

УДК 621.311.004.12

## Коэффициент полезного действия высоковольтной трехфазной трехпроводной линии электрической передачи с распределенными параметрами

В.А. Козлов<sup>а</sup>, Г.А. Большанин<sup>б</sup>

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

<sup>б</sup>bolshaning@mail.ru

Статья поступила 17.11.2012, принята 12.02.2013

*Согласование линии электропередачи с электрической нагрузкой является действенным способом повышения ее пропускной способности. Это доказывается на примере симметричного однородного участка высоковольтной трехфазной трехпроводной линии электропередачи, входящей в состав симметричной электроэнергетической системы. Сформулированы условия согласования трехпроводной линии электропередачи с электрической нагрузкой. Отмечено, что передача электрической энергии по симметричной трехпроводной линии электропередачи, входящей в состав симметричной электроэнергетической системы, обеспечивается тремя равновеликими парами волн электромагнитного поля. Показано, что о повышении пропускной способности линии электропередачи при ее согласовании с электрической нагрузкой свидетельствует факт повышения коэффициента полезного действия линии.*

**Ключевые слова:** трехпроводная линия электропередачи, согласованный режим, электрическая нагрузка, падающая волна, коэффициент полезного действия.

## Efficiency of high-voltage three-phase three-wire power transmission line with distributed parameters

V.A. Kozlov<sup>а</sup>, G.A. Bol'shanin<sup>б</sup>

Bratsk State University, 40, Makarenko str., Bratsk, Russia

<sup>б</sup>bolshaning@mail.ru

Received 17.11.2012, accepted 12.02.2013

*Matching a power line to electric load is an effective way to increase its capacity. It is proved by the example of a symmetrical uniform section of a high-voltage three-phase three-wire power line which is included into a symmetrical power system. The conditions of matching a three-wire power line to electric load have been formulated. It has been noted that electric-power transmission along the symmetrical three-wire power line which is included into a symmetrical power system is provided by three equal couples of the electromagnetic field waves. The laws for phase voltage and line currents distribution along the uniform section of a three-phase three-wire power line while its matching to electric load. It has been noted that when matching a three-phase symmetrical power line which is included into a symmetrical power system and the electric load phase voltage and line currents are distributed along the transmission line according to the exponential laws and their propagation is ensured by incident waves of the electromagnetic field only. It has been shown that the line efficiency increase is indicative of the increase in a power line capacity while matching to the electric load.*

**Key words:** three-wire power line, matched mode, electric load, incident wave, efficiency.

Одним из методов повышения пропускной способности в высоковольтных линиях электропередачи (ЛЭП) с распределенными параметрами трехпроводного исполнения напряжением 10кВ и выше является согласование этих линий с электрической нагрузкой [1].

При реализации мероприятия по согласованию симметричной трехпроводной ЛЭП напряжением 10кВ и выше с нагрузкой [2 – 3], возникают вопросы, связанные с качеством транспортируемой электрической энергии.

Особый интерес вызывает вопрос об изменении коэффициента полезного действия (КПД) длинной линии при ее согласовании с электрической нагрузкой.

В симметричной однородной трехфазной трехпроводной высоковольтной линии электропередачи, входящей в состав симметричной электроэнергетической системы (ЭЭС) первичные параметры каждого провода оказываются равны между собой [4]:

$$\left. \begin{aligned} M_{0ABn} &= M_{0BCn} = M_{0CAn} ; \\ \underline{Z}_{0ABn} &= \underline{Z}_{0BCn} = \underline{Z}_{0CAn} ; \\ \underline{Z}_{An} &= \underline{Z}_{Bn} = \underline{Z}_{Cn} , \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

где  $M_{0ABn}$ ;  $M_{0BCn}$ ;  $M_{0CAn}$  – взаимные индуктивности линейных проводов, Гн;  $\underline{Z}_{0ABn}$ ;  $\underline{Z}_{0BCn}$ ;  $\underline{Z}_{0CAn}$  – взаимные

сопротивления линейных проводов,  $Om$ ;  $\underline{Z}_{An}$ ;  $\underline{Z}_{Bn}$ ;  $\underline{Z}_{Cn}$  – продольные сопротивления линейных проводов,  $Om$ .

