

Инновационный электротехнический кластер Чувашской Республики  
Академия электротехнических наук Чувашской Республики  
Чувашский государственный университет имени И.Н. Ульянова  
Подкомитет Б5 «Релейная защита и автоматика»  
Российского национального комитета СИГРЭ

# **СОВРЕМЕННЫЕ ТЕНДЕНЦИИ РАЗВИТИЯ ЦИФРОВЫХ СИСТЕМ РЕЛЕЙНОЙ ЗАЩИТЫ И АВТОМАТИКИ**

**Материалы  
научно-технической конференции  
молодых специалистов форума  
«РЕЛАВЭКСПО-2021»**

Чебоксары  
2021

УДК621.311-52+621.316.925](063)  
ББК27-051я43  
С23

*Редакционная коллегия:*

**В.И. Антонов**, доктор технических наук, гл. редактор  
**Г.С. Нудельман**, кандидат технических наук, зам. гл. редактора  
**В.Г. Ковалев**, кандидат технических наук  
**А.В. Жуков**, кандидат технических наук  
**А.В. Мокеев**, доктор технических наук  
**В.И. Нагай**, доктор технических наук  
**В.А. Шуин**, доктор технических наук  
**В.А. Наумов**, кандидат технических наук  
**В.С. Петров**, кандидат технических наук

**С23**      **Современные** тенденции развития цифровых систем релейной защиты и автоматики: материалы науч.-техн. конф. молодых специалистов форума «РЕЛАВЭКСПО-2021». – Чебоксары: Изд-во Чуваш. ун-та, 2021. – 226 с.

ISBN 978-5-7677-3248-7

Представлены доклады научно-технической конференции молодых специалистов, состоявшейся в рамках форума РЕЛАВЭКСПО-2021. В сборнике приведены результаты актуальных научных исследований в области совершенствования алгоритмов релейной защиты и автоматики энергосистем, технологий цифровой обработки сигналов, векторных измерений и методов искусственного интеллекта в релейной защите. Рассматриваются научные и практические вопросы кибербезопасности цифровых устройств релейной защиты, её работа в сетях с распределенной генерацией, моделирование электроэнергетических систем для целей релейной защиты и автоматики, надежности релейной автоматики.

Для преподавателей, аспирантов, магистрантов, студентов старших курсов энергетических специальностей вузов, инженерно-технического персонала предприятий и энергосистем.

ISBN 978-5-7677-3248-7

УДК 621.311-52+621.316.925](063)  
ББК 27-051я43  
© Издательство  
Чувашского университета, 2021

# ЦИФРОВАЯ ОБРАБОТКА СИГНАЛОВ В СИСТЕМАХ РЕЛЕЙНОЙ ЗАЩИТЫ И АВТОМАТИКИ

## МОДАЛЬНЫЕ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ В УСТРОЙСТВЕ ВОЛНОВОГО ОПРЕДЕЛЕНИЯ МЕСТА ПОВРЕЖДЕНИЯ

**Фёдоров Алексей О.**, ООО НПП «ЭКРА», г. Чебоксары, Россия. E-mail: fedorov\_a@ekra.ru.

**Петров В.С.**, Чувашский государственный университет им. И.Н. Ульянова, ООО НПП «ЭКРА», г. Чебоксары, Россия. E-mail: petrov\_vs@ekra.ru.

**Алексеев В. С.**, ООО НПП «ЭКРА», г. Чебоксары, Россия. E-mail: alekseev\_vs@ekra.ru.

***Аннотация:** Для повышения точности устройств волнового ОМП в них используется модальное преобразование входных величин тока и напряжения. В настоящей статье показано, что преобразования Кларк, Карренбауэра и Ведпола, используемые в устройствах волнового ОМП, инвариантны. Следовательно, для локализации места повреждения может использоваться любое из них. Иллюстрируется применение преобразований Кларк, Карренбауэра и Ведпола при установке волнового ОМП на двухцепных ЛЭП.*

***Ключевые слова:** модальное преобразование, преобразование Кларк, преобразование Ведпола, преобразование Карренбауэра, одноцепная ЛЭП, двухцепная ЛЭП*

### **Введение**

Волны в фазах, образующиеся при возникновении КЗ на ЛЭП, состоят из составляющих двух воздушных и одного земляного волновых каналов [1]. Эти составляющие имеют разную скорость распространения и, следовательно, в месте установки устройства волнового определения места повреждения (ОМП) возникают в разное время. В результате чего фронты волн в фазах теряют выраженность, что приводит к снижению точности определения времени их возникновения и, следовательно, точности определения места повреждения. Для решения этой проблемы в устройствах волнового ОМП выполняется модальное преобразование фазных величин,

позволяющее выделить независимые составляющие волновых каналов [2]. Традиционно предполагают, что ЛЭП является симметричной, и используют модальное преобразование Кларк [3], [4], Карренбауэра [5] или Ведпола [6].

Цель настоящего доклада – иллюстрация инвариантности преобразований Кларк, Карренбауэра и Ведпола, а также возможности их использования как при установке волнового ОМП на одноцепных, так и на двухцепных ЛЭП.

### ***Основная часть***

Для анализа волновых процессов в линии электропередачи применяются преобразования, позволяющие перейти от фазных величин к независимым волновым каналам:

$$\begin{bmatrix} w_1 \\ w_2 \\ w_0 \end{bmatrix} = \mathbf{T} \begin{bmatrix} w_A \\ w_B \\ w_C \end{bmatrix},$$

где  $w_\vartheta$  – волны в фазах,  $\vartheta = \overline{A, B, C}$ ;  $w_\gamma$  – составляющие в волновых каналах,  $\gamma = \overline{1, 2, 0}$ .

