

**V Всероссийская (с международным участием) молодежная
научно-практическая конференция «ЭНЕРГОСТАРТ»**

206-1

20-22 октября 2022 года

УДК 621.316

**ДОСТАНОВА КЫМБАТ РУСЛАНОВНА, студент гр. 21-37W
(КазАТУ)**

**Научный руководитель ЖАНТЛЕСОВА А.Б. ктн, доктор философии
(КазАТУ)г.Астана.**

**МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ КАБЕЛЬНОЙ ЛИНИИ С
РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫМИ ПАРАМЕТРАМИ НАПРЯЖЕНИЕМ
110KV**

Целью данной работы является разработка математической модели и методики расчета стационарного режима линии с распределительными параметрами напряжением 110KV. Математическая модель основана на телеграфных уравнениях и учитывает тот факт, что электрические линии являются линиями с распределенными параметрами. В качестве объекта исследования выбрана воздушная линия электропередачи 110 кВ с двумя компактными цепями с горизонтальным и круговым расположением проводников. Сформулированы начальные и граничные условия для случая двухцепной электрической линии и регулировки угла сдвига фаз напряжений на вводе линии.

Высокая скорость распространения электромагнитных волн является преимуществом электричества как полезной формы энергии, поскольку обеспечивает возможность передачи электричества на большие расстояния и гибкое распределение. Передача и распределение электроэнергии осуществляется по линиям электропередач различного конструктивного исполнения. В связи с этим линии электропередач являются важным функциональным компонентом современных энергосистем.

Первая передача электричества на расстояние 1 км была продемонстрирована Фонтейном в 1873 г. [1], который считал, что такие передачи возможны только при малых мощностях и на короткие расстояния. Теоретические аспекты передачи электроэнергии на большие расстояния были разработаны Д.А. Лачиновым и М. Депре [1¹], а последний в 1882 г. обеспечил передачу электроэнергии по кабелю на расстояние 57 км между Мюнхеном и Мисбахом с выход 22%, а в 1883 г. КПД достиг 62%. Отметим, что величина доходности — не единственный показатель, который может влиять на экономическую конкурентоспособность систем электропередачи.

¹ Даценко В.А., Гетманов В.Т. Выблов А.Н. Математическое моделирование в системах электроснабжения: учеб. пособие. – Томск: Издво Томского политехнического университета, 2003. – 120 с.

Предложение трехфазного переменного тока (1888 г.) и повышение напряжения открыли путь для расширения электрических сетей, которые характеризовались процессами, типичными для длинных линий. В 1891 году Доливо-Добровольский вместе с инженером Брауном организовал переброску электричество на расстоянии 170 км от Лауфена на Неккар до Франкфуртской выставки электротехники с выходом ок.75% [2²]. Увеличение протяженности электрических линий, несимметричное расположение фазных проводов привели к возникновению небаланса в трехфазной системе переменного тока.

Балансировка параметров фаз ВЛ осуществляется несколькими способами: изменением взаимного расположения и расстояний фазных проводов, расстояния от поверхности почвы и т. д.

II. Цель и задачи исследования данной работы является разработка математической модели и методики расчета стационарного режима в многофазной линии с проводниками, переведенными в векторную систему координат. Рассмотрим распространение электромагнитной энергии по многопроводной трехфазной высоковольтной линии электропередачи с произвольным числом проводников. Математическая формулировка задачи представляет собой систему дифференциальных уравнений в частных производных, известных как уравнения линий передачи.

