

Передача электрической энергии пониженного качества по однопроводной линии электропередачи

Г.А. Большанин^{1 а}, Е.Г. Скулина^{2 б}

¹Братский государственный университет, ул. Макаренко 40, Братск, Россия

²Новосибирский государственный технический университет, пр. Карла Маркса 20, Новосибирск, Россия

^аbolshaning@mail.ru, ^бdream.len@yandex.ru

Статья поступила 28.02.2017, принята 30.03.2017

Сформулированы основные особенности передачи электрической энергии пониженного качества по линии электропередачи однопроводного исполнения. Предложены электрическая схема замещения однородного участка линии электропередачи однопроводного исполнения и математическая модель распределения по нему электрической энергии пониженного качества. Составлены уравнения распределения напряжения и тока по однородному участку линии электропередачи однопроводного исполнения в условиях пониженного качества электрической энергии. Отмечен волновой характер распределения электрической энергии по токоведущим частям линии электропередачи. Показана методика определения вторичных параметров линии электропередачи однопроводного исполнения: постоянной распространения электромагнитного поля по проводам линии электропередачи, волнового сопротивления и фазовой скорости. Приведены расчетные формулы для определения численных значений постоянных интегрирования. Обращено внимание на то, что скорость распространения электромагнитного поля по проводам линии электропередачи меньше, чем скорость распространения этого поля в вакууме. Предложена методика определения длины электромагнитного поля в токоведущих частях линии электропередачи однопроводного исполнения на частоте каждой гармонической составляющей напряжения и тока, а также методика определения скорости распространения этого поля в материальной среде. Сформулирована методика определения численных значений напряжения и тока на однородном участке линии электропередачи однопроводного исполнения практически любой протяженности. Отмечено, что для качественного прогнозирования результатов передачи электрической энергии пониженного качества по линии электропередачи однопроводного исполнения необходимы достоверные сведения о первичных параметрах этой линии, а также о спектральном составе напряжения и тока в начале или в конце анализируемого участка ЛЭП.

Ключевые слова: линия электропередачи; падающая волна; отраженная волна; постоянная распространения; волновое сопротивление; постоянная интегрирования; математическая модель; передаточная функция; амплитудно-частотная характеристика.

Transmission of low-quality electrical energy through a single-wire power line

G.A. Bolshinin^{1а}, E.G. Skulina^{2б}

¹Bratsk State University; 40, Makarenko St., Bratsk, Russia

²Novosibirsk State Technical University; 20, Karl Marx Ave., Novosibirsk, Russia

^аbolshaning@mail.ru, ^бdream.len@yandex.ru

Received 28.02.2017, adopted .30.03.2017

The basic features of the transmission of low-quality electric power through the single-wire transmission line are formulated. The electric circuit for replacing a homogeneous section of the electrical transmission line of a single-wire version and a mathematical model for distributing electric energy of lower quality along it are proposed. Equations of voltage and current distribution along a homogeneous section of an electrical transmission line of a single-wire design in the conditions of a reduced quality of electric energy have been compiled. Wave character of distribution of electric energy on current-carrying parts of a power transmission line is noted. The technique for determining the secondary parameters of a single-wire transmission line is shown: the propagation constant of the electromagnetic field along the transmission line wires, the wave impedance and the phase velocity. The calculation formulas for determining the numerical values of the integration constants are given. Attention is drawn to the fact that the speed of propagation of the electromagnetic field along the transmission line wires is less than the propagation velocity of this field in a vacuum. A method for determining the length of an electromagnetic field in current-carrying parts of a single-wire power transmission line at the frequency of each harmonic component of voltage and current, as well as a technique for determining the propagation velocity of this field in a material medium, are proposed. A technique for determining the numerical values of voltage and current in a homogeneous section of an electrical transmission line of a single-wire execution of almost any length is developed. It is noted that reliable information on the primary parameters of this line, as well as on the spectral composition of voltage and current at the beginning or at the end of the analyzed section of the transmission line, is required for qualitative prognosis of the results of transmission of electric energy of reduced quality through the single-wire power transmission line.

Keywords: power line; incident wave; reflected wave; propagation constant; wave impedance; integration constant; mathematical model; transfer function; amplitude-frequency characteristic.

Введение

Теория передачи электрической энергии по однопроводной линии электропередачи (ЛЭП) достаточно хорошо разработана и широко используется в инженерных расчетах.

При анализе процессов передачи электрической энергии ЛЭП делятся на линии с сосредоточенными параметрами и линии с распределенными параметрами. Критерием такого деления должна служить протяженность ЛЭП. Линии протяженностью менее 4–5 % от длины волны электромагнитного поля, обеспечивающего передачу по ним электрической энергии, считаются линиями с сосредоточенными параметрами, а линии большей протяженности — линиями с распределенными параметрами. При длине волны 6 000 км данная граница определяется величиной 200–300 км, но это если игнорировать наличие материальной среды в проводах ЛЭП и уравнивать скорость распространения электромагнитного поля в проводах ЛЭП со скоростью распространения этого поля в вакууме. То есть, это очень грубое допущение, которое существенно искажает физическую сущность передачи электрической энергии по ЛЭП, тем более при передаче электрической энергии пониженного качества, характеризующейся показателями, достигшими или даже превысившими свои нормативные значения [1].

