

УДК 621.311

**ИССЛЕДОВАНИЕ РЕЖИМА ЧЕТВЕРТИ ВОЛНЫ  
STUDY OF THE QUARTER WAVE REGIME**

Н.А. Бруцкий-Стемпковский, А. В. Острейко  
Научный руководитель – к.т.н., доцент Старжинский А. Л.  
Белорусский национальный технический университет  
г. Минск, Республика Беларусь  
N. A. Brutsky-Stempkovsky, A. V. Ostreyko  
Supervisor – A. L. Starzhinsky, Candidate of Technical Science, Docent  
Belarusian national technical university, Minsk, Belarus

**Аннотация:** данная научная работа была написана в процессе создания лабораторной работы для студентов специальности 1-43 01 02 «Электроэнергетические системы и сети» по дисциплине «Электропередачи». Здесь рассмотрены основные теоретические положения математической модели линии электропередачи большой протяжённости, отмечены особенности линий электропередачи протяжённостью, составляющей четверть волны, предложены способы исследований таких линий электропередачи в программной среде «MATLAB – Simulink».

**Abstract:** This scientific work was written in the process of creating a laboratory work for students of the specialty 1-43 01 02 "Electric power systems and networks" in the discipline "Power transmission". Here, the main theoretical provisions of the mathematical model of a long-distance power transmission line are considered, the features of power transmission lines with a length of a quarter of a wave are noted, methods for studying such power lines in the MATLAB-Simulink software environment are proposed.

**Ключевые слова:** электроэнергетика, передача электроэнергии, электропередачи, четверть волны.

**Keywords:** electric power industry, power transmission, power transmission, quarter wave.

**Введение**

Линия электропередачи (ЛЭП) – один из компонентов электрической сети, система энергетического оборудования, предназначенная для передачи электроэнергии посредством электрического тока [1].

Особую роль в энергосистемах занимают дальние и сверхдальние электропередачи, выполняющие функции межсистемных связей и магистральных передач больших потоков электроэнергии. К таким можно отнести, например, линию электропередачи Экибастуз – Кокшетау – участок уникальной высоковольтной линии электропередачи переменного тока «Сибирь — Центр» проектного напряжения 1150 кВ[2].

**Основная часть**

Все процессы, происходящие в линии электропередач, имеют волновой характер. В общем случае, когда линия электропередачи питается от источника

синусоидального напряжения, эти процессы можно описать как результат наложения падающей и отражённой волн. Для напряжения можно записать:

$$U_{\Pi} = \frac{1}{2}(U_2 + I_2 Z_B) e^{\gamma l}; \quad (1)$$

$$U_0 = \frac{1}{2}(U_2 - I_2 Z_B) e^{-\gamma l}, \quad (2)$$

где  $U_n, U_0$  – напряжение падающей и отраженной волны;

$U_2$  – напряжение в конце электропередачи;

$I_2$  – ток в конце электропередачи;

$z_0$  – волновое сопротивление линии;

$\gamma$  – постоянная распространения волны;

$l$  – расстояние от конца линии до какой-либо точки.

Аналогично для тока:

$$I_{\Pi} = \frac{1}{2}\left(I_2 + \frac{U_2}{z_B}\right) e^{\gamma l}; \quad (3)$$

$$I_0 = \frac{1}{2}\left(I_2 - \frac{U_2}{z_B}\right) e^{-\gamma l}, \quad (4)$$

где  $I_n, I_0$  – ток падающей и отраженной волны.

При попарном суммировании получаем уравнения, описывающие состояние электропередачи в любой её точке. Для фазных токов и линейных напряжений уравнения имеют вид:

$$U_1 = U_2 \operatorname{ch} \gamma l + \sqrt{3} I_2 z_B \operatorname{sh} \gamma l; \quad (5)$$

$$I_1 = I_2 \operatorname{ch} \gamma l + \frac{U_2}{\sqrt{3} z_B} \operatorname{sh} \gamma l, \quad (6)$$

Постоянная распространения волны  $\gamma$  определяется:

$$\gamma = \sqrt{(r_0 + jx_0)(g_0 + jb_0)} = \beta_0 + j\alpha_0, \quad (7)$$

где  $r_0, g_0$  – активное сопротивление и активная проводимость на единицу длины линии;

$x_0, b_0$  – индуктивное сопротивление и ёмкостная проводимость на единицу длины линии;

$\alpha_0$  – коэффициент изменения фазы волны на единицу длины;

$\beta_0$  – коэффициент затухания амплитуды волны на единицу длины.

