

ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ



УДК 621.31:621.3

98:621.3.091

Сравнение технических характеристик высокочастотного и оптического каналов в задаче организации связи между энергообъектами электрических сетей

Д.А. Данилин¹, В.Э. Левчук^{1,2}

¹ Донской государственный технический университет, г. Ростов-на-Дону, Российская Федерация

² Филиал ПАО «Россети» – Ростовское ПМЭС, г. Ростов-на-Дону, Российская Федерация

Аннотация

Рассмотрены два основных варианта организации технической связи между объектами электрической сети — по высокочастотному и оптоволоконному каналам. Публикация содержит общее описание организации этих двух методов связи, а также перечень технических требований, предъявляемых к каждому из них. Кроме того, представлены расчеты затухания сигнала для обоих способов связи. Проведено детальное аналитическое сравнение рассматриваемых технических решений, на основе которого сделаны соответствующие выводы.

Ключевые слова: высокочастотный канал, ВЧ-канал, оптоволоконный канал, ВОЛС, канал связи, затухание сигнала

Для цитирования. Данилин Д.А., Левчук В.Э. Сравнение технических характеристик высокочастотного и оптического каналов в задаче организации связи между энергообъектами электрических сетей. *Молодой исследователь Дона*. 2025;10(2):11–16.

Solving the Problem of Organising Communication between Electric Network Facilities by Comparing Technical Parameters of the High-Frequency and Optical Channels

Dmitry A. Danilin¹, Vladimir E. Levchuk^{1,2}

¹ Don State Technical University, Rostov-on-Don, Russian Federation

² Branch of PJSC “Rosseti”, Rostov Enterprise of Main Electric Networks, Rostov-on-Don, Russian Federation

Abstract

The article studies two main options for organising technical communication between electric network facilities: using the high-frequency and fiber-optic channels. The paper provides general description for organising communication using these two methods, as well as a list of technical requirements for each of them. Moreover, calculations of signal attenuation for both communication methods have been presented. The detailed comparative analysis of the technical solutions under study has been made, and its results served the grounds for drawing the conclusions.

Keywords: high frequency channel, HF-channel, fiber-optic channel, fiber-optic communication line (FOCL), communication channel, signal attenuation

For Citation. Danilin DA, Levchuk VE. Solving the Problem of Organising Communication between Electric Network Facilities by Comparing Technical Parameters of the High-Frequency and Optical Channels. *Young Researcher of Don*. 2025;10(2):11–16.

Введение. Современная электроэнергетика представляет собой обширную отрасль, которая охватывает как технические аспекты, так и географические размеры. Она включает в себя производства электроэнергии различными электростанциями, передачу энергии посредством кабельных и воздушных линий через распределительные подстанции, а также потребление как промышленными предприятиями, так и частными потребителями. Одной из ключевых проблем этой отрасли является организация связи.

Эффективная связь между объектами электроэнергетической сети необходима не только для осуществления оперативных переговоров, но и для функционирования ряда систем, используемых в электрической сети, а также ее отдельных элементов. В этой связи в электроэнергетике принято классифицировать каналы связи в соответ-

ствии с их функциональным назначением и предъявляемыми требованиями. Основные категории включают голосовую связь (диспетчерская и телефонная связь), передачу данных (АСУТП, телемеханика, АИИС КУЭ) и организацию работы систем релейной защиты и противоаварийной автоматики (передача дискретных команд и токового сигнала защит).

Каналы связи играют жизненно важную роль в обеспечении бесперебойной работы электрических сетей, что делает их организацию важной задачей в электроэнергетической отрасли. Цель данной работы заключается в сравнении существующих решений по организации связи между подстанциями и электростанциями. Это содержит в себе несколько аспектов, включая: определение способов организации технической связи между энергообъектами электрических сетей; формулирование технических требований к каналам связи; и сравнение различных методов организации каналов связи.

Организация каналов связи. Исторически в электроэнергетике в качестве каналов связи используются высокочастотные каналы или ВЧ-связь. Их организация требует наличия двух основных элементов: ВЧ-тракта, который передает ВЧ-сигнал по имеющимся фазным проводам или грозотросам воздушных линий, а также аппаратуры уплотнения (АУ), которая преобразует информационный сигнал в ВЧ-сигнал и обратно (рис. 1) [1].