В данном случае важны такие характеристики качества электрической энергии, как отклонения, колебания и особенно несинусоидальность напряжения, поскольку нарушение этой характеристики сопровождается появлением высокочастотных и низкочастотных (субгармонических) составляющих. Это обстоятельство вызвано тем, что изменение частоты существенно влияет на величину длины волны электромагнитного поля, а значит, и на передачу электрической энергии по проводам ЛЭП.

Напряжения и токи, характеризующие электрическую энергию, передаваемую по современным ЛЭП, обладают широким спектром высоко- и низкочастотных составляющих, в том числе постоянной составляющей. Об этом свидетельствуют результаты мониторинга качества электрической энергии в действующих электроэнергетических системах [2].

Поскольку не перегруженные ЛЭП можно считать линейными, при анализе передачи по ним электрической энергии можно использовать принцип суперпозиций. То есть, анализ распространения каждой n -й гармонической составляющей, а также постоянной составляющей ($n = 0$) напряжения и тока можно выполнять отдельно, при необходимости — с последующим обобщением результатов [3].

Передачу электрической энергии, а именно ее основных характеристик, каковыми являются напряжение и ток, целесообразно рассматривать на основании математической модели этого процесса.

Математическая модель передачи напряжения и тока строится на основании электрической схемы замещения в данном случае однопроводной линии электропередачи для n -й гармонической составляющей напряжения и тока, которая отражала бы все происходящие в ней процессы преобразования энергии. Причем гармоническая составляющая может быть любая: высокочас-

тотная, низкочастотная или даже дробная. Для их выявления можно использовать либо специализированные электроизмерительные приборы, либо специальные способы определения гармонических составляющих напряжения и тока [4–9].

Чем больше частота гармонической составляющей напряжения и тока, тем меньше протяженность ЛЭП, где проявляется так называемый эффект длинных линий, который заключается в нелинейном распределении напряжения и тока вдоль анализируемой линии электропередачи. На частоте 3-й гармонической составляющей эффект начинает проявляться уже на участке ЛЭП протяженностью 70 км, на частоте 5-й гармонической составляющей — на участке протяженностью 30 км, на 9-й — на участке протяженностью 10 км и т. д. [3]. Это если считать, что длина волны электромагнитного поля в ЛЭП равна 6 000 км, а поскольку на самом деле она гораздо меньше, то и указанные протяженности участков ЛЭП тоже будут много меньше.

Из этого следует, что для гарантированного учета нелинейности распределения напряжения и тока вдоль анализируемой ЛЭП даже сравнительно небольшой протяженности эту линию электропередачи следует принять за линию с распределенными параметрами.

Методика исследования. Линиями с распределенными параметрами называют линии, в которых напряжение и ток изменяются при переходе от одного места (сечения) к другому. Схему замещения такой линии при ее однопроводном исполнении целесообразно строить для однородного участка элементарной протяженности, как это показано на рис. 1.

Математическая модель выделенного участка представляет собой систему из двух уравнений, составленных на основании первого и второго законов Кирхгофа [3; 10–12]:

$$\left. \begin{aligned} i_n &= di_n + i_n + \frac{\partial i_n}{\partial l} dl; \\ u_n &= i_n R_{0n} dl + L_{0n} dl \frac{\partial i_n}{\partial t} + u_n + \frac{\partial u_n}{\partial t} dl. \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

Общий вид решения этих уравнений может быть представлен так:

$$\dot{U}_n = A_{1n} e^{\gamma_n l} + A_{2n} e^{-\gamma_n l}; \quad (2)$$

$$I_n = \frac{A_{2n} e^{-\gamma_n l} - A_{1n} e^{\gamma_n l}}{Z_{cn}}, \quad (3)$$

где A_{1n} и A_{2n} — постоянные интегрирования; γ_n — постоянная распространения электромагнитного поля по однородному участку ЛЭП однопроводного исполнения на частоте n -й гармонической составляющей, определяемая по формуле $\gamma_n = \sqrt{Z_{0n} Y_{0n}}$; Z_{cn} — волновое сопротивление линейного провода однородного участка однопроводной линии электропередачи на частоте n -й гармонической составляющей, определя-

емое по формуле: $Z_{cn} = \sqrt{\frac{Z_{0n}}{Y_{0n}}}$;

$$\begin{aligned} \underline{Z}_{0n} &= R_{0n} + jn\omega L_{0n}; \\ \underline{Y}_{0n} &= G_{0n} + jn\omega C_{0n}; \\ \omega &= 2\pi f; \end{aligned}$$

f — частота изменения напряжения и тока во времени.
 Постоянная распространения электромагнитного поля вдоль однородного участка ЛЭП зависит лишь от

первичных параметров этого участка и является комплексной величиной:

$$\gamma_n = \beta_n + j\alpha_n,$$

где β_n — коэффициент затухания n -й гармонической составляющей волны электромагнитного поля; α_n — коэффициент фазы этой же волны.