Уравнения выводятся из уравнений Максвелла и для неизвестного вектора напряжения $u(x, t)$ и тока.

$$G = \begin{pmatrix} G_{11} & 0 & \dots & 0 \\ 0 & G_{22} & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & \dots & G_{nn} \end{pmatrix}. \quad (1)$$

Область решения – прямоугольник:

$$D = \{(x, t) : x \in (0, l), t \in (0, T_{max})\} \quad (2)$$

Чтобы получить единственное решение, мы должны добавить начальное (здесь, $t = 0$) и граница (здесь, $x = 0$ и $x = l$) условия. Предположим, $t = 0$ что в начальный момент в линии отсутствуют напряжения и токи:

$$u(x, t) = i(x, t) = 0, \quad x \in [0, l] \quad (3)$$

² Бурулько Л.К., Овчаренко Е.В. Математическое моделирование в электротехнике: учебн. пособие. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2003. – 100 с

**V Всероссийская (с международным участием) молодежная
научно-практическая конференция «ЭНЕРГОСТАРТ»
20-22 октября 2022 года**

206-3

на вход линии при $x = 0$, подаются напряжения, а на выходе при $x = l$ имеем нагрузку с сопротивлением R_S :

$$\mathbf{u}(0, t) = \mathbf{U}_0(t), \mathbf{u}(l, t) = R_S \mathbf{i}(l, t) \quad (4)$$

Будем считать далее, что имеем 6-проводную линию ($n = 6$) с тремя фазами А, В, С (рис. 1) и значения \mathbf{U}_0 и R_S из (4) следующие:

Где $\omega = 2\pi f$ – круговая частота (1/сек);

f – частота колебаний (1/сек);

$T = \frac{2\pi}{\omega} = \frac{1}{f}$ – период колебаний (сек) – фазовые сдвиги в проводах.

Характеристики ЛЭП 110 кВ и условия транспортирования. Геометрия двухцепной линии электропередач 110 кВ с горизонтальной фазировкой представлена на рис. 1.

В математической модели учитывается перестановка фаз ЛЭП, которая выполняется для уменьшения асимметрии напряжений и токов в электрической системе при нормальной работе электропередачи и ограничения мешающего воздействия ЛЭП на маломощные электросети. частотные каналы связи. Проводим транспозицию по схеме, представленной на рис. 2.

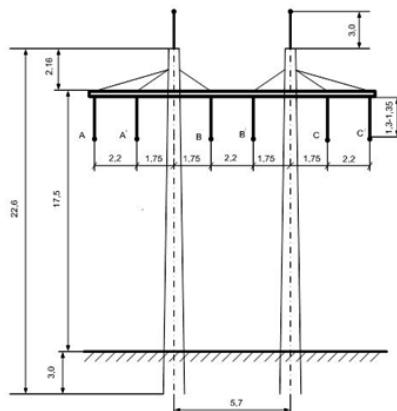
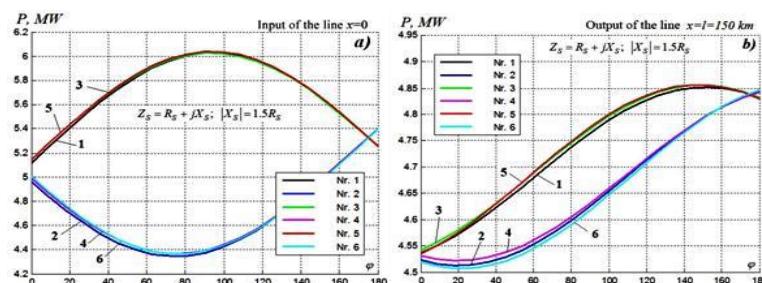


Рис. 1. Промежуточная железобетонная опора СПБ 110-2М ВЛ 110 кВ с примыкающими фазами. Размеры указаны в метрах. Диаметр проводников 17,1 мм.



**V Всероссийская (с международным участием) молодежная
научно-практическая конференция «ЭНЕРГОСТАРТ»
20-22 октября 2022 года**

206-4

*Рис.2. Эволюция активной мощности на линейном входе ($x = 0$) и активной
мощности, отводимой на нагрузку ZC- $0^\circ \leq \varphi \leq 1800$ ($x = l = 150$ км) в зависимости от
перестановки проводников и угла фазового сдвига входных напряжений*

I. Численные результаты

Описанный выше метод был реализован в виде комплекса программ в системе Matlab. Разработанная программа была апробирована и использована для расчета режимов работы в трехфазной линии 110 кВ с двумя цепями с горизонтальным расположением проводов (рис.1). Длина этой линии была принята равной 150 км. Режим работы рассчитан для двух конструктивных вариантов ЛЭП: без перестановки и с перестановкой фазных проводов.