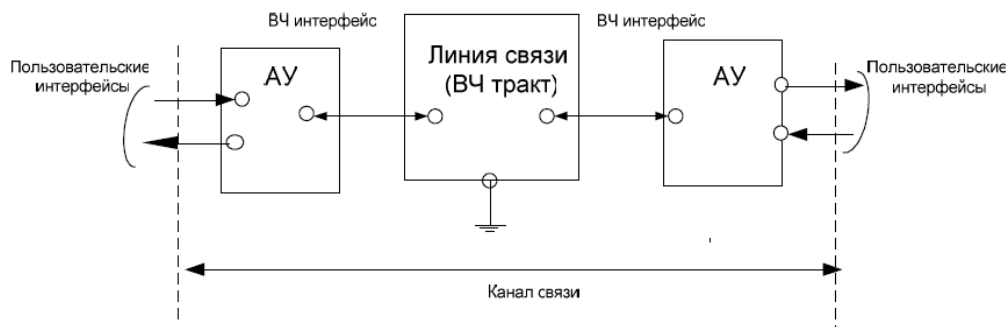


Рис. 1. Схема структуры связи каналов ВЧ-связи на воздушных линиях [1]

Как альтернатива ВЧ-связи в последние десятилетия активно развиваются технологии, основанные на оптическом волокне. Однако система передачи сигналов через оптическое волокно более сложна и требует большего количества элементов, чем ВЧ-связь (рис. 2).

Ключевые компоненты для оптической связи включают в себя:

- оптическое волокно (ОВ) — провод, по которому передаются сигналы в виде световых импульсов;
- систему передачи (СП), в котором происходит процесс сжатия или разбивания электрических сигналов, пригодных для дальнейших операций;
- оборудование сопряжения (ОС), в котором происходит преобразование электрического сигнала (информации) и сигнала для передатчика;
- передатчик (Пер), создающий импульсы света;
- приёмник (Пр) — устройство обратное передатчику, оно фиксирует импульсы света.

Более подробно принцип работы ОВ-связи описан в [3].

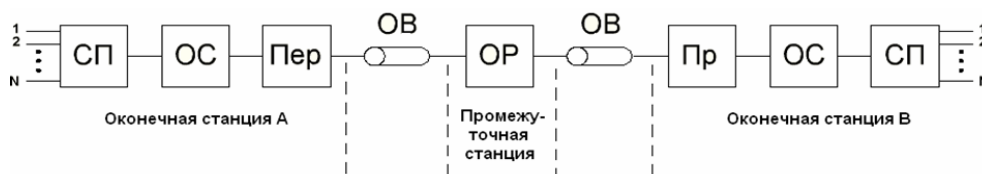


Рис. 2. Структурная схема связи двух станций посредством оптического канала

Технические требования к каналам связи. Согласно источникам [4, 5], к каналам связи обычно предъявляются следующие требования.

Во-первых, скорость передачи сигнала. Для сравнения скорости передачи сигнала берётся количество информации, которую может пропустить система за одну секунду. Для ВЧ-тракта это значение составляет 64 кбит/с, а в случае с ОВ, оно колеблется от 25 гбит/с до 1 Тбит/с. Объём передаваемой информации для ОВ зависит от длины волны самого сигнала и количества модов, то есть одно- или многомодовый канал.

Во-вторых, важным параметром является время задержки сигнала. Длительность задержки сигналов зависит от многих факторов, и для ВЧ-каналов эта величина примерно равна десяткам миллисекунд, в то время как для ОВ-каналов – сотням микросекунд, что указывает на меньшую задержку в случае оптических волокон.

Третьим аспектом является протяженность передачи. Для сравнения протяженности двух структурно различных вариантов передачи сигналов необходимо прийти к общему критерию, который соединит ВЧ-канал и ОВ. В

этом контексте следует рассмотреть аппаратуру УПК-Ц, являющуюся цифровым устройством передачи команд релейной защиты (РЗ) и противоаварийной автоматики (ПА). Она позволяет работать как с ВЧ, так и с ОВ. В техническом паспорте данного оборудования указаны данные для ВЧ варианта, включая выходную мощность передатчика в диапазоне 43–38 дБм и минимальное рабочее отношение сигнал/помеха, равное –2 дБ. На основании этой информации можно предположить, что максимальная предельная протяженность ВЧ-канала может достигать около 280 км при частоте передаваемого сигнала в 100 кГц. В то же время, производитель оптического волокна предоставляет конкретное значение, с которым способен работать данный прибор в одномодовом режиме, и оно составляет около 120 км.

