

2. Daleckij S.V. Forming of operational technical characteristics of air vehicles of the civil aviation. M.: Vozdushnyj transport, 2005. 416 p.
3. Druzhinin G.V. Analysis ergotekhnich of systems. M.: Jenergoatomizdat, 1984. 159 p.
4. Mjezon S., Cimmerman G. Electronic chains, signals and systems. M.: Mir, 1963. 622 p.
5. Reliability of technical systems: spravochnik / pod red. I.A.Ushakova. M.: Radio i svjaz', 1985. 604 p.
6. Pisarenko V.N. Technical operation and repair of aviation electric systems and flight and navigation complexes. Samara: Izd. SGAU, 2007. Ch. 1. 203 p.
7. Savenkov M.V. Management automation by technical operation of aviation systems. M.: Transport, 1992. 285 p.
8. A security status of flights in the civil aviation of the State Parties of the agreement on the civil aviation and about use of air space in 2015. M.: Mezhdunarodnyj aviacionnyj komitet (MAK), 2016. 114 p.
9. Technological systems. Technical requirements to reliability evaluation methods in performance parameters. GOST 27.204-83. M.: Gosstandart, 1988. 37 p.
10. Chokoj V.Z. Tools of nonparametric reliability of aviation engineering in case of the tsenzurir of data // CredeExperto: 2016. № 2 (9).
11. Chokoj V.Z. Instruments of adoption of diagnostic decisions on objects of aviation equipment in the conditions of uncertainty and risk // CredeExperto. 2016. № 2 (9). P. 45-46.
12. Chokoj V.Z. Use of dispersive distributions for an assessment of reliability of ergo-technical objects // Materialy IV nauchno-prakticheskoy konferencii prepodavatelej, nauchnyh rabotnikov i aspirantov: «Aktual'nye problemy i perspektivy razvitiya grazhdanskoj aviacii Rossii»: sb. tr. Irkutsk, 2014. P. 192-195.
13. Chokoj V.Z. Electronic Speller-TSM simulator for localization of equipment failures of the AirbusA320 planes // CredeExperto. 2016. № 1 (8). P. 26-28.
14. Chokoj V.Z. The electronic training-information Speller resource for training in aircraft maintenance Airbus // CredeExperto. 2016. № 2 (9). P. 12-16.
15. Chokoj V.Z., Kabykin A.V. Assessment of a keeping of aviation engineering // Sb. Nauchnye trudy adjunktov i soiskatelej: sb. st. Irkutsk, 2001. Vyp. 6. P. 72-76.
16. Chokoj V.Z., Kabykin A.V., Chokoj R.V. Assessment of frequency of scheduled maintenance in case of storage of aviation engineering // Nauchnye trudy adjunktov i soiskatelej: sb. st. Irkutsk, 2001. Vyp. 6. P. 77-79.
17. Chokoj V.Z., Chokoj R.V. Admissible period of the basis of the forecast of technical condition of objects of aviation engineering // Bulletin of Irkutsk State Technical University. 2011. № 1 (48). P. 128-132.
18. Chokoj V.Z., Chokoj R.V. Reliability of ergatic systems of the prevention of emergency situations on objects of the industry and transport // Bulletin of Irkutsk State Technical University. 2011. № 9 (56). P. 124-129.
19. The Airport CDM Implementation, April 2012, e-version /Airport CDM adverse conditions, EUROCONTROL, 359 p.

УДК 621.315.1

DOI: 10.18324/2077-5415-2016-3-135-142

Учет грозозащитного троса при моделировании передачи электрической энергии пониженного качества*

М.А. Шевченко^а, Г.А. Большанин^б

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

^аshevchenkomix@hotmail.com, ^бbolshaning@mail.ru

Статья получена 16.06.2016, принята 5.08.2016

Предлагаются схема замещения и математическая модель передачи электрической энергии пониженного качества по воздушной линии электропередачи (ЛЭП) трехпроводного исполнения с грозозащитным тросом. Приведенная в статье схема замещения учитывает наличие грозозащитного троса, описывает его связь с токоведущими частями ЛЭП и землей. Продольные параметры исследуемой ЛЭП на схеме замещения представлены погонными активными сопротивлениями линейных проводов и грозозащитного троса и их погонными собственными индуктивностями. Поперечные параметры анализируемого участка ЛЭП иллюстрируют электромагнитные связи между линейными проводами, а также между линейными проводами и поверхностью земли. Математическая модель участка линии электропередачи построена на основании схемы замещения с использованием законов Кирхгофа и состоит из четырнадцати уравнений. С ее помощью возможно провести анализ распределения напряжения и тока вдоль исследуемого участка высоковольтной ЛЭП. Показано, что при анализе передачи энергии пониженного качества ЛЭП даже сравнительно небольшой протяженности следует принимать за линии с распределенными параметрами, а схема замещения такой линии должна быть полнофазной. При математическом моделировании передачи электрической энергии такой линии следует учитывать все электромагнитные связи между токоведущими частями ЛЭП.

Ключевые слова: воздушная линия; грозозащитный трос; электрическая энергия пониженного качества; полнофазная схема замещения; гармонические составляющие.

Overhead ground-wire cable taken into account while modeling the transmission of lower quality electrical power

M.A. Shevchenko^a, G.A. Bolshinin^b

Bratsk State University; 40, Makarenko St., Bratsk, Russia

^ashevchenkomix@hotmail.com, ^bbolshaning@mail.ru

Received 16.06.2016, accepted 5.08.2016

Equivalent circuit and mathematical model have been proposed for transmitting the lower quality electrical power by means of three-wire overhead power transmission lines with overhead ground-wire cable. Equivalent circuit given in article takes the overhead ground-wire cable into account and describes its connection with current-carrying parts of power transmission lines and the ground. Longitudinal parameters of the power transmission line have been presented on the equivalent circuit by means of running active resistances of linear wires and overhead ground-wire cable and by means of their own running inductance. Transverse parameters of the analyzed site of the power transmission line illustrate electromagnetic couplings between linear wires as well as between linear wires and the ground. Mathematical model of a section of the power transmission line has been constructed on the basis of the equivalent circuit and by using Kirchhoff's laws. The model consists of fourteen equations and helps to analyze the distribution of voltage and current along the investigated area of a high voltage power transmission line. It has been shown that when analyzing the transmission of lower quality electrical power, the power transmission lines, even of comparatively small extension, should be regarded as power transmission lines with distributed parameters. The equivalent circuit for such lines should be full-phased. When modelling mathematically the transmission of electric power, all electromagnetic couplings between current-carrying parts of transmission lines should be taken into account.

