи.

Для большинства материалов зависимость коэффициента теплопроводности от температуры доста-

точно слабая, что позволяет вычислить среднее значение коэффициента теплопроводности в заданном интервале температур и оперировать им как постоянной величиной, что и сделано в работах [1, 3].

Однако для некоторых материалов и веществ зависимость коэффициента теплопроводности от температуры становится принципиальной [2], и поэтому формальное применение метода электротепловой аналогии без учета зависимости коэффициента теплопроводности от температуры снижает точность моделирования процессов теплопередачи, особенно при использовании современных материалов [3].

Целью настоящей работы является повышение точности моделирования процессов теплопередачи путем применения метода расчета электрических цепей [4, 5], который позволяет одновременно учесть нелинейные и инерционные свойства цепи.

**Основная часть**

Для упрощения задачи моделирования теплопередачи заменяют полную систему уравнений теплообмена на электрическую аналоговую модель, пользуясь методом электротепловой аналогии [1, 2].

В основе метода электротепловой аналогии лежит то обстоятельство, что математическая модель процесса передачи тепла через материалы и математическая модель процесса протекания тока в электрической цепи (с известными ограничениями) формально описывается одним и тем же выражением.

Так, плотность стационарного теплового потока  $q$  через плоскую стенку хорошо моделируется соотношением (закон Фурье)

$$q = \lambda \cdot \Delta t. \quad (1)$$

Величина тока  $i$  (А), протекающего через электропроводящую среду в установившемся режиме, выражается соотношением (закон Ома)

$$i = g \cdot \Delta u. \quad (2)$$

В этих выражениях  $\lambda$  и  $g$  – коэффициент теплопроводности (Вт/(м·К)) и электрическая проводимость (А/В), а  $\Delta t$  и  $\Delta u$  – перепады температур (град) и электрических потенциалов (В) соответственно.

Выражения (1) и (2), являясь математическими моделями процесса передачи тепла и процесса протекания электрического тока, позволяют применять для решения многих задач теплотехники известные методы расчета резистивных электрических цепей с сосредоточенными параметрами, основанные, в частности, на законах Кирхгофа.

В работе [2] отмечено, что для большинства материалов зависимость коэффициента теплопроводности от температуры достаточно слабая, что позволяет пользоваться усредненным значением коэффициента теплопроводности в заданном интервале температур, как это сделано, например, в работах [1, 3]. В тех случаях, когда зависимость коэффициента теплопроводности от температуры  $\lambda = f(T)$  игнорировать нельзя, ее приближенно аппроксимируют линейной функцией вида:  $\lambda = \lambda_0 [1 + b(T - T_0)]$  или  $\lambda = \beta + kT$ , либо экспоненциальной функцией вида:  $\lambda = b \cdot e^{kT}$  [2].

Таким образом, в общем случае имеет место нелинейная зависимость  $\lambda = f(T)$ , поэтому в электрической схеме, которой заменяется схема теплопередачи при использовании метода электротепловой аналогии, обычные проводимости  $g$  необходимо заменить нелинейными  $g = f(U)$ . Как уже отмечалось, зависимость  $\lambda = f(T)$  имеет слабо выраженную нелинейность, поэтому и электрические цепи с нелинейными проводимостями  $g = f(U)$  можно считать цепями с несущественной нелинейностью.

Одним из методов анализа нелинейных цепей является метод, основанный на представлении связи воздействия  $x$  и отклика на него  $y(t)$  в виде функционального ряда Вольтерра [4–6]:

$$y(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} k(\tau)x(t-\tau)d\tau + \\ + \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} k(\tau_1, \tau_2)x(t-\tau_1)x(t-\tau_2)d\tau_1d\tau_2 + \\ + \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} k(\tau_1, \tau_2, \tau_3)x(t-\tau_1)x(t-\tau_2)x(t-\tau_3)d\tau_1d\tau_2d\tau_3 + \dots + \\ + \int_{-\infty}^{+\infty} \dots \int_{-\infty}^{+\infty} k(\tau_1, \tau_2, \dots, \tau_k) \prod_{i=1}^k x(t-\tau_i)d\tau_i + \dots, \quad (3)$$

где  $x$  и  $y$  – соответственно входное воздействие и отклик цепи;  $k(\tau_1, \tau_2, \dots, \tau_k)$  – многомерная функция (ядро)  $k$ -го порядка, характеризующая как линейные, так и нелинейные свойства цепи.

