Торайғыров университетінің хабаршысы
ҒЫЛЫМИ ЖУРНАЛЫ

НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ
Вестник Торайгыров университета

Торайғыров университетінің ХАБАРШЫСЫ

Энергетикалық сериясы

1997 жылдан бастап шығады

ВЕСТНИК Торайгыров университета

Энергетическая серия

Издается с 1997 года

ISSN 2710-3420

№3 (2026)

ПАВЛОДАР

НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ
Вестник Торайгыров университета

Энергетическая серия
выходит 4 раза в год

СВИДЕТЕЛЬСТВО
о постановке на переучет периодического печатного издания,
информационного агентства и сетевого издания
№ 14310-Ж
выдано
Министерство информации и общественного развития
Республики Казахстан

Тематическая направленность
публикация материалов в области электроэнергетики,
электротехнологии, автоматизации, автоматизированных и
информационных систем, электромеханики и теплоэнергетики

Подписной индекс – 76136

---

https://doi.org/10.48081/BTOUEn3.2026/2710-3420

Бас редакторы – главный редактор
Талипов О. М.
доктор PhD, ассоц. профессор (доцент)

Заместитель главного редактора — Калтаев А.Г., *доктор PhD*
Ответственный секретарь — Сағындық Ә.Б., *доктор PhD*

Редакция алқасы – Редакционная коллегия

Клецель М. Я.,	*д.т.н., профессор*
Никифоров А. С.,	*д.т.н., профессор*
Новожилов А. Н.,	*д.т.н., профессор*
Алиферов А. И.,	*д.т.н., профессор (Российская Федерация)*
Кошеков К. Т.,	*д.т.н., профессор*
Приходько Е. В.,	*к.т.н., профессор*
Кислов А. П.,	*к.т.н., доцент*
Нефтисов А. В.,	*доктор PhD*
Шерьязов С. К.	т.ғ.д., *профессор (Российская Федерация)*
Искакова З. С.	*технический редактор*

За достоверность материалов и рекламы ответственность несут авторы и рекламодатели
Редакция оставляет за собой право на отклонение материалов
При использовании материалов журнала ссылка на «Вестник Торайгыров университета» обязательна

© Торайгыров университет

МРНТИ 44.29.31

https://doi.org/10.48081/BTOUEn3.2026/233-254

С. С. Даутов[1], Б. Р. Кангожин[2],
М. С. Жармагамбетова[3], *М. Б. Сатенова[4]
[1,2,3,4]Университет ALT Мұхаметжана Тынышпаева,
Республика Казахстан, г. Алматы.
[1]ORCID: https://orcid.org/0000-0003-2135-0790
[2]ORCID: https://orcid.org/0009-0000-1023-9873
[3]ORCID: https://orcid.org/0009-0008-3355-8293
[4]ORCID: https://orcid.org/0009-0002-5778-2536
*e-mail: msb_madeka@mail.ru

ВЫСОКОЧАСТОТНЫЕ ПОМЕХИ В ЦЕПЯХ РЗА ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПОДСТАНЦИИ 220 КВ ПРИ КОРОТКИХ ЗАМЫКАНИЯХ

В статье представлены результаты натурно-имитационных исследований высокочастотных дифференциальных помех, возникающих в контрольных кабелях микропроцессорных систем релейной защиты при подъёме потенциала заземляющего устройства высоковольтной электрической подстанции напряжением 220 кВ. Эксперимент выполнен на действующей подстанции ПС 220 кВ «№7» АО «KEGOC» с применением переносного генератора высокочастотных импульсов с диапазоном частот 0,5–2 МГц, обеспечивающего имитацию высокочастотной составляющей тока короткого замыкания без воздействия на технологический процесс. Существующие расчётные методы не всегда учитывают фактическое распределение потенциалов и импульсное сопротивление заземляющего устройства в реальных условиях эксплуатации. В связи с этим приоритетное значение приобретают натурные измерения.

Определены импульсные значения потенциала заземляющего устройства, рассчитан коэффициент передачи помехи во вторичные цепи и выполнен пересчёт к реальным значениям высокочастотной составляющей тока короткого замыкания. Установлено, что при определённых значениях импульсного сопротивления заземления уровень дифференциальной помехи может превышать допустимый порог 1 кВ для интерфейсов оборудования вторичных цепей подстанций.

Показана зависимость амплитуды наведённого напряжения от импульсного сопротивления заземлённого оборудования и предложены инженерные меры снижения уровня высокочастотных помех за счёт модернизации заземляющего устройства.

Ключевые слова: электромагнитная совместимость, электрическая подстанция 220 кВ, высокочастотная помеха, импульсное сопротивление заземления, дифференциальная помеха, вторичные цепи.

Введение

На современных электрических подстанциях (ЭП) высокого напряжения (ВН) 110–220 кВ микропроцессорные устройства релейной защиты и автоматики (МРЗА) подключаются к оборудованию посредством контрольных кабелей, трассируемых в зоне действия интенсивных электромагнитных переходных процессов [1]. При коротком замыкании (КЗ) ток, протекающий через заземляющее устройство, вызывает подъём потенциала заземлённого оборудования [2; 3]. Наличие паразитных ёмкостных и индуктивных связей между заземляющими элементами и контрольными кабелями создаёт условия для проникновения высокочастотной составляющей тока короткого замыкания во вторичные цепи [4; 5]. Несмотря на применение экранированных кабелей и двустороннее заземление экранов, в реальных условиях ЭП возможно формирование дифференциальных (противофазных) помех, способных достигать уровней, сопоставимых с порогами помехоустойчивости интерфейсов МРЗА [6].

