

## АНАЛИЗ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ ПониЖЕННОГО КАЧЕСТВА ПО НЕРАЗВЕТВЛЕННОЙ ТРЕХФАЗНОЙ ЛЭП

Предлагается методика прогнозирования электрической энергии пониженного качества по неразветвленным трехфазным линиям электропередачи. Сформулированы рекомендации по реализации предлагаемого алгоритма прогнозирования распределения электрической энергии в современных условиях электропотребления.

**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.

Современные электроэнергетические системы (ЭС) особенно системы промышленных регионов, нередко отличаются электрической энергией пониженного качества.

Под термином «электрическая энергия пониженного качества» здесь следует понимать электрическую энергию, характеризующуюся весьма заметными отклонениями, различного типа колебаниями, уровнями несинусоидальности и несимметрии напряжений и токов.

Факт понижения качества электрической энергии обуславливает ряд особенностей прогнозирования распределения этой энергии по участкам ЭЭС. Вот основные из них [1]:

- анализ распределения электрической энергии по участкам ЭЭС требуется выполнять для каждой гармонической составляющей напряжения и тока с последующим распространением результатов анализа на весь спектральный состав этих характеристик;

- анализируемый участок ЭЭС необходимо принимать за линию с распределенными параметрами;

- прогнозирование распределения электрической энергии пониженного качества по участкам ЭЭС следует выполнять с учетом всех электромагнитных связей между конструктивными элементами этих участков.

В данном случае в качестве анализируемого участка ЭЭС предлагается трехфазная трехпроводная линия электропередачи (ЛЭП). Именно ее и нужно представить здесь как линию с распределенными параметрами.

На основании сведений из теории электротехники можно разработать методику прогнозиро-

вания распределения электрической энергии пониженного качества по однородному трехфазному трехпроводному участку ЛЭП [2].

Однородность ЛЭП предполагает неизменность продольных и поперечных параметров линии электропередач по всей ее протяженности.

Величины продольных параметров в первую очередь зависят от сечения проводов и химического состава материала, из которого они выполнены. Постоянство этих характеристик можно обеспечить лишь с той или иной степенью достоверности. Но и этого добиться чрезвычайно сложно. Особенно для ЛЭП большой протяженности.

Величины поперечных параметров зависят от многих факторов: от взаимного расположения проводов ЛЭП, от рельефа местности, от состава грунта, от химического состава окружающей среды, от климатических условий и т.п. В этой связи обеспечение равновеликости поперечных параметров ЛЭП вдоль всей ее длины практически недостижимо.

Поэтому недостижима и абсолютная однородность ЛЭП.

Об относительной однородности можно говорить лишь при рассмотрении непротяженных участков линии электропередач.

Таким образом, анализируемую ЛЭП целесообразно представить в виде цепной схемы, составленной из множества однородных участков, на которые можно разделить данную линию электропередачи. Причем в данном случае каждый однородный участок удобно представить в виде восьмиполосника с двумя заземленными выводами (рис. 1).

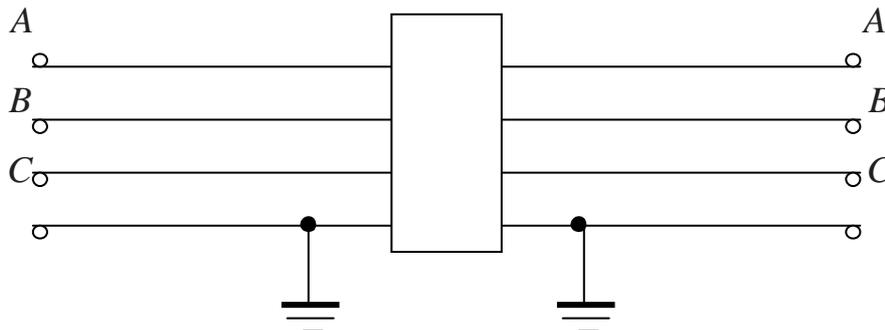


Рис. 1. Восьмиполосник, иллюстрирующий однородный участок трехфазной трехпроводной ЛЭП

\* - автор, с которым следует вести переписку

Цепную схему, иллюстрирующую анализируемую ЛЭП, в таком случае следует представлять в виде совокупности подобных восьмиполосников, как это показано на рис. 2.

