

DOI: 10.47026/1810-1909-2022-3-88-94

УДК 621.311.1-027-044.952

ББК 3279-051.1-017

А.Г. СЕМЕНОВА, А.О. ФЁДОРОВ,
В.С. ПЕТРОВ, А.М. ДМИТРЕНКО

ОСОБЕННОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ УСТРОЙСТВА ВОЛНОВОГО ОПРЕДЕЛЕНИЯ МЕСТА ПОВРЕЖДЕНИЯ НА ДВУХЦЕПНОЙ ЛИНИИ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ

Ключевые слова: модальное преобразование, двухцепная линия электропередачи, волновое определение места повреждения.

Точность и устойчивость функционирования устройства одностороннего волнового определения места повреждения напрямую зависит от правильности построения модели электрической сети аварийного режима. В режиме земляных коротких замыканий эта задача усложняется ввиду необходимости учета составляющих воздушных и земляного волновых каналов линии электропередачи в модели электрической сети аварийного режима. Ее неправильное решение ведет к снижению точности определения моментов возникновения рабочих волн, что, в свою очередь, увеличивает погрешность расчёта расстояния до места повреждения. С целью правильного построения модели электрической сети аварийного режима и точного выявления моментов возникновения рабочих волн в устройствах волнового определения места повреждения выполняется фазно-модальное преобразование. Таким преобразованием для одноцепной линии электропередачи может быть одно из инвариантных преобразований Кларк, Карренбауэра или Ведпола. Классическое представление этих преобразований не может быть непосредственно применено для электрических величин двухцепной линии электропередачи, состоящей из шести проводов и, соответственно, имеющей шесть независимых волновых каналов. Цель настоящей статьи – иллюстрация применения модального преобразования для разделения электрических величин двухцепной линии электропередачи.

Возникновение земляного короткого замыкания (КЗ) на воздушной линии электропередачи (ЛЭП) приводит к появлению в фазных напряжениях и токах составляющих двух воздушных и одного земляного волновых каналов [6, 12]. Поскольку эти составляющие имеют разную скорость распространения вдоль ЛЭП, то в месте установки устройства волнового определения места повреждения (ОМП) они возникают в разное время [2, 7, 8]. Для удобства анализа упомянутых составляющих и повышения точности фиксации моментов возникновения рабочих волн в модели электрической сети аварийного режима устройство волнового ОМП выполняет модальное преобразование фазных величин [9, 14]. Причем использование сигнала волнового канала с меньшим затуханием при выборе рабочих волн позволяет повысить точность и надежность определения места повреждения.

Для перехода от фазных величин к трём волновым каналам на одноцепной ЛЭП традиционно используют одно из инвариантных преобразований Кларк [4, 11, 17], Карренбауэра [13, 15] или Ведпола [15, 20]. Классическое представление этих преобразований не может быть непосредственно применено

для электрических величин двухцепной ЛЭП, состоящей из шести проводов и, соответственно, имеющей шесть независимых волновых каналов.

Цель настоящей статьи – иллюстрация применения модального преобразования для разделения электрических величин двухцепной ЛЭП.

Теоретические основы модального преобразования. Телеграфные уравнения, описывающие распространение волн в ЛЭП, содержащей n проводов (рисунок), в операторной форме имеют вид [1, 3]

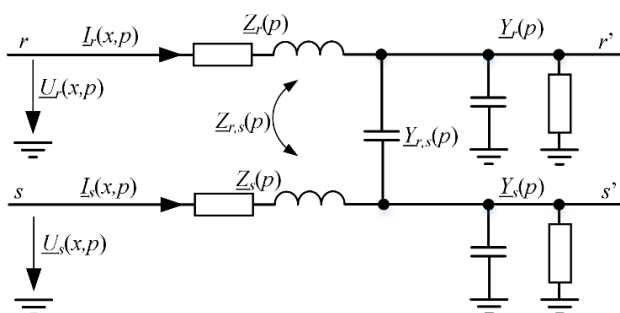
$$\begin{cases} -\frac{\partial \underline{\mathbf{U}}}{\partial x} = \underline{\mathbf{Z}} \underline{\mathbf{I}}, \\ -\frac{\partial \underline{\mathbf{I}}}{\partial x} = \underline{\mathbf{Y}} \underline{\mathbf{U}}, \end{cases} \quad (1)$$