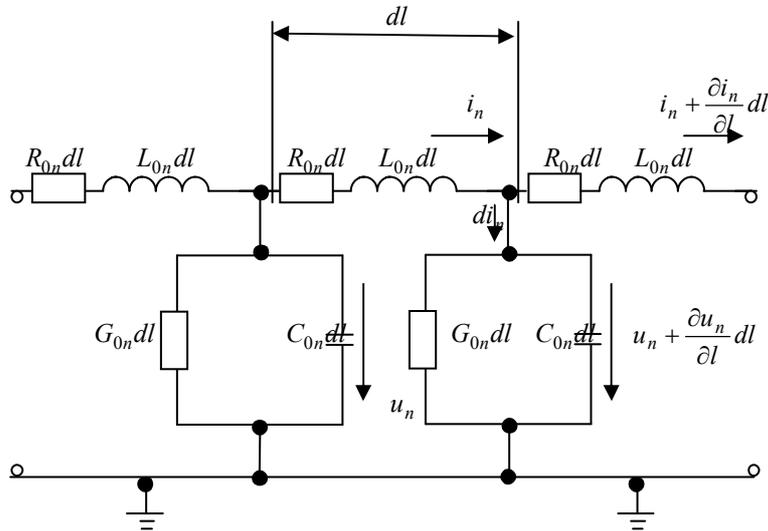


Рис. 1. Электрическая расчетная схема замещения элементарного участка однородной линии электропередачи однопроводного исполнения на частоте n -й гармонической составляющей

Уравнение (2) определяет общий вид уравнения распределения напряжения вдоль однородного участка ЛЭП однопроводного исполнения, а уравнение (3) — общий вид уравнения распределения тока вдоль этого же участка ЛЭП.

Судя по уравнениям (2) и (3), передача электрической энергии по однопроводной ЛЭП осуществляется парой волн электромагнитного поля, одной падающей и одной отраженной. Амплитуда этих волн характеризуется постоянными интегрирования A_{1n} и A_{2n} . Причем постоянная интегрирования A_{1n} характеризует амплитуду отраженной волны электромагнитного поля, а A_{2n} — падающей.

Получается, что электрическая энергия от генерирующих устройств (начало анализируемого участка ЛЭП) падающей волной электромагнитного поля доставляется электрической нагрузке (конец анализируемого участка ЛЭП). Но вся электрическая энергия, доставляемая к концу однородного участка ЛЭП, электрической нагрузкой не потребляется, а в виде отраженной волны электромагнитного поля возвращается обратно к началу участка линии электропередачи. Судя по уравнениям (2) и (3), на этом транспортировка электрической энергии заканчивается, т. е. амплитуда отраженной волны электромагнитного поля затухает до нуля. Фактически, это происходит лишь при достаточно большом коэффициенте затухания, а при малых затуханиях возможны вторичные, третичные и т. д. падающие и отраженные волны электромагнитного поля. Эти волны крайне негативно сказываются на достоверности прогнозирования напряжения, тока и мощности на участках ЛЭП, на качестве передаваемой электрической

энергии, пропускной способности линии электропередачи и т. д.

Согласно рекомендациям теоретической электротехники, постоянные интегрирования определяются по формулам:

$$\begin{aligned} A_{1n} &= \frac{\dot{U}_{1n} - \dot{I}_{1n} \underline{Z}_{\tilde{n}n}}{2}; \\ A_{2n} &= \frac{\dot{U}_{1n} + \dot{I}_{1n} \underline{Z}_{\tilde{n}n}}{2}, \end{aligned}$$

где \dot{U}_{1n} и \dot{I}_{1n} — напряжение и ток в начале исследуемого участка ЛЭП однопроводного исполнения на частоте n -й гармонической составляющей.

При подстановке этих формул в уравнения (2) и (3) получается, что:

$$\left. \begin{aligned} \dot{U}_n &= \frac{\dot{U}_{1n} - \dot{I}_{1n} \underline{Z}_{\tilde{n}n}}{2} e^{\gamma_n l} + \frac{\dot{U}_{1n} + \dot{I}_{1n} \underline{Z}_{\tilde{n}n}}{2} e^{-\gamma_n l}; \\ \dot{I}_n &= \frac{\dot{U}_{1n} + \dot{I}_{1n} \underline{Z}_{\tilde{n}n}}{2 \underline{Z}_{\tilde{n}n}} e^{-\gamma_n l} - \frac{\dot{U}_{1n} - \dot{I}_{1n} \underline{Z}_{\tilde{n}n}}{2 \underline{Z}_{\tilde{n}n}} e^{\gamma_n l}. \end{aligned} \right\}$$

Иначе эти уравнения можно переписать так:

$$\left. \begin{aligned} \dot{U}_n &= \dot{U}_{1n} ch \gamma_n l - \dot{I}_{1n} \underline{Z}_{\tilde{n}n} sh \gamma_n l; \\ \dot{I}_n &= \dot{I}_{1n} ch \gamma_n l - \frac{\dot{U}_{1n}}{\underline{Z}_{cn}} sh \gamma_n l. \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

Это если известны напряжения и токи на частоте n -й гармонической составляющей в начале исследуемого участка ЛЭП.

Если известны только напряжение \dot{U}_{2n} и ток \dot{I}_{2n} на частоте той же гармонической составляющей в конце однородного участка ЛЭП однопроводного исполнения, то следует рассуждать несколько иначе:

$$\left. \begin{aligned} \dot{U}_n &= \dot{U}_{2n} ch\gamma_n y + \dot{I}_{2n} \underline{Z}_{cn} sh\gamma_n y; \\ \dot{I}_n &= \frac{\dot{U}_{2n}}{\underline{Z}_{cn}} sh\gamma_n y + \dot{I}_{2n} ch\gamma_n y. \end{aligned} \right\}$$

Пусть анализу подлежит однородный участок ЛЭП однопроводного исполнения с погонным активным сопротивлением $R_0 = 0,74$ Ом/км, с собственной индуктивностью $L_0 = 1,28$ мГн/км, с активной проводимостью $G_0 = 10^{-16}$ См/км, с емкостью между линейным проводом и поверхностью земли $C_0 = 9 \cdot 10^{-9}$ Ф/км на частоте n -й гармонической составляющей. В таком случае графические интерпретации распределения напряжения и тока от конца однородного участка ЛЭП однопроводного исполнения протяженностью 50 км на частоте основной гармонической составляющей будут аналогичны изображенным на рис. 2 и 3.

