

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ МАКСИМАЛЬНО ДОПУСТИМОГО ПЕРЕТОКА
АКТИВНОЙ МОЩНОСТИ В СЕЧЕНИИ
С УЧЕТОМ ТЕПЛОВЫХ РЕЖИМОВ ЛИНИЙ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ**

Васьковская Анастасия Викторовна
ведущий специалист АО «Системный оператор
Единой энергетической системы» – Омское РДУ,
Омск, Россия
E-mail: nastya-7798@inbox.ru

Шепелев Александр Олегович
кандидат технических наук, доцент,
ФГБОУ ВО «Югорский государственный университет»
Ханты-Мансийск, Россия
E-mail: a_shepelev@ugrasu.ru

Шепелева Елена Юрьевна
старший преподаватель,
ФГБОУ ВО «Югорский государственный университет»
Ханты-Мансийск, Россия
E-mail: e_shepeleva@ugrasu.ru

Предмет исследования: в настоящей работе проводится оценка возможности внедрения в задачу расчёта максимально и аварийно допустимых перетоков активной мощности с учётом тепловых режимов воздушных линий при планировании электроэнергетических режимов.

Цель исследования: определение влияния тепловых процессов в линиях электропередачи на максимально допустимый переток активной мощности в контролируемых сечениях электроэнергетических систем.

Методы и объекты исследования: рассмотрены такие факторы, влияющие на перетоки активной мощности, как температура окружающего воздуха, корректировка на которую в настоящее время производится Системным оператором, скорость ветра, солнечная радиация и непосредственно нагрев от протекающего тока. Произведено моделирование установившегося электроэнергетического режима в программном комплексе RastrWin3 и Mathcad для 2-узловой схемы с утяжелением режима только с учетом температуры окружающей среды и расчеты установившегося режима уже с учетом вариации погодных параметров с учетом возможных ограничений максимальной нагрузки, обусловленных режимами работы энергосистемы (техническая возможность работы генерирующего оборудования в рассматриваемой работе не учитывалась).

Результаты исследования: в результате произведённых расчетов наглядно видно, что при учете тепловых режимов воздушных линий электропередачи допустимые перетоки активной мощности отличаются на 16-26% от значений, определяемых только лишь при учёте температуры окружающей среды.

Ключевые слова: электроэнергетический режим, допустимый переток активной мощности, температурные режимы, воздушные линии электропередачи.

**DETERMINATION OF THE MAXIMUM ALLOWABLE ACTIVE POWER
FLOW IN THE SECTION TAKING INTO ACCOUNT THE THERMAL CONDITIONS
OF POWER TRANSMISSION LINES**

Anastasiya V. Vas'kovskaya

Lead Specialist

System Operator of the Unified Energy System – JSC,

Omsk, Russia

E-mail: nastya-7798@inbox.ru

Alexander O. Shepelev

Candidate of Technical Sciences,

Assistant Professor,

Yugra State University,

Khanty-Mansiysk, Russia

E-mail: a_shepelev@ugrasu.ru

Elena Yu. Shepeleva

Senior Lecturer,

Yugra State University,

Khanty-Mansiysk, Russia

E-mail: e_shepeleva@ugrasu.ru

Subject of research: This paper assesses the possibility of introducing into the task of calculating maximum and emergency allowable active power flow, taking into account the thermal modes of overhead lines when planning electric power regimes.

Purpose of research: determine the effect of thermal processes in power lines on the maximum allowable active power flow in controlled sections of electric power systems.

Methods and objects of research: Such factors influencing active power flow as ambient air temperature, which is currently corrected by the Russian Power System Operator, wind speed, solar radiation and direct heating from flowing current are considered. Simulation of steady state flow in the software package RastrWin3 and Mathcad for a 2-bus scheme with mode only taking into account the ambient temperature and the calculations of steady state flow were already taking into account variations in weather parameters, taking into account possible restrictions on the maximum load due to the modes of operation of the power system (technical feasibility generating equipment was not taken into account in the work under consideration).

Main results of research: the result of calculation, it is clearly seen that when taking into account the thermal conditions of overhead power lines, the allowable active power flows differ by 16–26 % from the values determined only when taking into account the ambient temperature.

Keywords: electric power mode, allowable active power flow, temperature modes, overhead power lines.

