

УДК 621.315.1.001.63

Г. А. Большанин\*, Л. Ю. Большанина, Е.Г. Марьясова

### К ВОПРОСУ О ВОЛНОВОЙ ТЕОРИИ ПЕРЕДАЧИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ ПО ЛИНИЯМ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧ

*Изложены алгоритмы передачи электрической энергии по линиям электропередач с позиции волновой теории. Показано, что процесс передачи электрической энергии по многопроводным линиям электропередач существенно отличается от процесса передачи этой энергии по однопроводным ЛЭП.*

**Ключевые слова:** линия электропередачи, падающая волна электромагнитного поля, отраженная волна электромагнитного поля, волновые сопротивления, постоянная распространения электромагнитной волны.

Прежде чем разобраться в сущности передачи электрической энергии по проводам линий электропередачи (ЛЭП), необходимо вспомнить, что такое электрическая энергия.

В учебниках сказано, что электрическая энергия есть средняя мощность, передаваемая за определенный промежуток времени:

$$W = \int_0^T P dt.$$

Это количественная оценка электрической энергии. А по физической сущности электрическая энергия есть форма представления электромагнитного поля.

Поэтому речь здесь должна идти о передаче (точнее, о распространении) электромагнитного поля в проводящей среде.

Токоведущие части (провода) ЛЭП изготавливаются из проводящего материала, чаще металла. Это может быть медь, сталь, алюминий, серебро, золото и

---

\* - автор, с которым следует вести переписку.

т. п. Вольтамперные характеристики этих материалов имеют существенную по величине область с неявно выраженной нелинейностью. Это обычно рабочая для действующих ЛЭП область. Работа за пределами этой области в действующих ЛЭП возможна обычно лишь при больших токах и термической перегрузке. А в обычных и номинальных режимах работы провода ЛЭП работают в области неявно выраженной нелинейности. В этих условиях токоведущие части ЛЭП можно принять за линейную среду.

Известно, что электромагнитное поле носит корпускулярно-волновой характер и в линейной среде распространяется по гармоническому закону. По гармоническому закону оно распространяется и по проводам ЛЭП, но в таком случае и электрическая энергия, передаваемая по ЛЭП, тоже должна распределяться в токоведущих частях линии электропередачи по гармоническому закону. Особенно это заметно в протяженных ЛЭП или при передаче электрической энергии повышенной частоты.

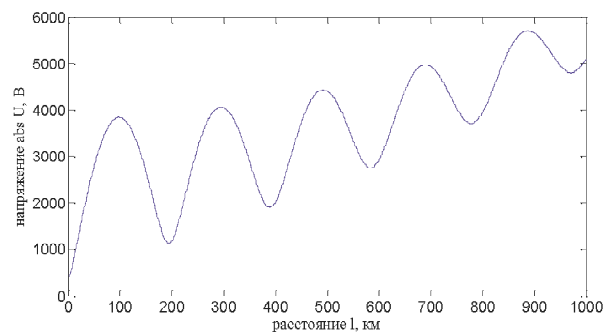
Законы распределения основных характеристик электрической энергии (напряжения и тока) вдоль однородного участка однопроводной ЛЭП могут быть представлены формулами:

$$\left. \begin{aligned} \dot{U} &= \dot{U}_2 \operatorname{ch} \gamma l + \dot{I}_2 Z_c \operatorname{sh} \gamma l; \\ \dot{I} &= \frac{\dot{U}_2}{Z_c} \operatorname{sh} \gamma l + \dot{I}_2 \operatorname{ch} \gamma l, \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

где  $\dot{U}_2$  и  $\dot{I}_c$  – действующие значения напряжения и тока в конце исследуемого участка ЛЭП;  $Z_c$  – волновое сопротивление;  $\gamma$  – постоянная распространения волны электромагнитного поля;  $l$  – протяженность линии от ее конца до интересующего исследователя места.

Графическая интерпретация уравнений, полученных при помощи операционной системы Matlab, приведена на рис. 1 и рис. 2. Из этих уравнений следует, что передача электрической

энергии по однородной ЛЭП обеспечивается двумя волнами электромагнитного поля: падающей и отраженной.

