УДК [621.315.1](https://www.teacode.com/online/udc/62/621.315.1.html)

С.О. ХОМУТОВ, И.В. БЕЛИЦЫН, И.А. ПАВЛИЧЕНКО

**ИССЛЕДОВАНИЕ РЕЖИМА ВОЗДУШНОЙ ЛИНИИ С**

**ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ КОМПАКТИРОВАННЫХ И**

**ВЫСОКОТМЕПЕРАТУРНЫХ ПРОВОДОВ**

**Аннотация.** *В статье рассмотрены режимы воздушной линии электропередачи напряжением 110 кВ с использование проводов нового поколения: компактированных и высокотемпературных. Построены графики зависимости тока в линии от мощности нагрузки для различных марок проводов. Определено значение напряжения в конце линии в зависимости от мощности нагрузки. Получена функциональная зависимость затрат на сооружение воздушной линии с учетом особенностей высокотемпературных проводов.*

**Ключевые слова:** *режим линии, провода нового поколения, максимально допустимы ток, напряжение, затраты, воздушные линии.*

**Введение**

На сегодняшний день всё большее распространение получают провода нового поколения (ПНП). Это вызвано не только технологическим развитием в области строительства линий, а именно появлением новых конструкций проводов и использованием новых материалов, но и развитием нормативно-технической базы, позволяющей производить соответствующее технико-экономическое обоснование для проектов.

В качестве объекта исследования были рассмотрены режимы воздушных линий электропередачи (ВЛЭП). Предметом исследования является компактированные и высокотемпературные провода.

Для исследования была выбрана промежуточная опора типа 2П110-1. Среднегеометрическое расстояние *D*ср для расчета индуктивного сопротивления и емкостной проводимости для данного типа опоры составляет 6,2 метра. Согласно [1, 2] предельная длина ВЛЭП 110 кВ составляет 80 км. Для анализа были выбраны ПНП: AACSRZ, АСВП, АСВТ, АСТ. Данные провода были выбраны по причине того, что линейная арматура для них идентична, используемой для стандартного провода АС, что позволяет при оценки затрат нивелировать дополнительные расходы на обучение персонала при строительстве воздушной линии. В работе не рассматриваются механические характеристики проводов, поэтому результаты применимы при сравнение характеристик режима (ток в линии, напряжение в конце линии). Сечения рассматриваемых проводов показаны на рисунке 1. Характеристики проводов представлены в таблице 1. Расчетные параметры ВЛЭП для расчета режима представлены в таблице 2.

  

 а) б) в)

***Рисунок 1 – Сечение ПНП:***

*а) AACSRZ 251; б) АСВП и АВСТ исполнение 4; в) АСТ*



***Рисунок 2 – Промежуточная опора 2П110-1***

Таблица 1 – Характеристики исследуемых проводов

|  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Марка провода | *F* в целом, мм2 | *F* сердечника, мм2 | *d*, мм | *R*0*,* Ом/км | *I*длит.доп, А | *t*длит.доп*,℃* |
| АС-240/32 | 275,7 | 31,7 | 21,6 | 0,118 | 610 | 70 |
| AACSRZ 339 | 345,9 | 75,6 | 22,45 | 0,1234 | 756 | 90 |
| АСВП 295/44 | 294,8 | 43,9 | 21,5 | 0,098 | 678 | 70 |
| АСВТ 295/44 | 294,8 | 43,9 | 21,5 | 0,099 | 1125 | 150 |
| АСТ-240/32 | 275,7 | 31,7 | 21,6 | 0,1217 | 1398 | 210 |

Таблица 2 – Расчетные характеристики схемы замещения ВЛЭП с использованием различных проводов

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| Марка провода | *R*л, Ом | *X*л, Ом | *B*л, мкСм |
| АС-240/32 | 9,44 | 33,04 | 219,96 |
| AACSRZ 251 | 9,872 | 32,85 | 221,31 |
| АСВП 218/63 | 7,84 | 33,06 | 219,80 |
| АСВТ 218/63 | 7,92 | 33,06 | 219,80 |
| АСТ-240/32 | 9,736 | 33,04 | 219,96 |

**Основная часть**

В результате расчета режима были построены зависимости токовой нагрузки воздушной линии от передаваемой мощности. На графике нанесены горизонтальные линии, отражающие максимальную токовую нагрузку для воздушной линии выполненной конкретным сечением и маркой провода. Сведены в таблицу основные значения двух режимов: нагрузки и ток с учетом максимально допустимого тока, максимально утяжеленные нагрузки, а также значение максимально допустимого тока и напряжение в конце линии.