Для исследования вопросов пропускной способности, перенапряжений, токов коротких замыканий для линий протяжённостью  $L \leq 2000$  км можно рассматривать вместо реальной линии – идеальную, без потерь [3]. Для такой линии удельные активные сопротивление и проводимость  $r_0 = 0$  и  $g_0 = 0$ .

После некоторых преобразований получаем:

$$U_1 = U_2 \cos \lambda + j\sqrt{3} I_2 z_B \sin \lambda; \quad (8)$$

$$I_1 = I_2 \cos \lambda + j \frac{U_2}{\sqrt{3} z_B} \sin \lambda, \quad (9)$$

где  $\lambda = \alpha l$  – волновая длина линии.

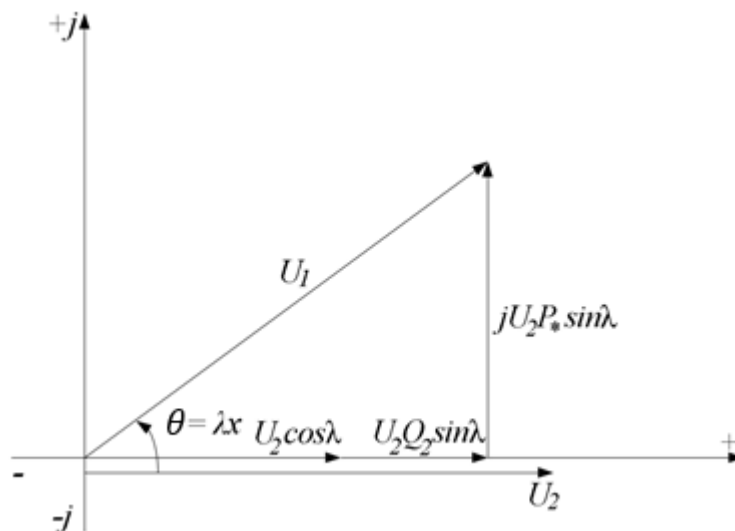


Рисунок 1 – Векторная диаграмма четвертьволновой линии

Из векторной диаграммы следует, что:  $\sin \theta = \frac{U_2 P_* \sin \lambda}{U_1}$ . После преобразований получим:

$$P = \frac{U_1 U_2}{Z_0 \sin \lambda}. \quad (10)$$

При длине электропередачи  $l = 1500$  км и, соответственно, волновой длине  $\lambda = \frac{\pi}{2}$  следует записать:

$$U_1 = j\sqrt{3}I_2 Z_B; \quad (11)$$

$$I_1 = j \frac{U_2}{\sqrt{3}Z_B}; \quad (12)$$

$$P_{*max} = 1; \quad (13)$$

$$P = \frac{U_1 U_2}{Z_B}; \quad (14)$$

$$\sin \theta = \frac{U_2}{U_1} P_*; \quad (15)$$

$$Q_1 = Q_2 = -\frac{U_1 U_2}{Z_B} \cos \theta; \quad (16)$$

Режим работы такой электропередачи называется четвертьволновым. Из уравнений (11)-(16) следует несколько простых и важных свойств данного режима.

1. Токи начала и конца четвертьволновой линии не зависят друг от друга и прямо пропорциональны напряжению противоположного конца линии.

2. В нормальном режиме работы напряжение в конце линии не зависит от напряжения в начале линии.

3. В режиме короткого замыкания в конце линии  $U_1 = const; U_2 = 0$ , следовательно  $I_1 = 0; I_2 = j \frac{U_1}{\sqrt{3}Z_B}$ , и такой режим для четвертьволновой линии не представляет опасности.

4. В режиме холостого хода при  $I_2 = 0$ , уравнение (8) запишется как  $U_1 = U_2 \cos \lambda$ . Отсюда  $U_2 = \frac{U_1}{\cos \lambda}$ . Поскольку  $\cos \lambda \frac{\pi}{2} = 0$ , то при подаче даже небольшого напряжения на начало четвертьволновой линии, напряжение разомкнутого конца теоретически становится бесконечным. Естественно, что в реальной линии напряжение повысится до некоторого конечного значения, обычно превышающего номинальное в несколько раз:  $U_2 \rightarrow \infty$ ;  $I_1 \rightarrow \infty$ .

Следовательно, режим холостого хода для четвертьволновой линии очень опасен, так как он равносильен режиму короткого замыкания для обычных линий.

