

УДК 621.311.004.12

Г. А. Большанин*, Л. Ю. Большанина

РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ ПониЖЕННОГО КАЧЕСТВА ПО ОДНОРОДНОМУ УЧАСТКУ ЛИНИИ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ ЧЕТЫРЕХПРОВОДНОГО ИСПОЛНЕНИЯ

Предложены электрическая схема замещения однородного участка линии электропередачи четырехпроводного исполнения, математическая модель и методика прогнозирования распределения электрической энергии пониженного качества по этому участку. Показано, что в этих условиях прогнозированию распределения всей электрической энергии предшествует прогнозирование распределения энергии на частоте каждой гармонической составляющей напряжения и тока, а участок линии электрической передачи при этом должен быть представлен в виде линии с распределенными параметрами.

Ключевые слова: гармонические составляющие напряжения и тока, несимметрия, длина волны, линия с распределенными параметрами, фазные токи, фазные напряжения, постоянная распространения, собственные и взаимные волновые сопротивления.

Анализ распределения электрической энергии пониженного качества по трехфазным линиям электропередачи четырехпроводного исполнения вполне актуален и своевременен. Предлагаемый алгоритм может быть использован для анализа распределения электрической энергии пониженного качества по любым линиям четырехпроводного исполнения.

Согласно действующим правилам эксплуатации электроустановок потребителей линия электропередачи (ЛЭП) четырехпроводного исполнения является трехфазным участком электроэнергетической системы с изолированной нейтралью. Такие линии могут применяться и применяются наравне с линиями иного исполнения для транспортировки электрической энергии напряжением выше 1 кВ (например, трехфазная трехпроводная ЛЭП с грозозащитным тросом, когда необходим учет влияния этого троса на распределение электрической энергии).

Распределение электрической энергии идеального качества по ЛЭП протяженностью до 200 км выполняется практически по линейному закону. Поэтому такие линии электропередач обычно принимаются за линии с сосредоточенными параметрами.

При повышении частоты изменения напряжений и токов диапазон линейности распределения электрической энергии сокращается. Так, на частоте третьей гармонической составляющей (150 Гц) этот диапазон составляет 67 км, на частоте пятой гармонической составляющей (550 Гц) – 40 км, седьмой (350 Гц) – 29 км, девятой (450 Гц) – 22 км, одиннадцатой (550 Гц) – 19 км, тринадцатой (650 Гц) – 17 км и т.д. Следует отметить, что в спектрах напряжений и токов в современных ЭЭС имеют место гармонические составляющие и более высоких частот. Поэтому при анализе распре-

деления электрической энергии пониженного качества даже по сравнительно непротяженным участкам ЛЭП эти участки следует принимать за линии с распределенными параметрами.

При анализе распределения электрической энергии пониженного качества, в частности, при нарушении симметрии напряжений и токов, необходимо рассматривать полнофазную модель линий с распределенными параметрами с учетом всех электромагнитных связей между конструктивными элементами ЛЭП, как показано на рис. 1.

Электрическая энергия пониженного качества отличается заметными уровнями несинусоидальности, несимметрии, отклонений и колебания напряжений и токов, нестабильной частотой. Эти отклонения вызваны подключением к сети несимметричных нагрузок. Это нелинейные нагрузки промышленного назначения (металлургические заводы, электрифицированный транспорт) и коммунально-бытового назначения (лампы дневного света, выпрямители, персональные компьютеры, мощная бытовая техника типа кухонных плит и стиральных машин). Словосочетание «заметные уровни несинусоидальности, несимметрии, отклонений и колебания напряжений и токов» означает достижение и превышение нормативных величин соответствующих показателей качества электрической энергии [1].

На рис. 1 представлена электрическая схема замещения элементарного участка однородной трехфазной четырехпроводной ЛЭП, который следует рассматривать как однородный элементарный участок электроэнергетической системы протяженностью dl с изолированным нейтральным проводом на частоте n -ой гармонической составляющей.

* - автор, с которым следует вести переписку.

