

## ВЕРОЯТНОСТНО-СТАТИСТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ ВЛ 10 кВ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННОГО НАЗНАЧЕНИЯ

В. И. Русан, докт. техн. наук, профессор (УО БГАТУ); О. Ю. Пухальская, аспирантка (УО ГГТУ им. П.О. Сухого)

### Аннотация

*В статье проанализированы конфигурации ВЛ 10 кВ РУП "Гомельэнерго" и в зависимости от количества участков магистральной части линии, количества и сложности ответвлений построены модели трех типов: I – модель ВЛ 10 кВ с ответвлениями I-го порядка; II – модель ВЛ 10 кВ с ответвлениями I-го и II-го порядка; III – модель ВЛ 10 кВ с ответвлениями I-го, II-го и III-го порядка.*

*Для всех типов моделей рассчитаны основные вероятностно-статистические характеристики структурных параметров ВЛ 10 кВ: протяженности магистральной части и ответвлений ВЛ, количество ответвлений, участков магистрали и ТП, подключенных к одной линии, и доверительные интервалы для математического ожидания с надежностью  $\beta=0.95$ , подобраны теоретические кривые распределения основных характеристик ВЛ.*

### Введение

Математическое моделирование распределительных сетей используется при решении различных технических и технико-экономических задач, связанных с передачей и распределением электрической энергии. Модели распределительных сетей применяются для определения и прогнозирования потерь электроэнергии в сетях, при анализе надежности электроснабжения, некоторых показателей качества электроэнергии, работы релейной защиты и автоматики и решении других вопросов. Моделирование схем упрощает решение задачи в общем виде и позволяет проанализировать всю совокупность вариантов схем электроснабжения без значительных затрат времени.

Модель ВЛ строится на основании установленных статистических характеристик параметров ВЛ. Определение основных параметров схем электроснабжения потребителей АПК выполняется вероятностно-статистическим методом.

Работы по определению статистических характеристик сельского электроснабжения проводились рядом исследователей. В их работах, на основании анализа, в основном фактических данных, по существующим сетям получены основные статистические характеристики структурных параметров распределительных сетей [1, 2].

Исследование параметров сельских электрических сетей должно проводиться систематически, так как с изменением нагрузок сельскохозяйственных потребителей изменяются и основные характеристики сетей в сельской местности.

В работах [3, 4, с. 91-101] установлены статистические закономерности параметров ВЛ и на их основе построены модели ВЛ 10 кВ.

Моделированию сельских распределительных сетей посвящены публикации [5, 6].

Следует учесть, что в данных работах предлагаются модели сельских распределительных сетей для различных районов. В зависимости от рельефа местности, климатических условий и других факторов схемы, и, следовательно, модели сетей будут отличаться.

Целью данной работы является исследование основных структурных характеристик и построение моделей ВЛ 10 кВ сельскохозяйственного назначения РУП "Гомельэнерго".

### Основная часть

#### Основные структурные характеристики ВЛ 10 кВ

Исследование основных параметров сельских электрических сетей проводилось на основе вероятностно-статистических методов. Математическая обработка статистических данных проводилась в следующей последовательности [7-9]:

1. Составление статистических таблиц;
2. Вычисление основных статистических характеристик (математического ожидания (M), среднего квадратического отклонения ( $\sigma$ ));
3. Построение по опытным данным гистограмм распределения случайных величин;
4. Выдвижение гипотезы о функции плотности распределения;
5. Выравнивание эмпирических кривых распределения случайных величин теоретическими кривыми;
6. Проверка по критериям согласия Пирсона и Колмогорова;
7. Выбор функций, дающих наилучшие согласования.

Для выполнения расчетов использовалась программа STATISTICA 6.0.

Для построения моделей ВЛ 10 кВ было исследовано 150 ВЛ 10 кВ. В качестве исходного материала

ла были использованы данные по линиям электропередачи 10 кВ РУП “Гомельэнерго”.

