

УДК 621.315

## ВЕРТИКАЛЬНОЕ РАСЩЕПЛЕНИЕ ФАЗ КАК СПОСОБ УВЕЛИЧЕНИЯ ПРОПУСКНОЙ СПОСОБНОСТИ ЛИНИЙ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ

Н.С. Бурянина, Ю.Ф. Королюк, Е.И. Малеева, А.-М. Тимофеева, Е.В. Лесных, К.В. Суслов

Проблема повышения передаваемой мощности существующих и проектируемых линий электропередачи относится к числу главных задач электроэнергетики и этим вопросом занимаются во всем мире. Предлагается конструкция высоковольтных линий с повышенной пропускной способностью, отличающаяся от известных возможностью увеличения натуральной мощности примерно в два раза путём введения «плоской» фазы. Приведен анализ их эффективности по сравнению с линиями традиционных конструкций.

*Ключевые слова:* пропускная способность воздушных линий; высоковольтные линии; индуктивное продольное сопротивление; поперечная емкость.

## ФАЗАЛАРДЫ УШУНУНАН БӨЛҮҮ ЭЛЕКТР ӨТКӨРГҮЧ ЛИНИЯЛАРДЫН ӨТКӨРГҮЧ ЖӨНДӨМДҮҮЛҮГҮН ЖОГОРУЛАТУУ ЫКМАСЫ КАТАРЫ

Колдонуудагы жана долбоорлонуп жаткан электр өткөргүч линияларынын өткөрүүчү кубаттуулугун жогорулатуу маселеси электр энергетикасынын башкы милдеттеринин катарына кирет. Бул маселе менен бүткүл дүйнө жүзү алектенүүдө. Бул эмгекте жогорку өткөргүч жөндөмдүүлүккө ээ жогорку вольттогу линиялардын конструкциясы сунушталат, ал буга чейин белгилүү болгон ыкмалардан «жалпак» фазаны киргизүү аркылуу табигый кубаттуулукту эки эсеге чейин жогорулатуу мүмкүнчүлүгү менен айырмаланат. Салттуу конструкциялык линияларга салыштырганда алардын натыйжалуулугу талдоонун жыйынтыгы менен белгиленет.

*Түйүндүү сөздөр:* аба линияларынын өткөргүч жөндөмдүүлүгү; жогорку вольттогу линиялар; индуктивдүү узунунан кеткен каршылык; туурасынан кеткен сыйымдуулук.

## VERTICAL SPLITTING OF PHASES AS A WAY OF INCREASING CAPACITY OF POWER TRANSMISSION LINES

N.S. Buryanina, Yu.F. Korolyuk, E.I. Maleeva, A.-M. Timofeeva, E.V. Lesnykh, K.V. Suslov

The problem of increasing the transmitted capacity of existing and projected power transmission lines is one of the main tasks of the electric power industry and this issue is being pursued all over the world. The design of high-voltage lines with increased throughput is proposed, which differs from those known for the possibility of increasing the natural power of the line by about two times, by introducing a «flat» phase. The analysis of their efficiency in comparison with lines of traditional designs is given.

*Keywords:* throughput of overhead transmission lines; high-voltage lines; inductive longitudinal resistance; transverse capacitance.

Развитие промышленности, рост городов, освоение новых территорий приводят к росту энергопотребления во всем мире. Во многих странах государственная политика в области энергетической эффективности направлена на увеличение ресурса электрических станций и пропускной способности линий электропередачи (ЛЭП) [1, 2].

Существует множество способов увеличения пропускной способности электрических сетей,

каждый из которых имеет свои достоинства и недостатки [2–7]. Б.А. Алексеевым обобщен зарубежный опыт применения проводов новых марок для воздушных линий высокого и сверхвысокого напряжений. Рассмотрен актуальный вопрос повышения пропускной способности ЛЭП как повышением рабочих напряжений, нагрузок на провода, так и применением дополнительных технических средств – компенсаторов реактивных мощностей,

устройств распределения потоков мощности в сети, гибкого управления режимами работы электрических сетей. Приведено сравнение некоторых проводов улучшенных характеристик с обычным сталеалюминиевым проводом АСР [2].

Основные возможности повышения мощности передаваемой линии (на основании отечественного и зарубежного опыта):

- повышение рабочего напряжения;
- увеличение сечения проводов и применение новых высокопрочных материалов для них;
- компенсация индуктивных сопротивлений линии;
- расщепление фаз на несколько проводов;
- сближение фаз линии.