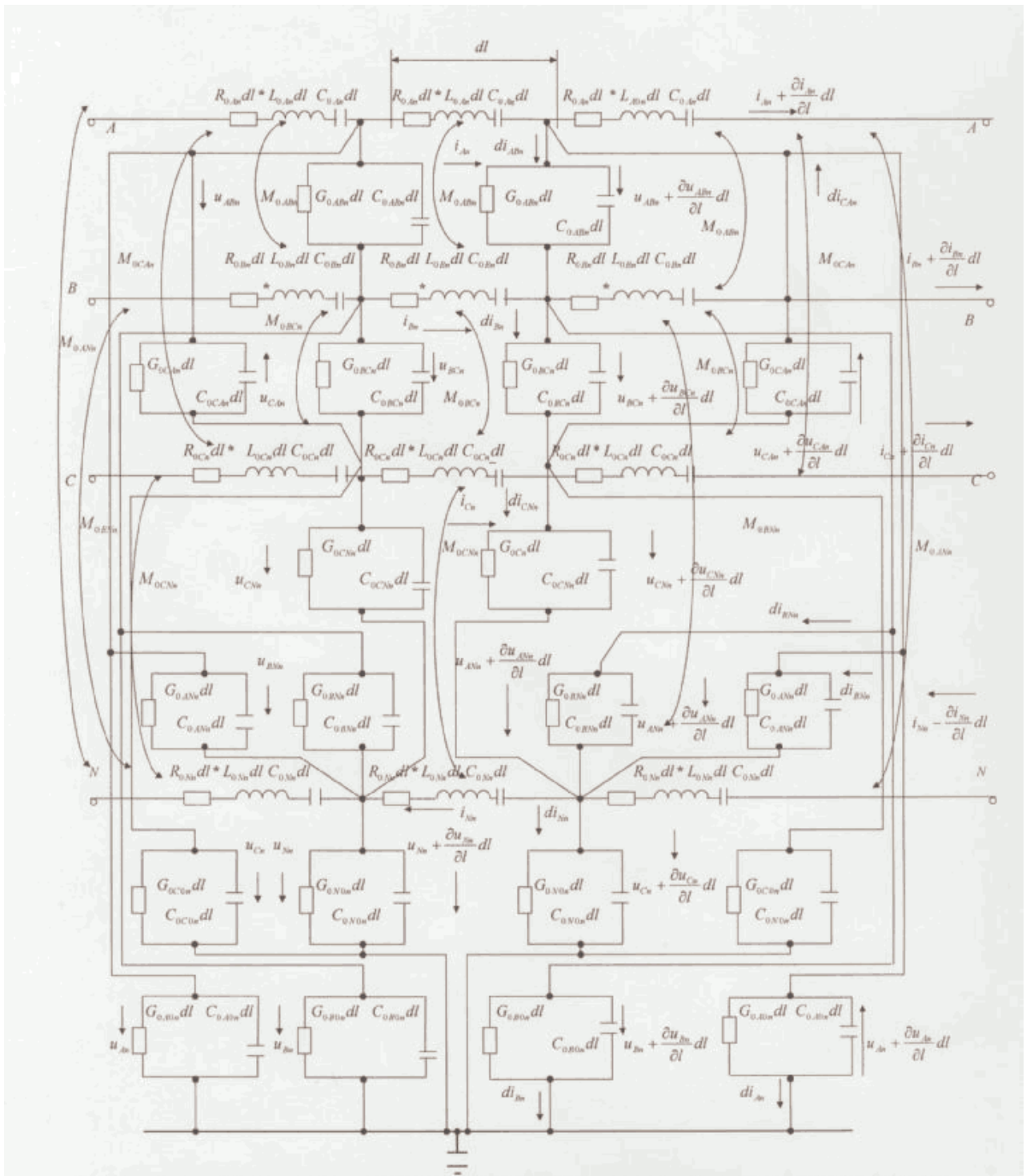


Рис. 1. Расчетная электрическая схема замещения элементарного участка однородной трехфазной четырехпроводной ЛЭП с изолированным нейтральным проводом на частоте n -й гармонической составляющей