Четвертым критерием является надежность связи. В случае ВЧ-канала можно говорить о высокой надежности, ведь линии электропередачи (ЛЭП), хоть и могут рваться, это происходит довольно редко. Падения опор ЛЭП происходят также крайне редко и зачастую рассматриваются как чрезвычайные происшествия. Рассматривая надежность ОВ, важно учитывать условия прокладки кабеля [2]. Если волокно размещено внутри грозотроса, можно предполагать схожую надежность, как и в случае с ВЧ-каналом. Однако, если провод прокладывается как самостоятельный, его надежность будет зависеть от местности, по которой проходит линия.

Пятым фактором является длительность восстановления связи. В ВЧ-канале находить неисправности проще, так как при выходе из строя канала связи передача энергии до потребителя прекращается. Такая неисправность решается налаживанием соединения между оборванными концами провода или через частичную замену фазного провода. С аналогичными проблемами сталкиваются и в случае грозотроса, через который также может передаваться ВЧ-сигнал. Что касается восстановления ОВ, в случае обрыва провода процесс несколько проще. При прокладке волокна с использованием специального оборудования его оборванные концы могут быть просто спаяны. Однако стоит отметить, что найти обрыв волоконно-оптической линии связи (ВОЛС) гораздо сложнее, чем на линии ЛЭП.

Наконец, стоимость каналов связи также является важным аспектом. Определить точную стоимость организации того или иного канала довольно сложно, поскольку она зависит от рыночных условий. Однако можно сделать общие выводы: для ВЧ-канала значительную долю составляют устройства силовой части, такие как заградители и фильтры присоединения, в то время как для ОВ-каналов необходим собственный кабель, что делает стоимость зависимой от длины линии, а также оборудование сопряжения.

Также, учитывая особенности ОВ-связи, добавляется требование по информационной безопасности, однако это является отдельной областью исследования, которая в данной работе не рассматривается.

Расчет затухания сигнала. Для максимально близкого сравнения двух способов передачи сигналов — по высокочастотным (ВЧ) и оптическим волокнам (ОВ), при этом используются одни и те же характеристики длины, сечения и марки провода, а также одинаковый класс напряжения в 220 кВ. Расположение фаз на опорах горизонтальное и составляет 80 км.

Расчет затухания сигнала в ВЧ каналах. Горизонтальное расположение фаз обусловлено оптимальным для схемы подключения между средней фазой и землей. Затухание будет рассчитано для частот 100, 150 и 200 кГц. Рассматриваемая воздушная линия (ВЛ) с напряжением 220 кВ не транспонирована и имеет длину 80 км. Фазный провод соответствует типу АС 330/43, а заградители — типу ВЗ 630-0,5/100-200. Минимальное значение сопротивления составляет 650 Ом, а фильтры присоединения имеют параметры ФПМ 3200/76-1000, с сопротивлениями $Z_{фл} = 480$ Ом и $Z_{Л1} = 450$ Ом. ВЧ кабели типа РК-75 имеют длину 100 м каждый по обоим концам линии.

Решение. Сначала определяем частотно зависимую составляющую, используя формулу (1):

$$a_T = \sum_{k=1}^{n_{пл}} a_{вл} + \sum_{k=1}^{2n_{вл}} (a_3 + a_{фп} + a_{каб}) + \sum_{k=1}^{n_{отв}} a_{отв}, \quad (1)$$

где $a_{вл}$ — затухание в воздушной линии; a_3 — затухание в высокочастотном заградителе; $a_{фп}$ — затухание в фильтре присоединения; $a_{каб}$ — затухание соединительного кабеля; $a_{отв}$ — затухание ответвлений; $n_{вл}$ — количество линий; $n_{отв}$ — количество ответвлений.

Коэффициент затухания $a_{мф}$ определяем по (2), принимая во внимание коэффициенты $k_1 = 3,2$ (для провода АС 330), $k_2 = 0,024$ (горизонтальное расположение проводов ВЛ) и $k_3 = k_4 = 1$ (фаза без расщепления):

$$a_{мф} = (k_1 k_3 \sqrt{f} + k_2 k_4 f) 10^{-3}, \quad (2)$$

где f — частота канала.