где $\underline{\mathbf{U}} = \begin{bmatrix} U_1(x, p) \\ \dots \\ U_n(x, p) \end{bmatrix}$ – вектор фазных комплексных значений напряжений на

проводах многопроводной ЛЭП; $\underline{\mathbf{I}} = \begin{bmatrix} I_1(x, p) \\ \dots \\ I_n(x, p) \end{bmatrix}$ – вектор фазных комплексных

значений токов в проводах многопроводной ЛЭП; $p = a + j\omega$ – оператор Лапласа; $\underline{\mathbf{Z}}$ и $\underline{\mathbf{Y}}$ – матрицы удельных сопротивлений и проводимостей многопроводной ЛЭП:

$$\underline{\mathbf{Z}} = \begin{bmatrix} Z_{11}(p) & \dots & Z_{n,1}(p) \\ \dots & \dots & \dots \\ Z_{1,n}(p) & \dots & Z_{nn}(p) \end{bmatrix}, \underline{\mathbf{Y}} = \begin{bmatrix} Y_{11}(p) & \dots & Y_{n,1}(p) \\ \dots & \dots & \dots \\ Y_{1,n}(p) & \dots & Y_{nn}(p) \end{bmatrix}. \quad (2)$$



Бесконечно малый элемент двух фаз r и s многопроводной ЛЭП

Продифференцировав обе части уравнений (1) и (2), получим дифференциальные уравнения с одной неизвестной:

$$\begin{cases} \frac{\partial^2 \underline{\mathbf{U}}}{\partial x^2} = \underline{\mathbf{Z}} \underline{\mathbf{Y}} \underline{\mathbf{U}}, \\ \frac{\partial^2 \underline{\mathbf{I}}}{\partial x^2} = \underline{\mathbf{Y}} \underline{\mathbf{Z}} \underline{\mathbf{I}}. \end{cases} \quad (3)$$

Решение дифференциальных уравнений (3) является сложной задачей, поскольку требует учета взаимной связи между проводами ЛЭП [5, 10, 16, 18, 19]. Чтобы преодолеть эту сложность, удобно рассматривать распространение волн по так называемым волновым каналам, в каждом из которых волны распространяются независимо от других каналов.

Напряжения \underline{U}_m и токи \underline{I}_m волновых каналов определяются с использованием свойств матричных преобразований подобия из уравнений

$$\underline{U} = \mathbf{T}_u \underline{U}_m, \quad (4)$$

$$\underline{I} = \mathbf{T}_i \underline{I}_m, \quad (5)$$

где \mathbf{T}_u и \mathbf{T}_i – матрицы связи величин волновых каналов с фазными величинами.

Подставляя (4) и (5) в (3), получим систему дифференциальных уравнений волновых каналов:

$$\begin{cases} \frac{\partial^2 \underline{U}_m}{\partial x^2} = \mathbf{T}_u^{-1} \underline{\mathbf{Z}} \underline{\mathbf{Y}} \mathbf{T}_u \underline{U}_m, \\ \frac{\partial^2 \underline{I}_m}{\partial x^2} = \mathbf{T}_i^{-1} \underline{\mathbf{Y}} \underline{\mathbf{Z}} \mathbf{T}_i \underline{I}_m, \end{cases} \quad (6)$$

где \mathbf{T}_u и \mathbf{T}_i выбираются таким образом, чтобы произведения $\mathbf{T}_u^{-1} \underline{\mathbf{Z}} \underline{\mathbf{Y}} \mathbf{T}_u$ и $\mathbf{T}_i^{-1} \underline{\mathbf{Y}} \underline{\mathbf{Z}} \mathbf{T}_i$ были диагональными матрицами. Это исключает взаимное влияния волновых каналов в системе дифференциальных уравнений (6).