$R_{0An}, L_{0An}, C_{0An}, R_{0Bn}, L_{0Bn}, C_{0Bn}, R_{0Cn}, L_{0Cn}, C_{0Cn}$ – продольные параметры фазных проводов;
 R_{0Nn}, L_{0Nn} и C_{0Nn} – продольные параметры нейтрального провода;
 $G_{0ABn}, M_{0ABn}, C_{0ABn}, G_{0BCn}, M_{0BCn}, C_{0BCn}, G_{0CAn}, M_{0CAn}, C_{0CAn}$ – поперечные параметры, характеризующие электромагнитные связи между фазными проводами;

$G_{0A0n}, C_{0A0n}, G_{0B0n}, C_{0B0n}, G_{0C0n}, C_{0C0n}$ – электромагнитные связи между фазными проводами и поверхностью земли;
 $G_{0ANn}, M_{0BNn}, C_{0ANn}, G_{0BNn}, M_{0BNn}, C_{0BNn}, G_{0CNn}, M_{0CNn}, C_{0CNn}$ – поперечные параметры, характеризующие электромагнитные связи между фазными и нейтральными проводами;

G_{0N0n} и C_{0N0n} – электромагнитные связи между изолированным нейтральным проводом и поверхностью земли;

$di_{ABn}, di_{BCn}, di_{CAn}, di_{ANn}, di_{BNn}, di_{CNn}, di_{An}, di_{Bn}, di_{Cn}$ и di_{Nn} – «токи утечки» по соответствующим электромагнитным связям.

Целью анализа является выявление и изучения взаимосвязи входных и выходных характеристик электрической энергии.

В начале рассматриваемого участка ЛЭП имеют место:

напряжения между фазными проводами (линейные)

$$u_{ABn}, u_{BCn}, u_{CAN};$$

напряжения между фазными и нейтральным проводами (фазные) $u_{ANn}, u_{BNn}, u_{CNn}$;

напряжения между фазными проводами и поверхностью земли u_{An}, u_{Bn}, u_{Cn} ;

напряжение между нейтральным проводом и поверхностью земли u_{Nn} , которое условно можно назвать напряжением смещения нейтрали на частоте n – ой гармонической составляющей; фазные токи i_{An}, i_{Bn}, i_{Cn} ;

ток в нейтральном проводе i_{Nn} .

Выходные характеристики электрической энергии на частоте n – той гармонической составляющей по отношению к выходным восприимчивым соответствующие дополнения и примут вид:

$$u_{ABn} + \frac{\partial u_{ABn}}{\partial l} dl; \quad u_{BCn} + \frac{\partial u_{BCn}}{\partial l} dl; \quad u_{CAN} + \frac{\partial u_{CAN}}{\partial l} dl;$$

$$u_{ANn} + \frac{\partial u_{ANn}}{\partial l} dl; \quad u_{BNn} + \frac{\partial u_{BNn}}{\partial l} dl; \quad u_{CNn} + \frac{\partial u_{CNn}}{\partial l} dl;$$

$$u_{An} + \frac{\partial u_{An}}{\partial l} dl; \quad u_{Bn} + \frac{\partial u_{Bn}}{\partial l} dl; \quad u_{Cn} + \frac{\partial u_{Cn}}{\partial l} dl; \quad u_{Nn} + \frac{\partial u_{Nn}}{\partial l} dl;$$

$$i_{An} + \frac{\partial i_{An}}{\partial l} dl; \quad i_{Bn} + \frac{\partial i_{Bn}}{\partial l} dl; \quad i_{Cn} + \frac{\partial i_{Cn}}{\partial l} dl; \quad i_{Nn} - \frac{\partial i_{Nn}}{\partial l} dl.$$

На рис. 1 обозначены так называемые «токи утечки» по соответствующим электромагнитным связям $di_{ABn}, di_{BCn}, di_{CAn}, di_{ANn}, di_{BNn}, di_{CNn}, di_{An}, di_{Bn}, di_{Cn}$ и di_{Nn} . Протяженность рассматриваемого участка беспредельно мала, поэтому и указанные «токи утечки» тоже беспредельно малы.