Такой вариант, как прокладка новых линий, ограничивается рядом факторов – увеличением стоимости земли под трассами линий, потребностью электроснабжения городов и крупных предприятий с плотной застройкой и высокими требованиями к безопасности населения [2].

Применение устройств компенсации на воздушных линиях электропередачи является более эффективным способом повышения пропускной способности, что применяется на магистральных линиях. Но натуральная мощность линии остается неизменной [3, 4].

Расщепление фаз на несколько проводов ведет к уменьшению индуктивного и волнового сопротивлений, а также к увеличению емкости и натуральной мощности линий электропередач. Но расщепление применяется в основном для снижения коронирования проводов и не применяется на линиях номинальным напряжением до 220 кВ.

Повышение пропускной способности линий достигается двумя основными путями: снижением продольного индуктивного сопротивления фаз линии и увеличением поперечной емкостной проводимости.

На основании исследований и анализа влияющих факторов предлагается комбинированный способ повышения пропускной способности линий электропередачи – одновременное расщепление и сближение фаз. Это позволяет более эффективно повышать передаваемую мощность по сравнению с рассмотренными способами [3, 6].

В Сибирском НИИ энергетики предложена конструкция линии электропередачи, состоящей из двух групп проводов, расположенных одна под другой с разными стрелами провеса, и соединенных между собой металлическими перемычками [8].

В Северо-Восточном федеральном университете им. М.К. Аммосова г. Якутска кафедрой «Электроснабжение» применена эта конструкция на ВЛ 110–220 кВ. Предложенная конструкция

воздушных линий (ВЛ), с одной стороны, позволила сблизить фазы линии, с другой, осуществила расщепление, что позволило увеличить натуральную мощность линии.

Предлагается так называемая «плоская» фаза, которая состоит из двух проводов: верхнего, подвешенного обычным способом со стрелой провеса, и нижнего, подвешиваемого в идеале горизонтально относительно земли, что обеспечивается креплением его к верхнему проводу. Реализация «плоской» фазы обеспечивается применением высокопрочных проводов [3, 4], разрывное усилие которых в 1,67 раз больше разрывного усилия проводов марки АС. Чтобы уменьшить весовые усилия на верхний провод, нижний провод следует выполнять облегченным.

Нижний провод фиксирует неподвижное положение фазы, предотвращает ее горизонтальные отклонения, и за счет этого появляется возможность сблизить фазы. Расстояние между фазами определяется двойным допустимым пробивным промежутком фазы на землю.

Два провода в одной фазе делают ее расщепленной со всеми вытекающими последствиями. С одной стороны, снижается критическое напряжение коронирования, с другой, уменьшается продольное индуктивное сопротивление и увеличивается поперечная емкость, т. е. увеличивается натуральная мощность линии.

Проведенные исследования показали, что натуральная мощность «плоской» линии больше мощности аналогичной двухцепной ВЛ. Можно заменить двухцепную ВЛ 220 кВ «плоской» одноцепной с натуральной мощностью в 300 МВт против 120 МВт, выполненной проводом марки АС.

Для такой конструкции ЛЭП не требуется разработка нового оборудования.

Применительно к линиям электропередачи 110–220 кВ с современной арматурой такие линии могут иметь конструкцию, показанную на рисунке 1.

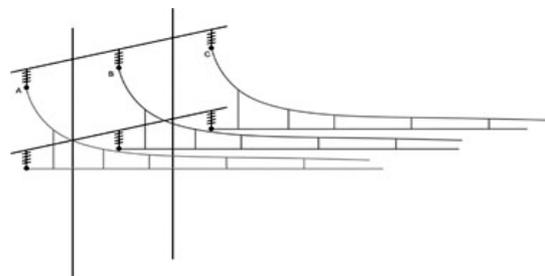


Рисунок 1 – Схема подвески проводов линии электропередачи с вертикальным расположением проводов в фазах

Особенностью данной схемы является то, что нижний провод натягивается практически без провиса. Это значит, что исключены его горизонтальные и вертикальные отклонения. При соединении верхнего и нижнего проводов стяжками из проводящего материала вся фаза лишается возможности горизонтального перемещения. Следовательно, фазы можно сблизить на расстояние, незначительно превышающее возможное пробивное напряжение. На рисунке 2 приведены зависимости пробивных напряжений от расстояний между электродами [9].