Существующие расчётные методы и компьютерное моделирование не всегда учитывают фактическое распределение потенциалов и импульсное сопротивление заземляющего устройства в реальных условиях эксплуатации [6; 7]. В связи с этим приоритетное значение приобретают натурные измерения, позволяющие количественно оценить уровень высокочастотных помех непосредственно на действующей ЭП ВН. В отечественных и зарубежных исследованиях неоднократно отмечалась роль импульсных характеристик заземления в формировании помех во вторичных цепях [7; 8; 9]. В частности, подобные явления электромагнитных помех во вторичных цепях подстанций до 400 кВ описаны в [10].

Вопросы чувствительности микропроцессорных устройств к импульсным и ВЧ воздействиям подробно исследованы [9; 10; 11]. На ЭП ВН это приводит к сбоям, отказам и ложным срабатываниям МРЗА.

Таким образом, чувствительность МРЗА к импульсным помехам при КЗ на ЭП ВН и несовершенство расчетных методов предопределило

цель настоящей работы: экспериментальное исследование уровней высокочастотных дифференциальных помех в контрольных кабелях ПС 220 кВ при имитации высокочастотной составляющей тока короткого замыкания.

Материалы и методы

Физика возникновения высокочастотных дифференциальных помех. Подъём потенциала заземляющего устройства при КЗ

При КЗ на ЭП (рисунок-1) значительная часть тока замыкания замыкается через заземляющее устройство (ЗУ). Горизонтальные элементы – распределённые сопротивления грунта, вертикальные ветви – токи растекания в грунт, точка КЗ – место замыкания на землю, зона нулевого потенциала - удалённая точка земли (бесконечность).

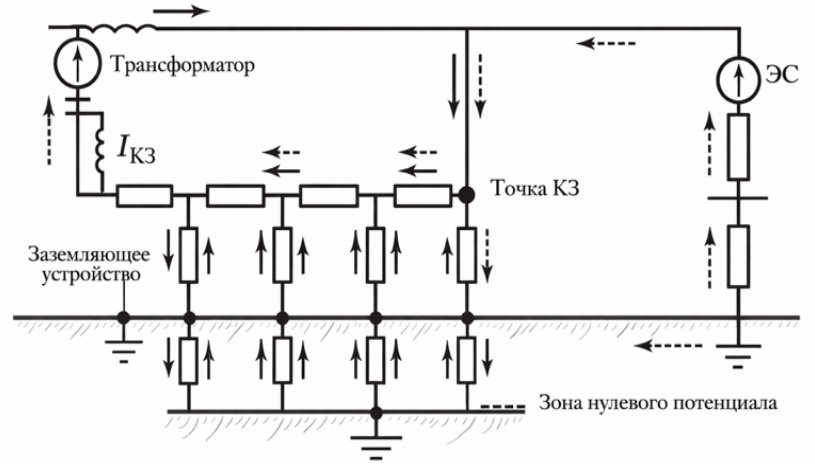


Рисунок 1 – Схема растекания тока
при однофазном замыкании на землю (КЗ)

В точке КЗ фазный провод соединяется с землёй. Возникает ток Ікз, который замыкается по контуру энергосистема → линия → точка КЗ → грунт → ЗУ подстанции → нейтраль трансформатора → источник. Ток не идет по одной линии – он растекается объемно. Грунт моделируется как цепочка продольных сопротивлений. Параллельные вертикальные сопротивления (растекание вниз).

В аварийном режиме мгновенное значение потенциала заземлённого оборудования относительно удалённой земли определяется выражением:

$$U_з(t) = I_{кз}(t) * Z_{имп}(f) \quad (1)$$

где: $I_{кз}(t)$ – ток короткого замыкания;

$Z_{имп}(f)$ – частотно-зависимое импульсное сопротивление заземляющего устройства.

В реальных энергосистемах структура тока короткого замыкания определяется параметрами сети, схемой заземления нейтрали и топологией узла, что подтверждается исследованиями [11; 12].

Частотно-зависимый характер импульсного сопротивления заземления подробно рассматривается в [11; 12]. Рост индуктивной составляющей импеданса заземляющей сети в диапазоне 0,1–5 МГц подтверждён экспериментально в работах [13; 14]. В отличие от установившегося режима, при наличии высокочастотной составляющей тока КЗ (0,1–5 МГц) заземляющее устройство (рисунок – 2) проявляет выраженные распределенные индуктивные и емкостные свойства, что приводит к увеличению импульсного сопротивления по сравнению с низкочастотным сопротивлением растеканию.

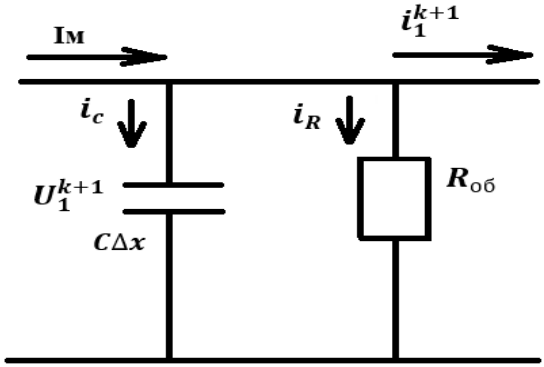


Рисунок 2 – Эквивалентная схема участка вторичной цепи при воздействии тока КЗ

Представлена эквивалентная схема участка вторичной цепи (контрольного кабеля или входа устройства РЗА) при воздействии тока короткого замыкания и наведённого потенциала корпуса. Схема содержит: продольную линию (верхний проводник) с током $I_{кз}$ короткого замыкания, потенциал узла U_1^{k+1}, паразитную ёмкость CΔx, сопротивление объекта $R_{об}$, токи: ёмкостный I_c, активный I_r, продольный ток линии I_1^{k+1}. Нижняя линия – заземляющая шина (опорный потенциал).