Известны матрицы преобразования:

Кларк

$$\mathbf{T}_C = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ 0 & \sqrt{3} & -\sqrt{3} \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix},$$

Карренбауэра

$$\mathbf{T}_K = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & -1 & 0 \\ 1 & 0 & -1 \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix},$$

и Ведпола

$$\mathbf{T}_W = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} -1 & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \\ 0 & -\frac{3}{2} & \frac{3}{2} \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}.$$

Матрица перехода от одного преобразования  $T_A$  к другому  $T_B$  может быть получена как:

$$T_{BA} = T_A T_B^{-1}.$$

Тогда матрица перехода от преобразования Ведпола к преобразованию Кларк [7]:

$$T_{WC} = \begin{bmatrix} -2 & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{2}{\sqrt{3}} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix},$$

а матрица перехода от преобразования Карренбауэра к преобразованию Кларк:

$$T_{KC} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 \\ \sqrt{3} & -\sqrt{3} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}.$$

Видно, что воздушные каналы по преобразованию Кларк и преобразованию Карренбауэра линейно комбинируемы, а воздушные каналы по преобразованию Кларк и Ведпола и вовсе подобны, поскольку достаточно использовать линейный коэффициент для волнового канала для перехода к другому преобразованию. Через линейную связь с матрицей преобразования Кларк также линейно связаны друг с другом матрицы преобразования Ведпола и Карренбауэра.

При установке устройства волнового ОМП на двухцепной ЛЭП для перехода к волновым каналам

$$\begin{bmatrix} w_1^I \\ w_2^I \\ w_1^{II} \\ w_2^{II} \\ w_0^{I-II} \\ w_0 \end{bmatrix} = T \begin{bmatrix} w_A^I \\ w_B^I \\ w_C^I \\ w_A^{II} \\ w_B^{II} \\ w_C^{II} \end{bmatrix} \quad (1)$$

используют матрицу преобразования [8], [9]

$$T = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \sqrt{3} & -\sqrt{3} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 2 & -1 & -1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \sqrt{3} & -\sqrt{3} \\ -1 & -1 & -1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \end{bmatrix},$$

где  $w_1^I$ ,  $w_2^I$ ,  $w_1^{II}$ ,  $w_2^{II}$  – составляющие воздушных волновых каналов для первой и второй цепи ЛЭП,  $w_0^{I-II}$ ,  $w_0$  – составляющие земляных волновых каналов,  $w_\phi^I$ ,  $w_\phi^{II}$  – волны в фазах первой и второй цепи.

Из (1) видно, что воздушные каналы одной цепи ЛЭП не зависят от воздушных каналов другой цепи. В связи с чем в устройстве волнового ОМП, установленном на двухцепной ЛЭП, для контроля составляющих воздушных каналов может быть применено традиционное преобразование Кларк. Также могут быть использованы преобразования Карренбауэра или Ведпола, линейно связанные с преобразованием Кларк.

### **Заключение**

Для определения места повреждения может использоваться любое из линейно-связанных преобразований Кларк, Карренбауэра и Ведпола – результат работы устройства волнового ОМП будет одинаков.

В устройстве волнового ОМП, установленном на двухцепной ЛЭП, для контроля составляющих воздушных волновых каналов может быть применено традиционное преобразование Кларк или же любое линейно связанное с ним преобразование Карренбауэра или Ведпола.

### **СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Попов И.Н., В.Ф. Лачугин, Соколова Г.В. Релейная защита, основанная на контроле переходных процессов. Москва: Энергоатомиздат, 1986.
2. A. Fedorov, V. Petrov, O. Afanasieva and I. Zlobina, "Limitations of Traveling Wave Fault Location," 2020 Ural Smart Energy Conference

(USEC), Ekaterinburg, 2020, pp. 21-25, DOI: 10.1109/USEC50097.2020.9281153.

3. *I. E. Clarke*, Circuit Analysis of Alternating Current Power Systems, vol. 1. New York: Wiley, 1943.

4. *M. M. Saha, J. J. Izykowski, E. Rosolowski*, "Fault Location on Power Networks", Springer, 2010 – 432 p.

5. *A. Lei, X. Dong, S. Shi*, "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.

6. *L. M. Wedepohl*, "Application of matrix methods to the solution of travelling-wave phenomena in polyphase systems", Proc. IEE 110 (1963) no. 12, pp. 2200-2212.

7. *V. Alekseev, V. Petrov and V. Naumov*, "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.

8. *H. Benteng, H. Weijin*, "Mode transformation of double-circuit line tower", Power System Technology, vol. 22, No.1, Aug. 1998.

9. *Q. Xin, S. Wei*, "Mode analysis of different transported double circuit on same tower", Power System Technology, vol. 25, No.8, Aug. 2001.

**Авторы:**

**Фёдоров Алексей Олегович**, сведения об авторе приведены на стр. 82.

**Петров Владимир Сергеевич**, сведения об авторе приведены на стр. 33.

**Алексеев Валерий Сергеевич**, инженер-исследователь 3 категории департамента автоматизации энергосистем ООО НПП «ЭКРА». Окончил в 2020 г. факультет энергетики и электротехники ЧГУ им. И.Н. Ульянова, получил степень магистра по направлению «Автоматика энергосистем». E-mail: *alekseev\_vs@ekra.ru*.