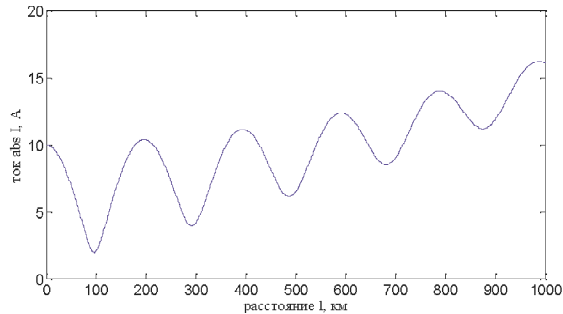


**Рис. 1. Графическая интерпретация распределения напряжения вдоль однородного участка однопроводной ЛЭП на частоте 15-й гармонической составляющей.**

Вывод о волновом характере передаваемой по ЛЭП электрической энергии сделан сравнительно давно. Но авторы этих выводов, а за ними и многие специалисты в данной области знаний, нередко делали оговорку, что сам факт наличия таких волн является не более чем следствием использования математической абстракции и физически вряд ли имеет место. Но, тем не менее, наличие падающих и отраженных волн косвенно подтверждается результатами многих экспериментальных исследований. Наличие таких волн объясняет факт неравномерного распределения электрической энергии вдоль линий электропередачи, необходимость согласования основного и вспомогательного электротехнического оборудования (например, фильтров) для обеспечения эффективности их работы с питающей сетью и т. п. Поэтому на современном этапе развития электроэнергетики наличие падающих и отраженных волн электромагнитного поля в токоведущих ЛЭП надлежит воспринимать как объективную реальность.

Падающая и отраженная волны перемещаются вдоль однородного участка ЛЭП с одинаковой фазовой скоростью. Причем, падающая волна электрической энергии перемещается от

начала однородного участка к его концу, от источника к потребителю. А отраженная волна направлена, наоборот, от конца однородного участка к его началу, от потребителя к источнику.



**Рис. 2. Графическая интерпретация распределения тока вдоль однородного участка однопроводной ЛЭП на частоте 15-й гармонической составляющей.**

Эти волны характеризуются одной и той же постоянной распространения, представляющей собой сумму коэффициента затухания  $\beta$  и коэффициента фазы  $\alpha$ . Причем, коэффициент затухания имеет вещественный характер, а коэффициент фазы – мнимый:

$$\gamma = \beta + j\alpha.$$

Перенос электрической энергии по любому материальному объекту сопряжен с затратой части этой энергии на преодоление сопротивления этому переносу. В данном случае речь может идти о сопротивлении перемещенных волн электромагнитного поля, то есть о волновом сопротивлении  $Z_C$ .

Фазовую скорость, волновое сопротивление, постоянную распространения волны электромагнитного поля и ее составляющие принято называть вторичными параметрами ЛЭП. Их величины зависят от первичных параметров исследуемой линии электропередачи, то есть от параметров ее схемы замещения.

Таким образом, получается, что не вся передаваемая по ЛЭП электрическая энергия поступает к потребителям. Часть этой энергии возвращается обратно к источнику.

Термины «источник» и «потребитель» в данном случае надо понимать весьма условно, поскольку волна электромагнитного поля отражается от каждой границы однородности. Такой границей может быть конец однородного участка. Получается, что произведенная однажды генераторами источника электрическая энергия может весьма длительное время транспортироваться от начала к концу однородного участка ЛЭП и обратно от конца к началу до тех пор, пока полностью не затухнет на резистивных элементах ЛЭП или не будет реализована в соответствующих электрических нагрузках. Все это затрудняет анализ результатов транспортировки электрической энергии по ЛЭП, вызывает существенное искажение ее характеристик. Но в реальных ЛЭП количество уже вторично отраженной энергии пренебрежительно мало по сравнению с величиной энергии падающей волны.

Но, тем не менее, энергия первичных отраженных волн заметно сказывается на количественных и качественных характеристиках электрической энергии, и чаще всего отрицательно.

Передача электрической энергии по однопроводной ЛЭП обеспечивается лишь одной парой волн электромагнитного поля, поэтому здесь есть весьма достижимая возможность избавиться от отраженной волны. Для этого достаточно обеспечить равенство волнового сопротивления полному сопротивлению обобщенной электрической нагрузки, выполнив, таким образом, согласование электрической нагрузки с питающей сетью. Коэффициент полезного действия ЛЭП в таком случае будет полностью определяться степенью затухания электрической энергии падающей волны.

В принципе, волновой характер передачи электрической энергии по ЛЭП изучен и неоднократно освещался в специальной литературе, но только по

однопроводной линии электропередачи. Было бы грубейшей ошибкой считать, что физические процессы, связанные с передачей электрической энергии по однопроводной ЛЭП, идентичны физическим процессам, связанным с передачей электрической энергии по многопроводным ЛЭП. И чем больше численность проводников в ЛЭП, тем значительнее эта ошибка.