Собственные волновые сопротивления в каждом линейном проводе оказываются одинаковыми:

$$\begin{aligned} \underline{Z}_{cAn} &= \underline{Z}_{cBn} = \underline{Z}_{cCn}; \\ \underline{Z}_{cAn} &= \underline{Z}_{cA1n} = \underline{Z}_{cA2n} = \underline{Z}_{cA3n}, \end{aligned} \quad (2)$$

где  $\underline{Z}_{cAn}$ ;  $\underline{Z}_{cBn}$ ;  $\underline{Z}_{cCn}$  – волновые сопротивления соответственно линейных проводов А, В и С,  $Om$ ;  $\underline{Z}_{cA1n}$ ;  $\underline{Z}_{cA2n}$ ;  $\underline{Z}_{cA3n}$  – собственные волновые сопротивления фазы А для первой, второй и третьей пары волн (падающей и отраженной) электромагнитного поля,  $Om$ .

Из-за симметрии первичных параметров линии взаимные волновые сопротивления взаимнокомпенсируются и учету не подлежат.

Симметричная ЭЭС представляет собой совокупность симметричных устройств, предназначенных для генерации, передачи, преобразования и потребления электрической энергии. Получается, что генераторы электрических станций, линии электропередачи, трансформаторные подстанции, приемники электрической энергии и сопутствующее им электротехническое оборудование в этом случае представляют собой симметричные системы. В данной ситуации можно констатировать факт равенства величин фазных и линейных напряжений и токов. Тем не менее, они различаются друг от друга на треть периода, то есть на угол  $120^\circ$ . При таких условиях справедливы равенства:

$$\left. \begin{aligned} \dot{I}_{An} + \dot{I}_{Bn} + \dot{I}_{Cn} &= 0; \\ \dot{U}_{An} + \dot{U}_{Bn} + \dot{U}_{Cn} &= 0; \\ \dot{U}_{ABn} + \dot{U}_{BCn} + \dot{U}_{CAn} &= 0. \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

Формулы (3) обеспечивают равенство между собой постоянных распространения [4]:

$$\gamma_{1n} = \gamma_{2n} = \gamma_{3n} = \gamma_n. \quad (4)$$

Равенство (4) свидетельствует о факте обеспечения передачи электрической энергии по линии электропередачи, входящей в состав симметричной ЭЭС, тремя равновеликими парами волн электромагнитного поля.

С учетом равенства (4) оказывается возможным такое согласование линии электропередачи с электрической нагрузкой, при котором исключаются все три отраженные волны электромагнитного поля. В таком случае условие согласования симметричной однородной трехпроводной ЛЭП напряжением 220 кВ, входящей в состав симметричной ЭЭС, следует представить так:

$$\frac{\dot{U}_{An}}{\dot{I}_{An}} = \frac{\dot{U}_{A2}}{\dot{I}_{A2}}; \quad \frac{\dot{U}_{Bn}}{\dot{I}_{Bn}} = \frac{\dot{U}_{B2}}{\dot{I}_{B2}}; \quad \frac{\dot{U}_{Cn}}{\dot{I}_{Cn}} = \frac{\dot{U}_{C2}}{\dot{I}_{C2}}, \quad (5)$$

где  $\dot{U}_{An}$ ;  $\dot{U}_{Bn}$ ;  $\dot{U}_{Cn}$  – фазные напряжения на клеммах источника питания (начало линии), В;  $\dot{U}_{A2}$ ;  $\dot{U}_{B2}$ ;  $\dot{U}_{C2}$  – фазные напряжения на клеммах симметричной элек-

трической нагрузки (конец линии), В;  $\dot{I}_{An}$ ;  $\dot{I}_{Bn}$ ;  $\dot{I}_{Cn}$  – линейные токи в начале линии, А;  $\dot{I}_{A2}$ ;  $\dot{I}_{B2}$ ;  $\dot{I}_{C2}$  – токи в конце линии, А.

Условие согласования нагрузки с однородной симметричной трехпроводной линией электрической передачи напряжением 10 кВ и выше [1 – 3] для фазы А, входящей в состав симметричной ЭЭС [1], как и для фаз В и С (2), предполагает равенство:

$$\underline{Z}_{cAn} = \underline{Z}_{A2} = \underline{Z}_A, \quad (6)$$

где  $\underline{Z}_{cAn}$  – волновое сопротивление фазы А,  $Om$ ;  $\underline{Z}_{A2}$  – изображение полного сопротивления фазы А электрической нагрузки на комплексной плоскости на частоте  $n$ -й гармонической составляющей напряжения и тока,  $Om$ .

Волновое сопротивление фазы А и сопротивление нагрузки этой же фазы для удобства дальнейшего изложения имеет смысл обозначить единым символом  $\underline{Z}_A$  (6).