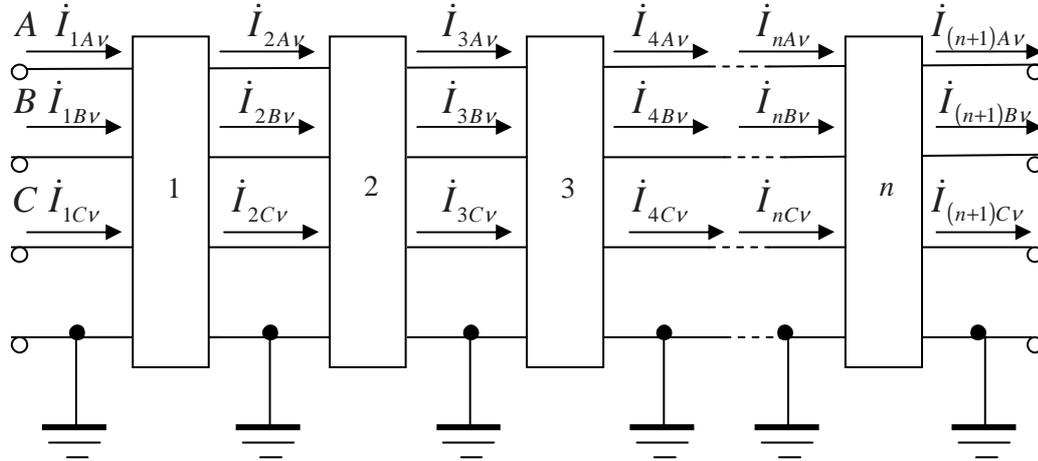


Рис. 2. Вариант представления неоднородного участка трехфазной трехпроводной ЛЭП на частоте  $\nu$ -й гармонической составляющей

Если известны параметры схем замещения каждого однородного участка ЛЭП, то есть возможность определить вторичные параметры этих участков. А если известны, например, и выходные характеристики электрической энергии однородного участка, то можно определить соответ-

ствующие входные характеристики. При этом удобно воспользоваться основными уравнениями восьмиполосника. Уравнения  $k$ -го восьмиполосника можно представить так:

$$\left. \begin{aligned} \dot{U}_{kAv} &= \underline{A}_{Akv} \dot{U}_{(k+1)Av} + \underline{B}_{Akv} \dot{I}_{(k+1)Av}; \\ \dot{U}_{kBv} &= \underline{A}_{Bkv} \dot{U}_{(k+1)Bv} + \underline{B}_{Bkv} \dot{I}_{(k+1)Bv}; \\ \dot{U}_{kCv} &= \underline{A}_{Ckv} \dot{U}_{(k+1)Cv} + \underline{B}_{Ckv} \dot{I}_{(k+1)Cv}; \\ \dot{I}_{kAv} &= \underline{C}_{Akv} \dot{U}_{(k+1)Av} + \underline{D}_{Akv} \dot{I}_{(k+1)Av} + \underline{E}_{Akv} \dot{U}_{(k+1)Bv} + \underline{F}_{Akv} \dot{I}_{(k+1)Bv} + \underline{G}_{Akv} \dot{U}_{(k+1)Cv} + \underline{H}_{Akv} \dot{I}_{(k+1)Cv}; \\ \dot{I}_{kBv} &= \underline{C}_{Bkv} \dot{U}_{(k+1)Bv} + \underline{D}_{Bkv} \dot{I}_{(k+1)Bv} + \underline{E}_{Bkv} \dot{U}_{(k+1)Av} + \underline{F}_{Bkv} \dot{I}_{(k+1)Av} + \underline{G}_{Bkv} \dot{U}_{(k+1)Cv} + \underline{H}_{Bkv} \dot{I}_{(k+1)Cv}; \\ \dot{I}_{kCv} &= \underline{C}_{Ckv} \dot{U}_{(k+1)Cv} + \underline{D}_{Ckv} \dot{I}_{(k+1)Cv} + \underline{E}_{Ckv} \dot{U}_{(k+1)Av} + \underline{F}_{Ckv} \dot{I}_{(k+1)Av} + \underline{G}_{Ckv} \dot{U}_{(k+1)Bv} + \underline{H}_{Ckv} \dot{I}_{(k+1)Bv}. \end{aligned} \right\} (1)$$