Режим холостого хода опасен еще и перегрузкой генераторов, включенных в начале передачи. Из-за повышенных уровней напряжения генерируемая линией реактивная мощность становится настолько большой, что может привести к перегреву обмоток генераторов [4].

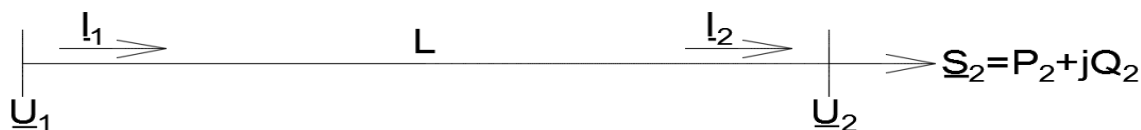


Рисунок 2 – Схема электропередачи

Опираясь на данные теоретические рассуждения, нами была разработана лабораторная работа «Исследование режима четверти волны» по дисциплине «Электропередачи» для студентов специальности 1-43 01 02 «Электроэнергетические системы и сети». Студенту, выполняющую данную лабораторную работу, предлагается ознакомиться с краткими теоретическими сведениями по данной теме и выполнить некоторые измерения и расчёты в среде MATLAB – Simulink. Результаты заносить в таблицу 1.

Приведем пример выполнения лабораторной работы и проанализируем полученные результаты.

Таблица 1 – Результаты измерений и расчётов (начало).

| №  | $\lambda$         | $P_2/P_{\text{нат}}$ | $U_1$ , кВ | $U_2$ , кВ | $I_1$ , А | $I_2$ , А | $\frac{U_2}{I_1}$ , кВ/А | $\frac{U_1}{I_2}$ , кВ/А | $\theta$ , град. |
|----|-------------------|----------------------|------------|------------|-----------|-----------|--------------------------|--------------------------|------------------|
| 1  | $< \frac{\pi}{2}$ | 0,5                  | 752,2      | 1362       | 2686      | 1362      | 0,51                     | 0,55                     | 61,23            |
| 2  |                   | 0,75                 | 750,2      | 972,5      | 1940      | 1477      | 0,50                     | 0,51                     | 69,9             |
| 3  |                   | 1                    | 749,4      | 749,1      | 1519      | 1515      | 0,49                     | 0,49                     | 74,65            |
| 4  |                   | 1,25                 | 749,1      | 607,1      | 1257      | 1534      | 0,48                     | 0,49                     | 77,61            |
| 5  |                   | 1,5                  | 748,9      | 509,7      | 1081      | 1545      | 0,47                     | 0,48                     | 79,63            |
| 6  | $= \frac{\pi}{2}$ | 0,5                  | 748,1      | 1483       | 2996      | 1505      | 0,49                     | 0,50                     | 96,27            |
| 7  |                   | 0,75                 | 749,1      | 994        | 2008      | 1510      | 0,50                     | 0,50                     | 94,21            |
| 8  |                   | 1                    | 749,4      | 747,2      | 1509      | 1511      | 0,50                     | 0,50                     | 93,18            |
| 9  |                   | 1,25                 | 749,6      | 598,6      | 1210      | 1512      | 0,49                     | 0,50                     | 92,55            |
| 10 |                   | 1,5                  | 749,8      | 499,2      | 1009      | 1513      | 0,49                     | 0,50                     | 92,13            |

Таблица 1 – Результаты измерений и расчётов (продолжение).

| №  | $\lambda$         | $P_2/P_{\text{нат}}$ | $U_1, \text{кВ}$ | $U_2, \text{кВ}$ | $I_1, \text{А}$ | $I_2, \text{А}$ | $\frac{U_2}{I_1}, \text{кВ/А}$ | $\frac{U_1}{I_2}, \text{кВ/А}$ | $\theta, \text{град.}$ |
|----|-------------------|----------------------|------------------|------------------|-----------------|-----------------|--------------------------------|--------------------------------|------------------------|
| 11 | $> \frac{\pi}{2}$ | 0,5                  | 745,7            | 1251             | 2394            | 1262            | 0,52                           | 0,59                           | 128,4                  |
| 12 |                   | 0,75                 | 748,2            | 943,9            | 1846            | 1428            | 0,51                           | 0,52                           | 117,8                  |
| 13 |                   | 1                    | 749,5            | 745,7            | 1501            | 1504            | 0,50                           | 0,50                           | 111,6                  |
| 14 |                   | 1,25                 | 750,2            | 612,3            | 1277            | 1544            | 0,48                           | 0,49                           | 107,6                  |
| 15 |                   | 1,5                  | 750,6            | 517,9            | 1124            | 1567            | 0,46                           | 0,48                           | 104,8                  |