Основные характеристики электрической энергии с учетом равенств (6), (2) и (4) могут определиться на основании формул, указанных в [4]:

$$\begin{aligned} \dot{U}_{An} &= \frac{1}{3} \cdot \left( \frac{\dot{I}_{A2} \cdot \underline{Z}_{A2} + \dot{I}_{A2} \cdot \underline{Z}_{cA1n}}{2} \cdot e^{\gamma_{1n}y} + \right. \\ &+ \frac{\dot{I}_{A2} \cdot \underline{Z}_{A2} - \dot{I}_{A2} \cdot \underline{Z}_{cA1n}}{2} \cdot e^{-\gamma_{1n}y} + \frac{\dot{I}_{A2} \cdot \underline{Z}_{A2} + \dot{I}_{A2} \cdot \underline{Z}_{cA2n}}{2} \cdot e^{\gamma_{2n}y} + \\ &+ \frac{\dot{I}_{A2} \cdot \underline{Z}_{A2} - \dot{I}_{A2} \cdot \underline{Z}_{cA2n}}{2} \cdot e^{-\gamma_{2n}y} + \frac{\dot{I}_{A2} \cdot \underline{Z}_{A2} + \dot{I}_{A2} \cdot \underline{Z}_{cA3n}}{2} \cdot e^{\gamma_{3n}y} + \\ &\left. + \frac{\dot{I}_{A2} \cdot \underline{Z}_{A2} - \dot{I}_{A2} \cdot \underline{Z}_{cA3n}}{2} \cdot e^{-\gamma_{3n}y} \right) = \\ &= \left( \frac{\dot{I}_{A2} \cdot \underline{Z}_A + \dot{I}_{A2} \cdot \underline{Z}_A}{2} \cdot e^{\gamma_n y} + \frac{\dot{I}_{A2} \cdot \underline{Z}_A - \dot{I}_{A2} \cdot \underline{Z}_A}{2} \cdot e^{-\gamma_n y} \right) = \\ &= \dot{I}_{A2} \cdot \underline{Z}_A \cdot e^{\gamma_n y} = \dot{I}_{A2} \cdot \underline{Z}_{cAn} \cdot e^{\gamma_n y}; \\ \dot{I}_{An} &= \frac{1}{3} \cdot \left( \frac{\dot{I}_{A2} \cdot \underline{Z}_{A2} + \dot{I}_{A2} \cdot \underline{Z}_{cA1n}}{2 \cdot \underline{Z}_{cA1n}} \cdot e^{\gamma_{1n}y} - \right. \\ &- \frac{\dot{I}_{A2} \cdot \underline{Z}_{A2} - \dot{I}_{A2} \cdot \underline{Z}_{cA1n}}{2 \cdot \underline{Z}_{cA1n}} \cdot e^{-\gamma_{1n}y} + \frac{\dot{I}_{A2} \cdot \underline{Z}_{A2} + \dot{I}_{A2} \cdot \underline{Z}_{cA2n}}{2 \cdot \underline{Z}_{cA2n}} \cdot e^{\gamma_{2n}y} - \\ &- \frac{\dot{I}_{A2} \cdot \underline{Z}_{A2} - \dot{I}_{A2} \cdot \underline{Z}_{cA2n}}{2 \cdot \underline{Z}_{cA2n}} \cdot e^{-\gamma_{2n}y} + \frac{\dot{I}_{A2} \cdot \underline{Z}_{A2} + \dot{I}_{A2} \cdot \underline{Z}_{cA3n}}{2 \cdot \underline{Z}_{cA3n}} \cdot e^{\gamma_{3n}y} - \\ &\left. - \frac{\dot{I}_{A2} \cdot \underline{Z}_{A2} - \dot{I}_{A2} \cdot \underline{Z}_{cA3n}}{2 \cdot \underline{Z}_{cA3n}} \cdot e^{-\gamma_{3n}y} \right) = \frac{\dot{I}_{A2} \cdot \underline{Z}_A + \dot{I}_{A2} \cdot \underline{Z}_A}{2 \cdot \underline{Z}_A} \cdot e^{\gamma_n y} - \\ &- \frac{\dot{I}_{A2} \cdot \underline{Z}_A - \dot{I}_{A2} \cdot \underline{Z}_A}{2 \cdot \underline{Z}_A} \cdot e^{-\gamma_n y} = \frac{\dot{I}_{A2} \cdot \underline{Z}_A + \dot{I}_{A2} \cdot \underline{Z}_A}{2 \cdot \underline{Z}_A} \cdot e^{\gamma_n y} = \dot{I}_{A2} \cdot e^{\gamma_n y}, \end{aligned} \quad (7)$$

где  $y$  – расстояние от конца ЛЭП напряжением 10 кВ и выше до места на линии А, где определяют напряжение  $\dot{U}_{An}$  и ток  $\dot{I}_{An}$ , км;  $\gamma_n$  – постоянная распространения

волн электромагнитного поля на частоте  $n$ -й гармонической составляющей.