Предлагаемая расчетная модель не включает в рассмотрение разделы защиты, так как разделы не подлежат транспонированию. При необходимости предлагаемая математическая модель трехфазной линии может быть дополнена элементами пассивной конструкции внутри линии электропередачи (секцией или двумя секциями защиты). Следует отметить, что секции защиты могут влиять как на параметры линии, так и на режим работы. Эти вопросы не являются предметом данной статьи.

Предложенная математическая модель также может быть использована для исследования стационарного режима компактных линий и линий, проводимых в фазированной системе координат. В расчетах использовались значения параметров линии для геометрии, представленной на рис. 1. Значения диссипативных параметров линии считались одинаковыми для обеих схем. Проводникам фазы данной электрической линии присваиваются следующие номиналы: $R = 0,4218$ мОм/м, $G = 2,05$ пСм/м.

Модель учитывает взаимное влияние фазных проводников, которое определяется индуктивностями и линейными емкостями этих проводников. ЛЭП 110 кВ – это линия с близлежащими проводниками в проеме линии (рис. 3, рис. 4). Фазы, обозначенные цифрами 1, 3, 5, образуют первую цепь, а фазы, обозначенные цифрами 2, 4, 6, образуют вторую цепь. Данная структура позволяет моделировать режим в случае, когда также регулируется угол фазности фаз между входами напряжения. Эта регулировка реализована во второй цепи (проводники 2, 4, 6). Это обеспечивает работу ЛЭП в само компенсированном режиме [3³].

$$L = \begin{pmatrix} 1.6188 & 0.6475 & 0.3190 & 0.2860 & 0.1920 & 0.1768 \\ 0.6475 & 1.6188 & 0.3597 & 0.3190 & 0.2093 & 0.1920 \\ 0.3190 & 0.3597 & 1.6188 & 0.6475 & 0.3190 & 0.2860 \\ 0.2860 & 0.3190 & 0.6475 & 1.6188 & 0.3597 & 0.3190 \\ 0.1920 & 0.2093 & 0.3190 & 0.3597 & 1.6188 & 0.6475 \\ 0.1768 & 0.1920 & 0.2860 & 0.3190 & 0.6475 & 1.6188 \end{pmatrix}$$

³ Курганов С.А. Схемно-алгебраическое моделирование и расчет линейных инфильтрационных цепей / С. А. Курганов, В. В. Филаретов: учебное пособие. - Ульяновск : УлГТУ, 2005. - 319 с

**V Всероссийская (с международным участием) молодежная
научно-практическая конференция «ЭНЕРГОСТАРТ»
20-22 октября 2022 года**

206-5

$$C = \begin{pmatrix} 8.3667 & -3.0349 & -0.6807 & -0.5043 & -0.2623 & -0.2291 \\ -3.0349 & 8.4908 & -0.9222 & -0.6484 & -0.3069 & -0.2623 \\ -0.6807 & -0.9222 & 8.5846 & -2.8883 & -0.6484 & -0.5043 \\ -0.5043 & -0.6484 & -2.8883 & 8.5846 & -0.9222 & -0.6807 \\ -0.2623 & -0.3069 & -0.6484 & -0.9222 & 8.4908 & -3.0349 \\ -0.2291 & -0.2623 & -0.5043 & -0.6807 & -3.0349 & 8.3667 \end{pmatrix}$$