Так, передачу электрической энергии по двухпроводной ЛЭП обеспечивает тоже одна пара волн электромагнитного поля и описывается такими же уравнениями (1), что и передача энергии по однопроводной ЛЭП. Но зависимость вторичных параметров линии от первичных здесь далеко неоднозначна, поэтому сложнее обеспечить согласование электрической нагрузки с питающей сетью.

Процесс передачи электрической энергии по трехпроводным ЛЭП существенно отличается от процесса передачи этой энергии по однопроводной или двухпроводной ЛЭП. Изучение механизма передачи электрической энергии особенно актуален, поскольку подавляющая часть всей электроэнергии, вырабатываемой генераторами электрических станций к электрическим нагрузкам, транспортируется именно по трехпроводным ЛЭП трехфазного исполнения.

Традиционно электрическая энергия оценивается своими основными характеристиками: напряжениями и токами. В данном случае уместно говорить о трех фазных напряжениях и трех линейных токах. Законы их распределения по проводам трехпроводной ЛЭП существенно отличаются от уравнений (1):

$$\dot{U}_A = \sum_{i=1}^3 (\dot{U}_{2A} ch\gamma_i l + \dot{I}_{2A} Z_{cAi} sh\gamma_i l); \quad (2)$$

$$\dot{U}_B = \sum_{i=1}^3 (\dot{U}_{2B} ch\gamma_i l + \dot{I}_{2B} Z_{cBi} sh\gamma_i l); \quad (3)$$

$$\dot{U}_C = \sum_{i=1}^3 (\dot{U}_{2C} ch\gamma_i l + \dot{I}_{2C} Z_{cCi} sh\gamma_i l); \quad (4)$$

$$\dot{I}_A = \sum_{i=1}^3 \left( \frac{\dot{U}_{2A} sh\gamma_i l + \dot{I}_{2A} ch\gamma_i l + \frac{\dot{U}_{2B} sh\gamma_i l + \dot{I}_{2B} Z_{cBi} ch\gamma_i l}{Z_{cABi}} + \frac{\dot{U}_{2C} sh\gamma_i l + \dot{I}_{2C} Z_{cCi} ch\gamma_i l}{Z_{cCAi}} \right); \quad (5)$$

$$\dot{I}_B = \sum_{i=1}^3 \left( \frac{\dot{U}_{2B} sh\gamma_i l + \dot{I}_{2B} ch\gamma_i l + \frac{\dot{U}_{2A} sh\gamma_i l + \dot{I}_{2A} Z_{cAi} ch\gamma_i l}{Z_{cABi}} + \frac{\dot{U}_{2C} sh\gamma_i l + \dot{I}_{2C} Z_{cCi} ch\gamma_i l}{Z_{cBCi}} \right); \quad (6)$$

$$\dot{I}_C = \sum_{i=1}^3 \left( \frac{\dot{U}_{2C} sh\gamma_i l + \dot{I}_{2C} ch\gamma_i l + \frac{\dot{U}_{2A} sh\gamma_i l + \dot{I}_{2A} Z_{cAi} ch\gamma_i l}{Z_{cCAi}} + \frac{\dot{U}_{2B} sh\gamma_i l + \dot{I}_{2B} Z_{cBi} ch\gamma_i l}{Z_{cBCi}} \right); \quad (7)$$

где  $\dot{U}_{2A}$ ,  $\dot{U}_{2B}$ ,  $\dot{U}_{2C}$  и  $\dot{I}_{2A}$ ,  $\dot{I}_{2B}$ ,  $\dot{I}_{2C}$  – фазные напряжения и линейные токи в конце анализируемого участка трехпроводной ЛЭП протяженностью  $l$ ;  $Z_{cAi}$ ,  $Z_{cBi}$ ,  $Z_{cCi}$  и  $Z_{cABi}$ ,  $Z_{cBCi}$ ,  $Z_{cCAi}$  – собственные и взаимные волновые сопротивления  $i$ -той пары волн электромагнитного поля;  $\gamma_i$  – постоянная распространения  $i$ -той пары волн электромагнитного поля.

На рис. 3-4 приведены графические интерпретации распределения фазного напряжения (рис. 3) и линейного тока (рис. 4) вдоль трехпроводной ЛЭП, построенные на основании этих уравнений, которые явно отличаются от графических интерпретаций распределения напряжения и тока вдоль однопроводной ЛЭП, приведенных на рис. 1-2.