По всем исследуемым линиям были получены следующие параметры:

– общая протяженность одной ВЛ 10 кВ  $L_{10}$ , км;

– протяженность магистральной части одной ВЛ 10 кВ  $L_{10M}$ , км;

– общая протяженность ответвлений одной ВЛ 10 кВ  $L_{10,0}$ , км;

– протяженность ответвлений одной ВЛ 10 кВ I-го порядка  $L_{10,01}$ , II-го порядка  $L_{10,02}$ , III-го порядка  $L_{10,03}$ , км;

– общее количество ответвлений на одной ВЛ 10 кВ  $n_0$ , шт;

– количество ответвлений на одной ВЛ 10 кВ I-го порядка  $n_{01}$ , II-го порядка  $n_{02}$ , III-го порядка  $n_{03}$ , шт;

– количество трансформаторных подстанций (ТП) 10/0,4 кВ, подключенных к одной ВЛ 10 кВ  $n_{ТП}$ , шт;

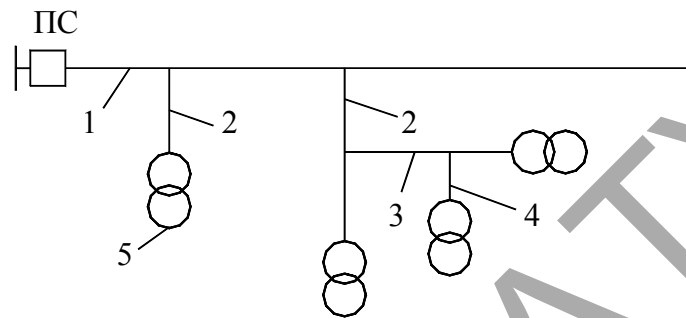
– суммарная установленная мощность ТП 10/0,4 кВ подключенных к одной ВЛ 10кВ  $S_{ТП}$ , кВт·А.

Магистральная линия определялась наибольшим сечением провода. Если сечения проводов одинаковые при разветвлении линии, то учитывалась наибольшая протяженность, а если и протяженность одинаковая – то наибольшая мощность потребителей подстанций.

**Моделирование ВЛ 10 кВ сельскохозяйственного назначения**

При рассмотрении конфигурации линий 10 кВ из выбранных 150 линий было выделено несколько типов ВЛ в зависимости от количества участков магистральной части линии, количества и сложности ответвлений.

Ответвления сети, отходящие от магистральной линии, классифицировались как ответвления I порядка, отходящие от ответвлений I порядка, как ответвления II порядка, аналогично определяются ответвления III порядка (рис.1).



**Рисунок 1. Классификация ответвлений ВЛ 10 кВ:**  
1 – магистральная часть ВЛ; 2 – ответвление I-го порядка; 3 – ответвление II-го порядка; 4 – ответвление III-го порядка; 5 – ТП 10/0,4 кВ

ления II порядка, аналогично определяются ответвления III порядка (рис.1).

В соответствии с типом линии было предложено 3 типа модели:

I – модель ВЛ 10 кВ с ответвлениями I-го порядка;

II – модель ВЛ 10 кВ с ответвлениями I-го и II-го порядка;

III – модель ВЛ 10 кВ с ответвлениями I-го, II-го и III-го порядка.

Для всех типов моделей были рассчитаны основные вероятностно-статистические характеристики указанных выше структурных параметров ВЛ 10 кВ и доверительные интервалы для математического ожидания с надежностью  $\beta=0,95$  [9,с. 21-22].

Результаты статистической обработки данных сведены в таблицы 1-3.