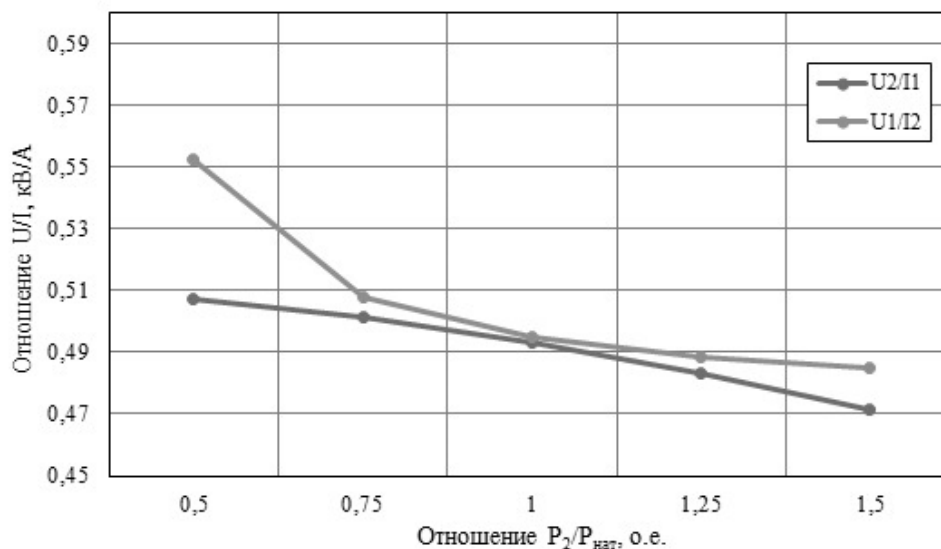


Рисунок 3 – Отношение  $U/I$  при волновой длине линии электропередачи менее четверти волны ( $L = 1200 \text{ км}$ )

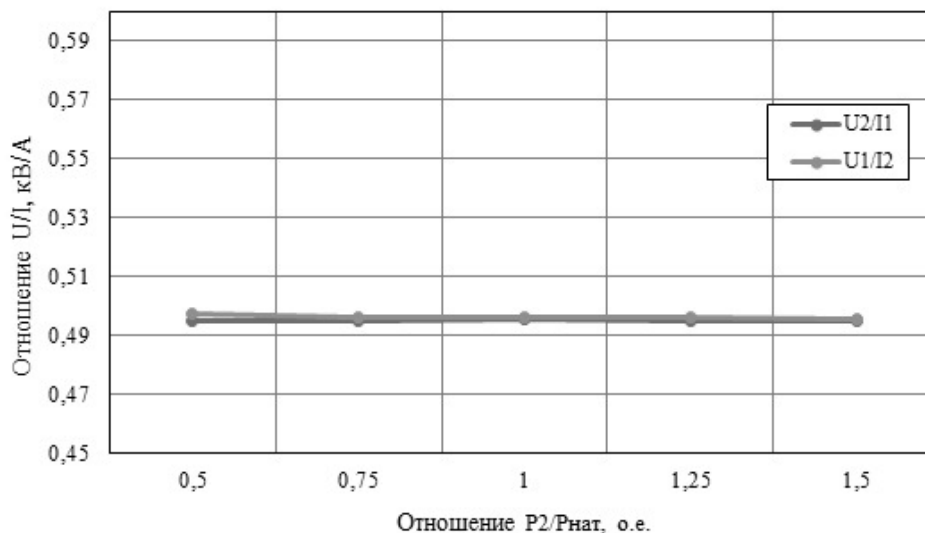


Рисунок 4 – Отношение  $U/I$  при волновой длине линии электропередачи равной четверти волны ( $L=1500 \text{ км}$ )