Затухание линии определяется по формуле (3):

$$a_{\text{вл}} = a_{\text{мф}} l + a_k, \quad (3)$$

где $a_{\text{мф}}$ — коэффициент затухания основной междупазной модальной составляющей, возбуждаемой в тракте при рассматриваемой схеме присоединения, дБ/км; l — длина линии, км; a_k — конечное затухание, учитывающее потери той части энергии передатчика, которая попадает в «земляную» модальную составляющую и, не доходя до приемника, полностью затухает в линии, дБ.

Концевое затухание принимается равным: для схемы фаза-земля — при одноцепной линии — 2,5 дБ и при двухцепной линии — 1 дБ; для схемы фаза-фаза и внутрифазного тракта — 0 дБ.

Затухание ВЧ кабелей, входящих в схему тракта по концам, определяется по (4):

$$\sum a_{\text{каб}} = 0,13\sqrt{f}l_{\text{каб}}, \quad (4)$$

Для других частот расчет делается аналогично.

Определяем составляющие формулы (1), которые не зависят от частоты.

Затухание ВЧ заградителей, входящих в схему тракта по концам и в месте ВЧ обхода, определяется по (5):

$$\sum a_z = 20 \log \left(1 + \frac{Z_{\text{фп}} Z_{\text{л.т}}}{R_z (Z_{\text{фп}} + Z_{\text{л.т}})} \right), \quad (5)$$

где $Z_{\text{фп}}$ — полное сопротивление фильтра присоединения; $Z_{\text{л1}}$ — полное сопротивление линии; R_z — активное сопротивление заградителя.

Затухание фильтров присоединения, входящих в схему тракта по концам и в месте ВЧ обхода, определяется по (6) при исходных данных $Z_{\text{л}} = 450$ Ом (задано); $Z_{\text{фп}} = 480$ Ом (задано):

$$\sum a_{\text{фп}} = 1 + 20 \log \left(\frac{Z_{\text{фп}} + Z_{\text{л1}}}{2\sqrt{Z_{\text{фп}} Z_{\text{л1}}}} \right), \quad (6)$$

Затухание заградителей, фильтров присоединения и ответвления можно было бы не определять по соответствующим формулам, как это было сделано выше, а принимать рекомендованные численные значения. В этом случае значение затухания тракта будет несколько отличаться от полученного. Это значение также приведено в сводной таблице 1 с обозначением « a_T ».

Таблица 1

Результатами расчетов примера затухания в ВЧ-каналах

Параметр	Значение рассчитываемого параметра для частот, кГц		
	100	150	200
$a_{\text{мф}}$, дБ/км	0,0344	0,0428	0,0500
$a_{\text{вл}}$, дБ	5,25	5,92	6,5
$\sum a_{\text{каб}}$, дБ	0,26	0,32	0,37
$\sum (a_z + a_{\text{фп}})$, дБ	7,31	7,31	7,31
a_T , дБ	12,82	13,55	14,18
$a_{\text{т}}$, дБ	14,05	14,72	15,30

Расчет затухания в ОВ. Для примера рассмотрим провод ОВ длиной в 80 км, с длиной волны в $\lambda = 1\,310$ нм, так как это минимальное значение для одномодового провода, согласно [3].

$$A_m = a_m \cdot L, \quad (7)$$

где a_m — зависимость километрического затухания ОВ на км; L — длина линии.

Потери в соединениях подсчитаем, используя для наглядности схему на рис. 3. Потери на сварках взяты гораздо большей величины нормальных значений, так как сварочное соединение может быть некачественным. Это учитывает возможность того, что при монтаже таких сетей могут использоваться сварочные аппараты для локальных линий или вовсе механические соединители типа «fibrlork». В результате имеем:

$$A_{\text{пот}} = A_{\text{нс}} + A_{\text{рс}}, \quad (8)$$

где $A_{\text{нс}}$ — потери сварного соединения волокна; $A_{\text{рс}}$ — потери механического соединения волокна (коннектор).