где  $\dot{U}_{kAv}$ ,  $\dot{U}_{kBv}$ ,  $\dot{U}_{kCv}$ ,  $\dot{I}_{kAv}$ ,  $\dot{I}_{kBv}$  и  $\dot{I}_{kCv}$  – изображения на комплексной плоскости фазных напряжений и токов на входных клеммах  $k$ -го однородного участка ЛЭП на частоте  $\nu$ -й гармонической составляющей;  $\dot{U}_{(k+1)Av}$ ,  $\dot{U}_{(k+1)Bv}$ ,  $\dot{U}_{(k+1)Cv}$ ,  $\dot{I}_{(k+1)Av}$ ,  $\dot{I}_{(k+1)Bv}$  и  $\dot{I}_{(k+1)Cv}$  – изображения на комплексной плоскости фазных напряжений и токов на выходных клеммах  $k$ -го однородного участка ЛЭП на частоте  $\nu$ -й гармонической составляющей.

Коэффициенты восьмиполосника, входящие в состав уравнений (1), определяются так:

$$\begin{aligned} \underline{A}_{Akv} &= \underline{A}_{Bkv} = \underline{A}_{Ckv} = ch\gamma_{1vk} l_k + ch\gamma_{2vk} l_k + ch\gamma_{3vk} l_k; \\ \underline{B}_{Akv} &= \underline{Z}_{kcA1v} sh\gamma_{1vk} l_k + \underline{Z}_{kcA2v} sh\gamma_{2vk} l_k + \underline{Z}_{kcA3v} sh\gamma_{3vk} l_k; \\ \underline{B}_{Bkv} &= \underline{Z}_{kcB1v} sh\gamma_{1vk} l_k + \underline{Z}_{kcB2v} sh\gamma_{1vk} l_k + \underline{Z}_{kcB3v} sh\gamma_{3vk} l_k; \\ \underline{B}_{Ckv} &= \underline{Z}_{kcC1v} sh\gamma_{1vk} l_k + \underline{Z}_{kcC2v} sh\gamma_{2vk} l_k + \underline{Z}_{kcC3v} sh\gamma_{3vk} l_k; \end{aligned}$$

$$\underline{C}_{Akv} = \frac{sh\gamma_{1vk} l_k}{\underline{Z}_{kcA1v}} + \frac{sh\gamma_{2vk} l_k}{\underline{Z}_{kcA2v}} + \frac{sh\gamma_{3vk} l_k}{\underline{Z}_{kcA3v}};$$

$$\underline{C}_{Bkv} = \frac{sh\gamma_{1vk} l_k}{\underline{Z}_{kcB1v}} + \frac{sh\gamma_{2vk} l_k}{\underline{Z}_{kcB2v}} + \frac{sh\gamma_{3vk} l_k}{\underline{Z}_{kcB3v}};$$

$$\underline{C}_{Ckv} = \frac{sh\gamma_{1vk} l_k}{\underline{Z}_{kcC1v}} + \frac{sh\gamma_{2vk} l_k}{\underline{Z}_{kcC2v}} + \frac{sh\gamma_{3vk} l_k}{\underline{Z}_{kcC3v}};$$

$$\underline{D}_{Akv} = \underline{D}_{Bkv} = \underline{D}_{Ckv} = ch\gamma_{1vk} l_k + ch\gamma_{2vk} l_k + ch\gamma_{3vk} l_k;$$

$$\underline{E}_{Akv} = \frac{sh\gamma_{1vk} l_k}{\underline{Z}_{kcAB1v}} + \frac{sh\gamma_{2vk} l_k}{\underline{Z}_{kcAB2v}} + \frac{sh\gamma_{3vk} l_k}{\underline{Z}_{kcAB3v}};$$

$$\underline{E}_{Bkv} = \frac{sh\gamma_{1vk} l_k}{\underline{Z}_{kcAB1v}} + \frac{sh\gamma_{2vk} l_k}{\underline{Z}_{kcAB2v}} + \frac{sh\gamma_{3vk} l_k}{\underline{Z}_{kcAB3v}};$$

$$\underline{E}_{Ckv} = \frac{sh\gamma_{1vk} l_k}{\underline{Z}_{kcCA1v}} + \frac{sh\gamma_{2vk} l_k}{\underline{Z}_{kcCA2v}} + \frac{sh\gamma_{3vk} l_k}{\underline{Z}_{kcCA3v}};$$

