

DOI: 10.51790/2712-9942-2023-4-3-10

## УТОЧНЕНИЕ ПОТЕРЬ ЭНЕРГИИ В ЛИНИЯХ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ ПУТЕМ УЧЕТА ИЗМЕНЕНИЯ СОПРОТИВЛЕНИЯ ЛИНИЙ ВО ВРЕМЕНИ

**А. Я. Бигун<sup>1,a</sup>, В. В. Рыжаков<sup>1,b</sup>, Л. В. Владимиров<sup>1,c</sup>, Ю. Е. Дроздова<sup>2,d</sup>**

<sup>1</sup> Сургутский государственный университет, г. Сургут, Российская Федерация

<sup>2</sup> Омский государственный технический университет, г. Омск, Российская Федерация

<sup>a</sup> ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6004-0974>, ✉ [bigun\\_aya@surgu.ru](mailto:bigun_aya@surgu.ru)

<sup>b</sup> ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9664-4227>, [ryzhakov\\_vv@surgu.ru](mailto:ryzhakov_vv@surgu.ru)

<sup>c</sup> ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7208-0893>, [vladimirov\\_lv@surgu.ru](mailto:vladimirov_lv@surgu.ru)

<sup>d</sup> ORCID: <https://orcid.org/0009-0007-4043-5665>, [drozdova1010@mail.ru](mailto:drozdova1010@mail.ru)

*Аннотация:* в работе представлен расчет потерь электрической энергии с учетом нестационарности тепловых процессов в проводах воздушных линий, возникающих из-за изменения режимных и климатических факторов (скорости и направления ветра, температуры окружающей среды). Для расчетов использовался метод, базирующийся на решении уравнения теплового баланса в нестационарном тепловом режиме проводов с возможностью расчета потерь электрической энергии, а также проводился расчет с учетом рекомендаций данных в приказе Министерства энергетики РФ от 30.12.2008 г. №326. Особенностью производимого расчета потерь электрической энергии при нестационарном режиме является применение метода, позволяющего сразу рассчитать их. Произведено сравнение полученных данных, выявлены расхождения, и представлена экономическая оценка расхождений.

*Ключевые слова:* провод, нагрев, тепловой режим, погодные условия, потери энергии.

*Для цитирования:* Бигун А. Я., Рыжаков В. В., Владимиров Л. В., Дроздова Ю. Е. Уточнение потерь энергии в линиях электропередачи путем учета изменения сопротивления линий во времени. *Успехи кибернетики*. 2023;4(3):95–100. DOI: 10.51790/2712-9942-2023-4-3-10.

*Поступила в редакцию:* 02.08.2023.

*В окончательном варианте:* 02.09.2023.

## ACCURATE ESTIMATION OF ENERGY LOSSES IN POWER LINES CONSIDERING THE RESISTANCE VARIATION IN TIME

**A. Ya. Bigun<sup>1,a</sup>, V. V. Ryzhakov<sup>1,b</sup>, L. V. Vladimirov<sup>1,c</sup>, Yu. E. Drozdova<sup>2,d</sup>**

<sup>1</sup> Surgut State University, Surgut, Russian Federation

<sup>2</sup> Omsk State Technical University, Omsk, Russian Federation

<sup>a</sup> ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6004-0974>, ✉ [bigun\\_aya@surgu.ru](mailto:bigun_aya@surgu.ru)

<sup>b</sup> ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9664-4227>, [ryzhakov\\_vv@surgu.ru](mailto:ryzhakov_vv@surgu.ru)

<sup>c</sup> ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7208-0893>, [vladimirov\\_lv@surgu.ru](mailto:vladimirov_lv@surgu.ru)

<sup>d</sup> ORCID: <https://orcid.org/0009-0007-4043-5665>, [drozdova1010@mail.ru](mailto:drozdova1010@mail.ru)

*Abstract:* this study estimates the electrical power losses in overhead power lines taking into account transient thermal processes caused by changes in operating and ambient conditions (wind speed and direction, air temperature). We solved the heat balance equation for the transient thermal condition of the wires to obtain the electrical power losses as specified in the Directive No. 326 of the Russian Ministry of Energy dated December 30, 2008. The proposed method directly estimates the losses. We analyzed the results, found discrepancies and performed a feasibility study.

