

ХАРАКТЕРИСТИЧЕСКОЕ УРАВНЕНИЕ ОДНОРОДНОГО УЧАСТКА ТРЕХФАЗНОЙ ТРЕХПРОВОДНОЙ ЛЭП

Представлено характеристическое уравнение однородного участка трехфазной трехпроводной электрической цепи в условиях пониженного качества электрической энергии. Предложен вариант его решения.

Ключевые слова: линия электропередачи, формула Кардано, падающие и отраженные волны электромагнитного поля, постоянная распространения волны электромагнитного поля.

По современным линиям электропередачи (ЛЭП) чаще всего транспортируется электрическая энергия (ЭЭ) пониженного качества, которой свойственны заметные уровни несинусоидальности, несимметрии, отклонения и колебания напряжений и токов. Для анализа функционирования ЛЭП, предназначенной для транспортировки такой энергии, необходимо, чтобы ЛЭП была представлена на линии с распределенными параметрами в полноразном варианте.

Теория электротехники располагает аппаратом анализа распределения гармонически изменяющихся токов и напряжений по однородному участку ЛЭП [1]. Поэтому перед выполнением анализа распределения ЭЭ пониженного качества по реальной ЛЭП последнюю необходимо разделить на относительно однородные участки и выполнить спектральный анализ известных напряжений и токов [2]. Анализ следует проводить по каждому однородному участку ЛЭП на частоте каждой гармонической составляющей спектральных составов основных характеристик электрической энергии.

Распространение электромагнитного поля в линейной среде представляет собой колебательный процесс с убывающей амплитудой характеристик поля. Количественная и качественная оценка распространения электромагнитного поля по проводам ЛЭП является результатом совместного решения уравнений, совокупность которых образует математическую модель исследуемого процесса. Для однородного участка трехфазной трехпроводной ЛЭП на частоте n -ой гармонической составляющей напряжения и тока это — совокупность девяти интегро-дифференциальных уравнений [3]:

$$i_{An} = di_{An} + di_{ABn} - d_{cAn} + i_{An} + \frac{\partial i_{An}}{\partial l} dl;$$

$$i_{Bn} = di_{Bn} - di_{ABn} + di_{BCn} + i_{Bn} + \frac{\partial i_{Bn}}{\partial l} dl;$$

$$i_{Cn} = di_{Cn} + di_{cAn} - di_{BCn} + i_{Cn} + \frac{\partial i_{Cn}}{\partial l} dl;$$

$$u_{An} = i_{An}R_{0An}dl + L_{0An}dl \frac{\partial i_{An}}{\partial t} + M_{0ABn}dl \frac{\partial i_{Bn}}{\partial t} + M_{0cAn}dl \frac{\partial i_{Cn}}{\partial t} + \frac{1}{C_{0An}} \int i_{An} dt + u_{An} + \frac{\partial u_{An}}{\partial l} dl;$$

$$u_{Bn} = i_{Bn}R_{0Bn}dl + L_{0Bn}dl \frac{\partial i_{Bn}}{\partial t} + M_{0ABn}dl \frac{\partial i_{An}}{\partial t} + M_{0BCn}dl \frac{\partial i_{Cn}}{\partial t} + \frac{1}{C_{0Bn}} \int i_{Bn} dt + u_{Bn} + \frac{\partial u_{Bn}}{\partial l} dl;$$

$$u_{Cn} = i_{Cn}R_{0Cn}dl + L_{0Cn}dl \frac{\partial i_{Cn}}{\partial t} + M_{0BCn}dl \frac{\partial i_{Bn}}{\partial t} + M_{0cAn}dl \frac{\partial i_{An}}{\partial t} +$$

$$+ \frac{1}{C_{0Cn}} \int i_{Cn} dt + u_{Cn} + \frac{\partial u_{Cn}}{\partial l} dl;$$

$$u_{ABn} = i_{An}R_{0An}dl + L_{0An}dl \frac{\partial i_{An}}{\partial t} + M_{0ABn}dl \frac{\partial i_{Bn}}{\partial t} + M_{0cAv}dl \frac{\partial i_{Cn}}{\partial t} + \frac{1}{C_{0An}} \int i_{An} dt - i_{Bn}R_{0Bn}dl - L_{0Bn}dl \frac{\partial i_{Bn}}{\partial t} - M_{0ABn}dl \frac{\partial i_{An}}{\partial t} - M_{0BCn}dl \frac{\partial i_{Cn}}{\partial t} - \frac{1}{C_{0Bn}} \int i_{Bn} dt + u_{ABn} + \frac{\partial u_{ABn}}{\partial l} dl;$$