**Таблица 1. Структурные характеристики модели ВЛ 10 кВ I типа**

Наименование показателей	M	$\sigma$	Доверительный интервал	Плотность распределения соответствующих показателей *
Общая протяженность одной ВЛ 10 кВ $L_{10}$ , км	7,3	4,98	(5,88;8,71)	$0,106+0,06x-0,015x^2+1,2 \cdot 10^{-3}x^3-2,9 \cdot 10^{-5}x^4$
Протяженность магистральной части одной ВЛ 10 кВ $L_{10M}$ , км	6,45	4,54	(5,15;7,74)	$0,135+0,050x-0,014x^2+1,1 \cdot 10^{-3}x^3-2,9 \cdot 10^{-5}x^4$
Общая протяженность ответвлений одной ВЛ 10 кВ $L_{10,0}$ , км	0,85	1,3	(0,48;1,22)	$0,943-1,193x+0,545x^2-0,103x^3+6,8 \cdot 10^{-3}x^4$
Общее количество ответвлений на одной ВЛ 10 кВ $n_0$ , шт.	2,71	2,38	(2,03;3,38)	$0,548-0,384x-0,121x^2-0,016x^3-7,8 \cdot 10^{-4}x^4$
Количество участков магистрали одной ВЛ 10 кВ $n_{уч}$ , шт.	4,52	2,77	(3,72;5,30)	$0,452-0,172x-0,037x^2-3,8 \cdot 10^{-3}x^3+1,3 \cdot 10^{-4}x^4$
Количество ТП 10/0,4 кВ, подключенных к одной ВЛ 10 кВ $n_{ТП}$ , шт.	4,25	2,91	(3,43;5,08)	$0,821-0,446x+0,102x^2-0,010x^3+3,5 \cdot 10^{-4}x^4$
Суммарная установленная мощность ТП 10/0,4 кВ, подключенных к одной ВЛ 10 кВ $S_{ТП}$ , кВт·А	1137,4	863,67	(891,87; 1382,88)	$0,474-8,7 \cdot 10^{-4}x-7,2 \cdot 10^{-7}x^2-2,6 \cdot 10^{-10}x^3+3,2 \cdot 10^{-14}x^4$

\*) где x – соответствующий показатель электрических сетей

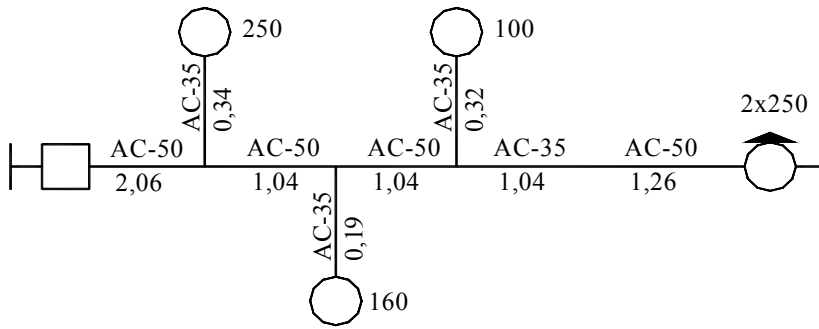


Рисунок 2. Структурная модель ВЛ 10 кВ сельскохозяйственного назначения I типа

В соответствии с данными, приведенными в таблице 1, модель ВЛ 10 кВ I типа представляет собой линию с пятью участками магистральной части, тремя ответвлениями I-го порядка и четырьмя ТП 10/0,4, подключенными к линии, с суммарной установленной мощностью 1137 кВ·А. Магистральная часть ВЛ выполнена проводами сечением 50 и 35 мм<sup>2</sup>, ответвления – проводами сечением 35 мм<sup>2</sup>. Модель ВЛ 10 кВ сельскохозяйственного назначения I типа показана на рисунке 2.