Выражение (3) преобразуется по Лапласу в пространстве многих комплексных переменных  $p_i - (p_1, p_2, \dots, p_k)$ , соответствующих  $\tau_i - (\tau_1, \tau_2, \dots, \tau_k)$ , и в операторной форме запишется следующим образом:

$$Y(p_1, p_2, \dots, p_k) = \sum_{k=1}^{\infty} K(p_1, p_2, \dots, p_k) \prod_{i=1}^k X(p_i), \quad (4)$$

где  $Y(p_1, p_2, \dots, p_k)$  – изображение отклика;

$K(p_1, p_2, \dots, p_k)$  – изображение ядра  $k$ -го порядка, характеризующего индивидуальные особенности цепи;

$X(p_i)$  – изображение входного воздействия.

Описание электрической цепи с помощью ряда Вольтерра было впервые исследовано Н. Винером [7], поэтому класс цепей этого вида называется классом Вольтерра – Винера.

Описание электрических цепей с помощью рядов Вольтерра имеет следующие достоинства:

1. Явная связь отклика и воздействия (как во временной, так и в операторной форме), что не характерно для описания свойств цепи с помощью системы дифференциальных уравнений.

2. Одновременный учет как линейных, так и нелинейных свойств цепи.

3. В тех случаях, когда влиянием инерции можно пренебречь (для резистивной цепи), ряд Вольтерра преобразуется в известный степенной ряд, широко используемый для анализа электрических цепей

$$y(x) = k_0 + k_1x + k_2x^2 + k_3x^3 + \dots + k_ix^i + \dots \quad (5)$$

На практике часто используют разновидность разложения (5) в виде ряда Тейлора, для которого  $k_0 = y(x_0)$ ,  $k_1 = y'(x_0)/1!$ ,  $k_2 = y''(x_0)/2!$ , ...,  $k_i = y^{(i)}(x_0)/i!$ , где  $x_0$  – точка функции (5), относительно которой осуществляется разложение.

Особенностью ряда Тейлора является единственность способа представления функции, в то время как применение степенных полиномов других видов дает неединственные результаты, а коэффици-

енты  $k_i$  полинома (5) зависят от способа их определения и области входного воздействия.

4. Удобство использования аппарата рядов Вольтерра при анализе цепей с малой нелинейностью [4, 5]. Это объясняется линеаризацией и алгебраизацией системы нелинейных дифференциальных уравнений цепи при использовании преобразования Лапласа (4), что существенно облегчает моделирование благодаря применению методов анализа линейных цепей.

В практике расчета электрической цепи широко используется представление как всей цепи в целом, так и ее элементов с помощью формализованных понятий – двухполюсников и многополюсников.

Простейшие двухполюсные физические модели представляются тремя цепями: резистивной, емкостной и индуктивной (рис. 1).

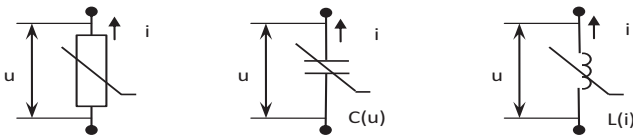


Рисунок 1. Виды нелинейных двухполюсных элементов

Приложенные к этим элементам токи  $i$  и напряжения  $u$  связаны зависимостями:

$$i = f(u) \text{ или } u = f(i) - \text{для резистивной цепи;} \quad (6)$$

$$i = C(u) \frac{du}{dt} - \text{для емкостной цепи;}$$

$$u = L(i) \frac{di}{dt} - \text{для индуктивной цепи,}$$

где  $C(u)$  и  $L(i)$  – соответственно дифференциальная емкость и дифференциальная индуктивность, в общем случае, нелинейные.

В настоящей работе ограничимся рассмотрением резистивной цепи и представим зависимости (6) в окрестности исходной рабочей точки в виде рядов Тейлора:

$$i = \sum_{n=0}^m \frac{1}{n!} \frac{d^n i}{du^n} u^n = \sum_{n=0}^m G^{(n)} u^n ;$$

$$u = \sum_{n=0}^m \frac{1}{n!} \frac{d^n u}{di^n} i^n = \sum_{n=0}^m R^{(n)} i^n ,$$

$$\text{где } G^{(0)}=G; R^{(0)}=R.$$

Возможно разложение нелинейных функций (6) в степенные ряды других видов, однако эти разложения не единственны, а коэффициенты рядов зависят от области воздействия.

Для цепей с нелинейностью резистивного характера ряд Вольтерра преобразуется в степенной ряд вида

$$y = K^{(1)}x + K^{(2)}x^2 + K^{(3)}x^3 + \dots, \quad (7)$$

где  $y$  и  $x$  соответственно, отклик и воздействие на электрическую цепь.