***Рисунок 3 – Зависимость тока в линии от нагрузки для АС и компактированных проводов***

***Рисунок 4 – Зависимость тока в линии от нагрузки для АС и высокотемпературных проводов***

***Рисунок 5 – Зависимость напряжения в конце линии от нагрузки для различных типов проводов***

Таблица 3 – Контролируемые параметры при расчете режима

|  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Марка провода | Pнагр1, МВт | Iфакт1, А | Pmax, МВт | Imax, А  | Imax.доп., А | U, кВ |
| АС-240/32 | 99 | 602 | 138 | 1088 | 610 | 94,95 |
| AACSRZ 251 | 115 | 745 | 1144 | 756 | 89,03 |
| АСВП 218/63 | 109 | 666 | 972 | 678 | 94,44 |
| АСВТ 218/63 | 138 | 975 | 975 | 1125 | 81,62 |
| АСТ-240/32 | 138 | 1144 | 1144 | 1398 | 69,38 |

Согласно ГОСТу 32144-2013 максимальное отклонение напряжение у потребителя низкого напряжения не должно превышать 10%, следовательно распределительных сетей класса напряжения 110 кВ данное отклонение должно быть в этих же пределах. Отсюда минимальное значение напряжение должно составлять не менее 99 кВ. В литературе [2,3] отмечено, что при проектировании распределительных сетей основным ограничением являлась токовая нагрузка на проводник, что мы и видим в таблице. Т.е. значение напряжения для стандартного провода АС находится в практически допустимых пределах. Также это справедливо для компактированных проводов, поскольку их основное назначение: уменьшение количества промежуточных опор на прямолинейных участках трассы, а не увеличение пропускной способности ВЛ. Для высокотемпературных проводов мы наблюдаем, что при проектировании распределительных сетей дополнительным параметром становится значение напряжения в конце линии. Отсюда мы можем перейти к определению затрат на сооружение ВЛ с учетом определенных особенностей проводов.

$З=И+p\_{н}∙К,$ (1)

где И – сумма издержек на потери электроэнергии, амортизацию и текущий ремонт;

pн – нормативный коэффициент сравнительной эффективности капитальных вложений;

К – капитальные затраты на строительство линии.

Расписав формулу (1) получаем:

$З=\left(α\_{э}+p\_{н}\right)\left(a+bF\right)L+β3I\_{нб}^{2}r\_{л}τ=З\_{1}+З\_{2},$ (2)

где L – длина ВЛЭП;

а – капитальные вложения, не зависящие от сечения провода;

b – затраты пропорциональные сечению провода;

F – сечение провода;

αэ – ежегодные отчисления на амортизацию и текущий ремонт линии;

β - стоимость потерь электроэнергии;

Iнб – наибольший ток, протекающий по линии;

rл – активное сопротивление линии;

τ – время наибольших потерь.

Для контроля напряжения в конце линии и сравнения вариантов сети, выполненных различными марками повода необходимо в функцию затрат добавить значение, отражающее затраты на установку устройств компенсации реактивной мощности для подержания заданного модуля напряжения в конце линии.

Затраты Зком определяются как функция от реактивной мощности компенсации:

$З\_{ком}=Q\_{ком}∙K\_{ком},$ (3)

где Qком – мощность компенсирующего устройства; Кком – удельная стоимость 1 Мвар компенсирующей установки.

Мощность компенсирующих устройств определяется исходя из необходимого значения напряжения в узле нагрузки. Напряжение в конце линии определяется по следующей формуле:

$U\_{кон}=U\_{нач}-\frac{P\_{н}∙r\_{л}+Q\_{н}∙x\_{л}}{U\_{кон}},$ (4)

где Uкон – напряжение в узле нагрузки;

Uнач – напряжение в узле питания;

Pн и Qн – активная и реактивная мощность нагрузки;

rл и xл – активное и реактивное сопротивление ВЛЭП.