Применительно к рассматриваемому участку придется иметь дело с десятью напряжениями и четырьмя токами. Соответственно рабочая математическая модель однородного элементарного участка ЛЭП трехфазного четырехпроводного исполнения с изолированным нейтральным проводом содержит четырнадцать уравнений, составленных по законам Кирхгофа типа:

$$i_{An} = di_{An} + di_{ABn} - di_{CAn} + di_{ANn} + i_{An} + \frac{\partial i_{An}}{\partial l} dl; \quad (1)$$

$$i_{Nn} = di_{ANn} + di_{BNn} + di_{CNn} - di_{Nn} + i_{Nn} - \frac{\partial i_{Nn}}{\partial l} dl; \quad (2)$$

$$u_{An} = i_{An} R_{0An} dl + L_{0An} dl \frac{\partial i_{An}}{\partial t} + M_{0ABn} dl \frac{\partial i_{Bn}}{\partial t} + M_{0CAn} dl \frac{\partial i_{Cn}}{\partial t} - M_{0ANn} dl \frac{\partial i_{Nn}}{\partial t} + \frac{1}{C_{0An}} dl \int i_{An} \partial t + u_{An} + \frac{\partial u_{An}}{\partial l} dl; \quad (3)$$

$$u_{Nn} = -i_{Nn} R_{0Nn} dl - L_{0Nn} dl \frac{\partial i_{Nn}}{\partial t} + M_{0ANn} dl \frac{\partial i_{An}}{\partial t} + M_{0BNn} dl \frac{\partial i_{Bn}}{\partial t} + M_{0CNn} dl \frac{\partial i_{Cn}}{\partial t} - \frac{1}{C_{0Nn}} dl \int i_{Nn} \partial t + u_{Nn} + \frac{\partial u_{Nn}}{\partial l} dl; \quad (4)$$

$$u_{ANn} = i_{An} R_{0An} dl + L_{0An} dl \frac{\partial i_{An}}{\partial t} + M_{0ABn} dl \frac{\partial i_{Bn}}{\partial t} + M_{0CAn} dl \frac{\partial i_{Cn}}{\partial t} - M_{0ANn} dl \frac{\partial i_{Nn}}{\partial t} + \frac{1}{C_{0An}} dl \int i_{An} \partial t + i_{Nn} R_{0Nn} dl + L_{0Nn} dl \frac{\partial i_{Nn}}{\partial t} - M_{0ANn} dl \frac{\partial i_{An}}{\partial t} - M_{0BNn} dl \frac{\partial i_{Bn}}{\partial t} - M_{0CNn} dl \frac{\partial i_{Cn}}{\partial t} + \frac{1}{C_{0Nn}} dl \int i_{Nn} \partial t + u_{ANn} + \frac{\partial u_{ANn}}{\partial l} dl; \quad (5)$$

$$u_{ABn} = i_{An} R_{0An} dl + L_{0An} dl \frac{\partial i_{An}}{\partial t} + M_{0ABn} dl \frac{\partial i_{Bn}}{\partial t} + M_{0CAn} dl \frac{\partial i_{Cn}}{\partial t} - M_{0ANn} dl \frac{\partial i_{Nn}}{\partial t} + \frac{1}{C_{0An}} dl \int i_{An} \partial t - i_{Bn} R_{0Bn} dl - L_{0Bn} dl \frac{\partial i_{Bn}}{\partial t} - M_{0ABn} dl \frac{\partial i_{An}}{\partial t} - M_{0BCn} dl \frac{\partial i_{Cn}}{\partial t} + M_{0BNn} dl \frac{\partial i_{Nn}}{\partial t} - \frac{1}{C_{0Bn}} dl \int i_{Bn} \partial t + u_{ABn} + \frac{\partial u_{ABn}}{\partial l} dl. \quad (6)$$