Таблица 2. Структурные характеристики модели ВЛ 10 кВ II типа

Наименование показателей	M	σ	Доверительный интервал	Плотность распределения соответствующих показателей *
Общая протяженность одной ВЛ 10 кВ $L_{10}$ , км	13,49	7,07	(11,41;15,56)	$-0,295+0,132x-0,010x^2+2,5\cdot 10^{-4}x^3-2,1\cdot 10^{-6}x^4$
Протяженность магистральной части одной ВЛ 10 кВ $L_{10M}$ , км	10,24	6,22	(8,42;12,06)	$-0,204+0,152x-0,014x^2+4,6\cdot 10^{-4}x^3-4,2\cdot 10^{-6}x^4$
Общая протяженность ответвлений одной ВЛ 10 кВ $L_{10,0}$ , км	3,24	2,04	(2,65;3,85)	$0,120+0,068x-0,022x^2+1,4\cdot 10^{-3}x^3$
Протяженность ответвлений I-го порядка одной ВЛ 10 кВ $L_{10,01}$ , км	2,95	1,80	(2,43;3,48)	$0,125+0,048x-0,019x^2+1,5\cdot 10^{-3}x^3$
Протяженность ответвлений II-го порядка одной ВЛ 10 кВ $L_{10,02}$ , км	0,29	0,39	(0,18;0,41)	$0,799-3,880x+7,159x^2-5,492x^3+1,468x^4$
Общее количество ответвлений на одной ВЛ 10 кВ $n_0$ , шт	7,62	2,95	(6,76;8,49)	$1,480-0,768x+0,152x^2-0,012x^3+3,5\cdot 10^{-4}x^4$
Количество ответвлений I-го порядка на одной ВЛ 10 кВ $n_{01}$ , шт	5,77	2,65	(4,99;6,55)	$-0,121+0,214x-0,059x^2+0,060x^3-2,5\cdot 10^{-4}x^4$
Количество ответвлений II-го порядка на одной ВЛ 10 кВ $n_{02}$ , шт	1,85	1,17	(1,51;2,20)	$1,759-1,479x-0,449x^2-0,058x^3+2,6\cdot 10^{-3}x^4$
Количество участков магистрали одной ВЛ 10 кВ $n_{уч}$ , шт	7,52	3,23	(6,57;8,47)	$0,131-0,127x+0,062x^2-0,010x^3+7,1\cdot 10^{-4}x^4+1,7\cdot 10^{-5}x^5$
Количество ТП 10/0,4 кВ, подключенных к одной ВЛ 10 кВ $n_{ТП}$ , шт	9,60	3,67	(8,53;10,68)	$-0,928+0,426x-0,058x^2+3,2\cdot 10^{-3}x^3-6,5\cdot 10^{-5}x^4$
Суммарная установленная мощность ТП 10/0,4 кВ, подключенных к одной ВЛ 10 кВ $S_{\Sigma ТП}$ , кВ·А	2022,56	1012,97	(1725,57; 2319,55)	$0,474-8,7\cdot 10^{-4}x-7,2\cdot 10^{-7}x^2-2,6\cdot 10^{-10}x^3+3,2\cdot 10^{-14}x^4$

\*) где x – соответствующий показатель электрических сетей

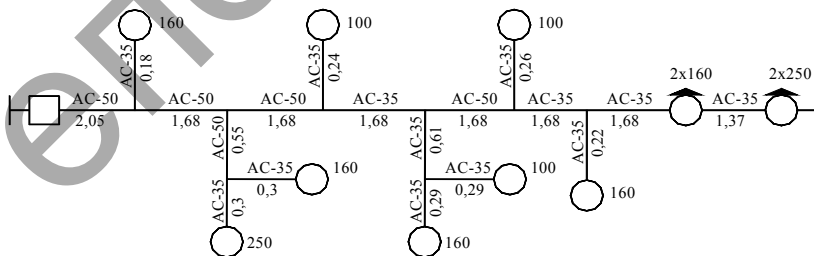


Рисунок 3. Структурная модель ВЛ 10 кВ сельскохозяйственного назначения II типа

В соответствии с данными, приведенными в таблице 2, модель ВЛ 10 кВ II типа представляет собой линию, магистральная часть которой состоит из восьми участков. На линии имеется шесть ответвлений I-го порядка и два II-го. Магистральная часть ВЛ и ответвления выполнены проводами сечением 50 и 35 мм<sup>2</sup>. К линии подключено 10 ТП 10/0,4, с суммарной установленной мощностью 2023 кВ·А. Модель ВЛ 10 кВ сельскохозяйственного назначения II типа представлена на рисунке 3.