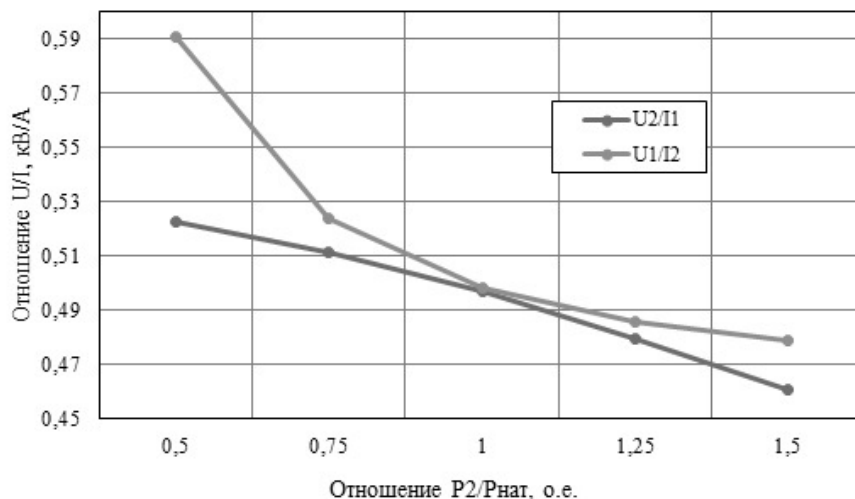


Рисунок 5 – Отношение  $U/I$  при волновой длине линии электропередачи более четверти волны ( $L=1800$  км)

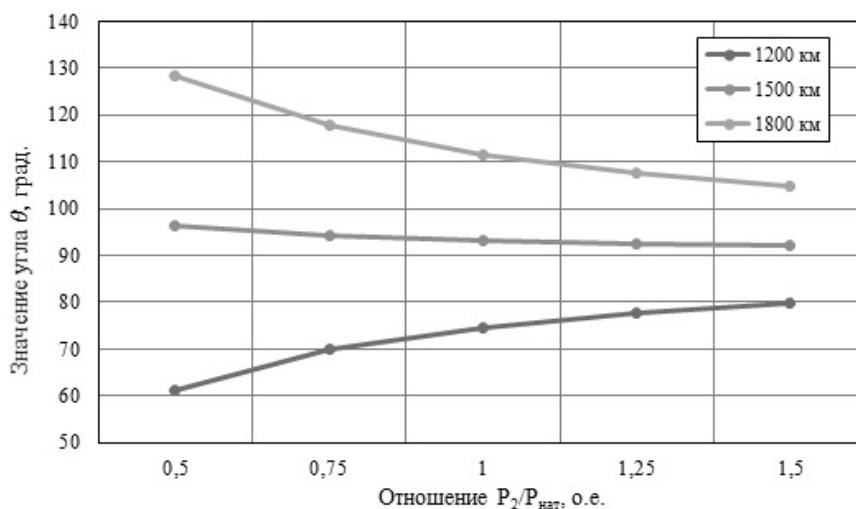


Рисунок 6 – Значение угла  $\theta$  при различных длинах линии электропередачи

### Заключение

Электропередачи длиной четверть волны обладают следующими свойствами:

1. Отношение напряжения  $U_2$  конца линии к току  $I_1$  начала линии постоянно для любой нагрузки при четвертьволновой длине электропередачи. При иной длине отношение изменяется.
2. Аналогичным образом ведёт себя отношение напряжения  $U_1$  начала линии к току  $I_2$  конца линии.
3. В режиме четверти волны ток  $I_2$  конца линии не меняется при изменении нагрузки  $P_2$ . В иных режимах ток увеличивается с ростом нагрузки, что логично.

### Литература

1. Линия электропередачи [Электронный ресурс]/ линия электропередачи. - Режим доступа: [https://ru.wikipedia.org/wiki/Линия\\_электропередачи/](https://ru.wikipedia.org/wiki/Линия_электропередачи/). – Дата доступа: 01.04.2021.
2. Единственная линия электропередачи 1150 кВ [Электронный ресурс]/единственная линия электропередачи 1150 кВ. - Режим доступа:

[https://pikabu.ru/story/edinstvennaya liniya\\_yelektroperedachi\\_1150\\_kv\\_5646567/](https://pikabu.ru/story/edinstvennaya liniya_yelektroperedachi_1150_kv_5646567/).

– Дата доступа: 01.04.2021.

3. Поспелов Г. Е., Федин В.Т. Передача энергии и электропередачи: Учеб. пособие для студентов энергет. специальностей вузов / Г. Е. Поспелов, В. Т. Федин. – Мн.: Адукацыя і выхаванне, 2003. – 544 с: ил.

4. Веников В.А., Рыжов Ю.П. Дальние электропередачи переменного и постоянного тока: Учебн. Пособие для вузов. – М.: Энергоатомиздат, 1985.- 272с., ил.