Заменим напряжение в конце линии Uкон на допустимое Uкон.доп, тогда формула примет следующий вид:

$U\_{кон.доп}=U\_{нач}-\frac{P\_{н}∙r\_{л}+(Q\_{н}-Q\_{ком})∙x\_{л}}{U\_{кон.доп}}.$ (5)

Запишем разницу Uкон.доп и Uкон:

$U\_{кон.доп}-U\_{кон}=U\_{нач}-\frac{P\_{н}∙r\_{л}+(Q\_{н}-Q\_{ком})∙x\_{л}}{U\_{кон.доп}}-\left(U\_{нач}-\frac{P\_{н}∙r\_{л}+Q\_{н}∙x\_{л}}{U\_{кон}}\right)=$

$=-\frac{P\_{н}∙r\_{л}+Q\_{н}∙x\_{л}}{U\_{кон.доп}}+\frac{P\_{н}∙r\_{л}+Q\_{н}∙x\_{л}}{U\_{кон}}+\frac{Q\_{ком}∙x\_{л}}{U\_{кон.доп}}.$ (6)

С учетом приведённых выше формул можно записать формулу затрат для высокотемпературных проводов:

$З=\left(α\_{э}+p\_{н}\right)\left(a+bF\right)L+β3I\_{нб}^{2}r\_{л}τ+\frac{\left(U\_{кон.доп}-U\_{кон}\right)\left[U\_{кон.доп}U\_{кон}-(P\_{н}∙r\_{л}+Q\_{н}∙x\_{л})\right]}{U\_{кон}∙x\_{л}}K\_{ком}.$ (7)

**Заключение**

Рассчитаны режимы воздушной линии с использованием компактированных и высокотемпературных проводов. На основе расчетов построены графики зависимости тока в линии и напряжения в конце линии от мощности нагрузки. По полученным графикам сделан вывод, о необходимости модификации функции затрат при строительстве ВЛ.

На основе полученных результатов была доработана функциональна зависимость для определения затрат при строительстве ВЛЭП с учетом особенностей высокотемпературных проводов. А именно, предложено учитывать затраты на установку компенсирующих устройств для поддержания модуля напряжения в допустимых значениях.

**СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. СТО 56947007- 29.060.50.268-2019. Указания по проектированию ВЛ 220 кВ и выше с неизолированными проводами нового поколения : стандарт организации ПАО «ФСК ЕЭС» : утвержден и введен в действие Приказом ПАО «ФСК ЕЭС» от 01. 07. 2019 №200 : введен впервые : дата введения 01. 07. 2019 / разработан АО «НТЦ ФСК ЕЭС», ООО «Интер РАО - Инжиниринг». – URL : <https://www.fsk-ees.ru/upload/docs/STO_56947007-29.060.50.268-2019.pdf> (дата обращения 21. 09. 2022). – Текст : электронный.

2. Идельчик, В. И. Электрические системы и сети : учебник для вузов / В. И. Идельчик. – Москва : Энергоатомиздат, 1989. – 592 с. Текст : непосредственный.

3. Передача и распределение электрической энергии : учебное пособие / А. А. Герасименко, В. Т. Федин. – Ростов-на-Дону : Феникс, 2008. – 720 с. – Текст : электронный, URL : <https://www.elec.ru/files/2019/12/05/gerasimenko-aa-fedin-vt-peredacha-i-raspredelenie.PDF> (дата обращения: 15.10.2022).

4. He Zhouwen, Chen Xin. and Wang Qiuling. Review of Research and Application of ACCC in

China. Electric Power Construction. – 2010,31,(4), – 90-93p.

5. Васюра, Ю. Ф. Условие экономической целесообразности сооружения линий электропередачи с применением провода с улучшенными характеристиками / Ю. Ф. Васюра, М. А. Глазырин, Т. А. Плешкова // Аллея науки. – 2017. № 15. – С. 647-650. – URL : https://www.elibrary.ru/item.asp?id=32300033 (дата обращения: 15.10.2022). – Текст : электронный.