Из этих уравнений видно, что передача электрической энергии в каждом из трех проводов ЛЭП обеспечивается тремя парами волн электромагнитного поля. Каждая из этих пар характеризуется своей постоянной распространения ( $\gamma_1, \gamma_2, \gamma_3$ ), коэффициентом затухания, коэффициентом фазы; в каждом проводе имеется собственное волновое сопротивление ( $Z_{cAi}, Z_{cBi}, Z_{cCi}$ ). Каждая пара волн распространения по проводам ЛЭП со своей фазовой скоростью.

Кроме того, каждая пара волн в каждом линейном проводе через соответствующие электромагнитные связи вызывает возмущение электромагнитных полей в соседних проводах. Они проявляются в виде дополнительных пар волн электромагнитного поля с постоянными распространения основных волн. Амплитуды и начальные фазы дополнительных пар электромагнитных волн зависят в основном от величин электромагнитных связей между проводами и, конечно, от количества передаваемой по ним электрической энергии. Безусловно, влияние на количественные характеристики этих волн оказывают и прочие первичные параметры ЛЭП. Распространение дополнительных пар волн электромагнитного поля регламентируется взаимными волновыми сопротивлениями  $Z_{cABi}, Z_{cBCi}$  и  $Z_{cCAi}$ . Их действие описывается уравнениями (5) – (7).

Наличие трех основных и девяти дополнительных пар волн электромагнитного поля обуславливает сравнительно громоздкий колебательный процесс передачи электрической энергии по трехпроводной ЛЭП. Кроме того, зависимость вторичных параметров ЛЭП далеко неоднозначно зависит от первичных параметров исследуемой линии электропередачи. Их определение вызывает некоторые сложности техни-

ческого порядка, но, тем не менее, вполне осуществимо [1]. Это необходимо для достоверного прогнозирования результатов транспортировки электрической энергии по трехфазным ЛЭП трехпроводного исполнения.

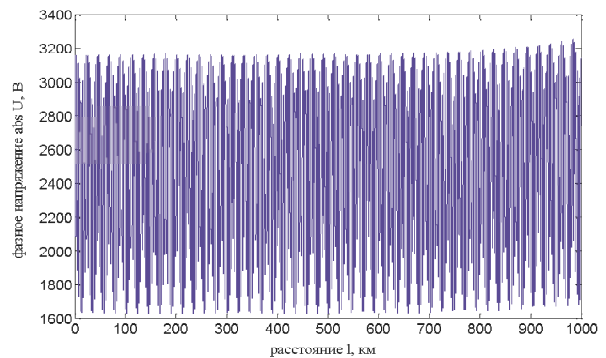


Рис. 3. Графическая интерпретация фазного напряжения по однородному участку трехпроводной ЛЭП на частоте 15-й гармонической составляющей.

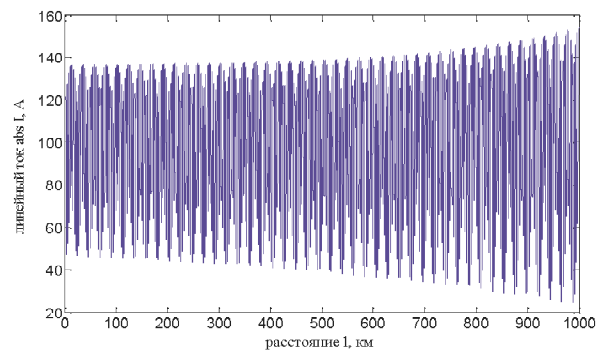


Рис. 4. Графическая интерпретация линейного тока по однородному участку трехпроводной ЛЭП на частоте 15-й гармонической составляющей.

При увеличении токоведущих элементов (расщепление проводов, увеличение фазности и т. д.) возрастает численность основных и дополнительных пар волн электромагнитного поля и еще более усложняется определение вторичных параметров ЛЭП. Эти изменения влекут за собой качественные и количественные изменения процесса передачи энергии по линиям электропередачи.

Выводы.

1. Процесс передачи электрической энергии по однопроводной ЛЭП отличен от процесса передачи этой энергии по многопроводным линиям электропередачи.

2. Передача электрической энергии по однопроводной и двухпроводной ЛЭП обеспечивается одной парой волн электромагнитного поля, падающей и отраженной; отличие заключается лишь в методике определения их вторичных параметров.

3. Передача электрической энергии по трехпроводной ЛЭП обеспечивается тремя основными и девятью дополни-

тельными парами волн электромагнитного поля.

4. Увеличение числа проводов ЛЭП сопровождается увеличением количества основных и дополнительных пар волн электромагнитного поля.

### *Литература*

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