Как известно из теоремы о приведении матрицы к диагональному виду [3], произведения $\mathbf{T}_u^{-1} \underline{\mathbf{Z}} \underline{\mathbf{Y}} \mathbf{T}_u$ и $\mathbf{T}_i^{-1} \underline{\mathbf{Y}} \underline{\mathbf{Z}} \mathbf{T}_i$ будут являться диагональными матрицами только в том случае, если матрицы \mathbf{T}_u и \mathbf{T}_i состоят из собственных векторов матриц $\underline{\mathbf{Z}} \underline{\mathbf{Y}}$ и $\underline{\mathbf{Y}} \underline{\mathbf{Z}}$, соответственно. Таким образом, переход к волновым каналам сводится к задаче определения собственных векторов матриц $\underline{\mathbf{Z}} \underline{\mathbf{Y}}$ и $\underline{\mathbf{Y}} \underline{\mathbf{Z}}$.

Симметричная двухцепная ЛЭП. Ввиду того, что на ЛЭП осуществляется транспозиция проводов, при выводе матрицы модального преобразования с использованием его теоретических основ достаточно представления ЛЭП симметричной и полностью транспонированной. Кроме того, влияние грозотросов можно не учитывать, поскольку они не оказывают существенного влияния на волновой процесс [18]. Поэтому для первой цепи из (3)

$$\underline{Z}_1(p) = \underline{Z}_2(p) = \underline{Z}_3(p) = \underline{Z}_L(p),$$

$$\underline{Z}_{1,2}(p) = \underline{Z}_{2,1}(p) = \underline{Z}_{2,3}(p) = \underline{Z}_{3,2}(p) = \underline{Z}_{3,1}(p) = \underline{Z}_{1,3}(p) = \underline{Z}_{pp}(p),$$

$$\underline{Y}_1(p) = \underline{Y}_2(p) = \underline{Y}_3(p) = \underline{Y}_L(p),$$

$$\underline{Y}_{1,2}(p) = \underline{Y}_{2,1}(p) = \underline{Y}_{2,3}(p) = \underline{Y}_{3,2}(p) = \underline{Y}_{3,1}(p) = \underline{Y}_{1,3}(p) = \underline{Y}_{pp}(p)$$

и для второй цепи

$$\underline{Z}_4(p) = \underline{Z}_5(p) = \underline{Z}_6(p) = \underline{Z}_L(p),$$

$$\underline{Z}_{4,5}(p) = \underline{Z}_{5,4}(p) = \underline{Z}_{5,6}(p) = \underline{Z}_{6,5}(p) = \underline{Z}_{6,4}(p) = \underline{Z}_{4,6}(p) = \underline{Z}_{pp}(p),$$

$$Y_4(p) = Y_5(p) = Y_6(p) = Y_L(p),$$

$$Y_{4,5}(p) = Y_{5,4}(p) = Y_{5,6}(p) = Y_{6,5}(p) = Y_{6,4}(p) = Y_{4,6}(p) = Y_{pp}(p),$$

а также

$$Z_{n,m}(p) = Z_{m,n}(p) = Z_s(p),$$

$$Y_{n,m}(p) = Y_{m,n}(p) = Y_s(p),$$

где $n = \overline{1-3}$, $m = \overline{4-6}$ – индексы фаз первой и второй цепи.

Тогда произведение симметричных матриц удельных параметров двух-цепной ЛЭП \underline{Z} и \underline{Y} будет также симметричная матрица:

$$\underline{Z}\underline{Y} = \underline{Y}\underline{Z} = \begin{bmatrix} \underline{N}(p) & \underline{M}(p) \\ \underline{M}(p) & \underline{N}(p) \end{bmatrix}, \quad (7)$$