Ток короткого замыкания $I_{кз}$ протекает по первичной цепи (шина, конструкция, корпус оборудования) и создаёт высокочастотную составляющую, импульсное повышение потенциала корпуса и распределённое поле вдоль трассы кабеля. Потенциал узла U^{k+1} это локальный потенциал корпуса, экрана, проводника относительно земли на участке I^{k+1}. При импульсном воздействии следующее выражение:

$$U(t)=Z_{имп}(\omega) * Iкз(t) \quad (2)$$

где: Zg(ω) – импульсное сопротивление заземления.

Паразитная ёмкость СΔх представляет распределённую ёмкость между жилой и экраном, между экраном и землёй или между корпусом оборудования и землёй. Через неё протекает ток смещения:

$$I_c(t) = C_{экв}\frac{dU_з(t)}{dt} \quad (3)$$

где: $I_c(t)$ – емкостный ток;

$C_{экв}$ – эквивалентная емкость (заземляющего устройства);

$U_з(t)$ – напряжение;

$\frac{dU_п(t)}{dt}$ – производная напряжения по времени.

При крутых фронтах КЗ (большое dU/dt) ёмкостный ток может достигать значительных значений даже при малой ёмкости.

Сопротивление объекта $R_{об}$ – это эквивалент входного сопротивления микропроцессорного устройства, измерительного входа, вторичной цепи РЗА.

Через него протекает ток:

$$I_R = U_{1K} + R_{об} \quad (4)$$

Этот ток формирует дифференциальное напряжение на входе устройства.

Продольный ток I^{k+1} +1 представляет часть наведённого тока, распространяемого вдоль линии. Он формирует продольную разность потенциалов, не симметрию, дифференциальную составляющую помехи.

При протекании $I_{кз}$ возникает импульсный подъём потенциала корпуса. Через СΔх протекает ток смещения, часть тока замыкается через $R_{об}$. Формируется дифференциальное напряжение на входе устройства.

Если:

$$U_{прик} \infty Z_{имп} \quad (5)$$

где: $U_{прик}$ – напряжение прикосновения;

возможны ложные срабатывания, сбой регистрации, нарушение селективности РЗА.

С точки зрения ЭМС схема отражает ёмкостный механизм связи, зависимость помехи от dU/dt, влияние импульсного сопротивления заземления, преобразование синфазного возмущения в дифференциальное. В результате формируется кратковременный подъём потенциала (Ground Potential Rise, GPR) на корпусах оборудования, к которым подключены вторичные цепи.

Механизм передачи помехи в контрольный кабель.

Контрольный кабель, соединяющий оборудование с панелью РЗА, имеет ёмкость между жилой и экраном Сэ, ёмкость между экраном и землёй Сэз, продольную индуктивность проводников L (рисунок-3). При воздействии высокочастотного потенциала Uз(t) на корпус оборудования возникает переменное электрическое поле, индуцирующее ток смещения:

$$I_c = C_{экв} \frac{dU_з}{dt} \quad (6)$$

Даже при двустороннем заземлении экрана, асимметрии трассировки, различия импедансов заземления и распределённый характер ЗУ приводят к формированию продольной разности потенциалов вдоль кабеля. В результате во вторичной цепи возникает дифференциальное напряжение:

$$U_d = k_t * U_з \quad (7)$$

где: k_t – коэффициент передачи, учитывающий параметры кабеля, способ заземления экрана и частоту сигнала.

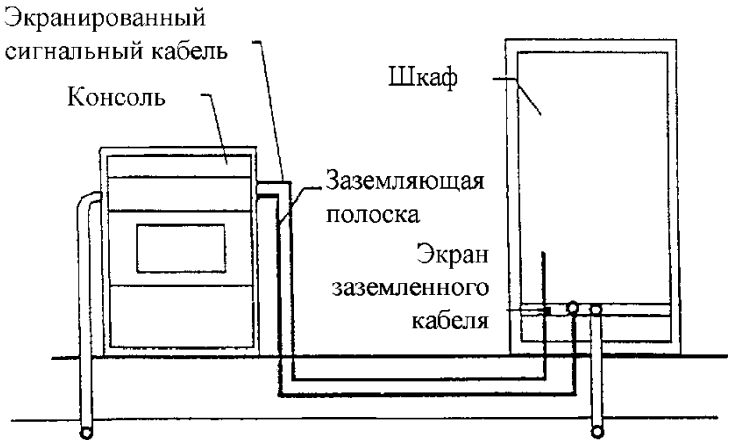


Рисунок 3 – Индукция ВЧ-напряжения в контрольном кабеле при двустороннем заземлении экрана

Процессы наведения помех в низковольтных кабелях под воздействием коммутационных и КЗ-процессов исследованы в [14]. Роль ёмкостных связей и распределённого импеданса вторичных цепей описана в [10; 15].

Высокочастотный потенциал корпуса Uз(t) создаёт переменное электрическое поле и индуцирует ток смещения I_c. Ток смещения замыкается через экран и землю. Из-за асимметрии трассировки, различия импедансов заземления, распределённого характера ЗУ вдоль экрана формируется продольная разность потенциалов ΔU(X). Это приводит к появлению во вторичной цепи дифференциального напряжения U_d.