Key words: overhead power transmission line; overhead ground-wire cable; lower quality electrical power; full-phase equivalent circuit; harmonic components.

Введение

Передача электрической энергии от электростанции к потребителям — одна из важнейших задач энергетики. Электрическая энергия передается преимущественно по воздушным линиям электропередачи (ЛЭП) переменного тока. Необходимость передачи электроэнергии на расстояние обусловлена тем, что электрическая энергия вырабатывается крупными электростанциями с мощными агрегатами, а потребляется сравнительно маломощными электроприемниками, распределенными на значительной территории.

Электрическая энергия, транспортируемая по современным линиям электропередачи, отличается высокими уровнями несимметрии и несинусоидальности напряжений и токов, особенно в промышленных регионах страны. Передачу электрической энергии в условиях ее пониженного качества целесообразно рассматривать на основании математической модели этого процесса.

Математическая модель передачи напряжения и тока строится на основании полнофазной электрической схемы замещения, в данном случае, трехпроводной линии электропередачи, участвующей в передаче электрической энергии на частоте n -й гармонической составляющей. Эта схема замещения отражает все происходящие в ЛЭП процессы преобразования энергии, а также позволяет определить продольные и поперечные параметры исследуемой трехфазной трехпроводной ЛЭП с учетом гроззащитного троса.

Современное состояние вопроса. Наблюдающаяся в последнее время тенденция к концентрации мощностей — как вырабатываемых, так и потребляемых — объясняется тем, что с их ростом снижаются относительные затраты на сооружение электростанций и уменьшается стоимость вырабатываемой электроэнер-

гии. Размещение мощных электростанций производится с учетом целого ряда факторов, таких, например, как наличие энергоресурсов, их виды, запасы и возможности транспортировки, природные условия, возможность работы в составе единой энергосистемы и т. п. Часто такие электростанции оказываются существенно удаленными от основных центров потребления электроэнергии. От эффективности передачи электроэнергии на расстояние зависит работа единых электроэнергетических систем, охватывающих обширные территории.

Для воздушных ЛЭП переменного тока можно приближенно считать, что максимальная передаваемая мощность примерно пропорциональна квадрату напряжения, а стоимость сооружения ЛЭП пропорциональна напряжению. Поэтому в развитии электропередач наблюдается тенденция к увеличению напряжения как главному средству повышения пропускной способности ЛЭП. Предельные значения напряжений ЛЭП, связанные с возможными перенапряжениями, ограничиваются изоляцией ЛЭП и электрической прочностью воздуха. Повышение пропускной способности ЛЭП переменного тока возможно и путем усовершенствования конструкции линии, а также посредством включения различных компенсирующих устройств [1].

Передача электрической энергии высокого напряжения на большие расстояния обычно выполняется по воздушным ЛЭП трехпроводного исполнения. Воздушные линии напряжением 110–220 кВ для уменьшения затрат на передачу электрической энергии преимущественно выполняются двухцепными. Межсистемные воздушные линии (ВЛ) более высокого напряжения выполняются, как правило, на одноцепных опорах с горизонтальным расположением проводов. Эксплуатация таких ЛЭП предполагает использование гроззащитного троса.

Грозозащитный трос выполняет функции тросового молниеотвода и представляет собой заземленный провод, служащий для защиты проводов воздушной ЛЭП от прямых ударов молнии. Крепление тросов на всех опорах ВЛ 220–750 кВ должно быть выполнено при помощи изоляторов, шунтированных искровым промежутком (ИП) размером не менее 40 мм.

На каждом анкерном участке длиной до 10 км тросы должны быть заземлены в одной точке путем устройства специальных переемычек на анкерной опоре. При большей длине анкерных пролетов количество точек заземления в пролете выбирается таким, чтобы при наибольшем значении продольной электродвижущей силы, наводимой в тросе при коротком замыкании (КЗ) на ВЛ, не происходил пробой ИП [2].

Крепление троса через изолятор на линиях напряжением 220 кВ и выше выполняют так, что в каждом анкерном пролете грозозащитный трос глухо заземляют только в одной точке, и участки тросов в смежных анкерных пролетах не соединяют между собой. Поэтому наводимая в тросах в результате электромагнитной индукции ЭДС не приводит к прохождению электрического тока, и потери мощности и энергии в линии заметно снижаются [3].

Для передачи электроэнергии на напряжении 220 кВ применяются опоры П220-1 башенного типа (рис. 1а). Опоры для воздушных линий напряжением 500 кВ и выше изготавливаются в одноцепном исполнении с горизонтальным расположением проводов (рис. 1б), тип опор ПБ. Такие опоры изготавливаются П-образными, с тросовыми растяжками. В верхней части опор закрепляется грозозащитный трос, защищающий линию от прямого удара молнии, а в некоторых случаях служащий для обеспечения высокочастотной связи.

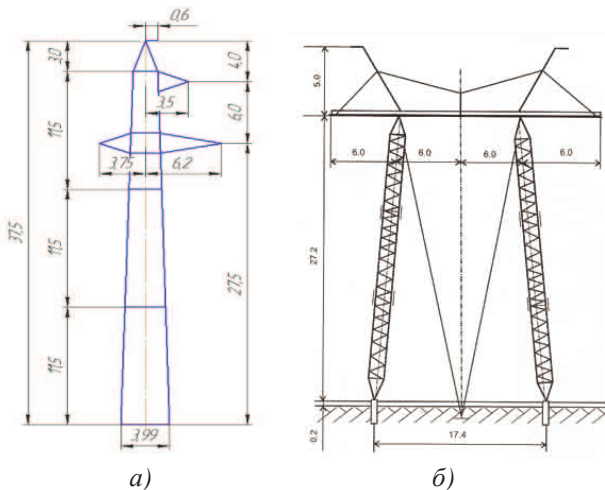


Рис. 1. Опоры для воздушных линий напряжением 500 кВ и выше

В настоящее время предпочтение получили порталные опоры П-образного типа свободностоящие и с тросовыми оттяжками. Портальная конструкция опоры позволяет обеспечить большие воздушные промежутки между проводами, грозозащитными тросами и телом опоры, требующиеся при напряжениях выше 220 кВ [4].

