

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования  
«КАЛИНИНГРАДСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

**В. Ф. Белей, Г. В. Коцарь**

**DISTRIBUTED GENERATION TECHNOLOGIES  
ТЕХНОЛОГИИ РАСПРЕДЕЛЕННОЙ ГЕНЕРАЦИИ**

Учебно-методическое пособие – локальный электронный методический  
материал по выполнению контрольной работы для студентов  
заочной формы обучения по направлению подготовки  
13.04.02 Электроэнергетика и электротехника

Калининград  
Издательство ФГБОУ ВО «КГТУ»  
2023

УДК 621.311

Рецензент

кандидат технических наук, доцент кафедры энергетики  
ФГБОУ ВО «Калининградский государственный технический университет»  
И.Е. Кажекин

**Белей, В. Ф.**

Distributed generation technologies / Технологии распределенной генерации: учеб.-методич. пособие – локальный электронный методич. материал по выполнению контр. работы для студ. заочной формы обучения по направлению подгот. 13.04.02 Электроэнергетика и электротехника / **В. Ф. Белей, Г. В. Коцарь.** – Калининград: ФГБОУ ВО «КГТУ», 2023. – 18 с.

В учебно-методическом пособии по выполнению контрольной работы представлены методика расчета и пример выполнения контрольной работы по дисциплине «Distributed generation technologies / Технологии распределенной генерации», а также необходимый справочный материал. Контрольная работа предназначена для практического закрепления теоретического материала по курсу «Distributed generation technologies / Технологии распределенной генерации».

Рис. – 1, табл. – 8, список литературы – 8 наименований

Локальный электронный методический материал. Учебно-методическое пособие рекомендовано к использованию в учебном процессе методической комиссией института морских технологий, энергетики и строительства 31.05.2023 г., протокол № 09

УДК 621.311

© Федеральное государственное  
бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования  
«Калининградский государственный  
технический университет», 2023 г.  
© Белей В. Ф., Коцарь Г. В., 2023 г.

## Введение

Настоящее учебно-методическое пособие разработано с учетом содержания лекционного курса «Distributed Generation Technologies / Технологии распределенной генерации». Для знакомства с теоретической частью курса, необходимой для корректного выполнения задания рекомендуется обратиться к учебному пособию и учебникам, рекомендованным для изучения дисциплины.

Цель освоения дисциплины «Distributed Generation Technologies / Технологии распределенной генерации» - формирование систематизированных знаний в области технологий распределённой генерации энергии, охватывающих традиционные и нетрадиционные установки малой мощности, возобновляемые источники энергии, в том числе при реализации концепции мини-сетей (Mini-grids).

Контрольная работа включает ряд заданий, которые часто встречаются на практике и охватывают значительную часть изучаемых вопросов. Их выполнение позволит в большей степени усвоить лекционный материал и подготовиться к зачету по дисциплине «Distributed Generation Technologies / Технологии распределенной генерации».

После выполнения контрольной работы студент должен овладеть следующими результатами освоения дисциплины.

- Знать: технологии распределённой генерации энергии, охватывающие традиционные и нетрадиционные установки малой мощности, возобновляемые источники энергии, в том числе при реализации концепции мини-сетей (Mini-grids).
- Уметь: использовать полученные знания при решении конкретных задач развития, проектирования и функционирования установок распределённой генерации энергии с обеспечением требуемого уровня надежности.
- Владеть: методами планирования и выбора установок распределённой генерации энергии для обеспечения концепция развития и самообеспеченности энергией региона и мини-сетей (Mini-grids).

Для каждого задания сформулированы требования к выполнению и дан пример решения. По каждой задаче в составе контрольной работы студентами, в соответствии с заданием, оформляются индивидуальные отчеты на основе приведенных примеров решения. Для удобства подготовки в конце методических указаний приводится список литературы, включающий, в том числе, необходимое количество учебных пособий и учебников по изучению дисциплины.

## Содержание

Задача 1. Расчёт изменения скорости ветра с ростом высоты.....	5
Задача 2. Определение месячной выработки электроэнергии ветроэнергетической установки .....	8
Критерии и нормы оценки контрольной работы .....	14
Список рекомендованных источников.....	15
Приложение А. Форма отчета по контрольной работе .....	16

## Задача 1. Расчёт изменения скорости ветра с ростом высоты

### Постановка задачи

Определить скорость ветра на высотах от 25 до 150 м с шагом в 25 м, используя данные о шероховатости поверхности и скорости ветра на высоте флюгера. Принять стандартную высоту флюгера за 10 м. Использовать логарифмический и степенной методы. Сравнить полученные результаты. Построить графики роста скорости ветра с ростом высоты.