Проще уравнения (7) можно представить так:

$$\left. \begin{aligned} \dot{U}_{Bn} &= \dot{I}_{B.2} \cdot \underline{Z}_B \cdot e^{Y_n y} = \dot{I}_{B.2} \cdot \underline{Z}_{cBn} \cdot e^{Y_n y}; \\ \dot{U}_{Cn} &= \dot{I}_{C.2} \cdot \underline{Z}_C \cdot e^{Y_n y} = \dot{I}_{C.2} \cdot \underline{Z}_{cCn} \cdot e^{Y_n y}; \\ \dot{I}_{Bn} &= \dot{I}_{B.2} \cdot e^{Y_n y}; \\ \dot{I}_{Cn} &= \dot{I}_{C.2} \cdot e^{Y_n y}. \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

Формулами (8) описывается передача электрической энергии по согласованной длинной трехпроводной однородной линии, входящей в состав симметричной ЭЭС.

Пусть начальные условия для линейного провода А с учетом (2) определяются так [4 – 8]:

$$\dot{U}_{A.2} = (209578.15 \cdot e^{0i}) B; \quad n = 1;$$

$$y = 450 \text{ км};$$

$$\underline{Z}_{A.2} = \underline{Z}_{cAn} = \underline{Z}_A = (611.40932 + j527.77) \text{ Ом};$$

$$\dot{I}_{A.2} = \frac{\dot{U}_{A.2}}{\underline{Z}_A} = \frac{209578.15 \cdot e^{0i}}{611.40932 + j527.77} = (196.42 - j169.55) \text{ А};$$

$$I_{A.2} = 259.48 \text{ А}.$$

Постоянная распространения волн электромагнитного поля с учетом (4):

$$\gamma_n = 0.00009214186 - j0.000045349.$$

В таком случае напряжение и ток в линии А на расстоянии  $y$  от конца линии определяются так (7):

$$\dot{U}_{An} = \dot{I}_{A.2} \cdot \underline{Z}_A \cdot e^{Y_n y} = (218405.25 - j4457.63) B;$$

$$U_{An} = 218450.74 B;$$

$$\dot{I}_{An} = \dot{I}_{A.2} \cdot e^{Y_n y} = (201.09 - j180.87) \text{ А};$$

$$I_{An} = 270.46 \text{ А}.$$

Величина активной мощности нагрузки фазы А определится из начальных условий:

$$\begin{aligned} P_{A.2} &= \text{Re} \left\{ \dot{U}_{A.2} \cdot \dot{I}_{A.2}^* \right\} = \text{Re} \left\{ \dot{Z}_A \dot{I}_{A.2}^2 \right\} = \\ &= \text{Re} \left\{ \dot{Z}_A \dot{I}_{A.2}^2 \right\} = 611.41 \cdot 259.48^2 = 41165550.89 \text{ Вт}, \quad (9) \end{aligned}$$

где  $\dot{I}^*$  – сопряженный ток, А.

Активная мощность источника питания фазы А при условии  $y = l$  определится так:

$$\begin{aligned} P_{An} &= \text{Re} \left\{ \dot{U}_{An} \cdot \dot{I}_{An}^* \right\} = \text{Re} \left\{ \dot{Z}_A \dot{I}_{An}^2 \right\} = \text{Re} \left\{ \dot{Z}_A \dot{I}_{An}^2 \right\} = \\ &= 611.40932 \cdot 270.46^2 = 44724857.23 \text{ Вт}. \end{aligned}$$

Коэффициент полезного действия рассматриваемой согласованной длинной трехпроводной линии определится как отношение активных мощностей:

$$\begin{aligned} \eta_{\text{СОГЛ.Ан}} &= \frac{P_{A.2}}{P_{An}} \cdot 100\% = \\ &= \frac{P_{A.2}}{P_{An}} \cdot 100\% = \frac{41165550.89}{44724857.23} \cdot 100\% = 92.04\%. \quad (10) \end{aligned}$$

Коэффициент полезного действия линейного провода А рассматриваемой согласованной длинной трехпроводной линии может определяться и иначе [9]:

$$\eta_{\text{СОГЛ.Ан}(2)} = e^{-2\alpha l} \cdot 100\%, \quad (11)$$

где  $\alpha$  – коэффициент затухания постоянной распространения,  $nep$ ;  $l$  – расстояние от начала ЛЭП напряжением 10 кВ и выше до места на линии, где определяют напряжение  $\dot{U}_{An}$  и ток  $\dot{I}_{An}$ ,  $кМ$ .

$$\eta_{\text{СОГЛ.Ан}(2)} = e^{-2\alpha l} \cdot 100\% = 92.04\%.$$

Таким образом определяется КПД согласованной длинной трехпроводной однородной ЛЭП, входящей в состав симметричной ЭЭС.