Линейные провода ЛЭП напряжением 35 кВ и выше защищаются от прямого удара молнии грозозащитным

тросом, закрепляемым в верхней части опоры. Грозозащитные тросы являются элементами ЛЭП, аналогичными по своей конструкции многопроволочным монометаллическим проводам. Тросы выполняют из стальных оцинкованных проволок. Номинальные сечения тросов соответствуют шкале номинальных сечений проводов. Минимальное сечение грозозащитного троса — 35 мм² [5].

Сталь обладает большим сопротивлением и высокой механической прочностью. Ее удельное сопротивление $\rho = 0,13 \text{ Ом}\cdot\text{мм}^2/\text{м}$, а предельное сопротивление на разрыв — 540 МПа [4]. Поэтому в системах электроснабжения сталь используется, в частности, для увеличения механической прочности алюминиевых проводов, изготовления опор и грозозащитных тросов воздушных линий электропередачи.

Электрическая энергия, транспортируемая по современным линиям электропередачи, отличается высокими уровнями несимметрии и несинусоидальности напряжений и токов, особенно в промышленных регионах страны. Показатели качества этой энергии нередко превышают нормативные величины, установленные действующим государственным стандартом [6]. Такую энергию называют электрической энергией пониженного качества.

Основной причиной несинусоидальности напряжений и токов являются потребители электрической энергии с нелинейной вольтамперной характеристикой [7; 8]. Достаточно остро проблема несинусоидальности наблюдается в регионах, имеющих мощную металлургическую и химическую промышленность (Иркутская и Кемеровская области, Красноярский край). Повышенные уровни высокочастотных гармонических составляющих напряжения и тока приводят к повышению потерь электрической энергии, сокращению срока службы электротехнического оборудования, нарушению нормального функционирования устройств релейной защиты и автоматики и т. д. [9; 11].

Процесс транспортировки электрической энергии, а именно ее основных характеристик, каковыми являются напряжение и ток, целесообразно рассматривать на основании математической модели этого процесса.

Математическая модель передачи напряжения и тока строится на основании электрической схемы замещения в данном случае трехпроводной линии электропередачи, участвующей в передаче электрической энергии на частоте n -й гармонической составляющей. Эта схема замещения должна отражать все происходящие в ЛЭП процессы преобразования энергии. Причем гармоническая составляющая может быть любой: высокочастотной (высшие гармоники), низкочастотной или даже дробной (интергармоники) [13–18].

Чем больше частота гармонической составляющей напряжения и тока, тем меньше протяженность ЛЭП, где проявляется так называемый «эффект длинных линий». Он заключается в нелинейном распределении напряжения и тока вдоль анализируемой линии электропередачи. На частоте 3-й гармонической составляющей он начинает проявляться уже на участке ЛЭП протяженностью 70 км, на частоте 5-й гармонической составляющей — на участке ЛЭП протяженностью 30

км, на 9-й — на участке ЛЭП протяженностью 10 км и т. д. [9]. Из этого следует, что для гарантированного учета нелинейности распределения напряжения и тока вдоль анализируемой ЛЭП линию даже сравнительно небольшой протяженности следует принять за линию с распределенными параметрами.

Линиями с распределенными параметрами называют линии, в которых напряжение и ток изменяются при переходе от одного места (сечения) к другому. Схему замещения такой линии при идеальном качестве передаваемой по ней электрической энергии целесообразно строить в однопроводном исполнении для однородного участка элементарной протяженности.

Методика расчета синусоидальных напряжений и токов на симметричных участках трехпроводных ЛЭП, входящих в состав симметричных электроэнергетических систем, широко известна и успешно применяется в инженерной практике. За линии с распределенными параметрами при идеальном качестве электрической энергии принимают ЛЭП протяженностью более 200–300 км [11]. Обычно это ЛЭП напряжением 220 кВ и выше. Расчет величин напряжений и токов по участкам таких линий электропередачи выполняется с помощью телеграфных уравнений [19].

Законы распределения напряжений и токов по трехпроводным линиям электропередачи в условиях пониженного качества электрической энергии представлены в [9]. Здесь учтена электромагнитная связь между линейными проводами, а также между линейными проводами и заземленными конструктивными элементами ЛЭП. К сожалению, в законах распределения токов и напряжений по трехпроводным линиям не учитывается воздействие грозозащитного троса на показатели передаваемых напряжений и токов по трехпроводным ЛЭП. Для объективного расчета передаваемой электроэнергии по ЛЭП нужно учитывать и электромагнитную связь между линейными проводами и грозозащитным тросом, а также между грозозащитным тросом и заземленными конструктивными элементами ЛЭП.

Полнофазная схема замещения и математическая модель трехфазной трехпроводной ЛЭП. Математическая модель однородного участка линии электропередачи строится на основании электрической схемы замещения этого участка с использованием законов Кирхгофа.

Электрическая энергия пониженного качества, как правило, характеризуется заметными уровнями несимметрии, несинусоидальности, отклонения и колебания напряжений и токов. Передача электрической энергии по одному линейному проводу в таких условиях вовсе не аналогична передаче энергии по другим линейным проводам [8]. Кроме того, влияние линейных проводов и грозозащитного троса друг на друга в этом случае нельзя игнорировать.

Высказанные доводы оказываются достаточными для того, чтобы трехпроводную ЛЭП, входящую в состав современной электроэнергетической системы, заместить полнофазной схемой замещения. Поскольку не перегруженная линия электропередачи обладает явно выраженной нелинейностью и, в принципе, может считаться линейной системой, здесь вполне применим

принцип суперпозиции. Это означает, что рассмотрению может подлежать распределение электрической энергии по трехпроводной ЛЭП на частоте каждой гармонической составляющей отдельно.