Таблица 3. Структурные характеристики модели ВЛ 10 кВ III типа

Наименование показателей	M	σ	Доверительный интервал	Плотность распределения соответствующих показателей *
Общая протяженность одной ВЛ 10 кВ $L_{10}$ , км	25,57	12,16	(21,39;29,74)	$-0,742+0,136x+6,6\cdot 10^{-3}x^2+$ $+1,3\cdot 10^{-4}x^3-8,4\cdot 10^{-7}x^4$
Протяженность магистральной части одной ВЛ 10 кВ $L_{10M}$ , км	13,90	5,44	(12,03;15,77)	$4,6\cdot 10^{-3}+0,035x-1,8\cdot 10^{-3}x^2-$ $-1,7\cdot 10^{-5}x^3+1,3\cdot 10^{-6}x^4$
Общая протяженность ответвлений одной ВЛ 10 кВ $L_{10O}$ , км	11,70	8,06	(8,93;14,46)	$-0,167+0,151x-0,017x^2+$ $+6,7\cdot 10^{-4}x^3-8,3\cdot 10^{-6}x^4$
Протяженность ответвлений I-го порядка одной ВЛ 10 кВ $L_{10O1}$ , км	8,62	6,18	(6,50;10,74)	$0,384-0,170x+0,046x^2-$ $-5,1\cdot 10^{-3}x^3+2,4\cdot 10^{-4}x^4-$ $-2,8\cdot 10^{-6}x^5$
Протяженность ответвлений II-го порядка одной ВЛ 10 кВ $L_{10O2}$ , км	2,88	2,95	(1,87;3,89)	$0,480-0,072x-0,016x^2+$ $+4,4\cdot 10^{-3}x^3-3,6\cdot 10^{-4}x^4+$ $+8,3\cdot 10^{-6}x^5$
Протяженность ответвлений III-го порядка одной ВЛ 10 кВ $L_{10O3}$ , км	0,20	0,42	(0,05;0,34)	$1,274-6,078x+10,835x^2-$ $-9,058x^3+3,583x^4-0,541x^5$
Общее количество ответвлений на одной ВЛ 10 кВ $n_O$ , шт.	19,00	8,98	(15,92;22,08)	$-4,501+1,290x-0,132x^2+$ $+6,3\cdot 10^{-3}x^3-1,4\cdot 10^{-4}x^4+$ $+1,2\cdot 10^{-6}x^5$
Количество ответвлений I-го порядка на одной ВЛ 10 кВ $n_{O1}$ , шт.	10,58	5,27	(8,77;12,39)	$-0,389+0,232x-0,034x^2+$ $+2,3\cdot 10^{-3}x^3-7,8\cdot 10^{-5}x^4+$ $+1,0\cdot 10^{-6}x^5$
Количество ответвлений II-го порядка на одной ВЛ 10 кВ $n_{O2}$ , шт.	6,17	4,06	(4,77;7,56)	$0,637-0,151x+0,017x^2-$ $-1,0\cdot 10^{-3}x^3+2,2\cdot 10^{-5}x^4$
Количество ответвлений III-го порядка на одной ВЛ 10 кВ $n_{O3}$ , шт.	2,25	2,69	(1,33;3,17)	$3,054-1,994x+0,491x^2-$ $-0,057x^3+3,1\cdot 10^{-3}x^4-6,4\cdot 10^{-5}x^5$
Количество участков магистрали одной ВЛ 10 кВ $n_{уч}$ , шт.	12,50	4,98	(10,79;14,21)	$5,392-2,031x-0,292x^2-$ $-0,020x^3+6,4\cdot 10^{-4}x^4-8,3\cdot 10^{-6}x^5$
Количество ТП 10/0,4 кВ, подключенных к одной ВЛ 10 кВ $n_{ТП}$ , шт.	21,39	9,60	(18,09;24,68)	$3,055-0,518x+0,033x^2-$ $-8,9\cdot 10^{-4}x^3+8,3\cdot 10^{-6}x^4$
Суммарная установленная мощность ТП 10/0,4 кВ, подключенных к одной ВЛ 10 кВ $S_{\Sigma ТП}$ , кВт·А	4193,56	1663,31	(3622,82; 4764,29)	$-0,626-6,0\cdot 10^{-4}x-$ $-1,4\cdot 10^{-3}x^2+1,1\cdot 10^{-11}x^3-$ $-2,7\cdot 10^{-16}x^4$