*Рис.3 Взаимное расположение проводников ЛЭП 110 кВ с двумя цепями в проеме
ЛЭП*

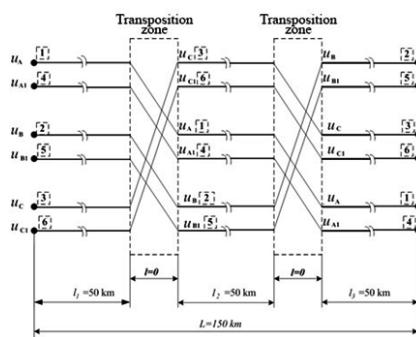


Рис.4. Схема перестановки проводников

Следует отметить, что в случае работы двухфазной цепи в режиме фазового регулирования сохраняется индивидуальное поведение потоков активной мощности, передаваемых по фазам (линия без перестановки проводников), а при перестановке эта разница потоков мощности сохраняется для линейных цепей. Это же явление характерно и для реактивной мощности линии при подключенной нагрузке) и при неподключенной нагрузке (4⁴).

В качестве рекомендации можно предположить, что для достижения хорошего результата балансировки перетоков мощности по фазам и цепям многопроводных линий необходимо изучить другие алгоритмы перестановки проводников, чтобы иметь более высокую степень уравновешенности для всего линия. С перестановкой проводников, в том числе при регулировке пропускной способности линии передачи путем изменения угла фазового сдвига входного напряжения.

⁴ Артемов М.А. Математическое моделирование и компьютерный эксперимент / М.А. Артемов, Е.Н. Коржов – Воронеж: ВГУ, 2001. –64 с

**V Всероссийская (с международным участием) молодежная
научно-практическая конференция «ЭНЕРГОСТАРТ»**

206-6

20-22 октября 2022 года

Выводы и предложения .Видно, что предложенный процесс расчета устойчив к анализу особенностей работы многопроводных электрических линий.

1.Использование математической модели многопроводной электрической линии на основе телеграфных уравнений открывает новые горизонты для изучения.

Особенности эксплуатации этих линий электропередач и возможности перехода от качественных оценок к оценкам в количественном выражении с учетом реальной конструктивной реализации линий электропередач. Предложенная модель и процедура расчета робастны и в случае скачков значений фазовых параметров.

2.Взаимное влияние фаз линий со многими проводниками приводит к разной их загрузке, даже если на выходе линии нагрузка симметрична. Несимметричная нагрузка по фазам имеет место как для активной мощности, так и для реактивной мощности линии. Распределение реактивной мощности является более сложным по сравнению с распределением активной мощности и зависит от характера нагрузки в линии.

3.Перестановка фазных проводов обеспечивает балансировку мощности, передаваемой по фазам трехфазной цепи, а в случае двухцепной линии - широкий диапазон фазовой регулировки входных напряжений обеих цепей. Однако перестановка фаз в цепях не решает полностью проблему балансировки работающей схемы, и этот дисбаланс зависит от величины фазового угла, достигая максимальной величины отклонения для $\varphi = 80^\circ - 90^\circ$.

Использованная литература:

1. Даценко В.А., Гетманов В.Т. Выблов А.Н. Математическое моделирование в системах электроснабжения: учеб. пособие. – Томск: Издво Томского политехнического университета, 2003. – 120 с.

2. Бурулько Л.К., Овчаренко Е.В. Математическое моделирование в электротехнике: учебн. пособие. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2003. – 100 с.

3. Курганов С.А. Схемно-алгебраическое моделирование и расчет линейных электрических цепей / С. А. Курганов, В. В. Филаретов: учебное пособие. - Ульяновск : УлГТУ, 2005. - 319 с.

4. Артемов М.А. Математическое моделирование и компьютерный эксперимент / М.А. Артемов, Е.Н. Коржов – Воронеж: ВГУ, 2001. –64 с

**V Всероссийская (с международным участием) молодежная
научно-практическая конференция «ЭНЕРГОСТАРТ»
20-22 октября 2022 года**

Информация об авторах:

Достанова Кымбат Руслановна студентка группы 21-37 W, КазАТУ им.С.Сейфуллина, г.Астана, Проспект Женис 62, dostanova99@mail.ru