Роль импульсного сопротивления заземления.

Влияние характеристик заземляющего устройства на электромагнитную обстановку подстанций рассмотрено в [8].

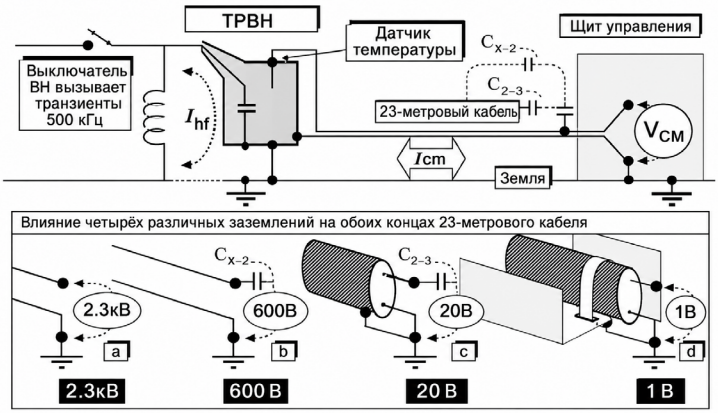


Рисунок 4 – Влияние импульсного сопротивления заземления и способа заземления экрана на уровень ВЧ помех: верхняя часть схемы – механизм возникновения помехи, нижняя часть-влияние способа заземления экрана

На рисунке 4 показана типичная ситуация на подстанции. Выключатель ВН формирует ВЧ-транзиенты (до ~500 кГц). В трансформаторе возникает высокочастотная составляющая тока I_h. Этот ток замыкается через заземляющее устройство (ЗУ). Из-за конечного и частотно-зависимого импульсного сопротивления заземления

$$U_з = I_{вч} * Z_{имп}(\omega) \quad (8)$$

где: $I_{вч}$ – ток высокой частоты (high frequency current);

Возникает подъём потенциала земли (GPR). Потенциал корпуса оборудования изменяется во времени. Через паразитные ёмкости «жила – экран» и «экран – земля» возникает ток смещения:

$$I_{cm} = C_d \frac{dU_з}{dt} \quad (9)$$

По контрольному кабелю ток распространяется в сторону щита управления. В щите возникает синфазное напряжение Vсм. Именно это напряжение далее преобразуется в дифференциальную помеху во вторичных цепях РЗА.

На нижней части (рисунок-4) показано влияние способа заземления экрана. Показаны четыре варианта оконцевания экрана кабеля:

а) экран не заземлён и работает как антенна дает 2.3 кВ. Это максимальный уровень синфазной помехи и является наихудшим вариантом.

б) экран заземлён, с одной стороны, дает результат 600 В. Снижается уровень помех, но возникает продольная разность потенциалов. При длинных трассах остаётся высокий риск ЭМС-нарушений.

в) экран заземлён с двух сторон – результат 20 В. При этом варианте замыкается ток смещения, происходит существенное снижение наведённого напряжения. Однако возможны токи по экрану при GPR.

г) экран заземлён на 360° (правильный ВЧ монтаж) дает результат 1 В. Контакт по окружности (а не «хвостиком») дает минимальную индуктивность заземления происходит эффективное подавление ВЧ помех. Данный вариант соответствует требованиям IEC 61850 / EMC good practice. Экспериментальное подтверждение зависимости уровня помех от $Z_{имп}$ приведено в [14; 15].

Из выражения $U_з = I_{вч} * Z_{имп}(\omega)$ следует, что уровень наведённой помехи прямо пропорционален импульсному сопротивлению заземления. Следовательно, при увеличении $Z_{имп}$ возрастает GPR, увеличивается, усиливается ток смещения через паразитные ёмкости, возрастает дифференциальная помеха во вторичных цепях.

Таким образом, ключевым параметром, определяющим уровень ВЧ помехи, является не только амплитуда высокочастотной составляющей тока КЗ, но и частотно-зависимое импульсное сопротивление заземляющего устройства. Требования к устойчивости оборудования подстанций к колебательным процессам установлены в ГОСТ IEC 61000-6-5-2017. За критерий электромагнитной уязвимости принято условие опасного воздействия:

$$U_d \geq U_{кр} \tag{10}$$

где: $U_{lim} \approx 1$ кВ для подстанций.

Оно служит для оценки риска воздействия на микропроцессорные устройства. При несоблюдении критерия электромагнитной уязвимости условия возможны ложные срабатывания РЗА, некорректная регистрация осциллограмм, нарушение селективности, сбои в цифровых интерфейсах (GOOSE, SV, Ethernet). Проблемы помехоустойчивости SMART-устройств на ПС рассмотрены в [16]. Требования по обеспечению ЭМС на подстанциях Республики Казахстан регламентируются также ГОСТ МЭК 61000-6-5-2017.

Особенности ЭМС SMART-устройств подстанций высокого напряжения рассмотрены в [9].

Объект исследования и экспериментальная методика.

Экспериментальные исследования выполнены на действующей ПС 220 кВ «№7» ОРУ 220/110 кВ. Приведена электрическая схема ПС-220 кВ (рисунок-5). Измерения проводились на ОРУ-220 кВ (автотрансформаторы АТ-1, АТ-2), ОРУ-110 кВ (выключатели Л-136, Л-123, Л-124, Л-141).