$$\underline{F}_{Akv} = \frac{Z_{kcB1v}}{Z_{kcAB1v}} ch\gamma_{1vk} l_k + \frac{Z_{kcB2v}}{Z_{kcAB2v}} ch\gamma_{2vk} l_k + \frac{Z_{kcB3v}}{Z_{kcAB3v}} ch\gamma_{3vk} l_k ;$$

$$\underline{F}_{Bkv} = \frac{Z_{kcA1v}}{Z_{kcAB1v}} ch\gamma_{1vk} l_k + \frac{Z_{kcA2v}}{Z_{kcAB2v}} ch\gamma_{2vk} l_k + \frac{Z_{kcA3v}}{Z_{kcAB3v}} ch\gamma_{3vk} l_k ;$$

$$\underline{F}_{Ckv} = \frac{Z_{kcA1v}}{Z_{kcCA1v}} ch\gamma_{1vk} l_k + \frac{Z_{kcA2v}}{Z_{kcCA2v}} ch\gamma_{2vk} l_k + \frac{Z_{kcA3v}}{Z_{kcCA3v}} ch\gamma_{3vk} l_k ;$$

$$\underline{G}_{Akv} = \frac{sh\gamma_{1vk} l_k}{Z_{kcCA1v}} + \frac{sh\gamma_{2vk} l_k}{Z_{kcCA2v}} + \frac{sh\gamma_{3vk} l_k}{Z_{kcCA3v}} ;$$

$$\underline{G}_{Bkv} = \frac{sh\gamma_{1vk} l_k}{Z_{kcBC1v}} + \frac{sh\gamma_{2vk} l_k}{Z_{kcBC2v}} + \frac{sh\gamma_{3vk} l_k}{Z_{kcBC3v}} ;$$

$$\underline{G}_{Ckv} = \frac{sh\gamma_{1vk} l_k}{Z_{kcBC1v}} + \frac{sh\gamma_{2vk} l_k}{Z_{kcBC2v}} + \frac{sh\gamma_{3vk} l_k}{Z_{kcBC3v}} ;$$

$$\underline{H}_{Akv} = \frac{Z_{kcC1v}}{Z_{kcCA1v}} ch\gamma_{1vk} l_k + \frac{Z_{kcC2v}}{Z_{kcCA2v}} ch\gamma_{2vk} l_k + \frac{Z_{kcC3v}}{Z_{kcCA3v}} ch\gamma_{3vk} l_k ;$$

$$\underline{H}_{Bkv} = \frac{Z_{kcC1v}}{Z_{kcBC1v}} ch\gamma_{1vk} l_k + \frac{Z_{kcC2v}}{Z_{kcBC2v}} ch\gamma_{2vk} l_k + \frac{Z_{kcC3v}}{Z_{kcBC3v}} ch\gamma_{3vk} l_k ;$$

$$\underline{H}_{Ckv} = \frac{Z_{kcB1v}}{Z_{kcBC1v}} ch\gamma_{1vk} l_k + \frac{Z_{kcB2v}}{Z_{kcBC2v}} ch\gamma_{2vk} l_k + \frac{Z_{kcB3v}}{Z_{kcBC3v}} ch\gamma_{3vk} l_k ;$$

где  $\gamma_{1vk}$ ,  $\gamma_{2vk}$ ,  $\gamma_{3vk}$  – постоянные распространения волн электромагнитного поля на частоте  $\nu$ -й гармонической составляющей по линейным проводам  $k$ -го однородного участка ЭЭС;  $Z_{kcA1v}$ ,  $Z_{kcA2v}$ ,  $Z_{kcA3v}$ ,  $Z_{kcB1v}$ ,  $Z_{kcB2v}$ ,  $Z_{kcB3v}$ ,  $Z_{kcC1v}$ ,  $Z_{kcC2v}$ ,  $Z_{kcC3v}$ ,  $Z_{kcAB1v}$ ,  $Z_{kcAB2v}$ ,  $Z_{kcAB3v}$ ,  $Z_{kcBC1v}$ ,  $Z_{kcBC2v}$ ,  $Z_{kcBC3v}$ ,  $Z_{kcCA1v}$ ,  $Z_{kcCA2v}$  и  $Z_{kcCA3v}$  – изображения

на комплексной плоскости волновых сопротивлений фазных проводов  $k$ -го однородного участка ЛЭП на частоте  $\nu$ -й гармонической составляющей;  $l_k$  – протяженность  $k$ -го участка ЛЭП.