Таблица 1.1 – Варианты заданий для задачи 1.

Вариант	Номер вида подстилающей поверхности из таблицы 1.2	Скорость ветра на уровне флюгера, м/с
пример	2	12
1	1	3
2	2	4
3	3	5
4	4	6
5	5	7
6	6	8
7	7	9
8	8	10
9	9	11
10	1	12
11	2	3
13	3	4
14	4	5
15	5	6
16	6	7
17	7	8
18	8	9
19	9	10
20	1	11

Таблица 1.2 – Классификация подстилающей поверхности

№	Классификация подстилающей поверхности	$h_0$ , м	$m$
1	Спокойная водная поверхность, гладкий лёд	$10^{-6} - 10^{-4}$	0,10
2	Взволнованная поверхность моря, большого озера	$2 \cdot 10^{-4} - 5 \cdot 10^{-4}$	
3	Равнина без растительности, равнина под снеговым покровом, ровная пустыня	$2 \cdot 10^{-4} - 5 \cdot 10^{-3}$	
4	Равнина, луга с травяным покровом до 0,2 м	0,01 – 0,03	0,15
5	Посевы высотой 0,25-1 м, отдельные препятствия	0,04 – 0,1	
6	Высокие посевы высотой до 2-3 метров, кусты, лесозащитные полосы	0,2 – 0,3	0,20
7	Лес, тайга	0,5 – 0,8	0,25
8	Пригороды с низкими зданиями	0,5 – 5,0	0,30
9	Центр города с высокими и низкими зданиями	1,0 – 6,0	0,40

### Алгоритм решения задачи

Скорость ветра на заданной высоте можно определить при помощи степенного закона:

$$v_2 = v_1 \left( \frac{h_2}{h_1} \right)^m \quad (1.1)$$

где  $v_1$ ,  $v_2$  – соответственно скорости ветра на уровне флюгера метеостанции и ступицы ветроколеса ВЭУ, м/с;

$h_1$ ,  $h_2$  – соответственно высоты флюгера метеостанции и ступицы ветроколеса ВЭУ, м;

$m$  – показатель степени вертикального профиля ветра.

Другой способ предполагает использование логарифмического закона:

$$v_2 = v_1 \frac{\ln\left(\frac{h_2}{h_0}\right)}{\ln\left(\frac{h_1}{h_0}\right)} \quad (1.2)$$

где  $h_0$  – шероховатость подстилающей поверхности, м.

Для взволнованной поверхности моря примем следующие значения (таблица 1.2):  $h_0 = 3,5 \cdot 10^{-4}$  м,  $m = 0,1$ .

Определим скорость ветра для высоты 50 м по степенному закону:

$$v_2 = 12 \left( \frac{50}{10} \right)^{0,1} = 14,1 \text{ м/с} \quad (1.3)$$

Определим скорость ветра для высоты 50 м по логарифмическому закону:

$$v_2 = 12 \frac{\ln\left(\frac{50}{3,5 \cdot 10^{-4}}\right)}{\ln\left(\frac{10}{3,5 \cdot 10^{-4}}\right)} = 13,9 \text{ м/с} \quad (1.4)$$

Скорости ветра для высот от 25 до 150 м определим аналогичным образом и сведём в таблицу. Построим необходимые графики.

Таблица 1.3 – Результаты расчёта скоростей ветра для заданных высот

Высота	Скорость ветра, определённая по степенному закону, м/с	Скорость ветра, определённая по логарифмическому закону, м/с
10 м	12	
25 м	13,2	13,1
50 м	14,1	13,9
75 м	14,7	14,4
100 м	15,1	14,7
125 м	15,4	15,0
150 м	15,7	15,2