Схема замещения однородного участка трехпроводной ЛЭП элементарной протяженности на частоте n -й гармонической составляющей приведена на рис. 2 [9; 12; 20–29].

Продольные параметры трехпроводной ЛЭП на этой схеме замещения представлены погонными активными сопротивлениями линейных проводов и грозозащитного троса $R_{0An}, R_{0Bn}, R_{0Cn}, R_{0Dn}$ и их погонными собственными индуктивностями этих проводов $L_{0An}, L_{0Bn}, L_{0Cn}, L_{0Dn}$. Собственные емкости линейных проводов настолько малы, что не оказывают заметного влияния на распределение по ним электрической энергии, а потому учитывать ее здесь не имеет смысла.

Поперечные параметры анализируемого участка ЛЭП (рис. 2) иллюстрируют электромагнитные связи между линейными проводами, а также между линейными проводами и поверхностью земли.

Электромагнитные связи между проводами здесь представлены погонными активными проводимостями $G_{0ABn}, G_{0BCn}, G_{0CAn}, G_{0ADn}, G_{0DZn}, G_{0CDn}$ и погонными емкостями $C_{0ABn}, C_{0BCn}, C_{0CAN}, C_{0ADn}, C_{0BDn}, C_{0CDn}$.

Электромагнитные связи между линейными проводами, грозозащитным тросом и поверхностью земли здесь представлены погонными активными проводимостями $G_{0A0n}, G_{0B0n}, G_{0C0n}, G_{0D0n}$ и погонными емкостями $C_{0A0n}, C_{0B0n}, C_{0C0n}, C_{0D0n}$.

Погонные взаимные индуктивности между токоведущими частями анализируемого участка ЛЭП на рис. 3 указаны символами $M_{0ABn}, M_{0BCn}, M_{0CAN}, M_{0DAn}$.

Входные величины фазных напряжений на рис. 3 указаны символами u_{An}, u_{Bn}, u_{Cn} , а линейных напряжений — $u_{ABn}, u_{BCn}, u_{CAN}$. Также на грозозащитном тросе наблюдается напряжение между фазными проводами и грозозащитным тросом — $u_{ADn}, u_{BZn}, u_{CZn}$. Между грозозащитным тросом и поверхностью земли из-за конечной величины сопротивления заземлителя грозозащитного троса имеет место напряжение u_{Dn} .

Выходные величины этих напряжений прирастают на величину, равную произведению скорости изменения соответствующих напряжений и протяженности анализируемого участка ЛЭП. На рис. 2 они указаны в виде:

$$\begin{aligned} & u_{An} + \frac{\partial u_{An}}{\partial l} dl; \quad u_{Bn} + \frac{\partial u_{Bn}}{\partial l} dl; \quad u_{Cn} + \frac{\partial u_{Cn}}{\partial l} dl; \\ & u_{Dn} + \frac{\partial u_{Dn}}{\partial l} dl; \quad u_{ABn} + \frac{\partial u_{ABn}}{\partial l} dl; \quad u_{BCn} + \frac{\partial u_{BCn}}{\partial l} dl; \\ & u_{CAN} + \frac{\partial u_{CAN}}{\partial l} dl; \quad u_{ADn} + \frac{\partial u_{ADn}}{\partial l} dl; \quad u_{BDn} + \frac{\partial u_{BDn}}{\partial l} dl; \end{aligned}$$

$$u_{CDn} + \frac{\partial u_{CDn}}{\partial l} dl .$$

Входные величины линейных токов на рис. 3, а также ток в грозозащитном проводе указаны символами $i_{An}, i_{Bn}, i_{Cn}, i_{Dn}$. Их выходные величины прирастают на величину, равную произведению скорости изменения соответствующих токов и протяженности анализируемого участка ЛЭП:

$$i_{An} + \frac{\partial i_{An}}{\partial l} dl ; i_{Bn} + \frac{\partial i_{Bn}}{\partial l} dl ; i_{Cn} + \frac{\partial i_{Cn}}{\partial l} dl ; \\ i_{Dn} + \frac{\partial i_{Dn}}{\partial l} dl .$$

Символами $di_{An}, di_{Bn}, di_{Cn}, di_{Dn}$ и $di_{ABn}, di_{BCn}, di_{CAn}, di_{ADn}, di_{BDn}, di_{CDn}$ на рис. 2 иллюстрируются так называемые «токи утечки» по электромагнитным связям между конструктивными частями анализируемого участка ЛЭП.

Из теории электротехники известно, что токи и напряжения принято считать квазивекторными величинами. На рис. 2 указаны их условно положительные направления.

На основании изображенной на рис. 2 электрической схемы замещения анализируемого участка ЛЭП с использованием законов Кирхгофа строится математическая модель этого участка, содержащая четырнадцать уравнений:

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

$$i_{Bn} = di_{An} + di_{BCn} - di_{ABn} + di_{BDn} + i_{Bn} + \frac{\partial i_{Bn}}{\partial l} dl ; \quad (2)$$

$$i_{Cn} = di_{Cn} + di_{CAn} - di_{BCn} + di_{CDn} + i_{Cn} + \frac{\partial i_{Cn}}{\partial l} dl ; \quad (3)$$

$$i_{Dn} = di_{ADn} + di_{BDn} + di_{CDn} - di_{Dn} + i_{Dn} - \frac{\partial i_{Dn}}{\partial l} dl ; \quad (4)$$

$$u_{An} = i_{An}R_{0An}dl + L_{0An}dl \frac{\partial i_{An}}{\partial t} + M_{0ABn}dl \frac{\partial i_{Bn}}{\partial t} + M_{0CAn}dl \frac{\partial i_{Cn}}{\partial t} - \\ - M_{0ADn}dl \frac{\partial i_{Dn}}{\partial t} + u_{An} + \frac{\partial u_{An}}{\partial l} dl ; \quad (5)$$