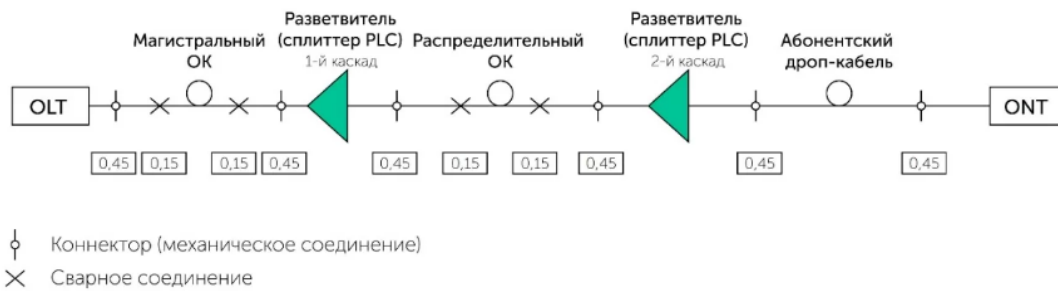


Рис. 3. Линейная схема OLT – ONT с указанием потерь (дБ) на соединениях

Для расчета берётся наихудший вариант потерь. Для двух установленных на линии сплиттеров (1×2):

$$A_{\text{сплит}} = n \cdot a_{\text{сплит}}, \quad (9)$$

где n — количество сплиттеров; $a_{\text{сплит}}$ — коэффициент затухания сплиттера.

Итого для линий длиной 80 км на разных длинах волн и с учётом всех элементов линий получаем суммарные потери:

$$A_{\text{общ}} = A_m + A_{\text{пот}} + A_{\text{сплит}}, \quad (10)$$

где A_m — потери в оптическом волокне; $A_{\text{пот}}$ — потери на соединениях волокна; $A_{\text{сплит}}$ — потери на сплиттерах.

Результаты проведенных измерений занесены в таблицу 4.

Таблица 4

Сводная таблица с результатами расчетов примера затухания в ОВ

Параметр	Значение рассчитываемого параметра для длины волны, нм		
	850	1310	1550
A_m , дБ	240,0	25,6	17,6
$A_{\text{пот}}$, дБ	3,3	3,3	3,3
$A_{\text{сплит}}$, дБ	8,6	8,6	8,6
$A_{\text{общ}}$, дБ	251,9	37,5	29,5

После получения значения общих потерь или вычисления «оптического бюджета» линии становится очевидным, что для поставленной задачи оптимальным выбором будет использование волоконно-оптической линии связи (ВОЛС) с длиной волны 1310 или 1550 нм. Этот выбор обусловлен параметрами активного оборудования, имеющего запас по мощности $A_{\text{доп}} = 40$ дБ, что является предельным значением для оптических генераторов типа ОГ 2-1.

Анализ результатов показывает, что в современных электрических сетях применяются оба метода организации технической связи. Как видно из ранее представленных данных, эффективность одного метода по сравнению с другим в значительной степени зависит от поставленной задачи, поскольку каждое решение имеет свои преимущества и недостатки.

К преимуществам волоконно-оптических систем можно отнести возможность передачи нескольких сигналов по одному оптическому кабелю. В защиту высокочастотного (ВЧ) тракта стоит отметить, что передача нескольких сигналов по одной линии электропередачи (ЛЭП) возможна, однако требует использования различных фазных проводов. Также выбор частоты в этом случае усложняется из-за взаимных помех между разными сигналами, что снижает общую эффективность передачи. В отличие от ВЧ трактов, оптическое волокно не подвержено влиянию электромагнитных полей, которые могут исказить сигналы, передаваемые по ВЧ каналам, и существенно сократить расстояние их передачи. Таким образом, метод передачи сигналов через оптическое волокно отличается высокой надежностью, так как ВОЛС часто встраивают в грозозащитные тросы, а само волокно имеет хорошую прочность. В случае повреждения оптического волокна его можно восстановить с помощью спайки, что значительно упрощает ремонт. Тем не менее, возникают сложности, когда волокно проходит через грозозащитный трос. Кроме того, оптическое волокно независимо от самой ЛЭП и может быть проложено через отдельные столбы, что позволяет эффективно решать задачи перехода с воздушной линии на кабельную, чего нельзя сказать о высокочастотной передаче. Не стоит забывать и о том, что ВОЛС обеспечивает более быструю передачу информации по сравнению с ВЧ тракта.