Из этих равенств становится очевидно, что

$$\underline{A}_{A1v} = \underline{A}_{B1v} = \underline{A}_{C1v} = \underline{D}_{A1v} = \underline{D}_{B1v} = \underline{D}_{C1v} ;$$

$$\underline{A}_{A2v} = \underline{A}_{B2v} = \underline{A}_{C2v} = \underline{D}_{A2v} = \underline{D}_{B2v} = \underline{D}_{C2v} ;$$

$$\underline{A}_{A3v} = \underline{A}_{B3v} = \underline{A}_{C3v} = \underline{D}_{A3v} = \underline{D}_{B3v} = \underline{D}_{C3v} ;$$

$$\underline{A}_{Anv} = \underline{A}_{Bnv} = \underline{A}_{Cnv} = \underline{D}_{Anv} = \underline{D}_{Bnv} = \underline{D}_{Cnv} .$$

Это означает, что все многополюсники, входящие в состав рассматриваемого здесь участка ЛЭП, – это лишь симметричные многополюсники (рис. 2), что подтверждает факт распространения энергии электромагнитного поля вдоль однородного проводника в любом направлении без каких-либо изменений характеристик этой энергии.

Такое представление участков ЭЭС дает возможность определить спектральный состав основных характеристик электрической энергии в любом месте ЛЭП при известном спектральном составе подобных характеристик на выходных клеммах этой линии электропередач. Так, для определения входных характеристик электрической энергии на частоте  $\nu$ -й гармонической составляющей для любого, например  $k$ -го, однородного участка неоднородной ЛЭП достаточно воспользоваться уравнениями

$$\dot{U}_{kAv} = \underline{A}_{(k-n)Av} \dot{U}_{(n+1)Av} + \underline{B}_{(k-n)Av} \dot{I}_{(n+1)Av} + \underline{N}_{(k-n)Av} \dot{U}_{(n+1)Bv} + \underline{O}_{(k-n)Av} \dot{I}_{(n+1)Bv} + \underline{P}_{(k-n)Av} \dot{U}_{(n+1)Cv} + \underline{Q}_{(k-n)Av} \dot{I}_{(n+1)Cv} ; \quad (2)$$

$$\dot{U}_{kBv} = \underline{A}_{(k-n)Bv} \dot{U}_{(n+1)Bv} + \underline{B}_{(k-n)Bv} \dot{I}_{(n+1)Bv} + \underline{N}_{(k-n)Bv} \dot{U}_{(n+1)Av} + \underline{O}_{(k-n)Bv} \dot{I}_{(n+1)Av} + \underline{P}_{(k-n)Bv} \dot{U}_{(n+1)Cv} + \underline{Q}_{(k-n)Bv} \dot{I}_{(n+1)Cv} ; \quad (3)$$

$$\dot{U}_{kCv} = \underline{A}_{(k-n)Cv} \dot{U}_{(n+1)Cv} + \underline{B}_{(k-n)Cv} \dot{I}_{(n+1)Cv} + \underline{N}_{(k-n)Cv} \dot{U}_{(n+1)Av} + \underline{O}_{(k-n)Cv} \dot{I}_{(n+1)Av} + \underline{P}_{(k-n)Cv} \dot{U}_{(n+1)Bv} + \underline{Q}_{(k-n)Cv} \dot{I}_{(n+1)Bv} ; \quad (4)$$

$$\dot{I}_{kAv} = \underline{C}_{(k-n)Av} \dot{U}_{(n+1)Av} + \underline{D}_{(k-n)Av} \dot{I}_{(n+1)Av} + \underline{E}_{(k-n)Av} \dot{U}_{(n+1)Bv} + \underline{F}_{(k-n)Av} \dot{I}_{(n+1)Bv} + \underline{G}_{(k-n)Av} \dot{U}_{(n+1)Cv} + \underline{H}_{(k-n)Av} \dot{I}_{(n+1)Cv} ; \quad (5)$$

$$\dot{I}_{kBv} = \underline{C}_{(k-n)Bv} \dot{U}_{(n+1)Bv} + \underline{D}_{(k-n)Bv} \dot{I}_{(n+1)Bv} + \underline{E}_{(k-n)Bv} \dot{U}_{(n+1)Av} + \underline{F}_{(k-n)Bv} \dot{I}_{(n+1)Av} + \underline{G}_{(k-n)Bv} \dot{U}_{(n+1)Cv} + \underline{H}_{(k-n)Bv} \dot{I}_{(n+1)Cv} ; \quad (6)$$