Методика определения  $K^{(1)}$ ,  $K^{(2)}$  и  $K^{(3)}$  передаточной характеристики (7) электрической цепи следующая [4]:

1. Составляется система уравнений анализируемой цепи, основанная на законах Кирхгофа.

2. Все свободно стоящие в уравнениях токи и напряжения заменяются коэффициентами степенных рядов соответствующих порядков, при этом исходная система уравнений распадается на три подсистемы относительно искомого члена ряда (7): линейного  $K^{(1)}$ , квадратичного  $K^{(2)}$  и кубического  $K^{(3)}$ .

3. Входное воздействие  $x$  заменяется единицей для линейной подсистемы и нулем для подсистем высших порядков.

4. Компонентные уравнения, связывающие токи и напряжения, приложенные к резистивным элементам цепи (линейным и нелинейным), подставляются из табл.1.

Величины параметров нелинейных резистивных элементов  $G, G', G'', R, R', R''$  находятся по известным вольт-амперным (ампер-вольтовым) характеристикам нелинейных элементов. Если аналитические выражения соответствующих характеристик неизвестны, то параметры можно определить экспериментально путем использования соответствующих устройств, например [8].

5. Подсистемы решаются относительно коэффициентов ряда искомого напряжения или тока (7).

Для иллюстрации предложенной методики рассмотрим пример расчета теплообмена в помещении с

Таблица 1. Компонентные уравнения

Вид компонента	Уравнение характеристики	Компонентное уравнение	Примечание
Резистивный нелинейный	$i = f(u)$	$K_i^{(1)} - GK_u^{(1)} = 0$ $K_i^{(2)} - GK_u^{(2)} = \alpha$ $K_i^{(3)} - GK_u^{(3)} = \beta$	$\alpha = G' [K_u^{(1)}]^2$ $\beta = G'' [K_u^{(1)}]^3 + 2G'K_u^{(1)}K_u^{(2)}$ $i = Gu + G'u^2 + G''u^3$
Резистивный нелинейный	$u = f(i)$	$K_u^{(1)} - RK_i^{(1)} = 0$ $K_u^{(2)} - RK_i^{(2)} = \gamma$ $K_u^{(3)} - RK_i^{(3)} = \delta$	$\gamma = R' [K_i^{(1)}]^2$ $\delta = R'' [K_i^{(1)}]^3 + 2R'K_i^{(1)}K_i^{(2)}$ $u = Ri + R'i^2 + R''i^3$
Резистивный линейный	$i = f(u)$	$K_i^{(1)} - GK_u^{(1)} = 0$ $K_i^{(2)} - GK_u^{(2)} = 0$ $K_i^{(3)} - GK_u^{(3)} = 0$	—
Резистивный линейный	$u = f(i)$	$K_u^{(1)} - RK_i^{(1)} = 0$ $K_u^{(2)} - RK_i^{(2)} = 0$ $K_u^{(3)} - RK_i^{(3)} = 0$	—

использованием электротепловой аналогии [1]. Для упрощения расчетных выражений представим модель теплообмена электрической цепью, в которой для моделирования нелинейной зависимости коэффициента теплопроводности от температуры  $\lambda = f(T)$  используются нелинейные резистивные элементы  $R_1$  и  $R_2$ , как показано на рис. 2.

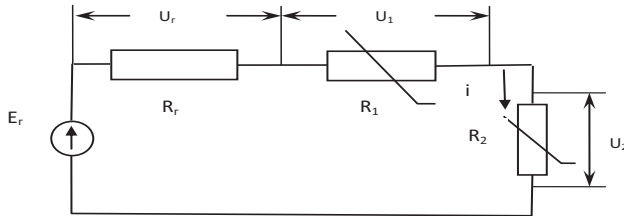


Рисунок 2. Модель теплообмена в виде нелинейной электрической цепи

Представим нелинейную зависимость тока  $i=f(u)$ , который протекает через элементы  $R_1$  и  $R_2$ , в виде ряда Тейлора, соответственно

$$i = G_1 u_1 + G_1^{(1)} u_1^2 + G_1^{(2)} u_1^3 \quad \text{и} \quad i = G_2 u_2 + G_2^{(1)} u_2^2 + G_2^{(2)} u_2^3.$$

Система уравнений, составленная по законам Кирхгофа для этой цепи, запишется следующим образом:

$$\begin{cases} u_r + u_1 + u_2 - E_r = 0, \\ i = G_1 u_1, \\ i = G_2 u_2, \\ u_r = R_r i. \end{cases} \quad (8)$$