$$u_{BCn} = i_{Bn}R_{0Bn}dl + L_{0Bn}dl \frac{\partial i_{Bn}}{\partial t} + M_{0ABn}dl \frac{\partial i_{An}}{\partial t} + M_{0BCn}dl \frac{\partial i_{Cn}}{\partial t} + \frac{1}{C_{0Bn}} \int i_{Bn} dt - i_{Cn}R_{0Cn}dl - L_{0Cn}dl \frac{\partial i_{Cn}}{\partial t} - M_{0BCn}dl \frac{\partial i_{Bn}}{\partial t} - M_{0cAn}dl \frac{\partial i_{An}}{\partial t} - \frac{1}{C_{0Cn}} \int i_{Cn} dt + u_{BCn} + \frac{\partial u_{BCn}}{\partial l} dl;$$

$$u_{cAn} = i_{Cn}R_{0Cn}dl + L_{0Cn}dl \frac{\partial i_{Cn}}{\partial t} + M_{0BCn}dl \frac{\partial i_{Bn}}{\partial t} + M_{0cAn}dl \frac{\partial i_{An}}{\partial t} + \frac{1}{C_{0Cn}} \int i_{Cn} dt - i_{An}R_{0An}dl - L_{0An}dl \frac{\partial i_{An}}{\partial t} - M_{0ABn}dl \frac{\partial i_{Bn}}{\partial t} - M_{0cAn}dl \frac{\partial i_{Cn}}{\partial t} - \frac{1}{C_{0An}} \int i_{An} dt + u_{cAn} + \frac{\partial u_{cAn}}{\partial l} dl,$$

где u_{An} , u_{Bn} , u_{Cn} и u_{ABn} , u_{BCn} , u_{cAn} — фазные и линейные напряжения; i_{An} , i_{Bn} , i_{Cn} — линейные токи; di_{An} , di_{Bn} , di_{Cn} , di_{ABn} , di_{BCn} , di_{cAn} — токи, обусловленные электромагнитными связями между конструктивными элементами линии электропередачи; R_{0An} , R_{0Bn} , R_{0Cn} , L_{0An} , L_{0Bn} , L_{0Cn} , C_{0An} , C_{0Bn} , C_{0Cn} , M_{0ABn} , M_{0BCn} и M_{0cAn} — погонные параметры ЛЭП на частоте n -ой гармонической составляющей; dl — протяженность рассматриваемого участка линии.

Результатом совместного решения этих уравнений является характеристическое уравнение однородного участка трехфазной трехпроводной ЛЭП в условиях пониженного качества электрической энергии, которое представляет собой уравнение шестого порядка:

$$x^6 + ax^4 + bx^2 + c = 0, \tag{1}$$

где

$$a = 3 - \underline{Z}_{0An} (\underline{Y}_{0A0n} + \underline{Y}_{0ABn} + \underline{Y}_{0cAn}) - \underline{Z}_{0Bn} (\underline{Y}_{0B0n} + \underline{Y}_{0BCn} + \underline{Y}_{0ABn}) - \underline{Z}_{0Cn} (\underline{Y}_{0C0n} + \underline{Y}_{0cAn} + \underline{Y}_{0BCn}) + \underline{Z}_{0ABn} (2\underline{Y}_{0ABn} + \underline{Y}_{0cAn}) + 2\underline{Z}_{0BCn} \underline{Y}_{0BCn} + \underline{Z}_{0cAn} \underline{Y}_{0cAn};$$

$$b = 3 - 2\underline{Z}_{0An} (\underline{Y}_{0A0n} + \underline{Y}_{0ABn} + \underline{Y}_{0cAn}) - 2\underline{Z}_{0Bn} (\underline{Y}_{0B0n} + \underline{Y}_{0BCn} + \underline{Y}_{0ABn}) - 2\underline{Z}_{0Cn} (\underline{Y}_{0C0n} + \underline{Y}_{0cAn} + \underline{Y}_{0BCn}) + 2\underline{Z}_{0ABn} (2\underline{Y}_{0ABn} + \underline{Y}_{0cAn}) + 4\underline{Z}_{0BCn} \underline{Y}_{0BCn} + 2\underline{Z}_{0cAn} \underline{Y}_{0cAn} +$$