где

$$\underline{N}(p) = \begin{bmatrix} \underline{e}(p) & \underline{h}(p) & \underline{h}(p) \\ \underline{h}(p) & \underline{e}(p) & \underline{h}(p) \\ \underline{h}(p) & \underline{h}(p) & \underline{e}(p) \end{bmatrix},$$

$$\underline{M}(p) = \begin{bmatrix} \underline{g}(p) & \underline{g}(p) & \underline{g}(p) \\ \underline{g}(p) & \underline{g}(p) & \underline{g}(p) \\ \underline{g}(p) & \underline{g}(p) & \underline{g}(p) \end{bmatrix},$$

$$\underline{e}(p) = Z_L(p)Y_L(p) + 2Z_{pp}(p)Y_{pp}(p) + 3Z_s(p)Y_s(p),$$

$$\underline{h}(p) = Z_{pp}(p)Y_{pp}(p) + Z_L(p)Y_{pp}(p) + Z_{pp}(p)Y_z(p) + 3Z_s(p)Y_s(p),$$

$$\underline{g}(p) = 2Z_{pp}(p)Y_s(p) + Z_L(p)Y_s(p) + 2Z_s(p)Y_{pp}(p) + Z_s(p)Y_z(p).$$

Для того, чтобы найти собственные векторы матриц $\underline{Z}\underline{Y}$ и $\underline{Y}\underline{Z}$, необходимо найти собственные значения λ этих матриц:

$$|\underline{Z}\underline{Y} - \lambda \mathbf{1}| = 0, \quad (8)$$

где $\mathbf{1}$ – квадратная единичная матрица, размерность которой равна размерности матрицы $\underline{Z}\underline{Y}$.

Из (8) с учетом (7) определяются собственные значения матриц $\underline{Z}\underline{Y}$ и $\underline{Y}\underline{Z}$:

$$\begin{cases} \lambda_1 = \lambda_2 = \lambda_3 = \lambda_4 = \underline{e}(p) - \underline{h}(p), \\ \lambda_5 = \underline{e}(p) + 2\underline{h}(p) - 3\underline{g}(p), \\ \lambda_0 = \underline{e}(p) + 2\underline{h}(p) + 3\underline{g}(p). \end{cases} \quad (9)$$

С учетом (9) собственные векторы \mathbf{X}_i матриц $\underline{Z}\underline{Y}$ и $\underline{Y}\underline{Z}$ могут быть найдены из

$$|\underline{Z}\underline{Y} - \lambda_i \mathbf{1}| \mathbf{X}_i = 0. \quad (10)$$

Матричное уравнение (10) имеет бесчисленное множество инвариантных решений. Так, одним из решений является матрица

$$\mathbf{T}_i = \mathbf{T}_u = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & -\frac{1}{2} & \frac{1}{2} \\ -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} & 0 & 0 & -\frac{1}{2} & \frac{1}{2} \\ -\frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} & 0 & 0 & -\frac{1}{2} & \frac{1}{2} \\ 0 & 0 & 1 & 0 & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \\ 0 & 0 & -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \\ 0 & 0 & -\frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix}. \quad (11)$$

Тогда из (4) и (5) с учетом (11)

$$\begin{bmatrix} w_1^I \\ w_2^I \\ w_1^{II} \\ w_2^{II} \\ w_0^{I-II} \\ w_0 \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \sqrt{3} & -\sqrt{3} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 2 & -1 & -1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \sqrt{3} & -\sqrt{3} \\ -1 & -1 & -1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} w_A^I \\ w_B^I \\ w_C^I \\ w_A^{II} \\ w_B^{II} \\ w_C^{II} \end{bmatrix}, \quad (12)$$

где $w_1^I, w_2^I, w_1^{II}, w_2^{II}$ – составляющие воздушных волновых каналов первой и второй цепей ЛЭП; w_0^{I-II}, w_0 – составляющие земляных волновых каналов; $w_A^I, w_B^I, w_C^I, w_A^{II}, w_B^{II}, w_C^{II}$ – волны в фазах первой и второй цепей; $\vartheta = \overline{A, B, C}$.

Из анализа (12) следует, что:

1. На волны, распространяющиеся в воздушных волновых каналах одной цепи, не влияют волны, распространяющиеся в фазах другой цепи. В связи с чем в устройстве ОМП, контролирующем одну цепь, может быть применено традиционное преобразование Кларк или же линейно связанные с ним преобразования Карренбауэра и Веппола.

2. Если в устройстве волнового ОМП требуется контролировать волны земляных волновых каналов, то для этого необходимо измерять фазные величины обеих цепей. При этом один земляной волновой канал будет формироваться как разность сумм фазных величин каждой цепи, а другой – как их сумма.