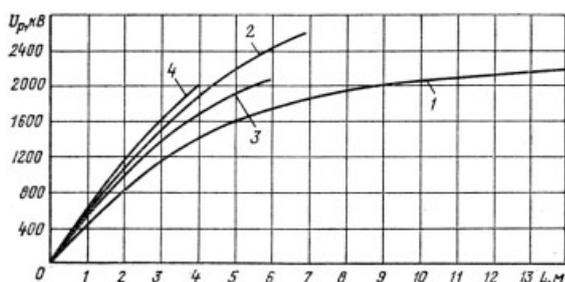


Рисунок 2 – Разрядные напряжения воздушных промежутков при переменном напряжении частотой 50 Гц: 1 – стержень – плоскость; 2 – стержень – стержень; 3 – провод (арматура гирлянды) – стойка опоры; 4 – провод – провод

На графике видно, что при одном метре между проводом и опорой на линии 110 кВ и двух метрах на линии 220 кВ пробивное напряжение воздушного промежутка между проводом и опорой более чем в шесть раз больше номинального напряжения. Это достаточно для выполнения условия перекрытия воздушной изоляции между проводами линии и опорами.

Применив расстояния между проводом и опорами в предлагаемых линиях 110 кВ, равными одному метру, а в линиях 220 кВ – 2 м, выполнено сравнение индуктивных сопротивлений линий: предлагаемых и выполненных традиционно.

Карсоном предложены уравнения, определяющие сопротивления линий с учетом протекания токов в земле [10]. Для двухпроводной фазы индуктивное сопротивление определяется как

$$x_3 = 0,1451g \frac{D_3}{r_3}, \text{ Ом/км}, \quad (1)$$

где  $r_3$  – эквивалентный радиус провода, значения которого для алюминиевых и сталеалюминевых проводов марки А, АС, АСО, АСУ составляет  $r_3 = 0,95 r$ , где  $r$  – истинный радиус провода;  $D_3$  – глубина залегания условного обратного провода, определяемого как

$$D_3 = \frac{0,085}{\sqrt{f\lambda \cdot 10^{-9}}} \cdot 10^{-3}, \text{ м} \quad (2)$$

где  $f$  – частота сети (Гц);  $\lambda$  – удельная проводимость земли, 1/Ом\*см.

При  $f = 50$  Гц и среднем значении  $\lambda = 10^{-4}$  1/Ом\*см, величина  $D_3 = 935$  м. При отсутствии данных о проводимости земли  $D_3$  обычно принимают 1000 м.

Для линий с расщепленными проводами вместо  $r_3$  следует вводить средний геометрический радиус  $r_{cp}$  системы проводов одной фазы, который находят из выражения

$$r_{cp} = \sqrt[n]{r_3 \cdot a_{cp}^{n-1}}, \quad (3)$$

где  $n$  – число проводов в фазе;  $a_{cp}$  – среднее геометрическое расстояние между проводами одной фазы.

Индуктивное сопротивление, обусловленное взаимной индукцией между двумя параллельными проводами с расстоянием  $d$  между осями их проводов, можно определить из выражения:

$$x_{Mcp} = 0,1451g \frac{D_3}{D_{cp}}, \text{ Ом/км}. \quad (4)$$

Для трехфазной одноцепной линии с полным циклом транспозиции проводов сопротивление взаимной индукции между фазами при возврате тока через землю следует определять, заменив в последнем  $d$  средним геометрическим расстоянием между проводами фаз а, b и с:

$$D_{cp} = \sqrt[3]{d_{ab} \cdot d_{ac} \cdot d_{bc}}, \text{ м}. \quad (5)$$

С учетом (1) и (4) сопротивление прямой последовательности, которое определяет, наряду с емкостной проводимостью, пропускную способность линии определяется как [3]:

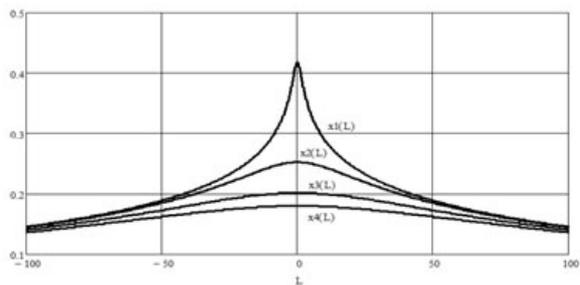
$$x_1 = 0,1451g \frac{D_{cp}}{r_{cp}}, \text{ Ом/км}. \quad (6)$$