Используя приведенную выше последовательность действий и табл. 1, составим соответствующие подсистемы. Тогда выходное напряжение будем искать в виде

$$u_2 = K_{u_2}^{(1)} E_r + K_{u_2}^{(2)} E_r^2 + K_{u_2}^{(3)} E_r^3. \quad (9)$$

Подсистема первого порядка:

$$\begin{cases} K_{u_r}^{(1)} + K_{u_1}^{(1)} + K_{u_2}^{(1)} - 1 = 0, \\ K_i^{(1)} = G_1 K_{u_1}^{(1)}, \\ K_i^{(1)} = G_2 K_{u_2}^{(1)}, \\ K_{u_r}^{(1)} = R_r K_i^{(1)}, \end{cases}$$

откуда

$$K_i^{(1)} = 1/L; \quad K_{u_1}^{(1)} = R_1/L; \quad K_{u_2}^{(1)} = R_2/L; \quad L = R_r + R_1 + R_2.$$

Подсистема второго порядка:

$$\begin{cases} K_{u_r}^{(2)} + K_{u_1}^{(2)} + K_{u_2}^{(2)} = 0, \\ K_i^{(2)} = G_1 K_{u_1}^{(2)} + \alpha_1, \\ K_i^{(2)} = G_2 K_{u_2}^{(2)} + \alpha_2, \\ K_{u_r}^{(2)} = R_r K_i^{(2)}, \end{cases}$$

где  $\alpha_1 = G_1^{(1)} [K_{u_1}^{(1)}]^2$ ;  $\alpha_2 = G_2^{(1)} [K_{u_2}^{(1)}]^2$ , откуда

$$K_i^{(2)} = (\alpha_1 R_1 + \alpha_2 R_2) / L;$$

$$K_{u_1}^{(2)} = (K_i^{(2)} - \alpha_1) R_1; \quad K_{u_2}^{(2)} = (K_i^{(2)} - \alpha_2) R_2.$$

Подсистема третьего порядка:

$$\begin{cases} K_{u_r}^{(3)} + K_{u_1}^{(3)} + K_{u_2}^{(3)} = 0, \\ K_i^{(3)} = G_1 K_{u_1}^{(3)} + \beta_1, \\ K_i^{(3)} = G_2 K_{u_2}^{(3)} + \beta_2, \\ K_{u_r}^{(3)} = R_r K_i^{(3)}, \end{cases}$$

где  $\beta_1 = G_1^{(2)} [K_{u_1}^{(1)}]^3 + 2G_1^{(1)} K_{u_1}^{(1)} K_{u_1}^{(2)}$ ;

$\beta_2 = G_2^{(2)} [K_{u_2}^{(1)}]^3 + 2G_2^{(1)} K_{u_2}^{(1)} K_{u_2}^{(2)}$ , откуда

$$K_i^{(3)} = (\beta_1 R_1 + \beta_2 R_2) / L; \quad K_{u_1}^{(3)} = (K_i^{(3)} - \beta_1) R_1;$$

$$K_{u_2}^{(3)} = (K_i^{(3)} - \beta_2) R_2.$$

Таким образом, полученные значения коэффициентов  $K_{u_2}^{(1)}$ ,  $K_{u_2}^{(2)}$  и  $K_{u_2}^{(3)}$  позволяют представить выходное напряжение (9) с точностью до трех членов ряда, что в большинстве случаев достаточно для моделирования теплопередачи с учетом зависимости коэффициента теплопроводности от температуры.

### Заключение

На основе метода электротепловой аналогии предложена методика моделирования стационарных процессов теплопередачи в изотропных материалах, которая за счет использования нелинейных резистивных элементов позволяет учесть нелинейный характер зависимости коэффициента теплопроводности от температуры. Это позволяет повысить точность моделирования процессов теплопередачи, особенно при использовании современных материалов. Для моделирования процессов теплопередачи, которые представляются сложными электрическими цепями, алгоритмы предложенной методики могут быть реализованы в виде компьютерных программ. Методика представляется перспективной, так как есть основания полагать, что ее возможности могут быть использованы для моделирования квазистационарных процессов теплопередачи, которые моделируются малоинерционными электрическими цепями.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Богословский, В. Н. Строительная теплофизика / В. Н. Богословский. – 2-е изд., пер. и доп. – М.: Высшая школа, 1982. – 416 с.
2. Фокин, В. М. Основы технической теплофизики / В. М. Фокин, Г. П. Бойков, Ю. В. Видин. – М.: Машиностроение, 2004. – 172 с.
3. Кожухов, В. А. Моделирование тепловых процессов резистивными схемами / В.А. Кожухов // Вестник Красноярского государственного аграрного университета, 2010. – № 4. – С. 150-155.
4. Проектирование усилительных устройств (на интегральных микросхемах): учеб. пособие для радиотехнических специальностей вузов / Б. М. Богданович. – М.: Радио и связь, 1987. – 128 с.