6. Постолатий В. М., Компактные управляемые высоковольтные линии электропередачи / В. М. Постолатий // Проблемы региональной энергетики. – 2019. – №42. – С. 68 – 85. – URL : <https://journal.ie.asm.md/assets/files/07_13_42_2019.pdf> (дата обращения: 30.10.2022). – Текст : электронный.

7. Геркусов А. А., Применение метода экономических интервалов при выборе сечения проводов с расщепленной фазой // Научно-технические ведомости СПбГПУ. – 2017. Т. 23. № 1. – С. 157–167. DOI: 10.18721/ JEST.230115. – URL : <https://engtech.spbstu.ru/userfiles/files/articles/2017/1/15_gerkusov.pdf> (дата обращения: 05.11.2022). – Текст : электронный.

8. Министерство энергетики: показатель технического состояния объектов электроэнергетики (физический износ) : официальный сайт. – Москва. – URL : https://minenergo.gov.ru/node/11201(дата обращения: 10.10.2022). – Текст : электронный.

9. Смекалов, В. В., Автоматизированная система контроля технического состояния основного оборудования магистральных электрических сетей / В. В. Смекалов, И. А. Назаров, А. С. Мерзляков, К.К. Романов// Энергия единой сети. – 2022. – №1. – С. 33 – 41. – URL : https://www.энергия-единой-сети.рф/publications/164-1-62-2022-g/2164-avtomatizirovannaja-sistema-kontrolja-tehsostojanija-oborudovanija-lep (дата обращения: 10.10.2022). – Текст : электронный.

10. Хомутов С.О., Белицын И.В., Котугин Е.А. Оценка показателей качества электрической энергии на основе анализа магнитного поля. – 2017. – №17. – С.33 – 37. – URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=32545378> (дата обращения: 16.10.2022). – Текст : электронный.

**Хомутов Станислав Олегович**

ФГБОУ ВО «Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова», г. Барнаул

доктор технических наук, профессор, зав. кафедрой «Электроснабжения промышленных предприятий»

656038, Барнаул, проспект Ленина, д. 46.

Тел. (3852) 29-09-86

E-mail: homutov.so@yandex.ru.

**Белицын Игорь Владимирович**

ФГБОУ ВО «Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова», г. Барнаул

Кандидат педагогических наук, доцент кафедры «Электроснабжения промышленных предприятий»

656038, Барнаул, проспект Ленина, д. 46.

Тел. (3852) 29-09-86

E-mail: b\_i\_w@mail.ru.

**Павличенко Илья Александрович**

ФГБОУ ВО «Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова», г. Барнаул

Аспирант, ассистент кафедры «Электроснабжения промышленных предприятий»

656038, Барнаул, проспект Ленина, д. 46.

Тел. (3852) 29-09-86

 E-mail: pavlichenko22rus@gmail.com.

\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_

**Khomutov S.O., Belitsyn I.V., Pavlichenko I.A.**

**RESEARCH OF THE OVERHEAD LINE MODE WITH THE USE OF**

**COMPACT AND HIGH-TEMPERATURE WIRES**

**Abstract.** *The paper considers the modes of an overhead power transmission line with a voltage of 110 kV using new generation wires: compact and high-temperature. Graphs of the dependence of the current in the line on the load power for various brands of wires are plotted. The voltage value at the end of the line is determined depending on the load power. A functional dependence of the costs for the construction of an overhead line is obtained, taking into account the characteristics of high-temperature wires.*

**Key words:** *line mode, new generation wires, maximum allowable current, voltage, costs, overhead lines.*

**BIBLIOGRAPHY**

1. STO 56947007-29.060.50.268-2019. Guidelines for the design of overhead lines 220 kV and higher with bare wires of a new generation: organization standard of PJSC «FGC UES»: approved and put into effect by Order of PJSC «FGC UES» of 01.07.2019 No. 200: introduced for the first time: introduction date 01.07 2019 / developed by JSC NTC «FGC UES», LLC Inter RAO - Engineering. – URL: https://www.fsk-ees.ru/upload/docs/STO\_56947007-29.060.50.268-2019.pdf (Accessed 21.09.2022). – Text : electronic.