$$\dot{I}_{kCv} = \underline{C}_{(k-n)Cv} \dot{U}_{(n+1)Cv} + \underline{D}_{(k-n)Cv} \dot{I}_{(n+1)Cv} + \underline{E}_{(k-n)Cv} \dot{U}_{(n+1)Av} + \underline{F}_{(k-n)Cv} \dot{I}_{(n+1)Av} + \underline{G}_{(k-n)Cv} \dot{U}_{(n+1)Bv} + \underline{H}_{(k-n)Cv} \dot{I}_{(n+1)Bv} . \quad (7)$$

Здесь символы  $\underline{A}_{(k-n)Av}$ ,  $\underline{A}_{(k-n)Bv}$ ,  $\underline{A}_{(k-n)Cv}$ ,  $\underline{B}_{(k-n)Av}$ ,  $\underline{B}_{(k-n)Bv}$ ,  $\underline{B}_{(k-n)Cv}$ ,  $\underline{C}_{(k-n)Av}$ ,  $\underline{C}_{(k-n)Bv}$ ,  $\underline{C}_{(k-n)Cv}$ ,  $\underline{D}_{(k-n)Av}$ ,  $\underline{D}_{(k-n)Bv}$ ,  $\underline{D}_{(k-n)Cv}$ ,  $\underline{E}_{(k-n)Av}$ ,  $\underline{E}_{(k-n)Bv}$ ,  $\underline{E}_{(k-n)Cv}$ ,  $\underline{F}_{(k-n)Av}$ ,  $\underline{F}_{(k-n)Bv}$ ,  $\underline{F}_{(k-n)Cv}$ ,  $\underline{G}_{(k-n)Av}$ ,  $\underline{G}_{(k-n)Bv}$ ,  $\underline{G}_{(k-n)Cv}$ ,  $\underline{H}_{(k-n)Av}$ ,  $\underline{H}_{(k-n)Bv}$ ,  $\underline{H}_{(k-n)Cv}$ ,  $\underline{N}_{(k-n)Av}$ ,  $\underline{N}_{(k-n)Bv}$ ,  $\underline{N}_{(k-n)Cv}$ ,  $\underline{O}_{(k-n)Av}$ ,  $\underline{O}_{(k-n)Bv}$ ,  $\underline{O}_{(k-n)Cv}$ ,  $\underline{P}_{(k-n)Av}$ ,  $\underline{P}_{(k-n)Bv}$ ,  $\underline{P}_{(k-n)Cv}$ ,  $\underline{Q}_{(k-n)Av}$ ,  $\underline{Q}_{(k-n)Bv}$  и  $\underline{Q}_{(k-n)Cv}$  означают коэффициенты восьмиполюсника, объединяющего от  $k$ -го до  $n$ -го однородные участки ЛЭП включительно на частоте  $\nu$ -й гармонической составляющей. Определяются эти коэффициенты так:

$$\underline{A}_{(k-n)Av} = \underline{A}_{[k-(n-1)]Av} \underline{A}_{Anv} + \underline{B}_{[k-(n-1)]Av} \underline{C}_{Anv} + \underline{O}_{[k-(n-1)]Av} \underline{E}_{Bnv} + \underline{Q}_{[k-(n-1)]Av} \underline{E}_{Cnv} ;$$

$$\underline{A}_{(k-n)Bv} = \underline{A}_{[k-(n-1)]Bv} \underline{A}_{Bnv} + \underline{B}_{[k-(n-1)]Bv} \underline{C}_{Bnv} + \underline{O}_{[k-(n-1)]Bv} \underline{E}_{Anv} + \underline{Q}_{[k-(n-1)]Bv} \underline{G}_{Cnv} ;$$