*Keywords:* wire, heating, thermal conditions, weather conditions, energy loss.

*Cite this article:* Bigun A. Ya., Ryzhakov V. V., Vladimirov L. V., Drozdova Yu. E. Accurate Estimation of Energy Losses in Power Lines Considering the Resistance Variation in Time. *Russian Journal of Cybernetics*. 2023;4(3):95–100. DOI: 10.51790/2712-9942-2023-4-3-10.

*Original article submitted:* 02.08.2023.

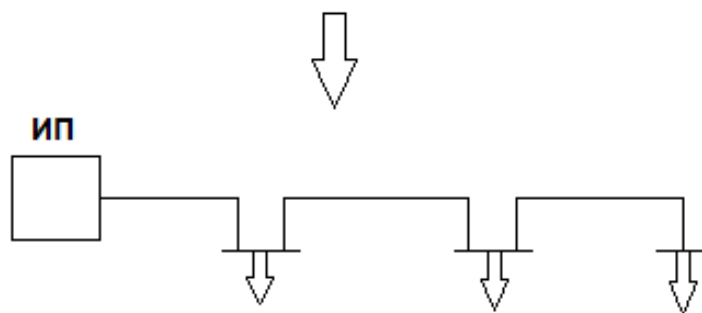
*Revision submitted:* 02.09.2023.

С ростом, наблюдающимся во всех отраслях, остро встает вопрос по обеспечению этих отраслей электрической энергией в необходимом объеме и установленного качества [1–3]. Для обеспечения потребителей электрической энергией есть несколько путей, а именно: повышение энергоэффективности оборудования на стороне потребителя, повышение выработки электрической энергии,

т. е. строительство и ввод в эксплуатацию новых генерирующих мощностей. Для реализации задач по повышению эффективности разработаны и приняты к исполнению ряд нормативных документов: распоряжение Правительства Российской Федерации от 9 июня 2020 г. № 1523-р «Об утверждении Энергетической стратегии Российской Федерации на период до 2035 года», распоряжение Правительства Российской Федерации от 3 апреля 2013 г. №511-р (ред. от 29 ноября 2017 г.) «Об утверждении Стратегии развития электросетевого комплекса Российской Федерации», постановление Правительства Российской Федерации от 15 апреля 2014 г. № 321 (ред. от 12 декабря 2022 г.) «Об утверждении государственной программы Российской Федерации «Энергоэффективность и развитие энергетики». Одним из них является госпрограмма «Энергосбережение и повышение энергетической эффективности», в которой указаны мероприятия по максимальному снижению потерь при производстве, передаче и потреблении энергии. Для эффективной реализации мероприятий, указанных в госпрограмме, необходимо наиболее точно определять потери в каждом элементе сети.

Расчет потерь электрической энергии регламентируется приказом Министерства энергетики РФ от 30.12.2008 г. №326 «Об организации в Министерстве энергетики Российской Федерации работ по утверждению нормативов технологических потерь электроэнергии при ее передаче по электрическим сетям» (с изменениями и дополнениями). Согласно пункту 12 раздела 2 «Расчет активных сопротивлений линий, шинопроводов, обмоток трансформаторов (автотрансформаторов)», мы должны учитывать температуру провода, но имеются некоторые пояснения: при отсутствии данных о температуре провода она принимается равной 20°C. Такой подход к расчету не приемлем, так как охлаждение и нагрев провода зависит от многих факторов: скорость ветра, температура окружающего воздуха, ток нагрузки, а также солнечное излучение [4-5]. Поэтому потери, рассчитанные согласно пункту 12, будут отличаться от реальных. Для учета всех вышеизложенных факторов разрабатываются методы, рассчитывающие температуру провода в стационарном тепловом режиме линий электропередачи [6] и в нестационарном режиме [7-8]. Наибольший интерес представляют методы, рассчитывающие температуру провода в онлайн-режиме, так как они учитывают все изменения.

Произведем расчет потерь электрической энергии в схеме, изображенной на рисунке 1, в которую входит источник и 3 потребителя. Расчет будет производиться, как указано в приказе, и методом, учитывающим изменения климатических и режимных факторов [7].