При известных напряжениях и токах в начале рассматриваемого участка ЛЭП $\dot{U}_{1An}, \dot{U}_{1Bn}, \dot{U}_{1Cn}, \dot{U}_{1Nn}$ и $\dot{i}_{1An}, \dot{i}_{1Bn}, \dot{i}_{1Cn}, \dot{i}_{1Nn}$ совместное решение этих уравнений выглядит так:

$$\dot{U}_{An} = \sum_{i=1}^4 (\dot{U}_{1An} ch\gamma_{in} l - \dot{i}_{1An} Z_{cAn} sh\gamma_{in} l); \quad (7)$$

$$\dot{U}_{Nn} = \sum_{i=1}^4 (\dot{U}_{1Nn} ch\gamma_{in} l + \dot{i}_{1Nn} Z_{cNn} sh\gamma_{in} l); \quad (8)$$

$$\begin{aligned} \dot{U}_{ABn} = \sum_{i=1}^4 [(\dot{U}_{1An} - \dot{U}_{1Bn}) ch\gamma_{in} l - \\ - (\dot{I}_{1An} \underline{Z}_{cAin} - \dot{I}_{1Bn} \underline{Z}_{cBin}) sh\gamma_{in} l]; \end{aligned} \quad (9)$$

$$\begin{aligned} \dot{U}_{ANn} = \sum_{i=1}^4 [(\dot{U}_{1An} - \dot{U}_{1Nn}) ch\gamma_{in} l - \\ - (\dot{I}_{1An} \underline{Z}_{cAin} - \dot{I}_{1Nn} \underline{Z}_{cNin}) sh\gamma_{in} l]; \end{aligned} \quad (10)$$

$$\begin{aligned} \dot{I}_{An} = \sum_{i=1}^4 \left(\dot{I}_{1An} ch\gamma_{in} l - \frac{\dot{U}_{1An}}{\underline{Z}_{cAin}} sh\gamma_{in} l + \right. \\ \left. + \frac{\dot{I}_{1Bn} \underline{Z}_{cBin}}{\underline{Z}_{cABin}} ch\gamma_{in} l - \frac{\dot{U}_{1Bn}}{\underline{Z}_{cABin}} sh\gamma_{in} l + \right. \\ \left. + \frac{\dot{I}_{1Cn} \underline{Z}_{cCin}}{\underline{Z}_{cCAin}} ch\gamma_{in} l - \frac{\dot{U}_{1Cn}}{\underline{Z}_{cCAin}} sh\gamma_{in} l + \right. \\ \left. + \frac{\dot{I}_{1Nn} \underline{Z}_{cNin}}{\underline{Z}_{cANin}} ch\gamma_{in} l + \frac{\dot{U}_{1Nn}}{\underline{Z}_{cANin}} sh\gamma_{in} l \right); \end{aligned} \quad (11)$$

$$\begin{aligned} \dot{I}_{Nn} = \sum_{i=1}^4 \left(\dot{I}_{1Nn} ch\gamma_{in} l + \frac{\dot{U}_{1Nn}}{\underline{Z}_{cNin}} sh\gamma_{in} l + \right. \\ \left. + \frac{\dot{I}_{1An} \underline{Z}_{cAin}}{\underline{Z}_{cANin}} ch\gamma_{in} l - \frac{\dot{U}_{1An}}{\underline{Z}_{cANin}} sh\gamma_{in} l + \right. \\ \left. + \frac{\dot{I}_{1Bn} \underline{Z}_{cBin}}{\underline{Z}_{cBNin}} ch\gamma_{in} l - \frac{\dot{U}_{1Bn}}{\underline{Z}_{cBNin}} sh\gamma_{in} l + \right. \\ \left. + \frac{\dot{I}_{1Cn} \underline{Z}_{cCin}}{\underline{Z}_{cCNin}} ch\gamma_{in} l - \frac{\dot{U}_{1Cn}}{\underline{Z}_{cCNin}} sh\gamma_{in} l \right), \end{aligned} \quad (12)$$