Литература / References

1. *Alekseev V., Petrov V. and Naumov V.* Invariance of Modal Transformations of Electrical Values in Traveling Wave Fault Locator. 2020 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM), Sochi, Russia, 2020, pp. 1-5, DOI: 10.1109/ICIEAM48468.2020.9111912.
2. *Ametani A., Nagaoka N., Baba Y. and Ohno T.* Power System Transients – Theory and Applications. Boca Raton, FL, USA: CRC Press, 2013.
3. *Bickford J.P., Mulinet N.* Overvoltage in electrical networks, translated from English by V.V. Bazutkin. Moscow, Energoizdat, 1981.

4. *Clarke I. E.* Circuit Analysis of Alternating Current Power Systems, vol. 1. New York, Wiley, 1943.
5. *Das J. C.* Understanding Symmetrical Components For Power System Modeling. New Jersey, Wiley, 2017, 89 p.
6. *Dong X.Z., Bo Z.Q., Redfern M.A. and Fang J.* The Application of the Wavelet Transform of Travelling Wave Phenomena for Transient Based Protection, IPST2003, International Conference on Power System Transients, Hong Kong, November 2003.
7. *Dong X.Z., Kong W. and Cui T.* Fault Classification and Faulted-Phase Selection Based on the Initial Current Traveling Wave, in IEEE Transactions on Power Delivery, 2009, vol. 24, no. 2, pp. 552–559.
8. *Fedorov A., Petrov V., Afanasieva O., Zlobina I.* Limitations of Traveling Wave Fault Location. 2020 Ural Smart Energy Conference (USEC), Ekaterinburg, 2020, pp. 21–25. DOI: 10.1109/USEC50097.2020.9281153.
9. *Fedorov A., Petrov V., Naumov V. and Hristoforov V.* Theory of single-end traveling wave fault location. In: 2021 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM), Sochi, Russia, 2021, pp. 68–74. DOI: 10.1109/ICIEAM51226.2021.9446310.
10. *Hase Y.* Handbook of Power System Engineering, John Wiley & Sons Ltd, 2007.
11. *Hung K. L., Huan P. V.* Performance Evaluation of Traveling Wave Fault Locator for a 220kV Hoa Khanh-Thanh My Transmission Line, 2018.
12. *Junior F.M. d. M., Lopes F.V.* Mathematical Study on Traveling Waves Phenomena on Three Phase Transmission Lines – Part I: Fault-Launched Waves, in IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 37, no. 2, pp. 1151–1160, April 2022. DOI: 10.1109/TPWRD.2021.3077769.
13. *Lei A., Dong X. and Shi S.* A Novel Method to Identify the Travelling Wave Reflected from the Fault Point or the Remote-end Bus. IEEE Power & Energy Society General Meeting, 2015.
14. *Magalhaes F. M., Lopes F. V.* Mathematical Study on Traveling Waves Phenomena on Three Phase Transmission Lines – Part II: Reflection and Refraction Matrices, in IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 37, no. 2, pp. 1161–1170, April 2022. DOI: 10.1109/TPWRD.2021.3077730.
15. *Mohan M. S., Izykowski J.J., Rosolowski E.* Fault Location on Power Networks. Springer, 2010, 432 p.
16. *Prado A.J., Filho J.P., Tavares M.C., Portela C.M.* Mode domain multiphase transmission line model-use in transient studies, in IEEE Transactions on Power Delivery, 1999, vol. 14, no. 4, pp. 1533–1544. DOI: 10.1109/61.796251.
17. *Schweitzer E.O., Guzmán A, Mynam M.V., Skendzic V., Kasztenny B.* Locating Faults by the Traveling Waves They Launch, 2014.
18. *Shalyt G.M.* Fault location in electrical networks, Énergoatomizdat. Moscow, 1982, 312 p.
19. *Tavares M.C., Pissolato J. and Portela C.M.* Mode domain multiphase transmission line model-use in transient studies. In: IEEE Transactions on Power Delivery, 1999, vol. 14, no. 4, pp. 1533–1544. DOI: 10.1109/61.796251.
20. *Wedepohl L. M.* Application of matrix methods to the solution of travelling-wave phenomena in polyphaser systems. Proc. IEE, 1963, 110, no. 12, pp. 2200–2212.