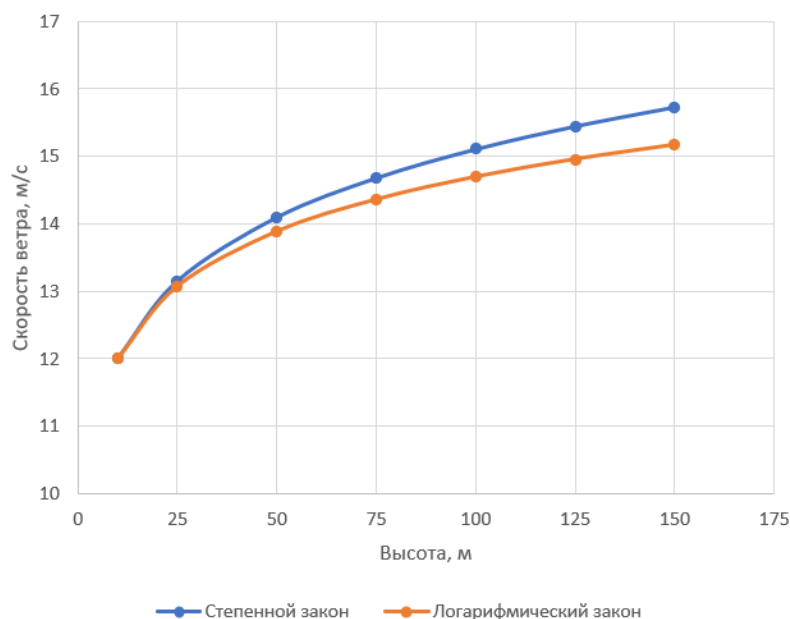


Рисунок 1.1 – Графики зависимости скорости ветра от высоты

## Задача 2. Определение месячной выработки электроэнергии ветроэнергетической установки

### Постановка задачи

На основе данных о скоростях ветра за один месяц и зависимости мощности ветроэнергетической установки от скорости ветра на уровне ступицы её ветроколеса рассчитать выработку электроэнергии ветроэнергетической установки за один месяц. Рассчитать коэффициент использования установленной мощности ветроэнергетической установки за месяц. Определить время работы, время простоя и число часов использования установленной мощности ветроэнергетической установки.

Таблица 2.1 – Варианты заданий для задачи 2

Вариант	Номер ряда скоростей ветра из таблицы 2.2	Номер ветроэнергетической установки из таблицы 2.3
1	1	1
2	1	2
3	1	3
4	1	4
5	2	1
6	2	2
7	2	3
8	2	4
9	3	1
10	3	2
11	3	3
12	3	4
13	4	1
14	4	2
15	4	3
16	4	4
17	5	1
18	5	2
19	5	3
20 (пример)	5	4



Таблица 2.2 – Данные о скоростях ветра на уровне ступицы ветроколеса ветро-энергетической установки

День	Средняя скорость ветра за день, м/с				
	№1	№2	№3	№4	№5
1	14,0	8,0	5,1	9,6	7,0
2	11,4	9,8	7,3	7,8	10,1
3	7,7	11,2	9,1	5,3	12,6
4	6,7	7,0	8,0	4,6	11,0
5	11,1	6,1	5,1	7,6	7,0
6	7,2	8,0	6,6	4,9	9,1
7	12,3	4,7	8,5	8,4	11,7
8	14,6	4,6	9,1	10,0	12,6
9	14,0	4,1	5,9	9,6	8,1
10	13,6	3,2	4,0	9,3	5,5
11	14,0	4,0	3,5	9,6	4,8
12	20,9	4,0	5,0	14,3	6,9
13	18,7	4,3	4,4	12,8	6,1
14	16,2	5,2	3,8	11,1	5,2
15	14,6	4,1	2,8	10,0	3,9
16	13,7	5,0	6,4	9,4	8,8
17	14,8	4,7	7,9	10,1	10,9
18	8,0	7,6	8,1	5,5	11,2
19	7,9	6,3	7,0	5,4	9,7
20	8,2	10,2	5,0	5,6	6,9
21	7,3	5,7	7,8	5,0	10,8
22	10,8	4,8	5,9	7,4	8,1
23	11,1	4,6	6,0	7,6	8,3
24	8,5	6,3	6,1	5,8	8,4
25	18,3	2,9	5,5	12,5	7,6
26	26,0	2,2	5,6	17,8	7,7
27	16,7	2,8	10,5	11,4	14,5
28	13,6	3,9	9,8	9,3	13,5
29	9,4	3,5	5,9	6,4	8,1
30	18,3	2,2	5,0	12,5	6,9

Таблица 2.3 – Зависимости вырабатываемой мощности ветроэнергетических установок от скорости ветра