$$\begin{aligned} \underline{P}_{[k-n]Cv} &= \underline{B}_{[k-(n-1)]Cv} \underline{G}_{Cnv} + \underline{O}_{[k-(n-1)]Cv} \underline{E}_{Anv} + \underline{P}_{[k-(n-1)]Cv} \underline{A}_{Bnv} + \underline{Q}_{[k-(n-1)]Cv} \underline{C}_{Bnv}; \\ \underline{Q}_{[k-n]Av} &= \underline{B}_{[k-(n-1)]Av} \underline{H}_{Anv} + \underline{O}_{[k-(n-1)]Av} \underline{H}_{Bnv} + \underline{P}_{[k-(n-1)]Av} \underline{B}_{Cnv} + \underline{Q}_{[k-(n-1)]Av} \underline{D}_{Cnv}; \\ \underline{Q}_{[k-n]Bv} &= \underline{B}_{[k-(n-1)]Bv} \underline{H}_{Bnv} + \underline{O}_{[k-(n-1)]Bv} \underline{H}_{Anv} + \underline{P}_{[k-(n-1)]Bv} \underline{B}_{Cnv} + \underline{Q}_{[k-(n-1)]Bv} \underline{D}_{Cnv}; \\ \underline{Q}_{[k-n]Cv} &= \underline{B}_{[k-(n-1)]Cv} \underline{H}_{Cnv} + \underline{O}_{[k-(n-1)]Cv} \underline{E}_{Anv} + \underline{P}_{[k-(n-1)]Cv} \underline{B}_{Bnv} + \underline{Q}_{[k-(n-1)]Cv} \underline{D}_{Bnv}, \end{aligned}$$

где  $\underline{A}_{Anv}$ ,  $\underline{A}_{Bnv}$ ,  $\underline{A}_{Cnv}$ ,  $\underline{B}_{Anv}$ ,  $\underline{B}_{Bnv}$ ,  $\underline{B}_{Cnv}$ ,  $\underline{C}_{Anv}$ ,  $\underline{C}_{Bnv}$ ,  $\underline{C}_{Cnv}$ ,  $\underline{D}_{Anv}$ ,  $\underline{D}_{Bnv}$ ,  $\underline{D}_{Cnv}$ ,  $\underline{E}_{Anv}$ ,  $\underline{E}_{Bnv}$ ,  $\underline{E}_{Cnv}$ ,  $\underline{F}_{Anv}$ ,  $\underline{F}_{Bnv}$ ,  $\underline{F}_{Cnv}$ ,  $\underline{G}_{Anv}$ ,  $\underline{G}_{Bnv}$ ,  $\underline{G}_{Cnv}$ ,  $\underline{H}_{Anv}$ ,  $\underline{H}_{Bnv}$  и  $\underline{H}_{Cnv}$  – коэффициенты восьмиполюсника, иллюстрирующего  $n$ -й однородный участок ЛЭП;  $\underline{A}_{[k-(n-1)]Av}$ ,  $\underline{A}_{[k-(n-1)]Bv}$ ,  $\underline{A}_{[k-(n-1)]Cv}$ ,  $\underline{B}_{[k-(n-1)]Av}$ ,  $\underline{B}_{[k-(n-1)]Bv}$ ,  $\underline{B}_{[k-(n-1)]Cv}$ ,  $\underline{C}_{[k-(n-1)]Av}$ ,  $\underline{C}_{[k-(n-1)]Bv}$ ,  $\underline{C}_{[k-(n-1)]Cv}$ ,  $\underline{D}_{[k-(n-1)]Av}$ ,  $\underline{D}_{[k-(n-1)]Bv}$ ,  $\underline{D}_{[k-(n-1)]Cv}$ ,  $\underline{E}_{[k-(n-1)]Av}$ ,  $\underline{E}_{[k-(n-1)]Bv}$ ,  $\underline{E}_{[k-(n-1)]Cv}$ ,  $\underline{F}_{[k-(n-1)]Av}$ ,  $\underline{F}_{[k-(n-1)]Bv}$ ,  $\underline{F}_{[k-(n-1)]Cv}$ ,  $\underline{G}_{[k-(n-1)]Av}$ ,  $\underline{G}_{[k-(n-1)]Bv}$ ,  $\underline{G}_{[k-(n-1)]Cv}$ ,  $\underline{H}_{[k-(n-1)]Av}$ ,  $\underline{H}_{[k-(n-1)]Bv}$ ,  $\underline{H}_{[k-(n-1)]Cv}$ ,  $\underline{N}_{[k-(n-1)]Av}$ ,  $\underline{N}_{[k-(n-1)]Bv}$ ,  $\underline{N}_{[k-(n-1)]Cv}$ ,  $\underline{O}_{[k-(n-1)]Av}$ ,  $\underline{O}_{[k-(n-1)]Bv}$ ,  $\underline{O}_{[k-(n-1)]Cv}$ ,  $\underline{P}_{[k-(n-1)]Av}$ ,  $\underline{P}_{[k-(n-1)]Bv}$ ,  $\underline{P}_{[k-(n-1)]Cv}$ ,  $\underline{Q}_{[k-(n-1)]Av}$ ,  $\underline{Q}_{[k-(n-1)]Bv}$  и  $\underline{Q}_{[k-(n-1)]Cv}$  – коэффициенты восьмиполюсника, объединяющего однородные участки от  $k$ -го до  $(n-1)$ -го включительно.