Емкостную проводимость определяем как

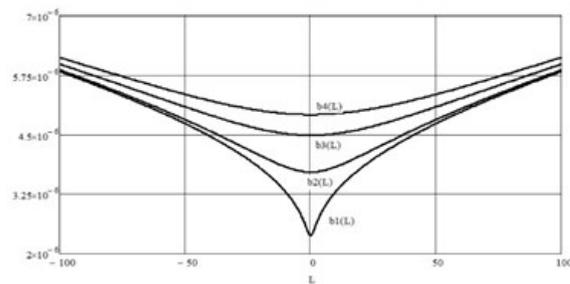
$$b_1 = \frac{7,58}{\log\left(\frac{2 \cdot D_{cp}}{d}\right)} 10^{-6}, \text{ См/км}, \quad (7)$$

где  $d$  – диаметр провода. Емкостную проводимость линии с расщепленными фазами можно вычислить согласно (7), если диаметр провода  $d$  заменить на эквивалентный согласно (3) [7].

Зависимости приведенных погонных продольного сопротивления и поперечной емкости от места в пролете длиной 200 м ВЛ 220 кВ показаны на рисунке 3, а, б. Цифрами обозначены варианты подвеса нижнего провода: 1 – провод касается верхнего в середине пролета; 2 – между верхним

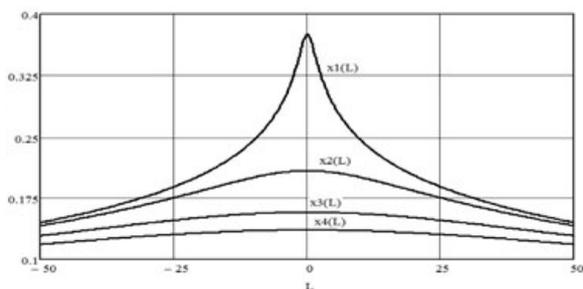


а

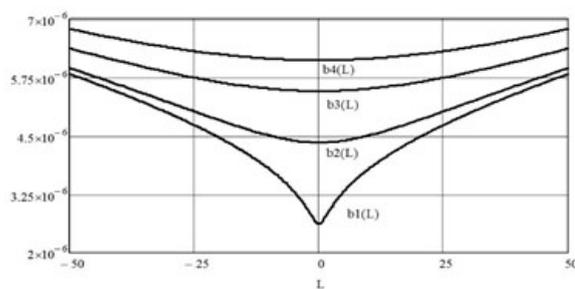


б

Рисунок 3 – Изменение продольного индуктивного сопротивления (а) и поперечной емкостной проводимости (б) вдоль пролета длиной 200 м ВЛ 220 кВ (стрела провеса 6 м)



а



б

Рисунок 4 – Изменение продольного индуктивного сопротивления (а) и поперечной емкостной проводимости (б) вдоль пролета длиной 100 м ВЛ 110 кВ (стрела провеса 1,5 м)

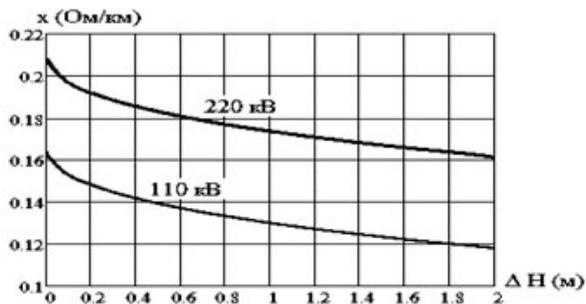


Рисунок 5 – Эквивалентное погонное продольное сопротивление фазы в зависимости от расстояния между проводниками фазы в середине пролета (для линии 110 кВ расстояние между фазами 2 м, для линии 220 кВ – 4 м)

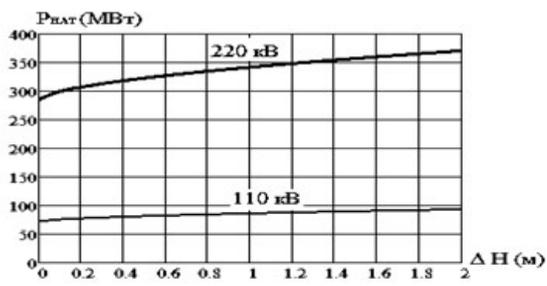


Рисунок 6 – Естественные мощности линий 110 и 220 кВ в зависимости от расстояния между проводниками фазы в середине пролета

и нижним проводами в середине пролета 0,2 м; 3–1 м; 4–2 м. Если бы провода в фазе касались вдоль всего пролета, то индуктивное сопротивление было бы равно 0,37–0,38 Ом/км, а поперечная емкостная проводимость – примерно  $2,6 \cdot 10^{-6}$  См/км. Эти цифры достаточно близки к параметрам реальных ВЛ, что подтверждает правильность расчетов.