2. Idelchik, V. I. Electrical systems and networks: a textbook for universities / V. I. Idelchik. - Moscow: Energoatomizdat, 1989. - 592 p. Text: direct.

3. Transmission and distribution of electrical energy: textbook / A. A. Gerasimenko, V. T. Fedin. - Rostov-on-Don: Phoenix, 2008. - 720 p. – Text: electronic, URL: https://www.elec.ru/files/2019/12/05/gerasimenko-aa-fedin-vt-peredacha-i-raspredelenie.PDF (date of access: 10/15/2022).

4. He Zhouwen, Chen Xin. and Wang Qiuling. Review of Research and Application of ACCC in

China. Electric Power Construction. – 2010,31,(4), – 90-93p.

5.Vasyura, Yu. F. Condition of economic feasibility of construction of power transmission lines using a wire with improved characteristics / Yu. F. Vasyura, M. A. Glazyrin, T. A. Pleshkova // Alley of Science. - 2017. No. 15. - P. 647-650. – URL: https://www.elibrary.ru/item.asp?id=32300033 (date of access: 10/15/2022). – Text : electronic.

6. Postolatiy V. M., The condition for the economic feasibility of constructing power lines using wires with improved characteristics / V. M. Postolatiy // Problems of regional energy. – 2019. – №42. – S. 68 – 85. – URL : https://journal.ie.asm.md/assets/files/07\_13\_42\_2019.pdf (date of access: 30.10.2022). – Text : electronic

7. Gerkusov A. A., Application of the method of economic intervals when choosing the cross section of wires with a split phase // Scientific and technical statements of SPbSPU. – 2017. T. 23. № 1. – S. 157–167. DOI: 10.18721/ JEST.230115. – URL : https://engtech.spbstu.ru/userfiles/files/articles/2017/1/15\_gerkusov.pdf (date of access: 05.11.2022). – Text : electronic.

8. Ministry of Energy: indicator of the technical condition of electric power facilities (physical deterioration): official website. - Moscow. – URL : https://minenergo.gov.ru/node/11201(date of access: 10.10.2022). – Text : electronic.

9. Smekalov, V. V., Automated system for monitoring the technical condition of the main equipment of main electrical networks / V. V. Smekalov, I. A. Nazarov, A. S. Merzlyakov, K.K. Romanov// Energy of a single network. – 2022. – №1. – S. 33 – 41. – URL : https://www.energiya-yedinoy-seti.rf/publications/164-1-62-2022-g/2164-avtomatizirovannaja-sistema-kontrolja-tehsostojanija-oborudovanija-lep (date of access: 10.10.2022). – Text : electronic.

10. Khomutov S.O., Belitsyn I.V., Kotugin Ye.A. Assessment of quality indicators of electric energy based on the analysis of the magnetic field. – 2017. – №17. – S.33 – 37. – URL: https://elibrary.ru/item.asp?id=32545378 (date of access: 10/16/2022). – Text : electronic.

**Khomutov Stanislav Olegovich**

Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Altai State Technical University named after I.I. Polzunov», Barnaul

doctor of technical sciences, professor, head. Department of «Power supply of industrial enterprises»

656038, Barnaul, Lenina avenue, 46.

Tel. (3852) 29-09-86

E-mail: homutov.so@yandex.ru.

**Belitsyn Igor Vladimirovich**

Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Altai State Technical University named after I.I. Polzunov» Barnaul

Candidate of Pedagogical Sciences, associate professor of the Department of «Power Supply of Industrial Enterprises»

656038, Barnaul, Lenina avenue, 46.

Tel. (3852) 29-09-86

E-mail: b\_i\_w@mail.ru.

**Pavlichenko Ilya Alexandrovich**

Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Altai State Technical University named after I.I. Polzunov», Barnaul

Postgraduate student, assistant of the department «Power supply of industrial enterprises»

656038, Barnaul, Lenina avenue, 46.

Tel. (3852) 29-09-86

 E-mail: pavlichenko22rus@gmail.com.