Градация рабочих скоростей ветра, м/с	Вырабатываемая мощность ветроэнергетической установки, кВт			
	№1	№2	№3	№4
3 – 4	100	50	100	100
4 – 5	300	300	300	250
5 – 6	600	750	550	500
6 – 7	1100	1500	900	800
7 – 8	1700	2500	1400	1250
8 – 9	2400	3500	1900	1800
9 – 10	3000	4500	2400	2350
10 – 11	3300	5500	2600	2800
11 – 12	3500	6750	2700	3000
12 – 13	3500	7750	2700	3150
13 – 14	3500	8000	2700	3200
14 – 15	3500	8000	2700	3200
15 – 16	3500	8000	2700	3200
16 – 17	3500	8000	2700	3200
17 – 18	3500	8000	2700	3200
18 – 19	3500	8000	2700	3200
19 – 20	3500	8000	2700	3200
20 – 21	3500	8000	2700	3200
21 – 22	3500	8000	2700	3200
22 – 23	3500	8000	2700	3200
23 – 24	3500	8000	2700	3200
24 – 25	3500	8000	2700	3200

*Примечание: при распределении скоростей ветра по градациям принять левую либо правую границу как «включительно», а другую – «не включительно».*

## Алгоритм решения задачи

Выработка электроэнергии ветроэнергетической установки ( $W$ , Вт\*ч) за период времени ( $T$ , ч) может быть рассчитана по формуле:

$$W = \sum_{i=1}^{n_{\text{раб}}} T \cdot P(v_i) \cdot f(v_i), \quad (2.1)$$

где  $n_{\text{раб}}$  – количество градаций в промежутке от минимальной до максимальной рабочей скоростей ветра ветроэнергетической установки;

$v_i$  – средняя скорость ветра  $i$ -ой градации, м/с;

$P(v_i)$  – вырабатываемая мощность для соответствующей градации, кВт;

$f(v_i)$  – повторяемость скоростей ветра для данной градации.

Для этого разобьём скорости ветра по интервалам (градациям). Такой способ получения дифференциальной повторяемости скорости ветра называется табулированным. Воспользуемся выражением:

$$f_i(v_i) = \frac{m_i}{n}, \quad (2.2)$$

где  $f_i$  – повторяемость скоростей в  $i$ -й градации  $v_i$ ;

$m_i$  – число измерений скорости, попавших в  $i$ -ю градацию;

$n$  – общее число измерений скорости за рассматриваемый период времени.

Таблица 2.4 – Распределение скоростей ветра по градациям

Градация, м/с	< 3	3 – 4	4 – 5	5 – 6	6 – 7	7 – 8
$m_i$	0	1	1	2	4	4
$f_i$	0	0,033	0,033	0,066	0,133	0,133
Градация, м/с	8 – 9	9 – 10	10 – 11	11 – 12	12 – 13	13 – 14
$m_i$	6	2	3	3	2	1
$f_i$	0,200	0,066	0,099	0,099	0,066	0,033
Градация, м/с	14 – 15	15 – 16	16 – 17	17 – 18	18 – 19	19 – 20
$m_i$	1	0	0	0	0	0
$f_i$	0,033	0	0	0	0	0
Градация, м/с	20 – 21	21 – 22	22 – 23	23 – 24	24 – 25	> 25
$m_i$	0	0	0	0	0	0
$f_i$	0	0	0	0	0	0

Приведём расчёт месячной выработки электроэнергии ветроэнергетической установки в табличной форме.

Таблица 2.5 – Расчёт месячной выработки электроэнергии

Градации рабочих скоростей ветра, м/с	Вырабатываемая мощность, кВт	Повторяемость скоростей ветра	Время работы, ч/месяц	Выработанная электроэнергия, кВт*ч/месяц
< 3	0	0	0	0
3 – 4	100	0,033	24	2 400
4 – 5	250	0,033	24	6 000
5 – 6	500	0,066	48	24 000
6 – 7	800	0,133	96	76 800
7 – 8	1250	0,133	96	120 000
8 – 9	1800	0,200	144	259 200
9 – 10	2350	0,066	48	112 800
10 – 11	2800	0,099	72	201 600
11 – 12	3000	0,099	72	216 000
12 – 13	3150	0,066	48	151 200
13 – 14	3200	0,033	24	76 800
14 – 15	3200	0,033	24	76 800
15 – 16	3200	0	0	0
16 – 17	3200	0	0	0
17 – 18	3200	0	0	0
18 – 19	3200	0	0	0
19 – 20	3200	0	0	0
20 – 21	3200	0	0	0
21 – 22	3200	0	0	0
22 – 23	3200	0	0	0
23 – 24	3200	0	0	0
24 – 25	3200	0	0	0
> 25	0	0	0	0
<b>Итого</b>	-	1	720	1 323 600

В таблице 2.5 время работы ветроэнергетической установки для каждой градации скоростей ветра ( $T_i$ , ч) определяется по формуле:

$$T_i = T_m \cdot f_i(v_i) \quad (2.3)$$

где  $T_m$  – количество часов в одном месяце, ч.