Введение

Планирование электроэнергетического режима – одна из основных задач оперативно-диспетчерского управления, и заключается она в определении состава генерирующего оборудования и загрузки электростанций различного типа для покрытия нагрузки энергосистемы. Задача планирования электроэнергетического режима не производится без расчёта максимально допустимого и аварийно допустимого перетоков активной мощности в контролируемом сечении. В настоящее время в Российской Федерации планирование режимов работы

как для планового диспетчерского графика, так и для выбора состава генерирующего оборудования осуществляется только с учетом температуры окружающей среды [1], при этом не учитываются другие факторы, влияющие на температуру токопроводящих частей: солнечное излучение, скорость и направление ветра. В работе предлагается на этапе расчёта установившегося режима учесть факторы, влияющие на фактическую температуру проводников, и произвести оценку перетоков активной мощности в контролируемом сечении.

В основе обеспечения устойчивого функционирования ЭЭС лежит расчёт и анализ допустимых перетоков активной мощности в контролируемом сечении (фактически анализ статической апериодической устойчивости). Изначально анализ данного вида устойчивости в крупных ЭЭС представлял собой сложную задачу. Однако благодаря развитию возможностей персональных компьютеров, а также полноте теоретических исследований, определение запасов устойчивости на основе анализа установившихся режимов является одной из основных функций оперативно-диспетчерского управления [2].

Дальнейшим этапом в определении запасов статической апериодической устойчивости на основе анализа установившихся режимов становится возможность учитывать тепловые процессы, происходящие в элементах ЭЭС [3–6].

Надежность обеспечения промышленных и бытовых потребителей электрической энергии значительно зависит от оборудования, находящегося в эксплуатации, в том числе и от проводника воздушной линии электропередачи. Одним из наиболее важных критериев оценки допустимости электроэнергетического режима является допустимый ток (в т. ч. допустимый переток мощности). Важно отметить, что воздушные линии электропередачи являются наиболее надежным способом передачи электрической энергии. Основными факторами, влияющими на нагрев и охлаждение проводника воздушной линии, являются джоулевы потери, инфракрасное излучение, конвекция (естественная или вынужденная) и солнечная радиация [7–10].

Солнечная радиация в то же время вносит ощутимое влияние только в регионах с жарким климатом, и поэтому в регионах средней полосы может не учитываться [10, с. 6].

Множественные проведённые исследования показали, что активное сопротивление, как один из параметров элементов ЭЭС, не является постоянной величиной, а изменяется в зависимости от температурных факторов и может значительно повлиять на параметры электроэнергетического режима. Это связано с тем, что активное сопротивление изменяется в широком диапазоне рабочих температур от -50 до $+90$ градусов Цельсия. Т. е., фактически, активное сопротивление линий электропередачи может изменяться вплоть до 50 %, таким образом влияя на пропускную способность элемента. Это, в свою очередь, влияет на запасы по статической апериодической устойчивости. Однако на сегодняшний день в практических расчетах установившихся режимов и оценке запасов статической устойчивости малое внимание уделяется учету фактической температуры элементов, окружающей среды, – соответственно, активное сопротивление принимают постоянным, не зависящим от температуры. Это допущение может сильно влиять на оценку запасов статической устойчивости в ЭЭС.

Результаты и обсуждение

Моделирование электроэнергетического режима электрической системы произведём в программном продукте RastWin3 и программном комплексе Mathcad. Для расчёта максимально и аварийно допустимого перетоков активной мощности воспользуемся методом последовательного утяжеления.

В работе были смоделированы установившиеся электроэнергетические режимы для двух узловых схемы, моделирующей генератор (ШБМ)-линию электропередачи-нагрузку.

2-узловая схема. Исходные параметры для моделирования 2-узловой схемы представлены в таблицах 1 и 2 (узлы и ветви, соответственно).

Таблица 1 – Исходные данные

$U_{\text{ном}}, \text{кВ}$	$P, \text{МВт}$	$Q, \text{Мвар}$	Марка провода	$L, \text{км}$
110	40	15	АС-95/16	30

Таблица 2 – Параметры провода АС-95/16

Диаметр провода $d_{\text{пр}}$	0.0135 м
Погонное активное сопротивление при 20°C r_{20}	0.301 Ом/км
Погонное индуктивное сопротивление x_0	0.434 Ом/км
Погонная емкостная проводимость b_0	2.611 мкСм/км
Температурный коэффициент сопротивления α	0.00403 °C ⁻¹
Степень черноты поверхности провода ϵ_n	0.6
Поглощательная способность поверхности провода для солнечного излучения A_s	0.6
Допустимая температура провода $\Theta_{\text{доп}}$	90 °C