* — автор, с которым следует вести переписку.

$$\begin{aligned}
 & + [\underline{Z}_{0An}(\underline{Y}_{0A0n} + \underline{Y}_{0ABn} + \underline{Y}_{0CAn}) - \underline{Z}_{0ABn}\underline{Y}_{0ABn} - \\
 & - \underline{Z}_{0CAn}\underline{Y}_{0CAn}][\underline{Z}_{0Bn}(\underline{Y}_{0B0n} + \underline{Y}_{0BCn} + \underline{Y}_{0ABn}) - \\
 & - \underline{Z}_{0ABn}\underline{Y}_{0ABn} - \underline{Z}_{0BCn}\underline{Y}_{0BCn}] + \\
 & + [\underline{Z}_{0An}(\underline{Y}_{0A0n} + \underline{Y}_{0ABn} + \underline{Y}_{0CAn}) - \underline{Z}_{0ABn}\underline{Y}_{0ABn} - \\
 & - \underline{Z}_{0CAn}\underline{Y}_{0CAn}][\underline{Z}_{0Cn}(\underline{Y}_{0C0n} + \underline{Y}_{0CAn} + \underline{Y}_{0BCn}) - \\
 & - \underline{Z}_{0ABn}\underline{Y}_{0CAn} - \underline{Z}_{0BCn}\underline{Y}_{0BCn}] + \\
 & + [\underline{Z}_{0Bn}(\underline{Y}_{0B0n} + \underline{Y}_{0BCn} + \underline{Y}_{0ABn}) - \underline{Z}_{0ABn}\underline{Y}_{0ABn} - \\
 & - \underline{Z}_{0BCn}\underline{Y}_{0BCn}][\underline{Z}_{0Cn}(\underline{Y}_{0C0n} + \underline{Y}_{0CAn} + \underline{Y}_{0BCn}) - \\
 & - \underline{Z}_{0ABn}\underline{Y}_{0CAn} - \underline{Z}_{0BCn}\underline{Y}_{0BCn}] - \\
 & - [\underline{Z}_{0An}\underline{Y}_{0ABn} + \underline{Z}_{0CAn}\underline{Y}_{0BCn} - \\
 & - \underline{Z}_{0ABn}(\underline{Y}_{0B0n} + \underline{Y}_{0BCn} + \underline{Y}_{0ABn})][\underline{Z}_{0Bn}\underline{Y}_{0ABn} + \underline{Z}_{0BCn}\underline{Y}_{0CAn} - \\
 & - \underline{Z}_{0ABn}(\underline{Y}_{0A0n} + \underline{Y}_{0ABn} + \underline{Y}_{0CAn})] - \\
 & - [\underline{Z}_{0Bn}\underline{Y}_{0BCn} + \underline{Z}_{0ABn}\underline{Y}_{0CAn} - \\
 & - \underline{Z}_{0BCn}(\underline{Y}_{0C0n} + \underline{Y}_{0CAn} + \underline{Y}_{0BCn})][\underline{Z}_{0Cn}\underline{Y}_{0BCn} + \underline{Z}_{0ABn}\underline{Y}_{0ABn} - \\
 & - \underline{Z}_{0BCn}(\underline{Y}_{0B0n} + \underline{Y}_{0BCn} + \underline{Y}_{0ABn})] - \\
 & - [\underline{Z}_{0An}\underline{Y}_{0CAn} + \underline{Z}_{0ABn}\underline{Y}_{0BCn} - \\
 & - \underline{Z}_{0CAn}(\underline{Y}_{0C0n} + \underline{Y}_{0CAn} + \underline{Y}_{0BCn})][\underline{Z}_{0Cn}\underline{Y}_{0CAn} + \underline{Z}_{0BCn}\underline{Y}_{0ABn} - \\
 & - \underline{Z}_{0ABn}(\underline{Y}_{0A0n} + \underline{Y}_{0ABn} + \underline{Y}_{0CAn})]; \\
 & c = 1 - 2\underline{Z}_{0An}(\underline{Y}_{0A0n} + \underline{Y}_{0ABn} + \underline{Y}_{0CAn}) - \\
 & - \underline{Z}_{0Bn}(\underline{Y}_{0B0n} + \underline{Y}_{0BCn} + \underline{Y}_{0ABn}) - \\
 & - \underline{Z}_{0Cn}(\underline{Y}_{0C0n} + \underline{Y}_{0CAn} + \underline{Y}_{0BCn}) + \\
 & + \underline{Z}_{0ABn}(2\underline{Y}_{0ABn} + \underline{Y}_{0CAn}) + \underline{Z}_{0BCn}\underline{Y}_{0BCn} + \underline{Z}_{0CAn}\underline{Y}_{0CAn} + \\