$$u_{Bn} = i_{Bn}R_{0Bn}dl + L_{0Bn}dl \frac{\partial i_{An}}{\partial t} + M_{0ABn}dl \frac{\partial i_{Bn}}{\partial t} + M_{0BCn}dl \frac{\partial i_{Cn}}{\partial t} - \\ - M_{0BDn}dl \frac{\partial i_{Dn}}{\partial t} + u_{Bn} + \frac{\partial u_{Bn}}{\partial l} dl ; \quad (6)$$

$$u_{Cn} = i_{Cn}R_{0Cn}dl + L_{0Cn}dl \frac{\partial i_{Cn}}{\partial t} + M_{0CAn}dl \frac{\partial i_{Bn}}{\partial t} + M_{0BCn}dl \frac{\partial i_{Cn}}{\partial t} - \\ - M_{0CDn}dl \frac{\partial i_{Dn}}{\partial t} + u_{Cn} + \frac{\partial u_{Cn}}{\partial l} dl ; \quad (7)$$

$$u_{Dn} = -i_{Dn}R_{0Dn}dl - L_{0Dn}dl \frac{\partial i_{Cn}}{\partial t} + M_{0ADn}dl \frac{\partial i_{Bn}}{\partial t} + M_{0BDn}dl \frac{\partial i_{Cn}}{\partial t} + \\ + M_{0CDn}dl \frac{\partial i_{Cn}}{\partial t} + u_{Dn} + \frac{\partial u_{Dn}}{\partial l} dl ; \quad (8)$$

$$u_{ADn} = i_{An}R_{0An}dl + L_{0An}dl \frac{\partial i_{An}}{\partial t} + M_{0ABn}dl \frac{\partial i_{Bn}}{\partial t} + M_{0CAn}dl \frac{\partial i_{Cn}}{\partial t} - \\ - M_{0ADn}dl \frac{\partial i_{Dn}}{\partial t} + i_{Dn}R_{0Dn}dl + L_{0Dn}dl \frac{\partial i_{Dn}}{\partial t} - M_{0ADn}dl \frac{\partial i_{An}}{\partial t} - \\ - M_{0BDn}dl \frac{\partial i_{Bn}}{\partial t} - M_{0CDn}dl \frac{\partial i_{Cn}}{\partial t} + u_{ADn} + \frac{\partial u_{ADn}}{\partial l} dl ; \quad (9)$$

$$u_{BZn} = i_{Bn}R_{0Bn}dl + L_{0Bn}dl \frac{\partial i_{Bn}}{\partial t} + M_{0ABn}dl \frac{\partial i_{An}}{\partial t} + M_{0BCn}dl \frac{\partial i_{Cn}}{\partial t} - \\ - M_{0BDn}dl \frac{\partial i_{Dn}}{\partial t} + i_{Dn}R_{0Dn}dl + L_{0Dn}dl \frac{\partial i_{Dn}}{\partial t} - M_{0ADn}dl \frac{\partial i_{An}}{\partial t} - \\ - M_{0BDn}dl \frac{\partial i_{Bn}}{\partial t} - M_{0CDn}dl \frac{\partial i_{Cn}}{\partial t} + u_{BZn} + \frac{\partial u_{BZn}}{\partial l} dl ; \quad (10)$$

$$u_{CDn} = i_{Cn}R_{0Cn}dl + L_{0Cn}dl \frac{\partial i_{Cn}}{\partial t} + M_{0CAn}dl \frac{\partial i_{An}}{\partial t} + M_{0BCn}dl \frac{\partial i_{Cn}}{\partial t} - \\ - M_{0CDn}dl \frac{\partial i_{Dn}}{\partial t} + i_{Dn}R_{0Dn}dl + L_{0Dn}dl \frac{\partial i_{Dn}}{\partial t} - M_{0ADn}dl \frac{\partial i_{An}}{\partial t} - \\ - M_{0BDn}dl \frac{\partial i_{Bn}}{\partial t} - M_{0CDn}dl \frac{\partial i_{Cn}}{\partial t} + u_{CDn} + \frac{\partial u_{CDn}}{\partial l} dl ; \quad (11)$$

$$u_{ABn} = i_{An}R_{0An}dl + L_{0An}dl \frac{\partial i_{An}}{\partial t} + M_{0ABn}dl \frac{\partial i_{Bn}}{\partial t} + M_{0CAn}dl \frac{\partial i_{Cn}}{\partial t} - \\ - M_{0ADn}dl \frac{\partial i_{Dn}}{\partial t} - i_{Bn}R_{0Bn}dl - L_{0Bn}dl \frac{\partial i_{Bn}}{\partial t} - M_{0ABn}dl \frac{\partial i_{An}}{\partial t} - \\ - M_{0BCn}dl \frac{\partial i_{Cn}}{\partial t} + M_{0BDn}dl \frac{\partial i_{Cn}}{\partial t} + u_{ABn} + \frac{\partial u_{ABn}}{\partial l} dl ; \quad (12)$$

$$u_{BCn} = i_{Bn}R_{0Bn}dl + L_{0Bn}dl \frac{\partial i_{Bn}}{\partial t} + M_{0ABn}dl \frac{\partial i_{An}}{\partial t} + M_{0BCn}dl \frac{\partial i_{Cn}}{\partial t} - \\ - M_{0BDn}dl \frac{\partial i_{Dn}}{\partial t} - i_{Cn}R_{0Cn}dl - L_{0Cn}dl \frac{\partial i_{Cn}}{\partial t} - M_{0CAn}dl \frac{\partial i_{An}}{\partial t} - \\ - M_{0BCn}dl \frac{\partial i_{Bn}}{\partial t} + M_{0CDn}dl \frac{\partial i_{Dn}}{\partial t} + u_{BCn} + \frac{\partial u_{BCn}}{\partial l} dl ; \quad (13)$$

$$u_{CAn} = i_{Cn}R_{0Cn}dl + L_{0Cn}dl \frac{\partial i_{Cn}}{\partial t} + M_{0CAn}dl \frac{\partial i_{An}}{\partial t} + \\ + M_{0BCn}dl \frac{\partial i_{Bn}}{\partial t} - M_{0CDn}dl \frac{\partial i_{Dn}}{\partial t} - i_{An}R_{0An}dl - \\ - L_{0An}dl \frac{\partial i_{An}}{\partial t} - M_{0ABn}dl \frac{\partial i_{Bn}}{\partial t} - M_{0CAn}dl \frac{\partial i_{Cn}}{\partial t} + \\ + M_{0ADn}dl \frac{\partial i_{Dn}}{\partial t} + u_{ACn} + \frac{\partial u_{ACn}}{\partial l} dl . \quad (14)$$