Зависимости приведенных погонных продольного сопротивления и поперечной емкости от места в пролете длиной 100 м ВЛ 110 кВ приведены на рисунке 4, а, б.

Эквивалентное погонное продольное индуктивное сопротивление, в зависимости от расстояния между проводами в фазе в середине пролета, в диапазоне от 0 до 2 м приведено на рисунке 5.

Сопротивление в рассматриваемом диапазоне снижается примерно в 1,3 раза как у линии 110 кВ, так и у линии 220 кВ.

Изменение натуральных мощностей в зависимости от этого же параметра приведены на рисунке 6.

Натуральные мощности у рассматриваемых линий примерно в 2–3 раза больше, чем у ВЛ традиционного исполнения.

Предложенное инновационное технологическое решение позволяет существенно увеличить пропускную способность, уменьшить эксплуатационные затраты и способствует минимизации негативного воздействия на окружающую среду. Экологические риски, связанные с возможным негативным воздействием на окружающую среду, минимизируются благодаря сближению фаз, т.е. уменьшением отчуждаемых земельных угодий под трассы линии. Снижается также электромагнитное воздействие на окружающую среду за счет более симметричного электромагнитного поля.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ и Субъекта РФ – Республики Саха (Якутия) № 18-48-140 010.

#### Литература

1. Программа инновационного развития ПАО «ФСК ЕЭС» на 2016–2020 годы с перспективой до 2025 года, 2012. 320 с.
2. Алексеев Б.А. Повышение пропускной способности воздушных линий электропередачи и применение проводов новых марок / Б.А. Алексеев // Электро. 2009. № 3. С. 45–50.
3. Колосов С.В. Повышение пропускной способности ВЛ: анализ технических решений / С.В. Колосов, С.В. Рыжов // Энергетик. 2011. № 1. С. 18–22.
4. Плотников В.В. Применение компактных линий, как одно из средств повышения пропускной способности / В.В. Плотников, Н.Е. Василенко, И.С. Протасенко, М.М. Зуев, Т.С. Зуева, В.И. Закутский, С.В. Глушкин, Н.С. Ермолов // Потенциал современной науки. 2016. № 4. С. 37–43.
5. Qihao Yu. Design and research of high voltage transmission lines on the Qinghai – Tibet Plateau – A Special Issue on the Permafrost Power Lines / Qihao Yu, Yanjun Ji, Zhongqiu Zhang, Zhi Wen, Chao Feng // Cold Regions Science and Technology. 2016. Vol. 121. P. 179–186 // <https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2015.05.003>
6. Hong Liu. Improved analytical method of power supply capability on distribution systems / Hong Liu, Jun Han, Shaoyun Ge, Chengshan Wang // Intern. Jour. of electrical power & energy systems. 2014. Vol. 63. P. 97–104 // <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2014.05.060>
7. Chao-Ming Huang. Hybrid optimisation method for optimal power flow using flexible AC transmission system devices / Chao-Ming Huang, Yann-Chang Huang // IET Generation, Transmission & Distribution. 2014. Vol. 8. P. 2036–2045 // <https://doi.org/10.1049/iet-gtd.2014.0096>
8. Воздушная линия электропередачи: авторское свидетельство № 588584 СССР: МПК Н 02G 1/00 / Ю.Ф. Королюк, В.А. Чунчин; (21) № 2070992/24-07; заявл. 30.10.74; опубл. 15.01.78. Бюл. № 2.
9. Рыжов Ю.П. Дальние электропередачи сверхвысокого напряжения / Ю.П. Рыжов. М.: Изд. дом МЭИ, 2007. 488 с.
10. Марголин Н.Ф. Токи в земле / Н.Ф. Марголин. М.: Госэнергоиздат, 1947. 195 с.