Вторичные цепи были представлены экранированными контрольными кабелями, подключёнными к панелям микропроцессорной релейной защиты и автоматики (РЗА). Для исключения воздействия на технологический процесс использовались резервные жилы кабелей, не задействованные в действующих цепях управления. Методика имитации ВЧ составляющей тока КЗ и натурные измерения на ПС подробно описаны в работах [15; 16].

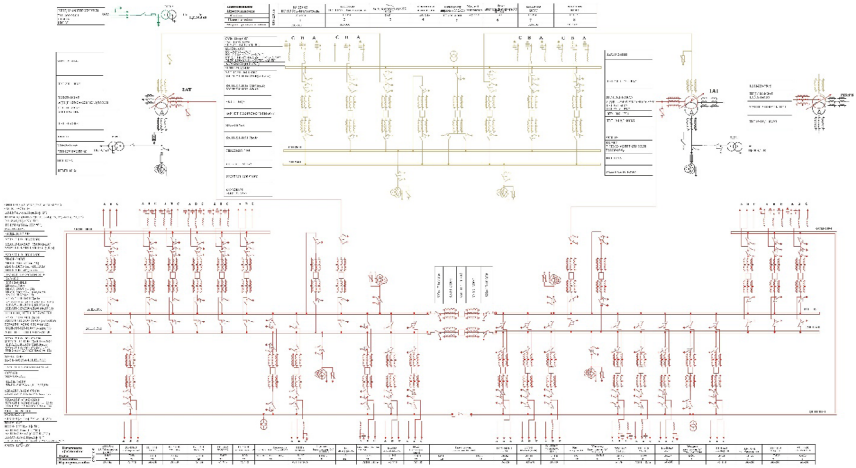


Рисунок 5 – Электрическая схема ПС 220 кВ «№7»

Приведена схема имитации ВЧ составляющей тока КЗ (рисунок-6) Принципы измерения импульсного сопротивления – согласно IEEE Std 81-2012 [16]. Программное моделирование переходных процессов – на основе подходов, изложенных в [17].

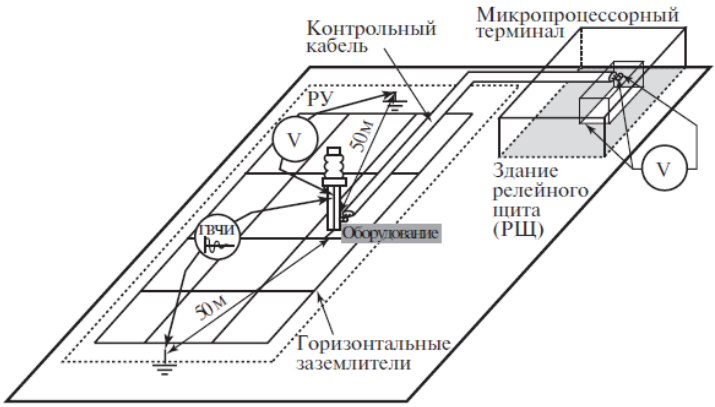
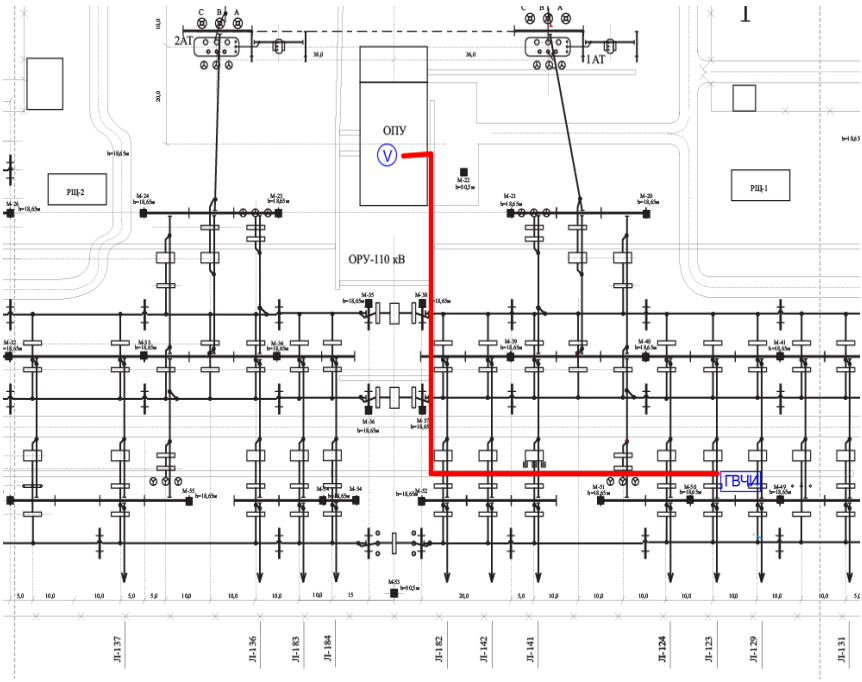


Рисунок 6 – Схема имитации ВЧ составляющей тока КЗ

В реальных условиях короткого замыкания ток содержит высокочастотные компоненты, обусловленные коммутационными процессами, дуговыми явлениями, неоднородностями заземляющей сети, отражениями волн в шинных системах. Для воспроизведения этих процессов использовался переносной генератор высокочастотных импульсов (ГВЧИ), формирующий затухающие колебательные токи в диапазоне частоты: 0,5; 1; 2 МГц, амплитуда тока, до 10 А, форма сигнала: затухающая колебательная волна. Генератор подключался одним выводом к заземлённому корпусу оборудования, вторым выводом – к удалённой земле (на расстоянии ≥ 50 м). На фрагменте плана ПС 220 кВ «№ 7» показана трасса одного из контрольных кабелей (рисунок – 7). Такая схема обеспечивает формирование неравномерного распределения потенциала на высоких частотах и воспроизводит подъём потенциала заземляющего устройства (GPR). Высокочастотные составляющие, возникающие при коммутации разъединителей и выключателей, подробно исследованы в [16].