Для несогласованной трехпроводной симметричной ЛЭП, входящей в состав симметричной ЭЭС, справедливо неравенства [4]:

$$\left. \begin{aligned} \underline{Z}_{cAn} &\neq \underline{Z}_{A.2.H}; \\ \underline{Z}_{cBn} &\neq \underline{Z}_{B.2.H}; \\ \underline{Z}_{cCn} &\neq \underline{Z}_{C.2.H}, \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

где  $\underline{Z}_{A.2.H}$ ;  $\underline{Z}_{B.2.H}$ ;  $\underline{Z}_{C.2.H}$  – изображение полного сопротивления электрической нагрузки на комплексной плоскости на частоте  $n$ -й гармонической составляющей напряжения и тока соответственно линейного провода А, В и С,  $Ом$ .

Неравенство (12) может выполняться и на основании частного случая для фазы А, где  $\underline{Z}_{cAn} = \underline{Z}_A$ ;  $\underline{Z}_{A.2.H} = \underline{Z}_A \cdot 1.5$  (условно). Здесь условно принято, что отношение сопротивления нагрузки  $\underline{Z}_{A.2.H}$  больше волнового сопротивления линии А  $\underline{Z}_{cAn}$  в 1,5 раза. В принципе, это отношение может быть любым другим. С учетом сказанного, (12) можно представить для фазы А в несколько ином виде:

$$\underline{Z}_A (\underline{Z}_{cAn}) \neq 1.5 \cdot \underline{Z}_A (\underline{Z}_{A.2.H}). \quad (13)$$

Формула (13) подразумевает, что сопротивление нагрузки ( $\underline{Z}_{A.2.H}$ ) имеет величину, отличную от волнового сопротивления, и этого достигли в результате повышения тока нагрузки.

С учетом (2), (4), (6), (12) и (13), основные характеристики электрической энергии рассматриваемой несогласованной ЛЭП определяются следующим образом [4]:

$$\begin{aligned}
 \dot{U}_{AnH} &= \frac{1}{3} \cdot \left( \frac{\dot{I}_{A.2.H} \cdot \underline{Z}_{A.2.H} + \dot{I}_{A.2.H} \cdot \underline{Z}_{cA1n}}{2} \cdot e^{\gamma_{1n}y} + \right. \\
 &+ \frac{\dot{I}_{A.2.H} \cdot \underline{Z}_{A.2.H} - \dot{I}_{A.2.H} \cdot \underline{Z}_{cA1n}}{2} \cdot e^{-\gamma_{1n}y} + \\
 &+ \frac{\dot{I}_{A.2.H} \cdot \underline{Z}_{A.2.H} + \dot{I}_{A.2.H} \cdot \underline{Z}_{cA2n}}{2} \cdot e^{\gamma_{2n}y} + \\
 &+ \frac{\dot{I}_{A.2.H} \cdot \underline{Z}_{A.2.H} - \dot{I}_{A.2.H} \cdot \underline{Z}_{cA2n}}{2} \cdot e^{-\gamma_{2n}y} + \\
 &+ \frac{\dot{I}_{A.2.H} \cdot \underline{Z}_{A.2.H} + \dot{I}_{A.2.H} \cdot \underline{Z}_{cA3n}}{2} \cdot e^{\gamma_{3n}y} + \\
 &\left. + \frac{\dot{I}_{A.2.H} \cdot \underline{Z}_{A.2.H} - \dot{I}_{A.2.H} \cdot \underline{Z}_{cA3n}}{2} \cdot e^{-\gamma_{3n}y} \right) = \\
 &= \left( \frac{\dot{I}_{A.2.H} \cdot 1.5 \cdot \underline{Z}_A + \dot{I}_{A.2.H} \cdot \underline{Z}_A}{2} \cdot e^{\gamma_{1n}y} + \right. \\
 &\left. + \frac{\dot{I}_{A.2.H} \cdot 1.5 \cdot \underline{Z}_A - \dot{I}_{A.2.H} \cdot \underline{Z}_A}{2} \cdot e^{-\gamma_{1n}y} \right) = \\
 &= (0.75 \cdot \dot{I}_{A.2.H} \cdot \underline{Z}_A + 0.5 \cdot \dot{I}_{A.2.H} \cdot \underline{Z}_A) \cdot e^{\gamma_{1n}y} + \\
 &+ (0.75 \cdot \dot{I}_{A.2.H} \cdot \underline{Z}_A - 0.5 \cdot \dot{I}_{A.2.H} \cdot \underline{Z}_A) \cdot e^{-\gamma_{1n}y} = \\
 &= 1.25 \cdot \dot{I}_{A.2.H} \cdot \underline{Z}_A \cdot e^{\gamma_{1n}y} + 0.25 \cdot \dot{I}_{A.2.H} \cdot \underline{Z}_A \cdot e^{-\gamma_{1n}y}; \\
 \dot{I}_{AnH} &= \frac{1}{3} \cdot \left( \frac{\dot{I}_{A.2.H} \cdot \underline{Z}_{A.2.H} + \dot{I}_{A.2.H} \cdot \underline{Z}_{cA1n}}{2 \cdot \underline{Z}_{cA1n}} \cdot e^{\gamma_{1n}y} - \right. \\
 &- \frac{\dot{I}_{A.2.H} \cdot \underline{Z}_{A.2.H} - \dot{I}_{A.2.H} \cdot \underline{Z}_{cA1n}}{2 \cdot \underline{Z}_{cA1n}} \cdot e^{-\gamma_{1n}y} + \\
 &+ \frac{\dot{I}_{A.2.H} \cdot \underline{Z}_{A.2.H} + \dot{I}_{A.2.H} \cdot \underline{Z}_{cA2n}}{2 \cdot \underline{Z}_{cA2n}} \cdot e^{\gamma_{2n}y} - \\
 &- \frac{\dot{I}_{A.2.H} \cdot \underline{Z}_{A.2.H} - \dot{I}_{A.2.H} \cdot \underline{Z}_{cA2n}}{2 \cdot \underline{Z}_{cA2n}} \cdot e^{-\gamma_{2n}y} + \\
 &+ \frac{\dot{I}_{A.2.H} \cdot \underline{Z}_{A.2.H} + \dot{I}_{A.2.H} \cdot \underline{Z}_{cA3n}}{2 \cdot \underline{Z}_{cA3n}} \cdot e^{\gamma_{3n}y} - \\
 &\left. - \frac{\dot{I}_{A.2.H} \cdot \underline{Z}_{A.2.H} - \dot{I}_{A.2.H} \cdot \underline{Z}_{cA3n}}{2 \cdot \underline{Z}_{cA3n}} \cdot e^{-\gamma_{3n}y} \right) = \\
 &= \frac{\dot{I}_{A.2.H} \cdot 1.5 \cdot \underline{Z}_A + \dot{I}_{A.2.H} \cdot \underline{Z}_A}{2 \cdot \underline{Z}_A} \cdot e^{\gamma_{1n}y} - \\
 &- \frac{\dot{I}_{A.2.H} \cdot 1.5 \cdot \underline{Z}_A - \dot{I}_{A.2.H} \cdot \underline{Z}_A}{2 \cdot \underline{Z}_A} \cdot e^{-\gamma_{1n}y} = \\
 &= \frac{\dot{I}_{A.2.H} \cdot 0.75 \cdot \underline{Z}_A + 0.5 \cdot \dot{I}_{A.2.H} \cdot \underline{Z}_A}{\underline{Z}_A} \cdot e^{\gamma_{1n}y} - \\
 &- \frac{\dot{I}_{A.2.H} \cdot 0.75 \cdot \underline{Z}_A - 0.5 \cdot \dot{I}_{A.2.H} \cdot \underline{Z}_A}{\underline{Z}_A} \cdot e^{-\gamma_{1n}y} = \\
 &= 1.25 \cdot \dot{I}_{A.2.H} \cdot e^{\gamma_{1n}y} - 0.25 \cdot \dot{I}_{A.2.H} \cdot e^{-\gamma_{1n}y};
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \dot{U}_{BnH} &= 1.25 \cdot \dot{I}_{B.2.H} \cdot \underline{Z}_B \cdot e^{\gamma_{1n}y} + 0.25 \cdot \dot{I}_{B.2.H} \cdot \underline{Z}_B \cdot e^{-\gamma_{1n}y}; \\
 \dot{I}_{BnH} &= 1.25 \cdot \dot{I}_{B.2.H} \cdot e^{\gamma_{1n}y} - 0.25 \cdot \dot{I}_{B.2.H} \cdot e^{-\gamma_{1n}y}; \\
 \dot{U}_{CnH} &= 1.25 \cdot \dot{I}_{C.2.H} \cdot \underline{Z}_C \cdot e^{\gamma_{1n}y} + 0.25 \cdot \dot{I}_{C.2.H} \cdot \underline{Z}_C \cdot e^{-\gamma_{1n}y}; \\
 \dot{I}_{CnH} &= 1.25 \cdot \dot{I}_{C.2.H} \cdot e^{\gamma_{1n}y} - 0.25 \cdot \dot{I}_{C.2.H} \cdot e^{-\gamma_{1n}y}. \quad (14)
 \end{aligned}$$

На основании формул (2), (4), (6), (12), (13) и (14) можно рассмотреть передачу электрической энергии по длинной несогласованной симметричной трехпроводной однородной линии, входящей в состав симметричной ЭЭС, на примере одного из линейных проводов. Пусть это будет линия А.