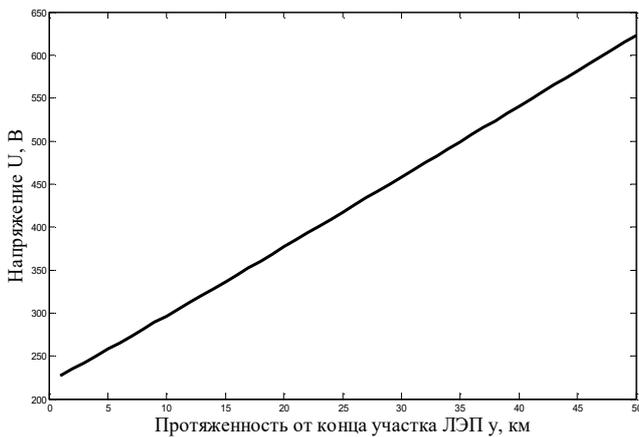


Рис. 2. Графическая интерпретация распределения напряжения от конца однородного участка ЛЭП однопроводного исполнения на частоте основной гармонической составляющей

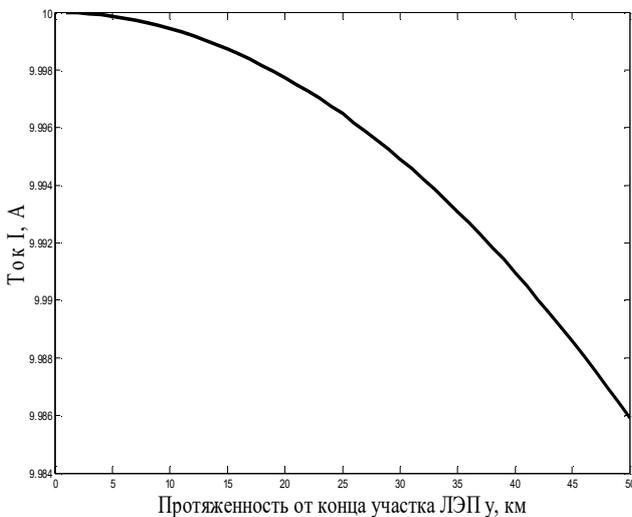


Рис. 3. Графическая интерпретация распределения тока от конца однородного участка ЛЭП однопроводного исполнения на частоте основной гармонической составляющей

Здесь не удалось зафиксировать волновой характер передачи электрической энергии по однородному участку ЛЭП однопроводного исполнения из-за малой протяженности анализируемого участка линии электропередачи и малой частоты изменения напряжения и тока во времени.

Предположим увеличение протяженности анализируемого участка ЛЭП в 10 раз. Причем для получения лучшего эффекта повысим частоту изменения напряжения и тока во времени до частоты 13-й гармонической составляющей.

При этих условиях постоянная распространения волн электромагнитного поля вдоль однородного участка ЛЭП однопроводного исполнения оказывается равной $\gamma_{13} = (0,001 + j0,0139)$ км⁻¹. Это означает, что коэффициент затухания в данном случае равен $\beta_{13} = 0,001$ км⁻¹, а коэффициент фазы $\alpha_{13} = 0,0139$ км⁻¹.

Расчетное значение постоянной распространения волн электромагнитного поля вдоль однородного участка ЛЭП однопроводного исполнения оказывается равным $\gamma_{13} = (-0,001 - j0,0139)$ км⁻¹. Эта величина свидетельствует о том, что выполняются рекомендации теорем Ляпунова [13], а значит, выполняются критерии статической устойчивости передачи электрической энергии по анализируемому участку ЛЭП [14]. Но трактовка уравнений распределения напряжения (2) и тока (3) вдоль однородного участка однопроводной ЛЭП такова, что коэффициент затухания β_n должен быть положительным. Поэтому результат расчета домножен на отрицательную единицу (-1).

Волновое сопротивление анализируемого участка ЛЭП на частоте 13-й гармонической составляющей оказывается равным: $\underline{Z}_{c13} = (378,06 - j26,426)$ Ом.

Фазовая скорость волны электромагнитного поля, в таком случае, на частоте 13-й гармонической составляющей будет определяться так:

$$v = \frac{dl}{dt} = \frac{n\omega}{\alpha_n} = \frac{13 \cdot 2\pi \cdot 50}{0,0139} = 29,38 \cdot 10^4 \text{ км/с.}$$

Теперь можно определить и длину волны электромагнитного поля, распространяющегося по проводам ЛЭП однопроводного исполнения [15, 16]:

$$\lambda = \frac{v}{f} = \frac{29,38 \cdot 10^4}{650} = 452 \text{ км.}$$

Это длина одной волны электромагнитного поля. При наложении падающей и отраженной волн электромагнитного поля получается результирующая волна этого поля [15; 16]:

$$\lambda = \frac{v}{af} = \frac{29,38 \cdot 10^4}{2 \cdot 650} = 226 \text{ км.}$$

Результат выполненного расчета длины результирующей волны электромагнитного поля подтверждается графическими интерпретациями распределения напряжения и тока вдоль однородного участка ЛЭП однопроводного исполнения протяженностью 500 км на

частоте 13-й гармонической составляющей, изображенным на рис. 4 и 5.