**Рис. 1.** Структурная схема

На рисунке 2 изображена расчетная схема, на которой видно, что у потребителей имеется 2 секции шин, соединенные между собой секционными выключателями, а также для каждой секции имеются свои линии, всего 6 линий. Использована марка провода модели ACCR 195-T20, сечением 99/20. Во всех режимах напряжение у потребителя не снижалось и не превышало допустимые значения. Расчет токов в линиях был произведен при помощи программы EnergyCS Режим.

На основании полученных значений токов (таблица 1) производился расчет температуры провода и потерь электрической энергии. Потери электрической энергии рассчитывались при температуре окружающей среды 20°C, скорость ветра 0,6 м/с, согласно стандарту организации ОАО «ФСК ЕЭС», №56947007-29.240.55.143-2013 «Методика расчета предельных токовых нагрузок по условиям сохранения механической прочности проводов и допустимых габаритов воздушных линий». Указанные условия соответствуют минимальным значениям скорости ветра и являются наихудшими условиями

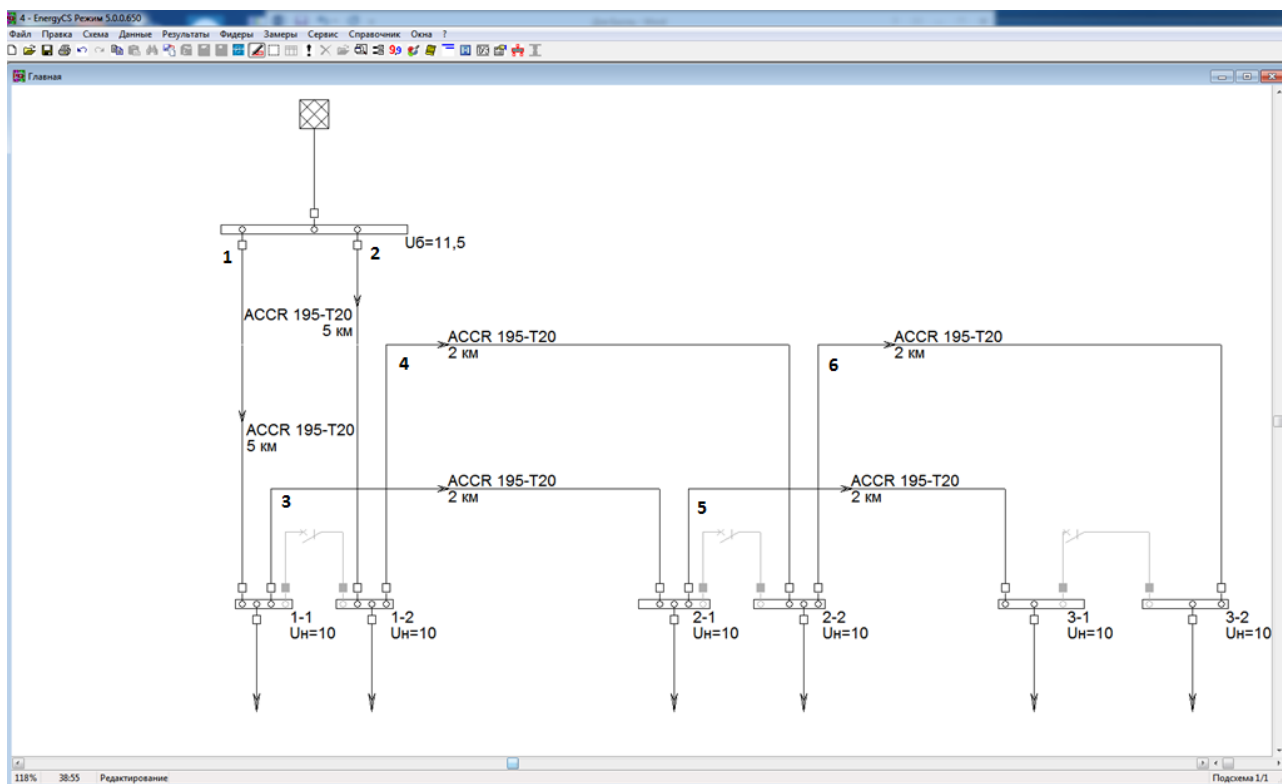


Рис. 2. Модель в EnergyCS

охлаждения. Угол атаки ветра ( $K_v$ ) был принят равным 1. При расчетах было сделано допущение, что ток в линиях изменяется мгновенно.