нович [и др.]; под ред. Б. М. Богдановича. – Мн.: Выш. школа, 1980. – 208 с., ил.

5. Богданович, Б. М. Нелинейные искажения в приемно-усилительных устройствах / Б. М. Богданович. – М.: Связь, 1980. – 280 с., ил.

6. Пупков, К. А. Функциональные ряды в теории нелинейных систем / К. А. Пупков, В. И. Капалин, А. С. Ющенко. – М.: Наука, 1976. – 448 с., ил.

7. Винер, Н. Нелинейные задачи в теории случайных процессов / Н. Винер. – М.: ИЛ, 1961. – 79 с.

8. Устройство для измерения передаточных функций Вольтерра нелинейных четырехполосников: а. с. 586403 СССР, МКИ G 01R 29/02 / Б. М. Богданович, В. П. Дорошев, С. С. Позняк, Л. А. Черкас, А. И. Шакирин. – № 2054383/18-21 4; заявл. 16.08.74; опубл. 30.12.77 // Бюл. № 48. – С. 3.

УДК 621.316.1

ПОСТУПИЛА В РЕДАКЦИЮ 24.09.2013

## АНАЛИЗ И ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ОТКАЗОВ В РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ СЕТЯХ

И.В. Протосовицкий, канд. техн. наук, доцент, А.И. Зеленкевич, ст. преподаватель,  
Д.А. Кулаковский, аспирант (БГАТУ); А.И. Науменко, начальник службы  
распределительных сетей (РУП «Витебскэнерго»)

### Аннотация

*В статье приведен анализ и прогнозирование отказов в распределительных сетях Республики Беларусь на примере Витебских электрических сетей.*

*The analysis and forecasting of refusals of distributive networks of the Republic of Belarus by way of example of Vitebsk electric networks are given in the article.*

### Введение

Функционирование и развитие АПК республики невозможно без качественной и надежной работы сельских электрических сетей (СЭС), которые являются заключительным звеном при обеспечении сельскохозяйственных потребителей электроэнергией. Основное отличие сельскохозяйственных электрических сетей от промышленных заключается в том, что они находятся в непосредственном взаимодействии с конкретным сельскохозяйственным потребителем или агропромышленным объектом. Для поддержания стабильной работы СЭС необходимо решать вопросы, направленные на повышение надежности и качества электроснабжения путем применения совокупности технических и организационных мероприятий. К ним можно отнести:

- повышение эффективности управления сетями;
- подготовку обслуживающего персонала необходимого уровня;
- замену устаревшего оборудования;
- повышение технической оснащенности и безопасности СЭС на основе новых, научно-обоснованных технических решений и технологий.

В последнее время в распределительных сетях наблюдается постоянный рост числа электропотребителей, обладающих высокой чувствительностью к надежности электроснабжения и качеству электроэнергии (электронные и микропроцессорные устройства и др.). Для поддержания надежности электроснабжения на соответствующем уровне необходимо разрабатывать и принимать меры по повышению надежности, в частности, распределительных воздуш-

ных линий напряжением 10 и 0,4 кВ, так как они являются наиболее ненадежным звеном в системе электроснабжения, и большинство всех аварий происходит именно в сетях данного класса напряжений [1].

Основными причинами снижения надежности СЭС являются отказы оборудования, ошибки эксплуатационного персонала, превышение срока эксплуатации, отклонение реальных условий от расчетных, ущерб от стихийных бедствий.

Целью данной работы является проведение теоретического анализа состояния распределительных электрических сетей на примере Витебских ЭС, а также составление прогноза отказов в распределительных сетях.

### Основная часть

Система электроснабжения сельских районов в Республике Беларусь сформирована на основе сетей трех типов, отличающихся между собой уровнем напряжения.

Первый тип сетей – это питающие сети высокого напряжения – 110 кВ. В таких сетях происходит передача электрической энергии от энергосистем к промежуточным питающим подстанциям – 110/35, 110/10, 35/10, 110/35/10 кВ.

Второй тип сетей – это распределительные сети среднего напряжения – 35 и 10 кВ. Они состоят из воздушных линий электропередачи – 35 и 10 кВ, а также из потребительских подстанций – 35/0,4 и 10/0,4 кВ.

Третий тип сетей – распределительные сети низкого напряжения – 0,4 кВ. Эти сети непосредственно питают электроэнергией потребителей. Они имеют