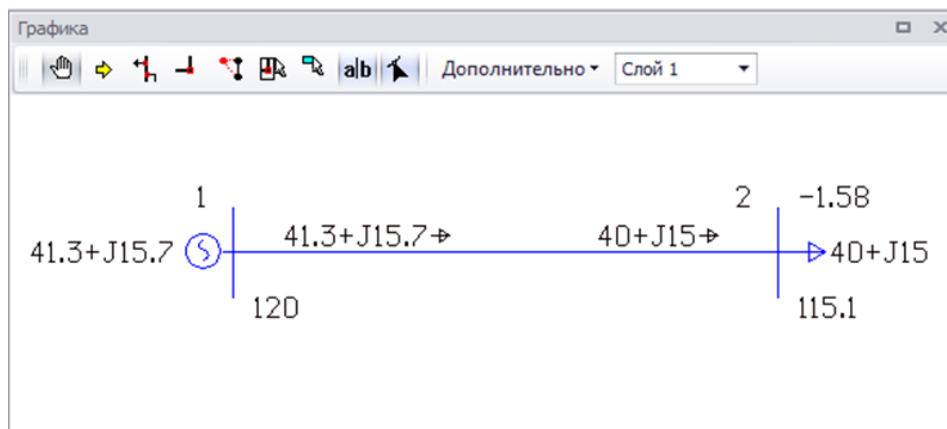


Рисунок 1 – 2-узловая схема

Расчет с учётом изменения температуры окружающей среды в соответствии с требованиями системного оператора

Сначала произведём расчёт с учётом температуры окружающей среды $t_{\text{окр}} = +25$ °C, которая считается номинальной для воздушных линий электропередачи [11].

Токвая нагрузка ЛЭП															
	N_нач	N_кон	Название	P_нач	P_кон	Место	контр. I	Tc	Iдоп_25_АДТН	N_I(t)_АДТН	Iдоп_расч_АДТН	I/I_доп_АДТН	Iдоп_25_АДТН	N_I(t)_АДТН	Iдоп_расч_АДТН
1	1	2	-	-41	-40	ВН	<input checked="" type="checkbox"/>	25,0	330,0	1	330,0	64,9	420,0	1	420,0

tr=0

выбрана 1 запись из 1

Конструктор фильтра...

Рисунок 2 – Токвая нагрузка ЛЭП при $t = +25$ °C

Таблица 3 – Расчетные данные для $t = +25$ °C

Переток, МВт	$I_{\text{ДДТН}}, \text{А}$	$I_{\text{АДТН}}, \text{А}$	$\frac{I}{I_{\text{допДДТН}}}, \%$	$\frac{I}{I_{\text{допАДТН}}}, \%$
41.3	330	420	64.9	51

Далее производится расчёт для температуры окружающей среды $t_{\text{окр}} = +10$ °C и $t_{\text{окр}} = -10$ °C.

*Определение максимально допустимого перетока активной мощности
в сечении с учетом тепловых режимов линий электропередачи*

	Номер	Название	Шаг	PN_2	QN_2
1		инициализация		40	15
2	1	Шаг [1]-[1.0000]	1,0000	45	17
3	2	Шаг [2]-[2.0000]	2,0000	50	19
4	3	Шаг [3]-[3.0000]	3,0000	55	21
5	4	Шаг [4]-[4.0000]	4,0000	60	23
6	5	Шаг [5]-[5.0000]	5,0000	65	24
7	6	Шаг [6]-[5.5000]	5,5000	68	25

1 выбрано 7 записей из 7 Конструктор фильтра...

Рисунок 3 – Утяжеление режима при температуре окружающей среды $t_{окр} = +10^{\circ}\text{C}$

	N_нач	N_кон	Название	P_нач	P_кон	Место	контр. I	Tc	Iдоп_25_ДДТН	N_1(t)_ДДТН	Iдоп_расч_ДДТН	I/I_dop_ДДТН	Iдоп_25_АДТН	N_1(t)_АДТН	Iдоп_расч_АДТН
1	1	2	-	-71	-67	ВН	<input checked="" type="checkbox"/>	10,0	330,0	1	381,2	98,1	420,0	1	485,1

tr=0 выбрана 1 запись из 1 Конструктор фильтра...