 & + [\underline{Z}_{0An}(\underline{Y}_{0A0n} + \underline{Y}_{0ABn} + \underline{Y}_{0CAn}) - \underline{Z}_{0ABn}\underline{Y}_{0ABn} - \\
 & - \underline{Z}_{0CAn}\underline{Y}_{0CAn}][\underline{Z}_{0Bn}(\underline{Y}_{0B0n} + \underline{Y}_{0BCn} + \underline{Y}_{0ABn}) - \\
 & - \underline{Z}_{0ABn}\underline{Y}_{0ABn} - \underline{Z}_{0BCn}\underline{Y}_{0BCn}] + \\
 & + [\underline{Z}_{0An}(\underline{Y}_{0A0n} + \underline{Y}_{0ABn} + \underline{Y}_{0CAn}) - \underline{Z}_{0ABn}\underline{Y}_{0ABn} - \\
 & - \underline{Z}_{0CAn}\underline{Y}_{0CAn}][\underline{Z}_{0Cn}(\underline{Y}_{0C0n} + \underline{Y}_{0CAn} + \underline{Y}_{0BCn}) - \\
 & - \underline{Z}_{0ABn}\underline{Y}_{0CAn} - \underline{Z}_{0BCn}\underline{Y}_{0BCn}] + \\
 & + [\underline{Z}_{0Bn}(\underline{Y}_{0B0n} + \underline{Y}_{0BCn} + \underline{Y}_{0ABn}) - \underline{Z}_{0ABn}\underline{Y}_{0ABn} - \\
 & - \underline{Z}_{0BCn}\underline{Y}_{0BCn}][\underline{Z}_{0Cn}(\underline{Y}_{0C0n} + \underline{Y}_{0CAn} + \underline{Y}_{0BCn}) - \\
 & - \underline{Z}_{0ABn}\underline{Y}_{0CAn} - \underline{Z}_{0BCn}\underline{Y}_{0BCn}] - \\
 & - [\underline{Z}_{0An}\underline{Y}_{0ABn} + \underline{Z}_{0CAn}\underline{Y}_{0BCn} - \\
 & - \underline{Z}_{0ABn}(\underline{Y}_{0B0n} + \underline{Y}_{0BCn} + \underline{Y}_{0ABn})][\underline{Z}_{0Bn}\underline{Y}_{0ABn} + \underline{Z}_{0BCn}\underline{Y}_{0CAn} - \\
 & - \underline{Z}_{0ABn}(\underline{Y}_{0A0n} + \underline{Y}_{0ABn} + \underline{Y}_{0CAn})] - \\
 & - [\underline{Z}_{0Bn}\underline{Y}_{0BCn} + \underline{Z}_{0ABn}\underline{Y}_{0CAn} - \\
 & - \underline{Z}_{0BCn}(\underline{Y}_{0C0n} + \underline{Y}_{0CAn} + \underline{Y}_{0BCn})][\underline{Z}_{0Cn}\underline{Y}_{0BCn} + \underline{Z}_{0ABn}\underline{Y}_{0ABn} - \\
 & - \underline{Z}_{0BCn}(\underline{Y}_{0B0n} + \underline{Y}_{0BCn} + \underline{Y}_{0ABn})] - \\
 & - [\underline{Z}_{0An}\underline{Y}_{0CAn} + \underline{Z}_{0ABn}\underline{Y}_{0BCn} - \\
 & - \underline{Z}_{0CAn}(\underline{Y}_{0C0n} + \underline{Y}_{0CAn} + \underline{Y}_{0BCn})][\underline{Z}_{0Cn}\underline{Y}_{0CAn} + \underline{Z}_{0BCn}\underline{Y}_{0ABn} - \\
 & - \underline{Z}_{0ABn}(\underline{Y}_{0A0n} + \underline{Y}_{0ABn} + \underline{Y}_{0CAn})] - \\
 & - [\underline{Z}_{0An}(\underline{Y}_{0A0n} + \underline{Y}_{0ABn} + \underline{Y}_{0CAn}) - \\
 & - \underline{Z}_{0ABn}\underline{Y}_{0ABn} - \underline{Z}_{0CAn}\underline{Y}_{0CAn}][\underline{Z}_{0Bn}(\underline{Y}_{0B0n} + \underline{Y}_{0BCn} + \underline{Y}_{0ABn}) - \\
 & - \underline{Z}_{0ABn}\underline{Y}_{0ABn} - \underline{Z}_{0BCn}\underline{Y}_{0BCn}][\underline{Z}_{0Cn}(\underline{Y}_{0C0n} + \underline{Y}_{0CAn} + \underline{Y}_{0BCn}) - \\
 & - \underline{Z}_{0ABn}\underline{Y}_{0CAn} - \underline{Z}_{0BCn}\underline{Y}_{0BCn}] +