Эти интерпретации иллюстрируют волновой характер передачи электрической энергии по однородному участку ЛЭП однопроводного исполнения. Длина волны электромагнитного поля в проводе этого участка ЛЭП, судя по рис. 4 и 5, соответствует расчетной величине.

Графические интерпретации распределения напряжения и тока вдоль анализируемого участка ЛЭП (рис. 4 и 5) свидетельствуют о том, что наибольшая пропускная способность для токов на частоте 13-й гармонической составляющей наблюдается в начале этого участка и на участках протяженностью 226 км, 452 км и т. д. Протяженность таких участков, их периодичность и длина волны электромагнитного поля в конечном счете зависят от величины первичных параметров линии электропередачи.

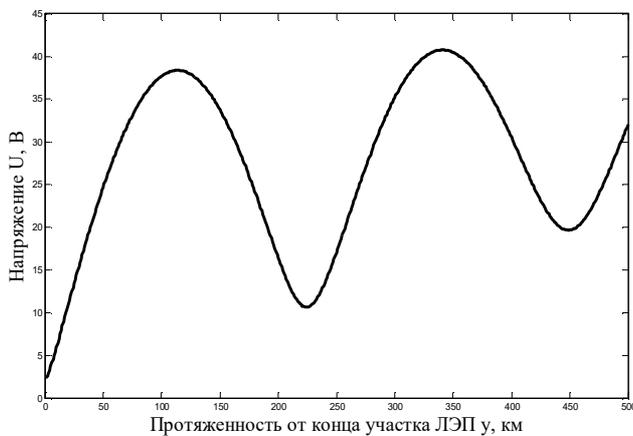


Рис. 4. Графическая интерпретация распределения напряжения от конца однородного участка ЛЭП однопроводного исполнения на частоте 13-й гармонической составляющей

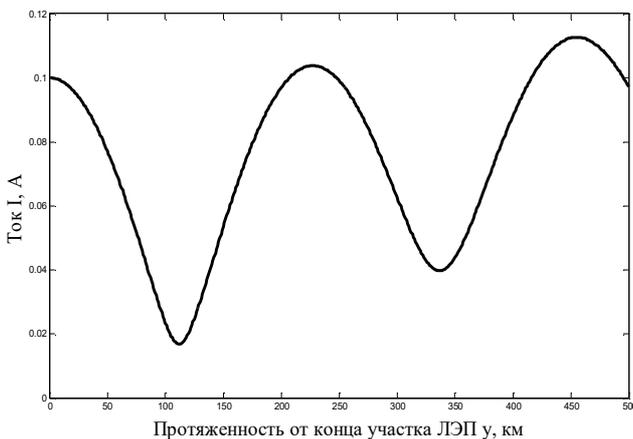


Рис. 5. Графическая интерпретация распределения тока от конца однородного участка ЛЭП однопроводного исполнения на частоте 13-й гармонической составляющей

Это значит, что для прогнозирования численных значений напряжений и токов на участках ЛЭП различной протяженности, для вычисления длины результирующей волны электромагнитного поля и определения участков ЛЭП с наибольшей пропускной способностью достаточно иметь достоверные сведения о первичных, а также вторичных параметрах линии электропередачи.

Величины напряжений и токов на различных участках ЛЭП зависят от электрической нагрузки. Величину этой нагрузки целесообразно оценивать значениями токов. Распределение токов по однородному участку ЛЭП объективно иллюстрирует распределение волн электромагнитного поля по этому участку. Графическая иллюстрация распределения тока по анализируемому участку ЛЭП приведена на схеме распределения амплитудных значений падающей и отраженной волн электромагнитного поля (рис. 6).

Передачу электрической энергии по ЛЭП можно оценить с помощью передаточной функции линии электропередачи и соответствующих частотных характеристик. Частотные характеристики строятся именно с помощью передаточной функции объекта $K(j\omega)$.

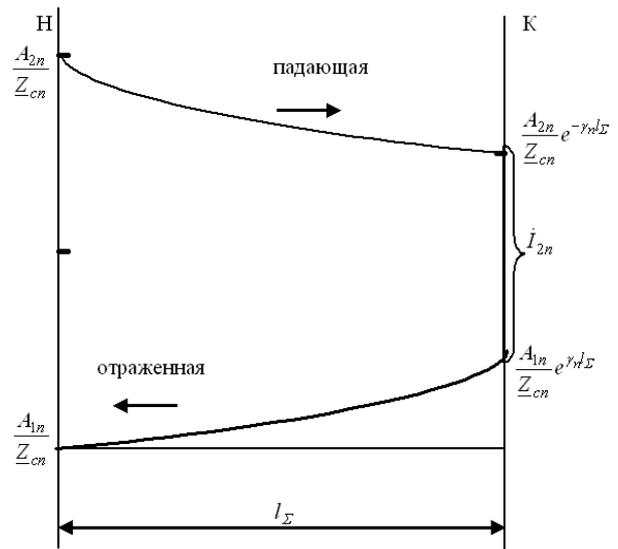


Рис. 6. Схема распределения амплитудных значений падающей и отраженной волн электромагнитного поля по линейному проводу однородного участка ЛЭП однопроводного исполнения

Передаточная функция объекта $K(j\omega)$ определяется как отношение спектральной плотности выходного сигнала к спектральной плотности входного сигнала:

$$K(j\omega) = \frac{F_2(j\omega)}{F_1(j\omega)},$$

где $F_1(j\omega)$ и $F_2(j\omega)$ — спектральные плотности входного и выходного сигналов.