Рисунок 4 – Токовая нагрузка ЛЭП при температуре окружающей среды $t_{окр} = +10^{\circ}\text{C}$

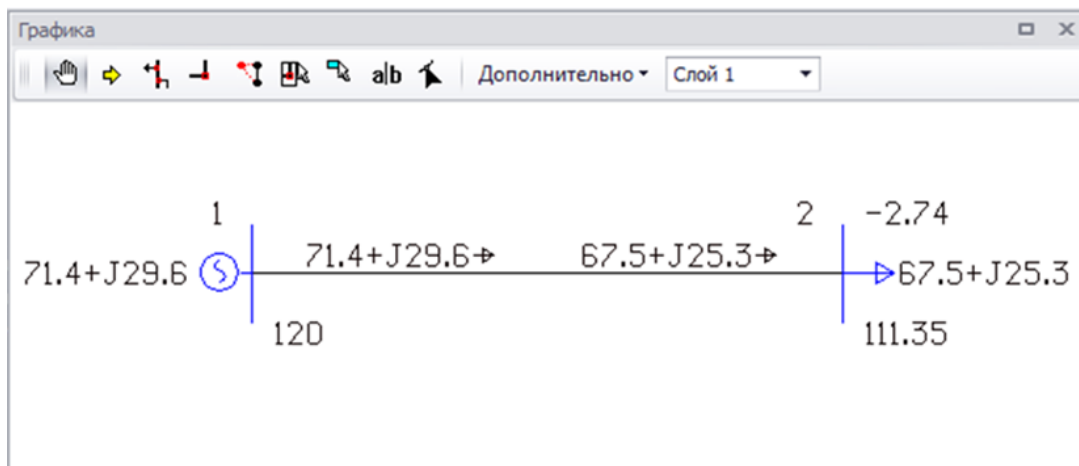


Рисунок 5 – 2-узловая схема с утяжелением режима для $t_{окр} = +10^{\circ}\text{C}$

Таблица 4 – Расчетные данные для $t_{окр} = +10^{\circ}\text{C}$

Переток, МВт	$I_{ДДТН}, \text{A}$	$I_{АДТН}, \text{A}$	$\frac{I}{I_{допДДТН}}, \%$	$\frac{I}{I_{допАДТН}}, \%$
71.4	381.2	485.1	98.1	77.1

Номер	Название	Шаг	PN_2	QN_2
1	инициализация		40	15
2	Шаг [1]-[1.0000]	1,0000	45	17
3	Шаг [2]-[2.0000]	2,0000	50	19
4	Шаг [3]-[3.0000]	3,0000	55	21
5	Шаг [4]-[4.0000]	4,0000	60	23
6	Шаг [5]-[5.0000]	5,0000	65	24
7	Шаг [6]-[6.0000]	6,0000	70	26
8	Шаг [7]-[7.0000]	7,0000	75	28
9	Шаг [8]-[7.2500]	7,2500	76	29

1 выбрано 9 записей из 9 Конструктор фильтра...

Рисунок 6 – Утяжеление режима при температуре окружающей среды $t_{окр} = -10\text{ }^{\circ}\text{C}$

N_нач	N_кон	Название	P_нач	P_кон	Место	контр. I	Tc	Idоп_25_ДДТН	N_I(t)_ДДТН	Idоп_расч_ДДТН	I/I_dоп_ДДТН	Idоп_25_АДТН	N_I(t)_АДТН	Idоп_расч_АДТН
1	2	-	-81	-76	ВН	✓	-10,0	330,0	1	425,7	100,3	420,0	1	541,8

tr=0 выбрана 1 запись из 1 Конструктор фильтра...

Рисунок 7 – Токовая нагрузка ЛЭП при температуре окружающей среды $t_{окр} = -10\text{ }^{\circ}\text{C}$