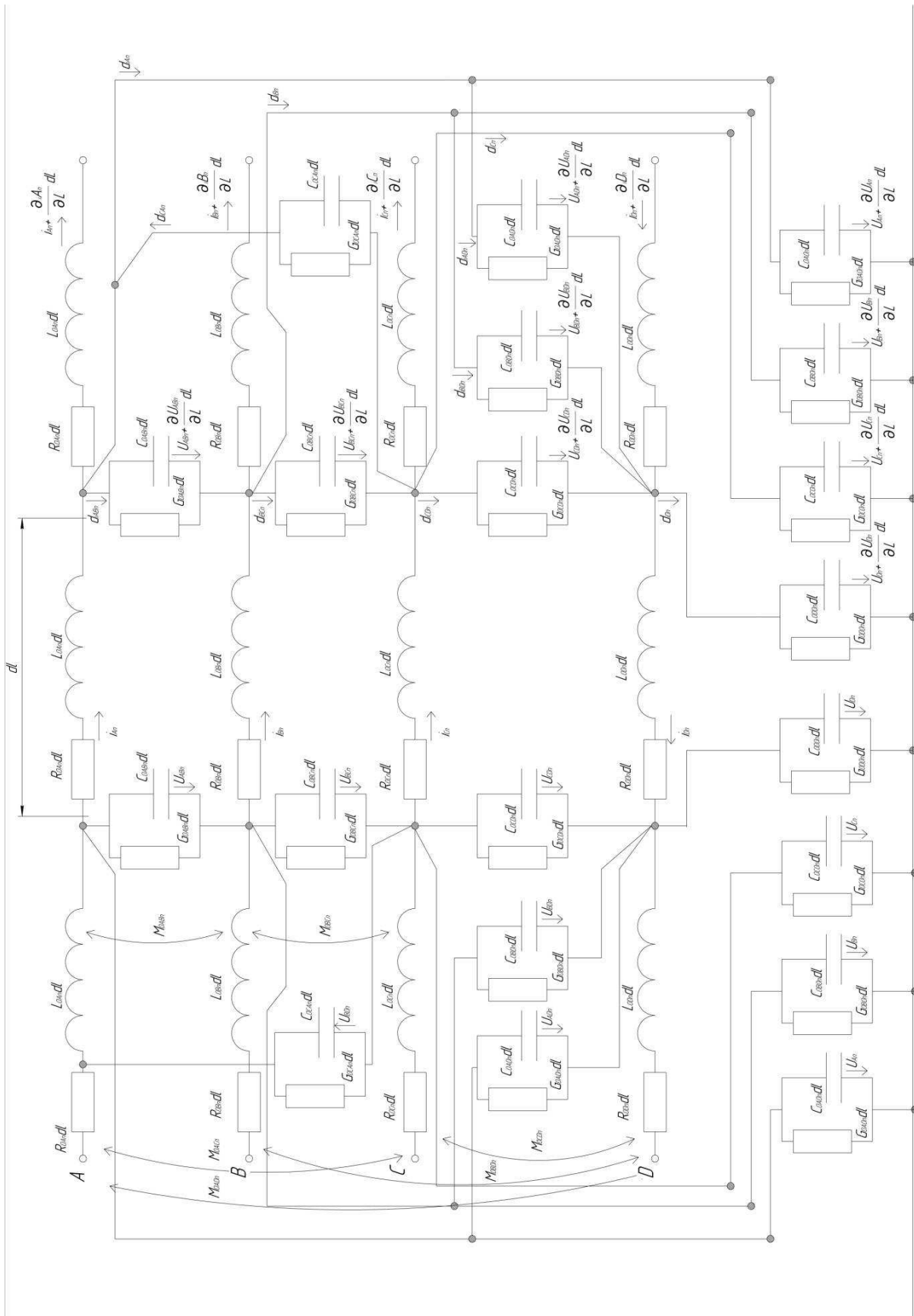


Рис. 2. Электрическая расчетная схема замещения элементарного участка трехфазной троспроводной ЛЭП с грозозащитным тросом

Уравнения (1)–(14) представляют собой математическую модель трехфазной трехпроводной линии с грозозащитным тросом, с помощью которой возможно провести анализ распределения напряжения и тока вдоль исследуемого участка высоковольтной ЛЭП. При этом объект математического моделирования должен быть представлен в виде линии с распределенными параметрами с учетом грозозащитного троса и электромагнитных связей между всеми токоведущими частями исследуемого участка ЛЭП.

Поскольку все реальные ЛЭП не однородны, для объективного анализа распределения электрической энергии пониженного качества целесообразно разбить исследуемую воздушную линию на однородные участки. Причем границы однородности могут оказаться настолько явно выражены, что не могут быть игнорированы. Это узлы включения разнообразных электрических нагрузок или сопутствующей линейной арматуры, транспозиция проводов, рельеф местности, изменение сечения или химического состава линейных проводов и т. п. В таком случае ЛЭП целесообразно представлять в виде совокупности однородных участков или группы многополюсников.

Заключение

Исследуемую ЛЭП при анализе режимов при передаче по ней электрической энергии пониженного качества следует принимать за линию с распределенными параметрами.

При анализе распределения электрической энергии пониженного качества по трехфазной ЛЭП необходимо учитывать все электромагнитные связи, в том числе электромагнитные связи между линейными проводами, проводами и грозозащитным тросом.

Объективный анализ передачи электрической энергии пониженного качества возможен только при полнофазной схеме замещения соответствующей линии электропередачи. Лишь на основании полнофазной схемы замещения возможно построение объективной математической модели передачи электрической энергии пониженного качества по этой ЛЭП.

Полнофазная схема замещения позволит определить продольные и поперечные параметры исследуемой трехфазной трехпроводной ЛЭП с грозозащитным тросом в условиях пониженного качества электроэнергии.