СЕМЕНОВА АНАСТАСИЯ ГЕННАДЬЕВНА – инженер департамента автоматизации энергосистем, ООО НПП «ЭКРА», Россия, Чебоксары (semenova_ag@ekra.ru; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0211-5341>).

ФЁДОРОВ АЛЕКСЕЙ ОЛЕГОВИЧ – аспирант кафедры теоретических основ электротехники и релейной защиты и автоматики, Чувашский государственный университет; инженер-исследователь 3-й категории департамента автоматизации энергосистем, ООО НПП «ЭКРА», Россия, Чебоксары (fedorov_a@ekra.ru; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8863-5956>).

ПЕТРОВ ВЛАДИМИР СЕРГЕЕВИЧ – кандидат технических наук, доцент кафедры теоретических основ электротехники и релейной защиты и автоматики, Чувашский государственный университет, Россия, Чебоксары (petrov_vs@ekra.ru; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3667-1442>).

ДМИТРЕНКО АЛЕКСАНДР МИХАЙЛОВИЧ – доктор технических наук, профессор кафедры электроснабжения и интеллектуальных электроэнергетических систем имени А.А. Фёдорова, Чувашский государственный университет, Россия, Чебоксары (dmitrenko_am@mail.ru; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4380-3482>).

Anastasia G. SEMENOVA, Aleksey O. FEDOROV,
Vladimir S. PETROV, Aleksandr M. DMITRENKO

APPLICATION FEATURES OF A TRAVELING WAVE FAULT LOCATOR
ON A DOUBLE-CIRCUIT POWER LINE

Key words: modal transform, double-circuit power line, traveling wave fault location.

The accuracy and stability of a single-end traveling wave fault locator directly depend on the correct construction of electrical network model in fault regime. In the regime of ground short circuits this task is complicated by the need to take into account the components of aerial and ground modes of power line in the electrical network of fault regime model. Its incorrect solution leads to a decrease in the accuracy of determining the arrival time of the used traveling wave, which, in turn, decreases the accuracy in calculating the distance to the fault. In order to correctly construct the electrical network of fault regime model and accurately estimate the used traveling wave arrival times in locators, phase-modal transformation is performed. Such a transformation for single-circuit power line can be one of the invariant Clarke, Karrenbauer or Wedepohl transformations. The classical representation of these transformations cannot be directly applied to the electrical values of a double-circuit power line, consisting of six wires and, accordingly, having six independent modes. The purpose of the article is to illustrate the application of the modal transform to divide the electrical values of a double-circuit power line into independent components.

ANASTASIA G. SEMENOVA – Engineer, Power Systems Automation Department, EKRA Ltd, Russia, Cheboksary (semenova_ag@ekra.ru; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0211-5341>).

ALEKSEY O. FEDOROV – Post-Graduate Student of Theoretical Foundations of Electrical Engineering and Relay Protection and Automation Department, Chuvash State University; Research Engineer, Power Systems Automation Department, EKRA Ltd, Russia, Cheboksary (fedorov_a@ekra.ru; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8863-5956>).

VLADIMIR S. PETROV – Candidate of Technical Sciences, Assistant Professor, Department of Theoretical Foundations of Electrical Engineering and Relay Protection and Automation, Chuvash State University, Russia, Cheboksary (petrov_vs@ekra.ru; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3667-1442>).

ALEKSANDR M. DMITRENKO – Doctor of Technical Sciences, Professor, Department of Power Supply and Intelligent Electric Power Systems named after A.A. Fedorov, Chuvash State University, Russia, Cheboksary (dmitrenko_am@mail.ru; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4380-3482>).

Формат цитирования: Семенова А.Г., Фёдоров А.О., Петров В.С., Дмитренко А.М. Особенности применения устройства волнового определения места повреждения на двухцепной линии электропередачи // Вестник Чувашского университета. – 2022. – № 3. – С. 88–94. DOI: 10.47026/1810-1909-2022-3-88-94.