Пусть начальные условия, определяются так [4 – 8]:

$$\dot{U}_{A.2} = (209578.15 \cdot e^{0i}) B; \quad y = 450 \text{ км}; \quad n = 1;$$

$$\underline{Z}_{cAn} = \underline{Z}_A = (611.41 + j527.77) \text{ Ом};$$

$$\underline{Z}_{A.2.H} = 1.5 \cdot \underline{Z}_A = (917.11 + j791.66) \text{ Ом};$$

$$\begin{aligned}
 \dot{I}_{A.2.H} &= \frac{\dot{U}_{A.2}}{\underline{Z}_{A.2.H}} = \frac{209578.15 \cdot e^{0i}}{917.11 + j791.66} = \\
 &= (130.95 - j113.03) A;
 \end{aligned}$$

$$I_{A.2.H} = 172.99 A.$$

Постоянная распространения волн электромагнитного поля:

$$\gamma_n = 0.00009214186 - j0.000045349.$$

Здесь напряжение и ток в линии А, на расстоянии  $y$  от конца линии определится так (14):

$$\begin{aligned}
 \dot{U}_{AnH} &= 1.25 \cdot \dot{I}_{A.2} \cdot \underline{Z}_A \cdot e^{\gamma_{1n}y} + \\
 &+ 0.25 \cdot \dot{I}_{A.2} \cdot \underline{Z}_A \cdot e^{-\gamma_{1n}y} = (323262.58 - j4546.31) B;
 \end{aligned}$$

$$U_{AnH} = 323294.55;$$

$$\begin{aligned}
 \dot{I}_{AnH} &= 1.25 \cdot \dot{I}_{A.2} \cdot e^{\gamma_{1n}y} - 0.25 \cdot \dot{I}_{A.2} \cdot e^{-\gamma_{1n}y} = \\
 &= (203.43 + j186.39) A;
 \end{aligned}$$

$$I_{AnH} = 275.91 A.$$

Величина активной мощности нагрузки фазы А определится из начальных условий:

$$P_{A.2.H} = \text{Re} \left\{ \dot{U}_{A.2} \cdot \dot{I}_{A.2.H}^* \right\} =$$

$$= 209578.15 \cdot 130.95 = 27443700.59 \text{ Вт}. \quad (15)$$

Активная мощность источника питания фазы А, при условии  $y = l$ , определится так:

$$P_{AnH} = \text{Re} \left\{ \dot{U}_{AnH} \cdot \dot{I}_{AnH}^* \right\} =$$

$$= 323262.58 \cdot 203.43 = 65760913.73 \text{ Вт}.$$

Коэффициент полезного действия линейного провода  $A$  рассматриваемой несогласованной длинной трехпроводной линии определится как отношение активных мощностей:

$$\eta_{\text{НЕСОГЛ.Лн}} = \frac{P_{A,2.H}}{P_{\text{AnH}}} \cdot 100\% =$$

$$= \frac{P_{A,2.H}}{P_{\text{AnH}}} \cdot 100\% = \frac{27443700.59}{65760913.73} \cdot 100\% = 41.73\%. \quad (16)$$

Таким образом (16), определен КПД рассматриваемой несогласованной длинной трехпроводной однородной ЛЭП.

Из формул (11) и (16) очевидно, что КПД согласованной линии больше, чем несогласованной:

$$\eta_{\text{СОГЛ.Лн}} > \eta_{\text{НЕСОГЛ.Лн}},$$

$$\eta_{\text{СОГЛ.Лн}} = 92.04\% > \eta_{\text{НЕСОГЛ.Лн}} = 41.73\%. \quad (17)$$

Количественное соотношение между КПД определится так:

$$N = \frac{\eta_{\text{СОГЛ.Лн}}}{\eta_{\text{НЕСОГЛ.Лн}}} = \frac{83.29}{19.17} = 2.21. \quad (18)$$

С учетом формулы (17), можно однозначно сказать, что КПД согласованной однородной трехфазной трехпроводной линии электропередачи напряжением 220 кВ, входящей в состав симметричной ЭЭС, окажется больше в сравнении с этой же длинной линией, но работающей на несогласованную нагрузку. Величина, определенная по формуле (18), позволяет сказать, что КПД согласованной рассматриваемой длинной линии окажется больше (в данном примере более чем в два раза), чем несогласованной.