Результаты расчета температуры по линиям представлены на рисунке 3. Из представленной зависимости видно, что в начальный момент времени было принято, что ток в линиях отсутствовал, и, соответственно, температура провода была равна температуре окружающей среды. При плотности тока ниже  $1 \text{ А/мм}^2$  температура провода выше температуры окружающей среды на значения от  $0,8^\circ\text{C}$  до  $2,1^\circ\text{C}$ , при плотности тока более  $1 \text{ А/мм}^2$  температура повышается значительно.

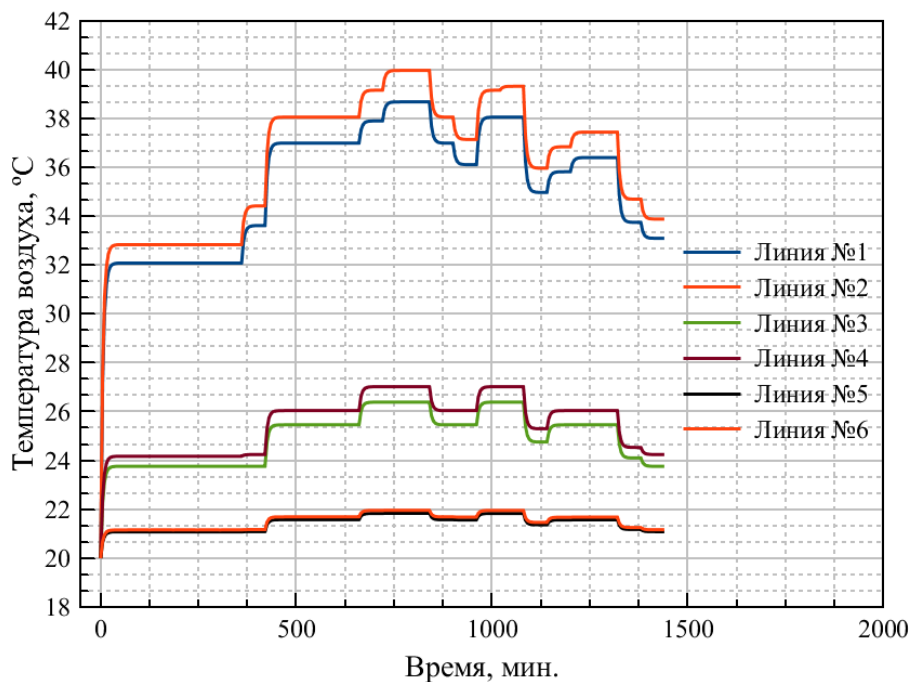


Рис. 3. Изменение температуры в линиях № 1–6

Таблица 1

## Расчет токов

Время, ч	Ток в линии 1, А	Ток в линии 2, А	Ток в линии 3, А	Ток в линии 4, А	Ток в линии 5, А	Ток в линии 6, А
1	203	209	115	121	62,6	64,7
2	203	209	115	121	62,6	64,8
3	203	209	115	121	62,6	64,8
4	203	209	115	121	62,6	64,8
5	203	209	115	121	62,6	64,8
6	203	209	115	121	62,6	64,8
7	215	221	115	122	62,9	65,1
8	239	246	138	145	75,2	77,8
9	239	246	138	145	75,2	77,8
10	239	246	138	145	75,2	77,8
11	239	246	138	145	75,2	77,8
12	245	253	149	156	80,9	83,5
13	250	258	149	156	81	83,6
14	250	258	149	156	81	83,6
15	239	246	138	145	75,2	77,8
16	233	240	138	145	75	77,6
17	246	253	149	156	80,9	83,5
18	246	254	149	156	80,9	83,5
19	225	232	129	136	70,2	72,6
20	231	238	138	145	75	77,5
21	235	242	138	145	75,1	77,6
22	235	242	138	145	75,1	77,6
23	216	223	120	126	65,3	67,4
24	211	217	115	122	62,8	65

Особенностью применяемого метода [8] является возможность расчета потерь электрической энергии за переходный тепловой процесс. Результаты расчетов представлены в таблице 2. При плотности тока до  $1 \text{ А/мм}^2$  разность потерь составляет 0,1 кВт, при плотности тока незначительно выше  $1 \text{ А/мм}^2$  разность составляет 0,9–1,1 кВт, а при плотности тока более  $1 \text{ А/мм}^2$  разность составляет от 18,8 кВт до 21,5 кВт. Суммарная разность представлена в таблице.