Спектральная плотность (спектральная функция) сигнала определяется из прямого преобразования Фурье:

$$F(j\omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} f(t) e^{-j\omega t} dt.$$

Если учесть, что до подачи электрической энергии в ЛЭП ни о напряжении, ни о токе речь не идет, то есть при $t < 0$ $f(t) = 0$, то прямое преобразование Фурье для исследуемого объекта переписывается так:

$$F(j\omega) = \int_0^{+\infty} f(t) e^{-j\omega t} dt. \quad (5)$$

В данном случае следует говорить о передаточной функции по напряжению и передаточной функции по току. Они определяются так:

$$K_U(j\omega) = \frac{U_2(j\omega)}{U_1(j\omega)};$$

$$K_I(j\omega) = \frac{I_2(j\omega)}{I_1(j\omega)},$$

где $U_1(j\omega)$ и $U_2(j\omega)$ — спектральные плотности входного и выходного напряжений; $I_1(j\omega)$ и $I_2(j\omega)$ — спектральные плотности входного и выходного токов.

Входные напряжение и ток на частоте n -й гармонической составляющей во времени изменяются по гармоническим законам:

$$u_{1n} = U_{m1n} \sin(n\omega t + \varphi_{u1n});$$

$$i_{1n} = I_{m1n} \sin(n\omega t + \varphi_{i1n}).$$

Спектральные плотности этих величин определяются по уравнению (5):

$$U_1(j\omega) = -\frac{U_{1n}\sqrt{2}}{n\omega} (\cos \varphi_{u1n} - j \sin \varphi_{u1n});$$

$$I_1(j\omega) = -\frac{I_{1n}\sqrt{2}}{n\omega} (\cos \varphi_{i1n} - j \sin \varphi_{i1n}),$$

где U_{1n} и I_{2n} — модули действующих величин напряжения и тока на частоте n -й гармонической составляющей в начале однородного участка ЛЭП однопроводного исполнения.

Действующие величины выходного напряжения однородного участка ЛЭП однопроводной ЛЭП определяются из первого уравнения системы (4), а выходного тока — из второго уравнения этой системы.

Мгновенное значение выходного напряжения определяется как мнимая составляющая произведения действующего значения этого напряжения и $\sqrt{2}e^{j\omega t}$:

$$u_{2n} = \sqrt{2} \left| \dot{U}_{1n} ch \gamma_n l - \dot{I}_{1n} Z_{cn} sh \gamma_n l \right| \sin(\omega t + \varphi_{u2n}), \quad (6)$$

где φ_{u2n} — аргумент выходного напряжения на частоте n -й гармонической составляющей.

Мгновенное значение выходного тока определяется как мнимая составляющая произведения действующего значения этого тока и $\sqrt{2}e^{j\omega t}$:

$$i_{2n} = \sqrt{2} \left| \dot{I}_{1n} ch \gamma_n l - \frac{\dot{U}_{1n}}{Z_{cn}} sh \gamma_n l \right| \sin(\omega t + \varphi_{i2n}), \quad (7)$$

где φ_{i2n} — аргумент выходного тока на частоте n -й гармонической составляющей.

Спектральные плотности выходных напряжения и тока определяются из уравнения (5) с учетом уравнений (6) и (7):

$$U_2(j\omega) = -\frac{\sqrt{2}}{n\omega} \left| \dot{U}_{1n} ch \gamma_n l - \dot{I}_{1n} Z_{cn} sh \gamma_n l \right| (\cos \varphi_{u2n} - j \sin \varphi_{u2n});$$

$$I_2(j\omega) = -\frac{\sqrt{2}}{n\omega} \left| \dot{I}_{1n} ch \gamma_n l - \frac{\dot{U}_{1n}}{Z_{cn}} sh \gamma_n l \right| (\cos \varphi_{i2n} - j \sin \varphi_{i2n})$$

В таком случае передаточная функция по напряжению однородного участка ЛЭП однопроводного исполнения приобретает вид:

$$K_U(j\omega) = \frac{\left| \dot{U}_{1n} ch \gamma_n l - \dot{I}_{1n} Z_{cn} sh \gamma_n l \right| (\cos \varphi_{u2n} - j \sin \varphi_{u2n})}{U_{1n} (\cos \varphi_{u1n} - j \sin \varphi_{u1n})},$$

а передаточная функция по току —

$$K_I(j\omega) = \frac{\left| \dot{I}_{1n} ch \gamma_n l - \frac{\dot{U}_{1n}}{Z_{cn}} sh \gamma_n l \right| (\cos \varphi_{i2n} - j \sin \varphi_{i2n})}{I_{1n} (\cos \varphi_{i1n} - j \sin \varphi_{i1n})}.$$

Передаточные функции по напряжению и току представляют собой комплексные величины:

$$K_U(j\omega) = A_U(\omega) e^{j\varphi_u(\omega)};$$

$$K_I(j\omega) = A_I(\omega) e^{j\varphi_i(\omega)}.$$

С помощью этих передаточных функций можно построить частотные характеристики напряжения и тока. Модули передаточных функций $A_U(\omega)$ и $A_I(\omega)$ являются амплитудно-частотными характеристиками (АЧХ) напряжения и тока, аргументы этих функций — фазо-частотными характеристиками (ФЧХ) напряжения и тока, вещественные составляющие передаточных функций $\text{Re}(A_U(\omega))$ и $\text{Re}(A_I(\omega))$ — вещественно-частотными характеристиками (ВЧХ) напряжения и тока, мнимые составляющие передаточных функций $\text{Im}(A_U(\omega))$ и $\text{Im}(A_I(\omega))$ — мнимыми частотными характеристиками (МЧХ) напряжения и тока.