ГВЧИ – точка подключения генератора (Выключатель Л-123),
V – точка подключения осциллографа (шкаф терминала РЗА),
---- трасса контрольного кабеля
Рисунок 7 – Фрагмент плана ПС 220 кВ «№7»

Исследования проводились сертифицированным поверенным измерительным оборудованием. В эксперименте применялись осциллограф: FLUKE 190C ScopeMeter с полосой пропускания: до 200 МГц, частотой дискретизации: до 2,5 GS/s, входным импедансом 1 Мом. Для измерения импульсного напряжения использовался импульсный вольтметр ВИ-5М с пределом измерения до 10 кВ и времени нарастания ≤ 20 нс. Погрешность измерения напряжения не превышала ұ3 %.

Ток генератора контролировался встроенной измерительной системой ГВЧИ с погрешностью ұ5 %.

Эксперименты проводился в следующей последовательности:

– фиксировались фоновые уровни помех при выключенном генераторе.
– устанавливались параметры импульса (амплитуда, частота).
– генерировался ВЧ-ток в заземляющем устройстве.

Одновременно измерялись импульсное напряжение на заземляющем оборудовании U_g и наведённое напряжение в контрольной жиле U_d. Измерение потенциала ЗУ производилось относительно удалённой земли, расположенной на расстоянии не менее 50 м от точки ввода тока. Для каждой конфигурации выполнялось не менее трёх повторных измерений. Разброс результатов не превышал 8 %, что подтверждает воспроизводимость.

Результаты и обсуждение

Значения импульсного сопротивления заземляющего устройства определялось как:

$$Z_{имп} = \frac{U_{имп}}{I_{имп}} \quad (11)$$

где: $U_{имп}$ – максимальное значение импульсного напряжения,

$I_{имп}$ – амплитуда импульсного тока генератора.

Полученные значения отражают частотно-зависимое поведение заземляющего устройства в диапазоне 0,5-2 МГц.

Коэффициент передачи дифференциальной помехи определялся как:

$$k_t = \frac{U_d}{U_{имп}} \quad (12)$$

Данный параметр характеризует ослабление (или усиление) импульсного воздействия при распространении по контрольному кабелю.

Измеренные значения пересчитывались к расчётной амплитуде высокочастотной составляющей реального тока КЗ:

$$U_{d,расч} = k_t * Z_{имп} * I_{вч} \quad (13)$$

Расчёт $I_{вч}$ выполнялся с использованием специализированной программы INTEFERENCE моделирования переходных процессов.

В ходе эксперимента для каждого объекта определялось импульсное сопротивление заземления в диапазоне частот 0,5-1 МГц. Полученные значения показали для оборудования ОРУ-220 кВ: $Z_{имп}$ =4,3-7,1 Ом, для оборудования ОРУ-110 кВ: $Z_{имп}$ =2,7-12,6 Ом. Максимальные значения фиксировались на отдельных присоединениях при частоте 1 МГц. Установлено, что увеличение частоты приводит к росту импульсного сопротивления, что связано с проявлением индуктивных свойств заземляющего контура.

Осциллографирование показало наличие затухающих высокочастотных колебаний в контрольных кабелях при каждом включении генератора. Характерные высокочастотные помехи на контрольных кабелях при генерации ВЧ-составляющей тока КЗ приведены на осциллограммах (рисунок– 8).

Обработка осциллограмм дала следующие характерные параметры: длительность колебательного процесса: 5-15 мкс, частота доминирующей компоненты: 0,5-1 МГц, форма сигнала - затухающая синусоидальная волна. После пересчёта к реальному значению высокочастотной составляющей тока КЗ были получены максимальные уровни дифференциальных помех (таблица 1).

Таким образом, в ряде присоединений уровень помехи превышает порог 1 кВ, установленный для интерфейсов вторичных цепей подстанций [10].

Спектральная обработка сигналов методом FFT показала максимум энергии в диапазоне 0,4–1,2 МГц, снижение амплитуды на частотах выше 2 МГц, совпадение доминирующих частот с частотами, задаваемыми генератором. Это подтверждает корректность методики имитации высокочастотной составляющей тока КЗ.

Таблица 1 – Значения высокочастотной составляющей тока короткого замыкания, полученные в ходе эксперимента, соответствуют максимальным уровням дифференциальных помех

Место измерения	**Наибольшее напряжение на устройстве (Расчетно-эксперимен-тальные воздействия), кВ**	**Допустимый уровень воздействия, кВ МЭК 61000-4-12-96**	**Выводы**	**Классифи-кация риска**
Синфазная помеха				
АТ-2 (газ. защита)	0,5-0,75 кВ	2 кВ	В пределах нормы	низкий риск
АТ-2 (ТВТ-220)	0,1-0,13 кВ	2 кВ	Значительно ниже предела	Очень низкий риск
ТВТ Л-432	1,65 кВ	2 кВ	На уровне порога	Средний риск
ЭГВ Л-123	1,79 кВ	2 кВ	На уровне порога	Средний риск
ТВТ Л-102	2,7 кВ	2 кВ	Выше нормы	Высокий риск
ЭГВ Л-142	1,24 кВ	2 кВ	На уровне порога	Средний риск