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 & + [\underline{Z}_{0An}(\underline{Y}_{0A0n} + \underline{Y}_{0ABn} + \underline{Y}_{0CAn}) - \\
 & - \underline{Z}_{0ABn}\underline{Y}_{0ABn} - \underline{Z}_{0CAn}\underline{Y}_{0CAn}][\underline{Z}_{0Bn}\underline{Y}_{0BCn} + \underline{Z}_{0ABn}\underline{Y}_{0CAn} - \\
 & - \underline{Z}_{0BCn}(\underline{Y}_{0C0n} + \underline{Y}_{0CAn} + \underline{Y}_{0BCn})][\underline{Z}_{0Cn}\underline{Y}_{0BCn} + \underline{Z}_{0ABn}\underline{Y}_{0ABn} - \\
 & - \underline{Z}_{0BCn}(\underline{Y}_{0B0n} + \underline{Y}_{0BCn} + \underline{Y}_{0ABn})] + \\
 & + [\underline{Z}_{0Cn}(\underline{Y}_{0C0n} + \underline{Y}_{0CAn} + \underline{Y}_{0BCn}) - \\
 & - \underline{Z}_{0ABn}\underline{Y}_{0CAn} - \underline{Z}_{0BCn}\underline{Y}_{0BCn}][\underline{Z}_{0An}\underline{Y}_{0ABn} + \underline{Z}_{0CAn}\underline{Y}_{0BCn} - \\
 & - \underline{Z}_{0ABn}(\underline{Y}_{0B0n} + \underline{Y}_{0BCn} + \underline{Y}_{0ABn})][\underline{Z}_{0Bn}\underline{Y}_{0ABn} + \underline{Z}_{0BCn}\underline{Y}_{0CAn} - \\
 & - \underline{Z}_{0ABn}(\underline{Y}_{0A0n} + \underline{Y}_{0ABn} + \underline{Y}_{0CAn})] + \\
 & + [\underline{Z}_{0Bn}(\underline{Y}_{0B0n} + \underline{Y}_{0BCn} + \underline{Y}_{0ABn}) - \\
 & - \underline{Z}_{0ABn}\underline{Y}_{0ABn} - \underline{Z}_{0CAn}\underline{Y}_{0CAn}][\underline{Z}_{0An}\underline{Y}_{0CAn} + \underline{Z}_{0ABn}\underline{Y}_{0BCn} - \\
 & - \underline{Z}_{0CAn}(\underline{Y}_{0C0n} + \underline{Y}_{0CAn} + \underline{Y}_{0BCn})][\underline{Z}_{0Cn}\underline{Y}_{0CAn} + \underline{Z}_{0BCn}\underline{Y}_{0ABn} - \\
 & - \underline{Z}_{0ABn}(\underline{Y}_{0A0n} + \underline{Y}_{0ABn} + \underline{Y}_{0CAn})] - \\
 & - [\underline{Z}_{0An}\underline{Y}_{0ABn} + \underline{Z}_{0CAn}\underline{Y}_{0BCn} - \\
 & - \underline{Z}_{0ABn}(\underline{Y}_{0B0n} + \underline{Y}_{0BCn} + \underline{Y}_{0ABn})][\underline{Z}_{0Bn}\underline{Y}_{0BCn} + \underline{Z}_{0ABn}\underline{Y}_{0CAn} - \\
 & - \underline{Z}_{0BCn}(\underline{Y}_{0C0n} + \underline{Y}_{0CAn} + \underline{Y}_{0BCn})][\underline{Z}_{0Cn}\underline{Y}_{0CAn} + \underline{Z}_{0BCn}\underline{Y}_{0ABn} - \\
 & - \underline{Z}_{0ABn}(\underline{Y}_{0A0n} + \underline{Y}_{0ABn} + \underline{Y}_{0CAn})] - \\
 & - [\underline{Z}_{0An}\underline{Y}_{0CAn} + \underline{Z}_{0ABn}\underline{Y}_{0BCn} - \\
 & - \underline{Z}_{0CAn}(\underline{Y}_{0C0n} + \underline{Y}_{0CAn} + \underline{Y}_{0BCn})][\underline{Z}_{0Bn}\underline{Y}_{0BCn} + \underline{Z}_{0ABn}\underline{Y}_{0BCn} - \\
 & - \underline{Z}_{0ABn}(\underline{Y}_{0A0n} + \underline{Y}_{0ABn} + \underline{Y}_{0CAn})][\underline{Z}_{0Cn}\underline{Y}_{0BCn} + \underline{Z}_{0ABn}\underline{Y}_{0ABn} - \\
 & - \underline{Z}_{0BCn}(\underline{Y}_{0B0n} + \underline{Y}_{0BCn} + \underline{Y}_{0ABn})],
 \end{aligned}$$