где γ_{in} – постоянные распространения i -той пары электромагнитных волн в токоведущих частях ЛЭП на частоте n -ой гармонической составляющей тока и напряжения;

\underline{Z}_{cAin} , \underline{Z}_{cBin} , \underline{Z}_{cCin} , \underline{Z}_{cNin} , \underline{Z}_{cABin} , \underline{Z}_{cCAin} , \underline{Z}_{cANin} , \underline{Z}_{cBNin} , \underline{Z}_{cCNin} – собственные и взаимные волновые сопротивления токоведущих частей ЛЭП i -той паре электромагнитной волны на частоте n -ой гармонической составляющей тока и напряжения;

l – расстояние от начала рассматриваемого участка до интересующего исследователя места.

Аналогично определяются и прочие напряжения и токи.

Такое решение позволит определить величины напряжений и токов на частоте каждой гармонической составляющей практически на любом участке однородной ЭЭС.

Если будут известны напряжения и токи на частоте n -ой гармонической составляющей лишь в конце рассматриваемого участка ЛЭП \dot{U}_{2Av} , \dot{U}_{2Bv} , \dot{U}_{2Cv} , \dot{U}_{2Nv} и \dot{I}_{2An} , \dot{I}_{2Bn} , \dot{I}_{2Cn} , \dot{I}_{2Nn} , то величины напряжений и токов той же частоты на расстоянии y от конца этого участка следует определять так:

$$\dot{U}_{An} = \sum_{i=1}^4 (\dot{U}_{2An} ch\gamma_{in} y + \dot{I}_{2An} \underline{Z}_{cAin} sh\gamma_{in} y); \quad (13)$$

$$\dot{U}_{Nn} = \sum_{i=1}^4 (\dot{U}_{2Nn} ch\gamma_{in} y - \dot{I}_{2Nn} \underline{Z}_{cNin} sh\gamma_{in} y); \quad (14)$$

$$\begin{aligned} \dot{U}_{ABn} = \sum_{i=1}^4 [(\dot{U}_{2An} - \dot{U}_{2Bn}) ch\gamma_{in} y + \\ + (\dot{I}_{2An} \underline{Z}_{cAin} - \dot{I}_{2Bn} \underline{Z}_{cBin}) sh\gamma_{in} y]; \end{aligned} \quad (15)$$

$$\begin{aligned} \dot{U}_{ANn} = \sum_{i=1}^4 [(\dot{U}_{2An} - \dot{U}_{2Nn}) ch\gamma_{in} y + \\ + (\dot{I}_{2An} \underline{Z}_{cAin} + \dot{I}_{2Nn} \underline{Z}_{cNin}) sh\gamma_{in} y]; \end{aligned} \quad (16)$$

$$\begin{aligned} \dot{I}_{An} = \sum_{i=1}^4 \left(\dot{I}_{2An} ch\gamma_{in} y + \frac{\dot{U}_{2An}}{\underline{Z}_{cAin}} sh\gamma_{in} y + \right. \\ \left. + \frac{\dot{I}_{2Bn} \underline{Z}_{cBin}}{\underline{Z}_{cABin}} ch\gamma_{in} y + \frac{\dot{U}_{2Bn}}{\underline{Z}_{cABin}} sh\gamma_{in} y + \right. \\ \left. + \frac{\dot{I}_{2Cn} \underline{Z}_{cCin}}{\underline{Z}_{cCAin}} ch\gamma_{in} y + \frac{\dot{U}_{2Cn}}{\underline{Z}_{cCAin}} sh\gamma_{in} y + \right. \\ \left. + \frac{\dot{I}_{2Nn} \underline{Z}_{cNin}}{\underline{Z}_{cANin}} ch\gamma_{in} y - \frac{\dot{U}_{2Nn}}{\underline{Z}_{cANin}} sh\gamma_{in} y \right); \end{aligned} \quad (17)$$