Эти уравнения предполагают знание выходных характеристик электрической энергии выделенного участка ЭЭС. Однако на практике это условие не всегда достижимо. Иногда гораздо проще, оказывается, изначально определить входные характеристики указанной энергии. Поэтому здесь есть смысл рассмотреть и этот вариант.

Пусть будут известны величины фазных напряжений и токов на входе рассматриваемой ЛЭП на частоте  $v$ -й гармонической составляющей  $\dot{U}_{1Av}$  и  $\dot{I}_{1Av}$ ,  $\dot{U}_{1Bv}$  и  $\dot{I}_{1Bv}$ ,  $\dot{U}_{1Cv}$  и  $\dot{I}_{1Cv}$ . В таком случае выходные характеристики электрической энергии указанной частоты на  $k$ -м однородном участке определяются так:

$$\left. \begin{aligned} \dot{U}_{(k+1)Av} &= \underline{D}_{Akv} \dot{U}_{kAv} - \underline{B}_{Akv} \dot{I}_{kAv}; \\ \dot{U}_{(k+1)Bv} &= \underline{D}_{Bkv} \dot{U}_{kBv} - \underline{B}_{Bkv} \dot{I}_{kBv}; \\ \dot{U}_{[k+1]Cv} &= \underline{D}_{Ckv} \dot{U}_{kCv} - \underline{B}_{Bkv} \dot{I}_{kCv}; \\ \dot{I}_{(k+1)Av} &= \underline{A}_{Akv} \dot{I}_{kAv} - \underline{C}_{Akv} \dot{U}_{kAv} + \underline{F}_{Akv} \dot{I}_{kBv} - \underline{E}_{Akv} \dot{U}_{kBv} + \underline{H}_{Akv} \dot{I}_{kCv} - \underline{G}_{Akv} \dot{U}_{kCv}; \\ \dot{I}_{(k+1)Bv} &= \underline{A}_{Bkv} \dot{I}_{kBv} - \underline{C}_{Bkv} \dot{U}_{kBv} + \underline{F}_{Bkv} \dot{I}_{kAv} - \underline{E}_{Bkv} \dot{U}_{kAv} + \underline{H}_{Bkv} \dot{I}_{kCv} - \underline{G}_{Bkv} \dot{U}_{kCv}; \\ \dot{I}_{(k+1)Cv} &= \underline{A}_{Ckv} \dot{I}_{kCv} - \underline{C}_{Ckv} \dot{U}_{kCv} + \underline{F}_{Ckv} \dot{I}_{kAv} - \underline{E}_{Ckv} \dot{U}_{kAv} + \underline{H}_{Ckv} \dot{I}_{kBv} - \underline{G}_{Ckv} \dot{U}_{kBv}. \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

При необходимости эти однородные участки, представленные на рис. 2 восьмиполюсниками, можно объединить в единый восьмиполюсник, воспользовавшись уравнениями, полученными по той же методике, что и уравнения (2), (3), (4), (5), (6) и (7).

Так, используя теорию многополюсников, можно прогнозировать распределение электрической энергии любого качества по неразветвленной линии электропередач. Достоверность такого прогнозирования зависит от тщательности определения параметров однородных участков ЛЭП и спектральных составов напряжений и токов либо в начале, либо в конце линии.

#### Литература

1. Большанин, Г.А. Математическая модель распределения гармонических составляющих электрической энергии по участкам современных электроэнергетических систем / Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ: межвузовский тематический сборник трудов. Выпуск 9/СПбГАСУ. – Санкт-Петербург, 2003. – С. 166–170.
2. Большанин, Г.А. Математическое моделирование распределения электрической энергии низкого качества в трехфазной трехпроводной электроэнергетической системе / Математика в вузе: материалы международной научно-методической конференции. Санкт-Петербург, сентябрь 2004 г. – Санкт-Петербург: ПГУПС, 2004. – С. 115–117.