На основании математического моделирования возможно формирование законов распределения напряжения и токов вдоль неоднородного участка трехпроводной ЛЭП с грозозащитным тросом в условиях пониженного качества электроэнергии.

Литература

1. Zhenya L. Ultra-High Voltage AC/DC Grids // Academic Press. 2015. P. 758.
2. Правила устройства электроустановок. 7-е изд. СПб.:ДЕАН, 2014. 1168 с.
3. Ефимов Б.В., Халилов Ф.Х., Новикова А.Н. Актуальные проблемы защиты высоковольтного оборудования подстанций от грозových волн, набегающих с воздушных линий. // Труды Кольского научного центра РАН. 2012. № 1. Том 4. С. 7-25.

4. Лебедева Ю.В. Выбор концепций развития воздушных линий электропередачи 110-220 кВ, подверженных экстремальным метеорологическим воздействиям: автореф. дис. на соиск. учен. степ. канд. техн. наук. (05.09.03) / Саратовский государственный технический университет. Саратов 2011. 10 с.

5. Лагутенков А. Г. Грозозащита и заземление. // Известия тульского государственного университета. Технические науки. 2014. №8. С.113-116.

6. ГОСТ 32144-2013. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. М.: Стандартинформ, 2014. 16 с.

7. Большанин, Г.А., Большанина Л. Ю. Особенности распространения электромагнитного поля по линиям электропередачи в условиях пониженного качества электрической энергии. // Системы. Методы. Технологии. 2009. № 2. С. 56-59.

8. Большанин Г.А., Большанина Л.Ю. Особенности распространения электрической энергии по линии электропередачи. Братск: Изд-во БрГУ, 2011. 64 с.

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

10. Большанин Г.А. Передача электрической энергии по ЛЭП одно-, двух- и трехпроводного исполнений. Братск: БрГУ, 2015. 330 с.

11. Maffucci A., Miano D. Transmission Lines and Lumped Circuits // Fundamentals and Applications, 30th January. 2001. P. 479.

12. Большанин Г.А. Распределение электрической энергии пониженного качества по однородному трехфазному трехпроводному участку воздушной ЛЭП // Научн. вестн. НГТУ. 2009. № 4 (37). С. 135-144.

13. Большанин Г.А., Охлопков, И.Н., Видерников С.И., Безносос Е.А., Манахов А.В., Зимарев С.А., Алферов М.А. Способ количественной оценки субгармонических и дробных высших гармонических периодических изменяющихся величин: пат. 2210154 Рос. Федерации. № 96112228; заявл. 14.06.96; опубл. 20.11.98, Бюл. № 2. С. 12.

14. Большанин Г.А., Макаренко М.В. Способ автоматизированного активного контроля показателей качества электрической энергии: пат. 2248038 Рос. Федерации. № 2003116562; заявл. 03.06.03; опубл. 10.03.05, Бюл. № 1. С. 14.

15. Большанин Г.А. Способ активного контроля уровня несинусоидальности напряжения и тока: пат. 2262174 Рос. Федерации. № 2003116557; заявл. 03.06.03; опубл. 10.10. 05, Бюл. № 1. С. 10.

16. Жежеленко И.В. Высшие гармоники в системах электроснабжения промпредприятий. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Энергоатомиздат, 1984. 160 с.

17. Большанин Г.А. Автоматизированная система активного контроля показателей качества электрической энергии. Братск: БрГУ, 2006. 152 с.

18. Большанин Г.А. Контроль показателей качества электрической энергии. LAP LAMBERT Academic Publishing GmbH & Co. KG Heinrich-Böcking-Str. 6-8, 66121 Saarbrücken, Germany. Saarbrücken, 2012. 154 с.

19. Рыжов Ю.П. Дальние электропередачи сверхвысокого напряжения. М.: Изд. дом МЭИ, 2007. 488 с.

20. Большанин Г.А., Большанина Л.Ю., Марьясова Е.Г. Передача электрической энергии по однородному участку трехфазной ЛЭП трехпроводного исполнения, входящему в состав симметричной ЭЭС // Вестн. Иркут. гос. техн. ун-та. 2011. № 10 (57). С. 179-186.

21. 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. 64-68.

22. Litrán S., Thomas J., Revuelta P. Active Power Line Conditioners // Design, Simulation and Implementation for Improving Power Quality, Academic Press. 2015. P. 436.

23. Большанин, Г.А., Большанина Л.Ю. Распределение электрической энергии пониженного качества по однородному участку линии электропередачи четырёхпроводного исполнения. // Системы. Методы. Технологии. 2009. № 3. С. 65-69.

24. Zhenya Liu. Global Energy Interconnection // Academic Press. 2016. P. 396.

25. Большанин, Г.А., Большанина Л.Ю., Марьясова Е.Г. Особенности распространения электрической энергии по трехпроводной линии электропередачи // Современные технологии, Системный анализ. Моделирование. 2010. № 4 (28). С. 197-204.

26. Большанин Г.А., Большанина Л.Ю. Особенности распространения электрической энергии по линиям электропередачи в условиях пониженного качества электрической энергии // Системы. Методы. Технологии. 2009. № 2. С. 56-59.

27. Большанина Г.А., Большанина, Л.Ю., Марьясова Е.Г. Расчет параметров электрической энергии трехфазной трехпроводной линии электропередачи в программе «LEP3» // Труды Братского государственного университета. Сер. Естественные и инженерные науки – развитию регионов Сибири. 2010. Т. 2. С. 69-73.

28. Большанина Г.А., Большанина, Л.Ю., Марьясова Е.Г. Особенности прогнозирования напряжений и токов на симметричном однородном участке трехфазной ЛЭП трехпроводного исполнения // Актуальные проблемы образования и науки: сб. науч. тр. по материалам междунар. научно-практ. конф., 30 дек. 2013 г. Тамбов, 2014. С. 19-23.