ТВТ Л-142	1,76 кВ	2 кВ	На уровне порога	Средний риск
ТВТ Л-182	1,56	2 кВ	На уровне порога	Средний риск
ЭГВ Л-102	3,43 кВ	2 кВ	Значительно выше нормы	Очень высокий риск
ЭГВ Л-184	0,22 кВ	2 кВ	Значительно ниже предела	Очень низкий риск
Противофазная помеха				
ЭГВ ВО-1	0,69 кВ	1 кВ	На уровне порога	Средний риск
ЭГВ Л-433	0,09 кВ	1 кВ	Значительно ниже предела	Очень низкий риск
ТВТ ВО-1	0,58 кВ	1 кВ	На уровне порога	Средний риск
ТВТ Л-123	1,13 кВ	1 кВ	Выше нормы	Высокий риск
ЭГВ Л-123	2,42 кВ	1 кВ	Значительно выше предела	Очень высокий риск
ЭГВ Л-141	0,77 кВ	1 кВ	На уровне порога	Средний риск
ТВТ Л-141	0,36 кВ	1 кВ	ниже предела	низкий риск
ТВТ Л-102	2,53 кВ	1 кВ	Значительно выше предела	Очень высокий риск

Сравнение полученных данных показало линейную зависимость: $U_{прик} \infty Z_{имп}$:

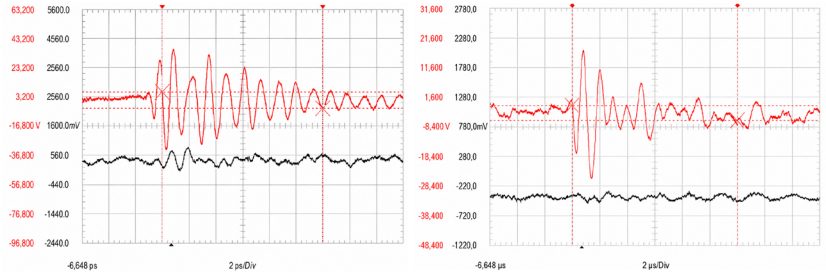
– при $Z_{имп}$=15,9 Ом (ЭВГ-Л-123, 0,5 МГц) зарегистрировано превышение 2,42 кВ;

– при $Z_{имп}$=3,6 Ом (ЭВГ-Л-136, 0,5 МГц) превышения порога не зафиксировано.

Это подтверждает ключевую роль импульсного сопротивления заземления в формировании дифференциальной помехи.

Сравнение полученных значений с допустимым уровнем 1 кВ показало в 30–35 % исследованных конфигураций наблюдается превышение допустимого порога. При этом наиболее уязвимыми являются цепи управления выключателей и автотрансформаторов на ОРУ-110 кВ. Таким образом, даже при двустороннем заземлении экранов контрольных кабелей не исключается формирование дифференциальной помехи, превышающей нормативные значения. Полученные значения импульсного сопротивления соответствуют диапазонам, приведённым в исследованиях [10]. Спектральные характеристики ВЧ процессов в подстанциях сопоставимы с данными

[5; 17]. Превышение уровня 1 кВ подтверждает необходимость оценки помехоустойчивости согласно [16].



а) б)

а – в цепях управления ЭГВ Л-123 (0,5 МГц);
б – в цепях АТ-2 (0,5 МГц)

Рисунок 8 – Характерные высокочастотные помехи на контрольных кабелях при генерации ВЧ-составляющей тока КЗ

Полученные данные показывают, что уровень дифференциальной помехи во вторичных цепях определяется произведением двух ключевых факторов:

$$U_d = k_t * Z_{имп} * I_{вч} \quad (14)$$

Экспериментально установлено, что при увеличении импульсного сопротивления заземлённого оборудования возрастает как потенциал GPR, так и амплитуда наведённой дифференциальной помехи. Результаты согласуются с ранее опубликованными данными по помехоустойчивости устройств автоматизированных систем энергообъектов [15; 16]. Таким образом, критическим параметром является не только амплитуда тока КЗ, но и высокочастотные свойства заземляющего устройства.

Анализ результатов показал, что превышение уровня 1 кВ связано с:

– повышенным импульсным сопротивлением отдельных присоединений;
– наличием распределённой индуктивности заземляющих проводников;
– асимметрией трассировки контрольных кабелей;
– наличием паразитных ёмкостных связей между экраном и жилой кабеля.

Даже при двустороннем заземлении экранов полностью исключить дифференциальную составляющую невозможно вследствие неоднородности потенциалов вдоль кабельной трассы.

На основании полученных результатов предлагаются следующие меры.

Снижение импульсного сопротивления заземления наиболее эффективной мерой является уменьшение путём:

– уплотнения заземляющей сетки;

– применения дополнительных горизонтальных и вертикальных электродов;

– сокращения длины токопроводящих соединений;

– использования проводников с меньшим индуктивным сопротивлением;

– организации локальной ВЧ-сетки вокруг критического оборудования.

Снижение импульсного сопротивления приводит к пропорциональному уменьшению GPR и наведённой дифференциальной помехи.

Оптимизация схемы заземления экранов кабелей рекомендуется:

– анализ распределения потенциалов вдоль трассы;

– минимизация разности потенциалов между точками подключения экрана;

– исключение параллельных контуров с различными импедансами;

– применение дополнительного уравнивания потенциалов в зоне ввода кабеля в панель РЗА.