#### Вывод

Согласование трехфазной трехпроводной высоковольтной линии электропередачи способствует существенному увеличению коэффициента полезного действия электрической передачи.

#### Литература

1. Козлов В.А., Большанин Г.А. Условия согласованного режима работы симметричного участка однородной трехпроводной высоковольтной линии электропередачи 220 кВ // Труды Братского государственного университета. Сер. Естественные и инженерные науки – развитию регионов Сибири. 2011. Т.2. С. 54-56.
2. Козлов В.А., Большанин Г.А. Согласованный режим работы однородной трехпроводной ЛЭП 220кВ и выше как средство улучшения электромагнитной обстановки // Наука сегодня: теоретические аспекты и практика применения: сб. науч. тр. Тамбов, 2011. Ч.2. С. 63-66.

3. Козлов В.А., Большанин Г.А. Условия согласования однородной трехпроводной высоковольтной линии электропередачи 10 кВ и выше с нагрузкой // Материалы VII международной научно-практической конференции. Прага: Образование и наука, 2011. Ч. 2. С. 86–90.

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

5. Большанин Г.А. Коррекция качества электрической энергии. Братск: БрГУ, 2007. 120 с.

6. Коробова Т.Г., Большанин Г.А. Определение постоянных интегрирования при оптимизации математической модели распространения электрической энергии по трехфазной ЛЭП // Труды Братского государственного университета. Сер. Естественные и инженерные науки – развитию регионов Сибири. 2007. Т. 2. С. 76-79.

7. Большанин Г.А., Большанин Л.Ю., Марьясова Е.Г. Влияние постоянных распространения электрической энергии на характер изменения фазного напряжения в трехпроводной ЛЭП // VII Международная научно-практическая конференция «Современные вопросы науки – XXI век». Тамбов, 2011. С.18-21.

8. Большанин Г.А. Особенности транспортировки электрической энергии по трехпроводным линиям электропередачи // Труды Братского государственного университета. Сер.: Естественные и инженерные науки – развитию регионов Сибири. 2010. Т. 2. С. 64-69.

9. Большанин Г.А., Большанин Л.Ю. Особенности распространения электрической энергии по линиям электропередачи: моногр.: Братск: Брат. ун-т, 2011. 64 с.

#### References

1. Kozlov V.A., Bol'shanin G.A. Conditions of the coordinated operating mode of a symmetric section of 220 kV uniform three-wire high-voltage power line // Trudy Bratskogo gosudarstvennogo universiteta: Ser.: Estestvennye i inzhenernye nauki – razvitiyu regionov Sibiri. 2011. T. 2. S. 54-56.
2. Kozlov V.A., Bol'shanin G.A. The coordinated operating mode of the homogeneous three-wire PL 220 kV and more as means of electromagnetic situation improvement // Nauka segodnya: teoreticheskiye aspekty i praktika primeneniya: sb. nauch. tr. Tambov, 2011. S. 63-66.
3. Kozlov V.A., Bol'shanin G.A. Conditions for coordination of a homogeneous three-wire high-voltage transmission line 10 kV and more with loading // Materialy VII mezhdunar. nauch.-praktich. konf. Praga, 2011. S. 86–90.
4. Bol'shanin G.A. Distribution of downgraded electric energy along the electrical power systems section: v 2 kn. Bratsk, 2006. 807 s.
5. Bol'shanin G.A. Correction of electric energy quality. Bratsk, 2007. 120 s.
6. Korobova T.G., Bol'shanin G. A. The determination of constants of integration while optimizing the mathematical model of electric energy distribution along three-phase high-voltage transmission line// Trudy Bratskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Estestvennye i inzhenernye nauki – razvitiyu regionov Sibiri. 2007. T. 2. S. 76-79.
7. Bol'shanin G.A., Bol'shanina L.Yu. Mar'yasova E.G. Influence of constants of distribution of electric energy on the nature of phase voltage changes in a three-wire PL // VII mezhdunar. nauch.-praktich. konf. «Sovremennyye voprosy nauki – XXI vek». Tambov, 2011. S.18-21.
8. Bol'shanin G.A. Features of electric energy transportation along the three-wire power transmission lines Trudy Bratskogo gosudarstvennogo universiteta: Ser.: Estestvennye i inzhenernye nauki – razvitiyu regionov Sibiri. 2010. S. 64-69.
9. Bol'shanin, G.A., Bol'shanina L. Yu. Specifics of electric energy distribution along power transmission lines. Bratsk, 2011. 64 s.