АЧХ напряжения однородного участка ЛЭП однопроводного исполнения изображена на рис. 7, АЧХ тока — на рис. 8

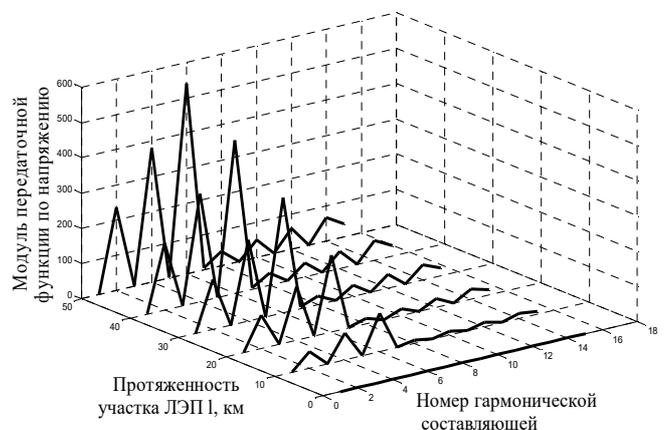


Рис. 7. АЧХ однородного участка ЛЭП однопроводного исполнения по напряжению

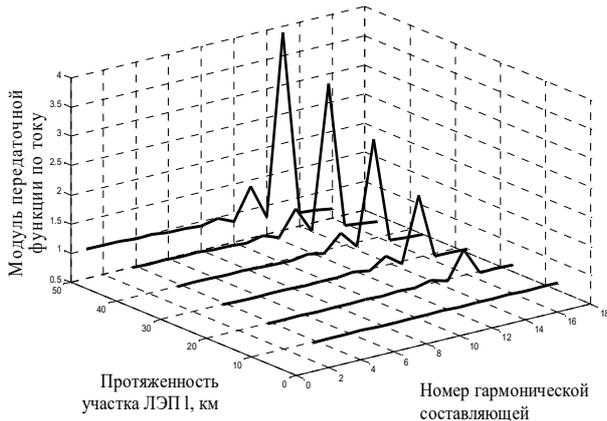


Рис. 8. АЧХ однородного участка ЛЭП однопроводного исполнения по току

При построении этих АЧХ в качестве начального условия был принят реальный спектральный состав напряжения и тока одного из промышленных регионов страны (Братский район Иркутской области). Своеобразие этих спектральных составов обусловлено участием в системе обеспечения электрической энергией промышленных объектов региона мощных преобразовательных устройств с 12-пульсной схемой выпрямления. Этим фактом объясняется преобладание в спектрах напряжения и тока 11-й и 13-й гармонических составляющих. Причем, судя по АЧХ (рис. 7 и 8), с увеличением протяженности анализируемого участка линии электропередачи уровни этих гармонических составляющих возрастают, а значит, возрастает пропускная способность ЛЭП для токов этих частот.

Выводы

1. В условиях пониженного качества электрической энергии ЛЭП даже сравнительно небольшой протяженности следует рассматривать как линии с распределенными параметрами.

2. Длина волны и скорость электромагнитного поля, распространяющегося по токоведущим частям ЛЭП, много меньше длины волны и скорости распространения этого поля в вакууме. Они определяются коэффициентом фазы, а значит, первичными параметрами соответствующей ЛЭП.

3. В результате выполненных исследований выяснено, что для прогнозирования численных значений напряжений и токов в различных местах однородного участка ЛЭП однопроводного исполнения необходимо иметь сведения не только о величинах напряжения и тока соответствующей частоты в начале или в конце этого участка, но и о его первичных и вторичных параметрах. Отметим, что получение таких сведений часто оказывается непростой задачей, особенно если исследованию подлежит действующая ЛЭП, как правило, обладающая весьма сомнительной однородностью.

Литература

1. ГОСТ 32144-2013. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. М.: Стандартинформ, 2014. 16 с.

2. Боровиков В.С., Волков М.В., Иванов В.В., Литвак В.В., Мельников В.А., Погонин А.И., Харлов Н.Н. Опыт корпоративного обследования электрических сетей 110 кВ Сибири. Томск: Изд-во ТПУ, 2010. 228 с.

3. Большанин Г.А. Распределение электрической энергии пониженного качества по участкам электроэнергетических систем. В 2 кн. Братск: БрГУ, 2006. Кн. 2. 807 с.

4. Большанин Г.А., Охлопков И.Н., Видерников С.И., Безносос Е.А., Манахов А.В., Зимарев С.А., Алферов М.А. Способ количественной оценки субгармонических и дробных высших гармонических периодически изменяющихся величин: пат. 2210154 Рос. Федерация № 96112228; заявл. 14.06.96; опубл. 20.11.98.

5. Большанин Г.А., Макаренко М.В. Способ автоматизированного активного контроля показателей качества электрической энергии: пат. 2248038 Рос. Федерация. № 2003116562; заявл. 03.06.03; опубл. 10.03.05.

6. Большанин Г.А. Способ активного контроля уровня несинусоидальности напряжения и тока пат. 2262174 Рос. Федерация. № 2003116557; заявл. 03.06.03; опубл. 10.10.05.