Для оценки финансовых потерь приняли, что средняя температура воздуха равна  $20^\circ\text{C}$  95 суток. Данные значения средней температуры воздуха в летний период соответствуют значительной территории нашей страны. Потери электрической энергии по линиям равны:

- для первой линии – 27756,64 кВт/ч;
- для второй линии – 33894,26 кВт/ч;
- для третьей линии – 1335,11 кВт/ч;
- для четвертой линии – 1629,49 кВт/ч;
- для пятой линии – 113,54 кВт/ч;
- для шестой линии – 129,31 кВт/ч.

После суммирования по всей схеме потери электрической энергии за лето составили 64858,35 кВт/ч. Приняв тариф 5 рублей за кВт/ч, получаем 324291 рубль 75 копеек. Данная сумма значительна для схемы, где суммарная длина линий 18 км.

Если рассмотреть данный вопрос относительно всех распределительных сетей, то размеры потерь примут масштабные значения, так как протяженность этих линий составляет сотни тысяч километров. Стоит отметить, что рассмотрен вопрос при средней летней температуре и малой скорости ветра (значения штиля). Если же его рассматривать относительно температур и скоростей ветра в ре-

Таблица 2

## Расчет потерь

Время, ч	Линия 1		Линия 2		Линия 3		Линия 4		Линия 5		Линия 6	
	Нестац. ре- жим, кВт	При 20°C, кВт	Нестац. ре- жим, кВт	При 20°C, кВт	Нестац. ре- жим, кВт	При 20°C, кВт	Нестац. ре- жим, кВт	При 20°C, кВт	Нестац. ре- жим, кВт	При 20°C, кВт	Нестац. ре- жим, кВт	При 20°C, кВт
1	175,8	168,5	186,8	178,6	21,9	21,6	24,3	23,9	6,4	6,4	6,9	6,8
2	176,6	168,5	187,7	178,6	22,0	21,6	24,3	23,9	6,4	6,4	6,9	6,9
3	176,6	168,5	187,7	178,6	22,0	21,6	24,3	23,9	6,4	6,4	6,9	6,9
4	176,6	168,5	187,7	178,6	22,0	21,6	24,3	23,9	6,4	6,4	6,9	6,9
5	176,6	168,5	187,7	178,6	22,0	21,6	24,3	23,9	6,4	6,4	6,9	6,9
6	176,6	168,5	187,7	178,6	22,0	21,6	24,3	23,9	6,4	6,4	6,9	6,9
7	199,1	189,0	211,0	199,7	22,0	21,6	24,8	24,3	6,5	6,5	7,0	6,9
8	249,0	233,6	264,8	247,4	31,8	31,1	35,2	34,4	9,3	9,2	10,0	9,9
9	249,3	233,6	265,1	247,4	31,8	31,1	35,2	34,4	9,3	9,2	10,0	9,9
10	249,3	233,6	265,1	247,4	31,8	31,1	35,2	34,4	9,3	9,2	10,0	9,9
11	249,3	233,6	265,1	247,4	31,8	31,1	35,2	34,4	9,3	9,2	10,0	9,9
12	262,7	245,4	281,5	261,7	37,2	36,3	40,9	39,8	10,8	10,7	11,5	11,4
13	274,4	255,6	293,6	272,2	37,2	36,3	40,9	39,8	10,8	10,7	11,5	11,4
14	264,8	255,6	293,7	272,2	37,2	36,3	40,9	39,8	10,8	10,7	11,5	11,4
15	249,4	233,6	265,3	247,4	31,8	31,1	35,2	34,4	9,3	9,2	10,0	9,9
16	236,2	222,0	251,6	235,5	31,8	31,1	35,2	34,4	9,3	9,2	9,9	9,8
17	264,9	247,4	281,4	261,7	37,2	36,3	40,9	39,8	10,8	10,7	11,5	11,4
18	265,1	247,4	284,0	263,8	37,2	36,3	40,9	39,8	10,8	10,7	11,5	11,4
19	219,5	207,0	234,3	220,1	27,7	27,2	30,9	30,3	8,1	8,1	8,7	8,6
20	231,8	218,2	247,0	231,6	31,8	31,1	35,2	34,4	9,3	9,2	9,9	9,8
21	240,4	225,8	255,9	239,5	31,8	31,1	35,2	34,4	9,3	9,2	9,9	9,8
22	240,5	225,8	256,0	239,5	31,8	31,1	35,2	34,4	9,3	9,2	9,9	9,8
23	201,3	190,8	215,4	203,3	23,9	23,6	26,4	26,0	7,0	7,0	7,5	7,4
24	191,5	182,0	203,2	192,5	22,0	21,6	24,8	24,3	6,5	6,5	6,9	6,9
Потери за 24 ч.	5383,156	5090,981	5759,099	5402,317	699,766	685,7122	774,257	757,1045	204,282	203,0869	218,386	217,0249
Раз- ность	292,1752		356,7817		14,05378		17,15248		1,195125		1,361147	