где \underline{Z}_{0An} , \underline{Z}_{0Bn} , \underline{Z}_{0Cn} , \underline{Z}_{0ABn} , \underline{Z}_{0BCn} , \underline{Z}_{0CAn} , \underline{Y}_{0A0n} , \underline{Y}_{0B0n} , \underline{Y}_{0C0n} , \underline{Y}_{0ABn} , \underline{Y}_{0BCn} и \underline{Y}_{0CAn} — изображения на комплексной плоскости первичных параметров однородного участка анализируемой ЛЭП на частоте n -й гармонической составляющей напряжения и тока.

Шестая степень характеристического уравнения (1) трехфазной трехпроводной ЛЭП свидетельствует о том, что в каждом линейном проводе присутствует шесть волн электромагнитного поля: три падающих и три отраженных. Среда распространения волн электромагнитного поля (в нашем случае — это провода ЛЭП) принята линейной. Исходя из этого, на основе принципа суперпозиций определяются численные значения постоянных интегрирования.

Падающие и отраженные волны напряжений и токов, которые распространяются по токоведущим частям ЛЭП, можно представить в виде суммы отдельных волн, каждая из которых распространяется по проводам однородной линии независимо от остальных в соответствии со своим коэффициентом распространения. Эти волны принято называть модальными составляющими или просто модами. Наличие в многопроводной ЛЭП модальных каналов было подтверждено экспериментально [4].

В трехфазной системе необходимо учитывать действие, по меньшей мере, трех пар волн собственного электромагнитного поля. В самом начале линии, когда электромагнитные связи между конструктивными элементами ЛЭП проявляются еще неявно, токоведущие части вполне можно считать отдельными каналами электромагнитного поля. Структура этих каналов линейна, а потому, согласно принципу суперпозиций действие каждой пары

волн электромагнитного поля можно рассматривать обособлено, игнорируя взаимные волновые сопротивления. Это, безусловно, является допущением, но в данном случае вполне оправданным и не вносящим существенных погрешностей в результат выполняемого анализа.

На рис. 1 представлено распространение электрической энергии в виде двух пар волн, при этом каждую пару волн электромагнитного поля следует рассматривать как результат действия каждой ЭДС трехфазной системы в том или ином линейном проходе.

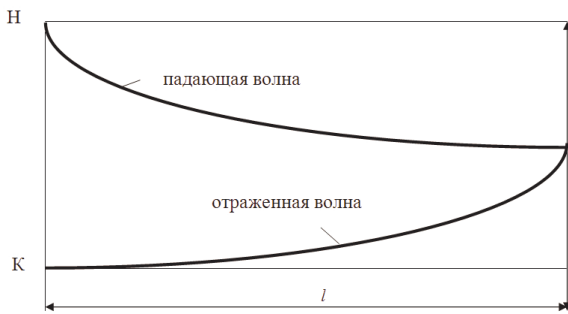


Рис.1. Иллюстрация распространения ЭЭ в виде падающей и отраженной волны: Н — начало; К — конец рассматриваемого участка ЭЭС; l - длина волны

Постоянные распределения этих волн определяются в результате решения характеристического уравнения (1).