Однако у организации сигналов через ВОЛС есть и недостатки, главным из которых являются высокие затраты. Несмотря на то, что сами оптические волокна являются относительно простыми и недорогими компонентами, стоимость оборудования для их сопряжения может значительно превышать стоимость материала. При расчете различных вариантов выбора длин волн для организации связи по ВОЛС было выяснено, что выбор оптимальной длины волны напрямую зависит от расстояния передачи. В случаях, когда требуется передавать данные на большие расстояния, необходимо устанавливать ретрансляторы, которые принимают и усиливают световой поток. В свою очередь, ВЧ тракт не имеет такого недостатка и способен функционировать на больших дистанциях, что увеличивает его привлекательность в некоторых сценариях.

Заключение. Выводы из проведенного анализа указывают на то, что выбор способа организации канала связи должен основываться на тщательном учете особенностей обоих методов. При использовании ВЧ-тракта нужно принимать во внимание различные помехи, негативно влияющие на его работу, от неблагоприятных погодных условий, таких как туман, до электромагнитных помех, возникающих из-за соседних каналов связи и телефонных линий, работающих в пределах частотного диапазона ВЧ. Также стоит отметить, что организация ВЧ-тракта на комбинированных кабельно-воздушных линиях (КВЛ) может быть затруднена. С другой стороны, длина канала ВОЛС зависит от длины волны, что связано с параметрами оборудования для подключения. В большинстве случаев возможно применение любого из описанных методов, однако выбор должен основываться на конкретных требованиях и условиях эксплуатации.

Список литературы

1. Данилин Д.А. Назначение высокочастотных каналов и их организация на современных подстанциях. В: *Труды внутривузовской научно-практической конференции. «Новые идеи» Ростов-на-Дону, 09–14 октября 2023 года.* Ростов-на-Дону: ИП Беспамятнов Сергей Владимирович; 2023. С. 133–135.
2. Шкарин Ю.П. *Высокочастотные тракты каналов связи по линиям электропередачи.* Ч. 1. Москва: Энергопрогресс: Энергетик; 2001. 72 с.;
3. Листвин А.В., Листвин В.Н., Швырков Д.В. *Оптические волокна для линий связи.* Москва: ЛЕСАПарт; 2003. 288 с.
4. *Об электроэнергетике.* Федеральный Закон № 35–ФЗ от 26.03.2003 г. КонсультантПлюс. URL: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_41502/?ysclid=m7vhhhtzco17544 (дата обращения: 10.01.2025).
5. Харламов В.А., Романов С.Е. *Перспективы использования ВЧ каналов в системах РЗА.* URL: <https://digitalsubstation.com/releyshik/2016/01/25/perspektivy-ispolzovaniya-vch-kanalov-v-sistemah-rza/> (дата обращения: 10.01.2025).

Об авторах:

Дмитрий Андреевич Данилин, студент кафедры цифровых технологий и платформ в электроэнергетике Донского государственного технического университета (344003, Российская Федерация, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), dima34danilin6411@gmail.com

Владимир Эдуардович Левчук, ведущий инженер службы релейной защиты и автоматики и автоматизированных систем управления технологическими процессами Ростовского предприятия магистральных электрических сетей (344093, Российская Федерация, г. Ростов-на-Дону, ул. Днепропетровская, 54/1), аспирант кафедры цифровые технологии и платформы в электроэнергетике Донского государственного технического университета (344003, Российская Федерация, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), vladimir.levchuk.94@mail.ru

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

About the Authors:

Dmitry A. Danilin, Bachelor's Degree Student of the Digital Technologies and Platforms in the Electric Power Industry Department, Don State Technical University (1, Gagarin Sq., Rostov-on-Don, 344003, Russian Federation), dima34danilin6411@gmail.com

Vladimir E. Levchuk, Leading Engineer at the Unit of Relay Protection, Automation, and Technological Process Automated Control Systems, Rostov Enterprise of Main Electric Networks (54/1, Dnepropetrovskaya Str., Rostov-on-Don, 344093, Russian Federation), Postgraduate Student of the Digital Technologies and Platforms in the Electric Power Industry Department, Don State Technical University (1, Gagarin Sq., Rostov-on-Don, 344003, Russian Federation), vladimir.levchuk.94@mail.ru

Conflict of Interest Statement: the authors declare no conflict of interest.

All authors have read and approved the final manuscript.