\*) где x – соответствующий показатель электрических сетей

Согласно данным, представленным в таблице 3, модель III типа представляет собой ВЛ, магистральная часть которой состоит из тринадцати участков. На линии имеется одиннадцать ответвлений I-го порядка, шесть – II-го и два – III-го. Магистральная

часть ВЛ и ответвления выполнены проводами сечением 50 и 35 мм<sup>2</sup>. К линии подключена 21 ТП 10/0,4 кВ, с суммарной установленной мощностью 4194 кВт·А. Модель ВЛ 10 кВ сельскохозяйственного назначения III типа представлена на рис. 4.

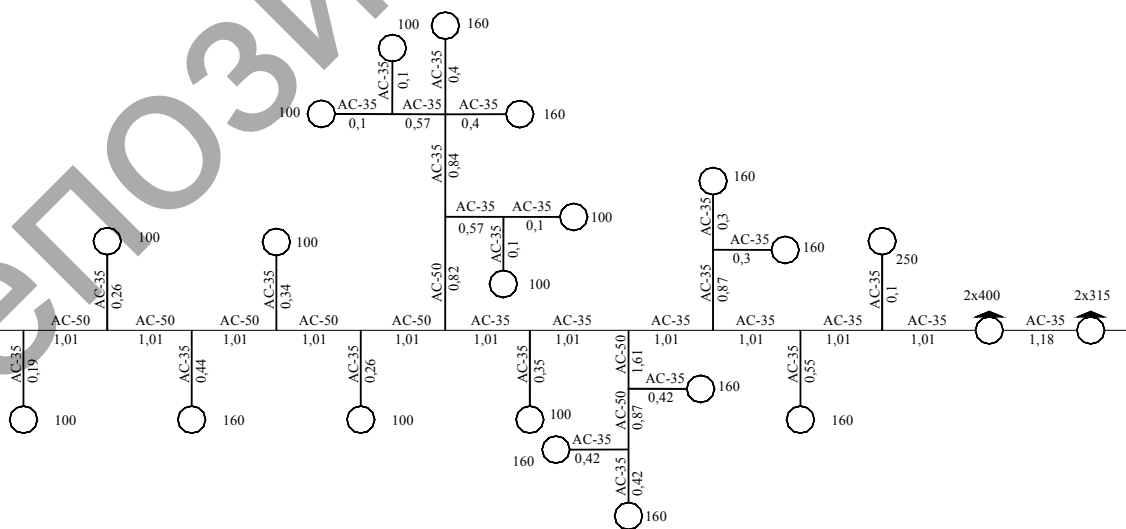


Рисунок 4. Структурная модель ВЛ 10 кВ сельскохозяйственного назначения III типа

### Заключение

В работе исследованы основные структурные характеристики и построены вероятностно-статистические модели ВЛ 10 кВ сельскохозяйственного назначения РУП «Гомельэнерго». Если обратиться к работам по исследованию параметров сельских электрических сетей, выполненным ранее [1, 3-5], то можно отметить тенденции к снижению общей протяженности ВЛ 10 кВ, увеличению сечений проводов магистральной части линии и ответвлений, увеличению суммарной установленной мощности ТП 10/0.4 кВ, подключенных к одной ВЛ.