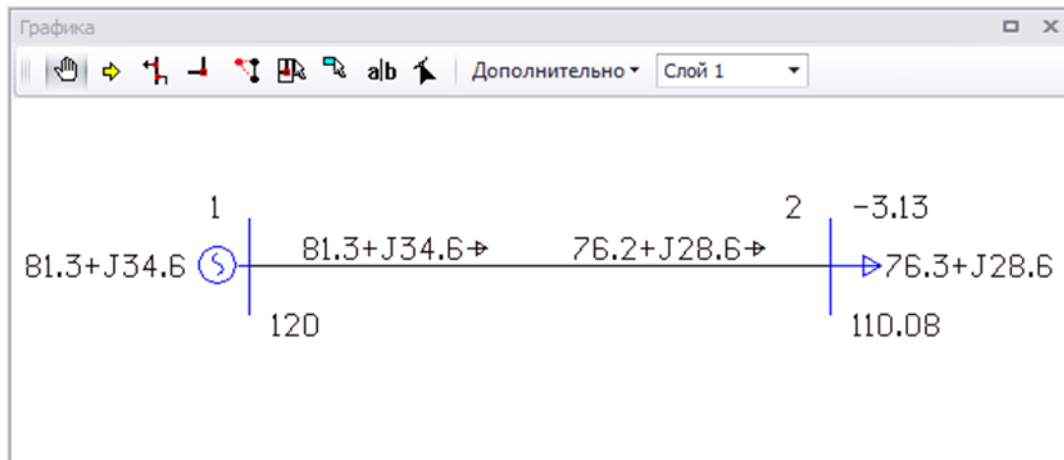


Рисунок 8 – 2-узловая схема с утяжелением режима для $t_{окр} = -10\text{ }^{\circ}\text{C}$

Таблица 5 – Расчетные данные для $t_{окр} = -10\text{ }^{\circ}\text{C}$

Переток, МВт	$I_{ДДТН}, \text{ A}$	$I_{АДТН}, \text{ A}$	$\frac{I}{I_{допДДТН}}, \%$	$\frac{I}{I_{допАДТН}}, \%$
81.3	425.7	541.8	100.3	78.8

Расчет с учетом неблагоприятных условий окружающей среды

Дополнительные исходные данные для неблагоприятных условий охлаждения представлены в таблице 6. Неблагоприятные условия выбраны в соответствии с данными [4, 9].

Таблица 6 – Исходные данные

Скорость ветра	0.6 м/с
Угол атаки ветра	0.55
Постоянная излучения	$5.67 \cdot 10^{-8}$, Вт/м ² · К ⁴
Солнечная радиация	0.7

Таблица 7 – Расчетные данные для $t = +10$ °С с утяжелением режима

Переток, МВт	I_{\max} , А	$\frac{I}{I_{\text{допДДТН}}}$, %	$\frac{I}{I_{\text{допАДТН}}}$, %
58	301.7	100	77.8

Таблица 8 – Расчетные данные для $t = -10$ °С с утяжелением режима

Переток, МВт	I_{\max} , А	$\frac{I}{I_{\text{допДДТН}}}$, %	$\frac{I}{I_{\text{допАДТН}}}$, %
67.9	353.7	100	77.8

Расчет допустимых перетоков мощности с учётом повышенной средней скорости ветра

Дополнительные исходные данные для благоприятных условий охлаждения представлены в таблице 9.

Таблица 9 – Исходные данные

Скорость ветра	3 м/с	
Угол атаки ветра	0.55	1
Постоянная излучения	$5.67 \cdot 10^{-8}$, Вт/м ² · К ⁴	
Солнечная радиация	0.7	

Таблица 10 – Расчетные данные для $t = +10$ °С с утяжелением режима при $v = 3$ м/с

k_v	Переток, МВт	I_{\max} , А	$\frac{I}{I_{\text{допДДТН}}}$, %	$\frac{I}{I_{\text{допАДТН}}}$, %
0.55	87.6	459.5	100	77.8
1	115	608.5	100	77.8

Таблица 11 – Расчетные данные для $t = +10$ °С с утяжелением режима при $v = 3$ м/с

k_v	Переток, МВт	I_{\max} , А	$\frac{I}{I_{\text{допДДТН}}}$, %	$\frac{I}{I_{\text{допАДТН}}}$, %
0.55	102.3	538.8	100	77.8
1	134	712.9	100	77.8

Выводы

Таким образом, на основе полученных результатов моделирования рассматриваемой системы электроснабжения с 6-пульсным преобразователем, сравнивая результаты с существующими нормами по обеспечению качества электрической энергии, можно сделать следующие выводы.

Были выполнены расчеты установившихся режимов для 2-узловой схемы с утяжелением режима только с учетом температуры окружающей среды и расчеты установившегося режима уже с учетом вариации погодных параметров. В результате данных расчетов наглядно видно, что при учете тепловых режимов воздушных линий электропередачи допустимые перетоки активной мощности значительно отличаются от значений, определяемых только лишь при учёте температуры окружающей среды.