Время работы  $T_{\text{раб}}$  и время простоя  $T_{\text{пр}}$  (за месяц) ветроэнергетической установки можно определить по данным таблицы 2.5:

$$T_{\text{раб}} = T_{\text{м}} \cdot \sum_{i=1}^{n_{\text{раб}}} f(v_i) \quad (2.4)$$

$$T_{\text{пр}} = T_{\text{м}} - T_{\text{раб}} \quad (2.5)$$

В данном случае общее время работы ветроэнергетической установки  $T_{\text{раб}}$  равно 720 ч, а время простоя  $T_{\text{пр}} = 0$  ч, так как ни одна из скоростей ветра не вышла из рабочего диапазона.

Коэффициент использования установленной мощности (в данном случае определяемый за один месяц) можно вычислить по формуле:

$$\text{КИУМ}_{\text{ВЭУ}} = \frac{W_{\text{мес}}^{\text{ВЭУ}}}{P_{\text{ном}} \cdot T_{\text{м}}} = \frac{1\,323\,600}{3\,200 \cdot 720} = 0,574 \quad (2.6)$$

Такой высокий коэффициент использования установленной мощности объясняется высокими скоростями ветра за данный месяц, а также тем, что при расчёте не учитываются различные коэффициенты потерь энергии ветроэнергетической установки и другие факторы.

Число часов использования ( $T_{\text{исп}}$ , ч) установленной мощности ветроэнергетической установки (за месяц) равно:

$$T_{\text{исп}} = \text{КИУМ}_{\text{ВЭУ}} \cdot T_{\text{м}} = 0,574 \cdot 720 = 413,3 \text{ (ч)} \quad (2.7)$$

## Критерии и нормы оценки контрольной работы

Контрольная работа перед сдачей ее на проверку преподавателем должна быть подписана студентом и оформлена в соответствии с требованиями (Приложение А).

Работа представляется преподавателю, выдавшему задание. Контрольная работа проверяется преподавателем, который дает краткий устный отзыв. В нем дается заключение о допуске или недопуске работы к защите.

При наличии существенных недостатков контрольная работа возвращается студенту и должна быть им доработана, а после повторно представлена для проверки.

Критерии оценивания различаются для расчетной части и устных ответов при защите работы. По результатам выполнения расчетной части и последующей защиты проекта выставляется оценка: «зачтено» или «не зачтено».

Оценка «зачтено» за выполнение расчетных заданий выставляется при следующих условиях:

- Методика и порядок расчета верные.
- Ошибки отсутствуют, либо имеются несущественные вычислительные ошибки.
- Имеются вычислительные ошибки, обусловленные невнимательностью при расчетах, которые не привели к существенному искажению результата.
- Имеются незначительные ошибки в методологии, ошибки в промежуточных расчетах, обусловленные неполным пониманием принципа расчета, при этом конечный результат имеет приемлемые отклонения.

Оценка «не зачтено» выставляется если при расчетах применена неверная методология, нарушен порядок расчета, имеется серьезная системная ошибка, обусловленные непониманием принципа расчета и приведшие к ошибочному результату.

Целью устной защиты является демонстрация понимания решаемых задач и самостоятельности при выполнении работы. Вопросы к устной защите контрольной работы ограничиваются описанием хода решения, а также интерпретацией полученных результатов и не выходят за рамки заданий. Оценка «зачтено» за устные ответы по работе выставляется при соблюдении следующих условий:

- Обладает минимальным набором знаний, необходимым для системного взгляда на изучаемый объект.
- В состоянии осуществлять научно корректный анализ предоставленной информации.
- В состоянии найти необходимую информацию для решения поставленной задачи.