29. Nasser Tleis. Power Systems Modelling and Fault Analysis // Theory and Practice, 30th November. 2007. P. 656.

References

1. Zhenya L. Ultra-High Voltage AC/DC Grids // Academic Press. 2015. P. 758.

2. Rules for Electrical Installation. 7-e izd. SPb.:DEAN, 2014. 1168 p.

3. Efimov B.V., Halilov F.H., Novikova A. Actual problems of the protection of high-voltage substation equipment from lightning waves lapping with overhead lines. // Proceedings of the Kola Science Centre R.A.S. № 1, 2012. P. 7-25.

4. Lebedeva Y. Selection of air-lines of 110-220 kV transmission concepts, prone to extreme weather influences: the thesis abstract on competition of a scientific degree of candidate of technical sciences (05.09.03) // Saratov State Technical University. Saratov, 2011. P. 10.

5. Lagutenko AG Lightning protection and grounding. // Proceedings of the Tula State University. Technical science. № 8, 2014. P. 113-116.

6. GOST 32144-2013. Electric Energy. Compatibility of technical equipment. Power quality limits in public electrical systems. M.: Standartinform, 2014. 16 p.

7. Bol'shanin, G.A., Bol'shanina L. J. Features of distribution of the electromagnetic field on the power lines in a lower quality of electrical energy. // Systems. Methods. Technologies, 2009. № 2. P. 56-59.

8. Bol'shanin G.A., Bol'shanina L.Yu. Distribution of electric energy through the power line. Bratsk: Izd-vo BrGU, 2011. 64 p.

9. Bol'shanin G.A. Distribution of electricity on sites of electric power systems: v 2 kn. Bratsk BrGU, 2006. Kn. 1. 807 p.

10. Bol'shanin G.A. Electric power transmission on power lines one-, two- and three-wire versions. Bratsk: BrGU, 2015. 330 p.

11. Maffucci A., Miano D. Transmission Lines and Lumped Circuits // Fundamentals and Applications, 30th January. 2001. P. 479.

12. Bol'shanin G.A. The distribution of electric low-quality energy for a uniform three-phase two-wire portion of the overhead line // Scientific Bulletin of NSTU. 2009. № 4 (37). P. 135-144.

13. Bol'shanin G.A., Okhlopov, I.N., Vidernikov S.I., Beznosov E.A., Manakhov A.V., Zimarev S.A., Alferov M.A. A method of quantifying subharmonic and higher fractional harmonic periodic varying quantities: pat. 2210154 Ros. Federatsii. № 96112228; zayavl. 14.06.96; opubl. 20.11.98, Byul. № 2. P. 12.

14. Bol'shanin G.A., Makarenko M.V. The method of automated active monitoring of indicators of quality of electric energy: pat. 2248038 Ros. Federatsii. № 2003116562; zayavl. 03.06.03; opubl. 10.03.05, Byul. № 1. P. 14.

15. Bol'shanin G.A. Method of active control level of non-sinusoidal voltage and current: pat. 2262174 Ros. Federatsii. № 2003116557; zayavl. 03.06.03; opubl. 10.10.05, Byul. № 1. P. 10.

16. Zhezhenko I.V. Higher harmonics in the power supply systems of industrial enterprises. 2-e izd., pererab. i dop. M.: Energoatomizdat, 1984. 160 p.

17. Bol'shanin G.A. Automated system of active monitoring of indicators of quality of electric energy. Bratsk: BrGU, 2006. 152 p.

18. Bol'shanin G.A. Monitoring of indicators of quality of electric energy. LAP LAMBERT Academic Publishing GmbH & Co. KG Heinrich-Böcking-Str. 6-8, 66121 Saarbrücken, Germany. Saarbrücken, 2012. 154 p.

19. Ryzhov Yu.P. Long-distance transmission extra high voltage. M.: Izd. dom MEI, 2007. 488 p.

20. Bol'shanin G.A., Bol'shanina L.Yu., Mar'jasova E.G. Electric power transmission on a homogeneous area of three-phase three-wire transmission line performance, part of the symmetrical EPS // Vestn. Irkut. gos. tekhn. un-ta. 2011. № 10 (57). P. 179-186.

21. Bol'shanin G.A. Features transporting electricity on the two-wire power lines // Trudy Bratskogo gosudarstvennogo universiteta. Ser. Estestvennye i inzhenernye nauki - razvitiyu regionov Sibiri. 2010. T. 2. P. 64-68.

22. Litrán S., Thomas J., Revuelta P. Active Power Line Conditioners // Design, Simulation and Implementation for Improving Power Quality, Academic Press. 2015. P. 436.

23. Bol'shanin, G.A., Bol'shanina L.Ju., Mar'jasova E.G. The distribution of electric low-quality energy for a homogeneous area four-wire transmission line performance. // Sistemy. Metody. Tehnologii. 2009. № 3. P. 65-69.

24. Zhenya Liu. Global Energy Interconnection // Academic Press. 2016. P. 396.

25. Bol'shanin, G.A., Bol'shanina L.Yu., Mar'jasova E.G. Features of distribution of electric energy through a two-wire transmission line // Modern technologies. System analysis. Modeling. 2010. № 4 (28). P. 197-204.

26. Bol'shanin G.A., Bol'shanina L.Yu. Features of distribution of electric energy through power lines in a lower quality of electrical energy // Sistemy. Metody. Tekhnologii. 2009. № 2. P. 56-59.

27. Bol'shanina G.A., Bol'shanina, L.Yu., Mar'jasova E.G. The calculation of the parameters of the three-phase electric power transmission line in the three-wire «LEP3» program // Trudy Bratskogo gosudarstvennogo universiteta. Ser. Estestvennye i inzhenernye nauki - razvitiyu regionov Sibiri. 2010. T. 2. P. 69-73.

28. Bol'shanina G.A., Bol'shanina, L.Yu., Mar'jasova E.G. Features voltages and currents prediction in a symmetrical three-phase power lines homogeneous section of three-wire performance // Aktual'nye problemy obrazovaniya i nauki: sb. nauch. tr. po materialam mezhdunar. nauchno-prakt. konf., 30 dek. 2013 g. Tambov, 2014. P. 19-23.

29. Nasser Tleis. Power Systems Modelling and Fault Analysis // Theory and Practice, 30th November. 2007. P. 656.