$$\begin{aligned} \dot{I}_{Nn} = \sum_{i=1}^4 \left(\dot{I}_{2Nn} ch\gamma_{in} y - \frac{\dot{U}_{2Nn}}{\underline{Z}_{cNin}} sh\gamma_{in} y + \right. \\ \left. + \frac{\dot{I}_{2An} \underline{Z}_{cAin}}{\underline{Z}_{cANin}} ch\gamma_{in} y + \frac{\dot{U}_{2An}}{\underline{Z}_{cANin}} sh\gamma_{in} y + \right. \\ \left. + \frac{\dot{I}_{2Bn} \underline{Z}_{cBin}}{\underline{Z}_{cBNin}} ch\gamma_{in} y + \frac{\dot{U}_{2Bn}}{\underline{Z}_{cBNin}} sh\gamma_{in} y + \right. \\ \left. + \frac{\dot{I}_{2Cn} \underline{Z}_{cCin}}{\underline{Z}_{cCNin}} ch\gamma_{in} y + \frac{\dot{U}_{2Cn}}{\underline{Z}_{cCNin}} sh\gamma_{in} y \right). \end{aligned} \quad (18)$$

Результаты совместного решения уравнений, входящих в состав математической модели, вида (1) – (6) свидетельствуют о присутствии в каждом проводе четырехпроводного участка ЛЭП четырех пар электромагнитных волн.

Таким образом, выявлена реальная возможность прогнозирования основных характеристик электрической энергии в любом месте однородного участка трехфазной электроэнергетической системы четырехпроводного исполнения. Например, по трехфазной трехпроводной ЛЭП с грозозащитным тросом, особенно, когда рассматриваемый участок ЛЭП расположен вдали от места металлического заземления этого троса, и его продольные и поперечные параметры не могут быть игнорированы.

Приведенные выше математические формулировки при выполнении этого условия позволят найти основные характеристики электрической энергии на частоте каждой гармонической составляющей.

Полностью значения основных характеристик электрической энергии в каком-либо месте однородного участка ЛЭП можно определить суммированием соответствующих значений каждой гармонической составляющей.

Предлагаемую здесь методику прогнозирования распределения электрической энергии пониженного качества по участкам электроэнергетической системы рекомендуется использовать уже на стадии про-

ектирования и при выполнении реконструкции действующих ЛЭП, при корректировке ее параметров и параметров нагрузок, при формировании активного воздействия на качество электрической энергии и при выполнении прочих технических мероприятий.

В качестве выводов здесь можно представить основные особенности прогнозирования распределения электрической энергии пониженного качества по однородным участкам трехфазных ЛЭП четырехпроводного исполнения, которые состоят в том, что:

- анализируемые участки следует рассматривать как линии с распределенными параметрами;
- участки ЛЭП следует рассматривать в полнофазном исполнении с учетом всех электромагнитных связей между их конструктивными элементами;
- база данных для описываемой операции формируется из погонных параметров рассматриваемого участка ЛЭП, а также из спектрального состава входных или выходных характеристик электрической энергии.

Реализацию предлагаемой методики прогнозирования распределения электрической энергии следует выполнять при помощи средств вычислительной техники.

Практическая ценность данной методики подтверждается в настоящее время результатами компьютерного моделирования и их сопоставлением с данными синхронного измерения спектральных составов напряжений и токов в различных местах действующих ЛЭП. Расхождение не превышает нескольких процентов. Ведутся работы по совершенствованию эксперимента и формированию программного обеспечения с целью выяснения зависимости характера распределения электрической энергии от параметров ЛЭП и спектрального состава напряжений и токов. Результаты этой работы планируется использовать в процессе прогнозирования характера распределения электрической энергии по проектируемым, реконструируемым или действующим ЛЭП в современных условиях электропотребления.

Литература

1. ГОСТ 13109-97. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. – Введ.1999 – 01-01.- Минск : Межгос. совет по стандартизации, метрологии и сертификации ; М. : Изд-во стандартов, 1998. – 31 с.