По результатам проведённых расчётов можно сделать вывод о том, что при наиболее худших условиях охлаждения наблюдается снижение перетоков мощности в контролируемых сечениях относительно расчёта режима в RastrWin3 с учётом корректировки длительно-допустимого тока относительно температуры окружающего воздуха. Так, например, в 2-узловой схеме величина максимально-допустимого перетока активной мощности снизилась на 18% ($P_{МДП_+10} = 58 \text{ МВт}$) и 16% ($P_{МДП_ -10} = 68 \text{ МВт}$) при температуре окружающего воздуха $+10^\circ\text{C}$ и -10°C , соответственно, относительно расчёта в RastrWin3 ($P_{МДП_Rastr_+10} = 71 \text{ МВт}$ и $P_{МДП_Rastr_ -10} = 81 \text{ МВт}$). При скорости ветра 3 м/с и $k_v = 0,55$ (угол атаки ветра) величина максимально-допустимого перетока активной мощности увеличилась на 24% ($P_{МДП_+10} = 88 \text{ МВт}$) и 26% ($P_{МДП_ -10} = 102 \text{ МВт}$) при температуре окружающего воздуха $+10^\circ\text{C}$ и -10°C , соответственно, относительно расчёта в RastrWin3. В остальных рассмотренных случаях и схемах, результаты получились со схожей тенденцией.

Литература

1. Требования к обеспечению надёжности электроэнергетических систем, надёжности и безопасности объектов электроэнергетики и энергопринимающих установок «Методические указания по устойчивости энергосистем»: Приказ Министерства энергетики РФ от 3 августа 2018 г. № 630. – Текст : непосредственный.
2. Об электроэнергетике: Федер. закон [принят Гос. Думой 26.03.2003 № 35-ФЗ, ред. от 03.07.2016] : справочная правовая система Консультант Плюс (интернет-версия). – Текст : электронный. – URL : http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_41502/ (дата обращения: 11.03.23).
3. Frank, S. Temperature-Dependent Power Flow / S. Frank, J. Sexauer, S. Mohagheghi. – DOI: 10.1109/TPWRS.2013.2266409 // IEEE Transactions on Power System. – 2013. – Vol. 28, № 4. – Pp. 4007–4018.
4. Гиршин, С. С. Разработка усовершенствованных методов расчёта установившихся режимов электроэнергетических систем с учётом температурной зависимости активных сопротивлений ВЛ / С. С. Гиршин, А. О. Шепелев. – Текст : непосредственный // Электрические станции. – 2019. – № 11. – С. 44–54.
5. Шепелев, А. О. Применение метода внутренней температурной коррекции для расчёта установившихся режимов электроэнергетических систем с учётом тепловых процессов в элементах / А.О. Шепелев. – Текст : непосредственный // Промышленная энергетика. – 2020. – № 9. – С. 9–19.
6. Данилов, М. И. Определение потоков мощности и температуры проводов электрической сети установившегося состояния энергосистемы / М. И. Данилов, И. Г. Романенко. – Текст : непосредственный // Электрические станции. – 2022. – № 7. – С. 25–37.
7. IEEE Std. 738-2012. (Revision of IEEE Std 738-2006 – Incorporates IEEE Std 738-2012 Cor 1–2013). Standard for Calculating the Current-Temperature Relationship of Bare Overhead Conductors. – NY, The USA: IEEE, 2012. – 72 p.
8. CIGRE. Guide for thermal rating calculations of overhead lines / Working group B2.43. – 2014.
9. Методика расчёта предельных токовых нагрузок по условиям сохранения механической прочности проводов и допустимых габаритов воздушных линий: СТО 56947007-29.240.55.143–2013. – М. : ОАО «ФСК ЕЭС», – 2013. – 67 с. – Текст : непосредственный.
10. Методика расчета предельных токовых нагрузок по условиям нагрева проводов для действующих линий электропередачи // РД 34.20.547 (МТ 34-70-037-87). – М. : ВНИИЭ, 1988. – 12 с. – Текст : непосредственный.
11. Правила устройства электроустановок: Все действующие разделы ПУЭ-6 и ПУЭ-7. 7-й выпуск. – Новосибирск: Сиб. Унив. Изд-во, 2007. – 854 с. – Текст : непосредственный.