Корни этого уравнения можно определить по формулам

$$x_{1,2} = \pm \left(\sqrt[3]{-\frac{a^3}{27} - \frac{c}{2} + \frac{ab}{6} + \sqrt{D}} + \sqrt[3]{-\frac{a^3}{27} - \frac{c}{2} + \frac{ab}{6} - \sqrt{D}} - \frac{a}{3} \right)^{1/2};$$

$$x_{3,4} = \pm \frac{1}{\sqrt{2}} \left[-\sqrt[3]{-\frac{a^3}{27} - \frac{c}{2} + \frac{ab}{6} + \sqrt{D}} - \sqrt[3]{-\frac{a^3}{27} - \frac{c}{2} + \frac{ab}{6} - \sqrt{D}} - \frac{2a}{3} + j\sqrt{3} \left(\sqrt[3]{-\frac{a^3}{27} - \frac{c}{2} + \frac{ab}{6} + \sqrt{D}} - \sqrt[3]{-\frac{a^3}{27} - \frac{c}{2} + \frac{ab}{6} - \sqrt{D}} \right) \right]^{1/2};$$

$$x_{5,6} = \pm \frac{1}{\sqrt{2}} \left[-\sqrt[3]{-\frac{a^3}{27} - \frac{c}{2} + \frac{ab}{6} + \sqrt{D}} - \sqrt[3]{-\frac{a^3}{27} - \frac{c}{2} + \frac{ab}{6} - \sqrt{D}} - \frac{2a}{3} - j\sqrt{3} \left(\sqrt[3]{-\frac{a^3}{27} - \frac{c}{2} + \frac{ab}{6} + \sqrt{D}} - \sqrt[3]{-\frac{a^3}{27} - \frac{c}{2} + \frac{ab}{6} - \sqrt{D}} \right) \right]^{1/2},$$

где

$$D = \frac{2a^4b + 16a^3c + 19a^2b^2 + 36b^3 + 243c^2}{972}$$

Величина постоянных распределения каждой пары волн электромагнитного поля определяется следующим образом: $\gamma_{1n} = |x_{1,2}|$; $\gamma_{2n} = |x_{3,4}|$ и $\gamma_{3n} = |x_{5,6}|$.

Получается, что постоянные распределения γ_{1n} , γ_{2n} и γ_{3n} сдвинуты в пространстве на угол $\pi/3$, что подтверждает трехфазный характер распределения электрической энергии.

Таким образом, анализ характеристического уравнения однородного участка трехфазной трехпроводной ЛЭП позволяет оценить физическую сущность электромагнитных процессов, происходящих в конструктивных элементах линии электропередач.

Литература

1. Способ прогнозирования гармонических составляющих электрической энергии по неразветвленным участкам электроэнергетической системы : пат. 2210154 Рос. Федерация, МКИ⁷ Н 02 J 3/01/ Большанин Г. А. ; заявитель Брат. гос. техн. ун-т. — № 2001106402; заявл. 06.03.01; опубл. 10.08.03.
2. Способ количественной оценки субгармонической и дробных высших гармонических периодически изменяемых величин : пат. № 2122186 Рос. Федерация МКИ 6 G 01 J 3/28 / Большанин Г. А., Охлопков И. Н., Видерников С. В., Безносоев Е. А., Манахов А. В., Зимарев С. А., Алферов М. А. — заявитель Брат. индустр. ин-т. — № 96112228/25; заявл. 14.06.96; опубл. 20.11.98.
3. Большанин, Г. А. Распределение электрической энергии пониженного качества по участкам электроэнергетической системы / Г. А. Большанин // Тр. ун-та в 2 т. // Брат. гос. ун-т. — 2006. — Т. 2. — (Естественные и инженерные науки — развитию регионов Сибири). — С. 129 — 140.
4. Микуцкий, Г. В. Линейные тракты каналов высокочастотной связи по линиям электропередачи. / Г. В. Микуцкий, Ю. П. Шкарин. — М.: Энергоатомиздат, 1986. — 200 с.