Модели могут быть использованы для задач, связанных с анализом надежности схем электроснабжения потребителей АПК.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Зуль, А.М. Вероятностно-статистическое исследование основных параметров сельских электрических сетей / А.М. Зуль, А.А. Халфен // Научные труды по электрификации сельского хозяйства / Всесоюз. науч.-исслед. ин-т электрифик. сельск. хоз-ва; редкол. И. А. Будзко [и др.] – М., 1968. – Т. XXI. – С. 78-92.
2. Куценко, Г.Ф. Структурные характеристики ВЛ 6-10 кВ сельских электрических сетей / Г.Ф. Куценко, А.А. Парфенов // Энергетика. – Изв. вузов. – 2002. – №2. – С. 10-15.
3. Акимцев, Ю.И. Вероятностно-статистические модели сельских распределительных сетей / Ю.И. Акимцев, В.В. Афанасьев // Труды Волгоградского сельскохозяйств. ин-та. – Волгоград, 1985. – Т. 92. – С. 80-87.
4. Поспелов, Г.Е. Надежность электроустановок сельскохозяйственного назначения / Г.Е. Поспелов, В.И. Русан. – Минск: Ураджай, 1982. – 166 с.
5. Крушельницкий, А.З. Модели электрических распределительных сетей / А.З. Крушельницкий, В.А. Попов // Электрические сети и системы: респ. междувед. науч.-техн. сб. – Львов: Вища школа, 1980. – Вып. 16. – С. 75-84.
6. Куценко, Г.Ф. Моделирование распределительных сетей напряжением 6-10 кВ / Г.Ф. Куценко, А.А. Парфенов // Энергосбережение. Электроснабжение. Автоматизация: материалы междунар. науч.-техн. конф., Гомель, 22-23 нояб. 2001 г. / Гомельский гос. техн. ун-т им. П.О. Сухого; редкол.: Б. И. Кудрин [и др.]. – Гомель, 2001. – С. 84-86.
7. Смирнов, Н.В. Курс теории вероятностей и математической статистики для технических приложений / Н.В. Смирнов, И.В. Дунин-Барковский. – М.: Наука, 1969. – 511 с.
8. Тарасик, В.П. Математическое моделирование технических систем: учебник для вузов / В.П. Тарасик. – М.: ДизайнПРО, 2004. – 640 с.
9. Методика статистической обработки эмпирических данных (РТМ-44-62). – М.: Изд – во стандартов, 1966. – 100 с.

УДК 621.311.1

ПОСТУПИЛА В РЕДАКЦИЮ 25.01.2008

## ОБ ЭФФЕКТИВНОСТИ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ КОМПЛЕКСА ТЕХНИЧЕСКИХ СРЕДСТВ В ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЯХ 0,38 кВ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ ОБЪЕКТОВ

В.П. Счастный, канд. техн. наук, доцент (УО БГАТУ)

### Аннотация

*Для конструктивного взаимодействия между энергоснабжающей организацией и потребителем электроэнергии в сельских электрических сетях 0,38 кВ требуется применение комплекса технических средств (КТС), обеспечивающих как надежное и качественное электроснабжение сельскохозяйственных объектов, так и способных регистрировать и архивировать значения параметров и режимов работы этих сетей. Предложены функции КТС и направления их оптимизации при определении оценки эффективности его функционирования.*

### Введение

В структуре электропотребления Республики Беларусь производственные сельскохозяйственные потребители и сельское население составляют 15-17 %. Взаимоотношения между электроснабжающей организацией и потребителями строятся на договорной основе и регламентируются «Правилами пользования

электрической и тепловой энергией» [1]. Не вдаваясь в детальный анализ разработанного более 10 лет назад вышеупомянутого нормативного документа, по мнению большинства руководителей энергетических служб предприятий, он не соответствует современным экономическим отношениям. Фактически, несмотря на имеющие место констатации ответственности сторон, энергоснабжающая организация, являю-