7. Жежеленко И.В. Высшие гармоники в системах электроснабжения промпредприятий. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Энергоатомиздат, 1984. 160 с.

8. Большанин Г.А. Автоматизированная система активного контроля показателей качества электрической энергии. Братск: БрГУ, 2006. 152 с.

9. Большанин Г.А. Контроль показателей качества электрической энергии. LAP LAMBERT Academic Publishing GmbH & Co. KG Heinrich-Böcking-Str. 6-8, 66121 Saarbrücken, Germany. Saarbrücken, 2012. 154 с.

10. Рыжов Ю.П. Дальние электропередачи сверхвысокого напряжения. М.: Изд. дом МЭИ, 2007. 488 с.

11. Большанин Г.А. Математическое моделирование распределения электрической энергии низкого качества по однопроводной линии электропередачи // Математическое моделирование в образовании, науке и производстве: материалы III Междунар. научно-практ. конф. Тирасполь, 17-20 сент., 2003 г. Тирасполь, 2003. С. 346-347.

12. Большанин Г.А., Большанина Л.Ю. Особенности распространения электрической энергии по линии электропередачи. Братск: Изд-во БрГУ, 2011. 64 с.

13. Корн Г., Крон Т. Справочник по математике для научных работников и инженеров: Определения, теоремы, формулы. М.: Наука, 1973. 832 с.

14. Большанин Г.А., Большанина Л.Ю. Статическая устойчивость математической модели распределения электрической энергии по однородным участкам ЭЭС четырехпроводного исполнения. // Вестн. Иркут. гос. техн. ун-та. 2008. № 4(36). С. 264-271.

15. Большанин Г.А., Плотников М.П. Длина волны электромагнитного поля в линиях электропередачи // Вестн. Вост.-Сиб. гос. ун-та техн. и управления. 2016. № 4 (61). С. 5-11.

16. Большанин Г.А. Передача электрической энергии по ЛЭП одно-, двух- и трехпроводного исполнения: моногр. Братск: Изд-во БрГУ, 2016. 313 с.

References

1. GOST 32144-2013. Electric Energy. Compatibility of technical equipment. Power quality limits in public electrical systems. М.: Standartinform, 2014. 16 p.

2. Borovikov V.S., Volkov M.V., Ivanov V.V., Litvak V.V., Mel'nikov V.A., Pogonin A.I., Kharlov N.N. Experience in corporate survey of 110 kV electric networks of Siberia. Tomsk: Izd-vo TPU, 2010. 228 p.

3. Bol'shanin G.A. The distribution of electric power quality for low-cal areas of electricity systems. V 2 kn. Bratsk: BrGU, 2006. Kn. 2. 807 p.

4. Bol'shanin G.A., Okhlopkov I.N., Vidernikov S.I., Beznosov E.A., Manakhov A.V., Zimarev S.A., Alferov M.A. A method of quantifying subharmonic-ray and fractional higher harmonic periodically varying quantities: pat. 2210154 Ros. Federatsiya № 96112228; zayavl. 14.06.96; opubl. 20.11.98.
5. Bol'shanin G.A., Makarenko M.V. The process of auto-active control and enshrined indicators of quality of electric energy: pat. 2248038 Ros. Federatsiya. № 2003116562; zayavl. 03.06.03; opubl. 10.03.05.
6. Bol'shanin G.A. Method of active control voltage level nesinusoi-range and current: pat. 2262174 Ros. Federatsiya. № 2003116557; zayavl. 03.06.03; opubl. 10.10.05.
7. Zhezhelenko I.V. Higher harmonics in the power supply systems of industrial enterprises. 2-e izd., pererab. i dop. M.: Energoatomizdat, 1984. 160 p.
8. Bol'shanin G.A. Automated system of active monitoring of indicators of quality of electric energy. Bratsk: BrGU, 2006. 152 p.
9. Bol'shanin G.A. Monitoring of indicators of quality of electric energy. LAP LAMBERT Academic Publishing GmbH & Co. KG Heinrich-Böcking-Str. 6-8, 66121 Saarbrücken, Germany. Saarbrücken, 2012. 154 p.
10. Ryzhov Yu.P. Long-distance transmission of EHV. M.: Izd. dom MEI, 2007. 488 p.
11. Bol'shanin G.A. Mathematical modeling of distribution of electric energy of low quality on a single transmission line // Matematicheskoe modelirovanie v obrazovanii, nauke i proizvodstve: materialy III Mezhdunar. nauchno-prakt. konf. Tiraspol', 17-20 sent., 2003 g. Tiraspol', 2003. P. 346-347.
12. Bol'shanin G.A., Bol'shanina L.Yu. Features of distribution of electric energy through power lines. Bratsk: Izd-vo BrGU, 2011. 64 p.
13. Korn G., Kron T. Mathematical Handbook for Scientists and Engineers: definitions, theorems, formulas. M.: Nauka, 1973. 832 p.
14. Bol'shanin G.A., Bol'shanina L.Yu. Static stability of mathematical models of electric power distribution for the homogeneous parts of four-power system performanc // Bulletin of Irkutsk State Technical University. 2008. № 4 (36). P. 264-271.
15. Bol'shanin G.A., Plotnikov M.P. The length of the electromagnetic field waves in transmission lines // ESSUTM Bulletin. 2016. № 4 (61). P. 5-11.
16. Bol'shanin G.A. Electric power transmission on power lines one-, two- and three-wire performance: monogr. Bratsk: Izd-vo BrGU, 2016. 313 p.