### Список рекомендованных источников

1. Электрические станции: ежемес. произв.-техн. журн./ учредитель: Минэнерго России, ОАО "Федеральная сетевая компания ЕЭС", Электроэнергетическая Ассоциация "Корпорация ЕЭЭК", научно-техническая фирма "Энергопрогресс", НП "Научно-технический Совет ЕЭС"; гл. ред.: Гурген Ольховский. - Москва: НТФ "Энерго-прогресс", 1930 - . - 29 см : а-цв.ил. - Входит в Перечень ВАК. - URL: <http://www.elst.energy-journals.ru/>. - Срок хранения 15 лет. - Выходит ежемесячно, Ред.: Ольховский Г. Г. - ISSN 0201-4564
2. Электричество: ежемес. научно-техн. журн./ учредитель Русское техническое общество, РАН СССР: - Москва: ФГБОУ ВО Национальный исследовательский университет МЭИ - Входит в Перечень ВАК. - URL. <http://etr1880.mpei.ru> - Срок хранения 15 лет. - Выходит ежемесячно, Ред.: Бутырин П.А.
3. Альтернативная энергетика и экология / Международный научный журнал / Изд-во Общество с ограниченной ответственностью Научно-технический центр ТАТА. - Входит в Перечень ВАК. - [https://elibrary.ru/title\\_about.asp?id=8395](https://elibrary.ru/title_about.asp?id=8395) - Выходит ежемесячно.
4. Энергетическая стратегия России на период до 2030 года [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://docs.cntd.ru/document/902187046> (дата обращения: 19.09.2022).
5. ГОСТ Р 58491-2019. Технические требования к объектам генерации на базе ветроэнергетических установок.
6. Бессель, В. В. Изучение солнечных фотоэлектрических элементов: учеб.-методич. пособие / В. В. Бессель, В. Г. Кучеров, Р. Д. Мингалеева. – Москва: Издательский центр РГУ нефти и газа (НИУ) имени И. М. Губкина, 2016. – 90 с.
7. Потенциальное использование древесных отходов для производства энергии [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.fao.org/3/t0269e/t0269e08.htm> (Дата обращения: 19.09.2022).
8. Елистратов, В.В. Теоретические основы нетрадиционной и возобновляемой энергетики: методические указания / В.В. Елистратов, М.В. Кузнецов. – Санкт-Петербург: Изд-во СПбГПУ, 2003. – Ч.1. Определение ветроэнергетических ресурсов региона.

Приложение А. Форма отчета по контрольной работе  
*Образец титульного листа*

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования  
«КАЛИНИНГРАДСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ  
УНИВЕРСИТЕТ»

Институт морских технологий, энергетики и строительства  
Кафедра энергетики

**КОНТРОЛЬНАЯ РАБОТА**

по дисциплине «Distributed Generation Technologies / Технологии  
распределенной генерации»

направления подготовки 13.04.02 «Электроэнергетика и электротехника»

Работу выполнил:  
студенты гр. ХХ-ЭЭм  
Иванов И.И.



Калининград

202X

*Требования к оформлению работы*

Работа должна отражать основные результаты, полученные в ходе аналитического исследования, а также выводы о характере и причинах полученных зависимостей. Работа оформляется с использованием электронных вычислительных средств в соответствии с требованиями ГОСТ 2.105-95. На все рисунки и таблицы должны быть ссылки в тексте, например, «(рисунок 1)», «приведены в таблице 2». Подписи таблиц и рисунков выполняются по форме «Таблица 1 – Название» (над таблицей, выравнивание по левому краю без отступа), «Рисунок 1 – Название» (под рисунком, выравнивание по середине без отступа). При подготовке рисунков и схем рекомендуется использовать редактор MS Visio. Построение диаграмм (графиков) рекомендуется выполнять посредством MS Excel, Mathcad или аналогичных программ.

Общие требования к оформлению документа:

- Шрифт Times New Roman, размер 12.
  - Выравнивание текста по ширине
  - Межстрочный интервал – 1,15
  - Отступ первой строки абзаца – 1,25 см
  - Выравнивание рисунков – по центру без отступа
  - Выравнивание таблиц – по ширине окна, без отступа
- Внедрение формул через редактор формул

Локальный электронный методический материал

Валерий Феодосиевич Белей, Герман Владимирович Коцарь

DISTRIBUTED GENERATION TECHNOLOGIES  
ТЕХНОЛОГИИ РАСПРЕДЕЛЕННОЙ ГЕНЕРАЦИИ

*Редактор И. Голубева*

Уч.-изд. л. 1,3. Печ. л. 1,2.

Издательство федерального государственного бюджетного  
образовательного учреждения высшего образования  
«Калининградский государственный технический университет».  
236022, Калининград, Советский проспект, 1