альном времени, можно получить наиболее точные значения. Также стоит отметить, что методы, базирующиеся на решении уравнения теплового баланса при нестационарном тепловом режиме проводов воздушных линий, позволяют с наибольшей эффективностью эксплуатировать линии. Из вышеизложенного следует, что организации сетевого комплекса и потребители заинтересованы в использовании такого подхода в расчете.

## ЛИТЕРАТУРА

- Игнатенко И. В., Власенко С. А., Пазенко Н. П., Сунь Ю. Обеспечение работоспособности воздушных линий электропередачи путём сохранения габарита при пропуске токов повышенной величины. *Вестник Приамурского государственного университета им. Шолом-Алейхема*. 2019;4:25–34.
- Шепелев А. О., Гиршин С. С., Ткаченко В. А., Северинов Р. А. Практические способы реализации методов расчёта установившихся режимов электрических систем с учётом температурной зависимости активных сопротивлений. *Ученые Омска – региону* : Материалы V Региональной научно-технической конференции, Омск, 13–14 октября 2020 года / Под общей редакцией Л. О. Штриплинга. Омск: Омский государственный технический университет; 2020. С. 119–123.
- Шепелев А. О., Шепелева Е. Ю. Исследование несинусоидальных режимов работы электрооборудования в системе электроснабжения с 6-пульсным преобразователем. *Вестник Югорского государственного университета*. 2022;2:68-78. DOI: 10.18822/byusu20220268-78.

4. Васьяковская А. В., Шепелев А. О., Шепелева Е. Ю. Определение максимально допустимого перетока активной мощности в сечении с учетом тепловых режимов линий электропередачи. *Вестник Югорского государственного университета*. 2023;1(68):131-138. DOI: 10.18822/byusu202301131-138.
5. Фигурнов Е. П., Харчевников В. И. Опыты по нагреву неизолированных проводов воздушных линий. *Электрические станции*. 2016;11:41–47.
6. Петрова Е. В., Гиришин С. С., Ляшков А. А., Бигун А. Я. Аналитическое решение уравнения теплового баланса провода воздушной линии в условиях вынужденной конвекции. *Современные проблемы науки и образования*. 2015;1(1):218. EDN: VIDWFF.
7. Girshin S. S., Bigun A. Y., Petrova E. V. *Analysis of Dynamic Thermal Rating of Overhead Power Lines in the Conditions of Forced Convection Considering Non-Linearity of Heat Transfer Processes*. International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing, ICIEAM 2016. Chelyabinsk: Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc.; 2016. P. 7911434. DOI: 10.1109/ICIEAM.2016.7911434. EDN: XNBLQG.
8. Пазенко Н. П., Пухова А. И., Игнатенко И. В. Разработка математической модели расчета габарита провода воздушной линии электропередачи для определения предельных токовых нагрузок. *Транспорт Азиатско-Тихоокеанского региона*. 2019;2:40–43. EDN: HKMVVG.