Минимизация паразитных связей:

– разделение силовых и контрольных трасс;

– увеличение расстояния между заземляющими шинами и вторичными кабелями;

– использование металлических кабельных лотков, подключённых к общей системе уравнивания потенциалов.

Учёт ВЧ-составляющей при проектировании ЗУ.

Традиционный расчёт заземляющих устройств ориентирован на условия электробезопасности и токи промышленной частоты.

Результаты исследования показывают необходимость дополнительной оценки высокочастотного импульсного сопротивления при проектировании подстанций 220/110 кВ.

Практическая значимость результатов.

Полученные экспериментальные данные позволяют:

– количественно оценивать риск превышения допустимого уровня дифференциальной помехи;

– определять наиболее уязвимые присоединения;

– обосновывать модернизацию заземляющего устройства;

– использовать импульсное сопротивление как диагностический параметр.

Необходимость учёта ВЧ-характеристик ЗУ при проектировании подчёркивается в [17].

Предложенный подход может быть применён при техническом обследовании действующих подстанций без вмешательства в их технологический режим.

Выводы

В результате натурно-имитационных исследований на подстанции ПС 220 кВ «№7» установлено:

При имитации высокочастотной составляющей тока короткого замыкания формируется подъём потенциала заземляющего устройства, достигающий значений, приводящих к возникновению дифференциальных помех во вторичных цепях.

В ряде конфигураций уровень помехи превышает допустимое значение 1 кВ для интерфейсов контрольных кабелей.

Ключевым параметром, определяющим амплитуду помехи, является импульсное сопротивление заземления оборудования.

Снижение импульсного сопротивления и оптимизация схемы заземления экранов кабелей позволяют существенно уменьшить уровень высокочастотных дифференциальных помех.

Полученные результаты подтверждают необходимость учёта высокочастотных характеристик заземляющих устройств при проектировании и модернизации подстанций высокого напряжения.

REFERENCES

1 **Ramdani, M., Sicard, E., Boyer, A., Ben, D.S., Whalen, J.J., Hubing Todd, H. Coenen M., Wada O.** The Electromagnetic Compatibility of Integrated Circuits-Past, Present and Future // IEEE Trans. EMC, 2009. [Electronic resource] – https://hdl.handle.net/2433/109813

2 **Xuehai, G., Jinliang, H.** «Electromagnetic Interference on Secondary Systems of Substation Caused by Short-circuit Fault» // 2007 International Symposium on Electromagnetic Compatibility. – Qingdao, China, 2007. – P. 206–211 – https://doi.org/10.1109/ELMAGC.2007.4413467

3 **Ng, D.K.S., Barker, R. J.** "Effect of shield termination on conducted emissions in cable harnesses" // IEEE Transactions on Electromagnetic

Compatibility. – Vol. 54. – no. 1. – P. 169–177, Feb. 2012. [Electronic resource]. – https://ieeexplore.ieee.org/document/6378447

4 **Kangozhin, B. R., Dautov, S. S.** Kazakh Institute of Technical Development (KITR) LLP. Developed projects [Electronic resource]. – Access mode: https://kitr.kz/projects (Date of access: 24.02.2025)

5 **Kangozhin, B. R., Dautov, S. S.** "Electromagnetic Compatibility": A Textbook. Almaty : Kazakh University Publishing House, 2020. – 192 p.

6 **Kangozhin, B. R., Dautov, S. S.** Research report on «Coordination of Noise Immunity of SMART Devices in the Automated Control System» at KEGOC JSC substations using the example of the 500 kV TsGPP, 500 kV Shymkent, 220 kV Kuibyshevskaya, and 220 kV No. 7 substations, 2024.

7 **Kangozhin, B.R., Dautov S.S., Zhalgabayev, S., Nurmakhanova, A., Bakyt G. A.** Computational and Experimental Method for Determining the Current in the Braid of a Control Cable During a Short Circuit // Applied Sciences. – 2025. – 15(19). – 10379. – https://doi.org/10.3390/app151910379.

8 **Kangozhin, B. R., Baimuratov, O. A., Zharmagambetova, M. S., Dautov, S. S., Kangozhin, D. B.** Noise immunity of devices of automated systems for technological control of energy facilities in the Almaty region // SERIES «Advances in Intelligent Systems and Computing» [Electronic resource]. – https://link.springer.com/10.1007/978-3-030-87675-3_17.

9 **Carrsco, G.** «Electromagnetic interference in substation Jose up to 400/115 kV» // in Proc. IEEE Transmission & Distribution Conference and Exposition. – P. 1–6. – Aug. 2006

10 **Wu, J.** Microcontroller susceptibility variations to EFT burst during accelerated aging // Microelectronics Reliability. – 2016. – 64. – P. 210–214

11 **Benfica, J., Vargas, F., Soares, M.F., Schramm D.** Conducted EMI susceptibility analysis of a COTS processor as function of aging. – 2020 Microelectronics Reliability. – 114. – 113884. – https://doi.org/10.1016/j.microrel.2020.113884

12 **Linjing Fan, Xudong Zu, Zhengxiang.** Huang Interferences of Electromagnetic Pulses on Microcontroller Units. Appl. – 2023. – Sci. 2023. – 13(14). – 8190. – https://doi.org/10.3390/app13148190

13 **Sun, S.** Research on Measures to Limit Short-Circuit Current by Changing the Structure of the Power Grid // Energies. – 2025. – 18(8). – 2098. – https://doi.org/10.3390/en18082098

14 **Li, L.** "Location method of single line-to-ground faults in low-resistance-grounded distribution networks" International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2023. – https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2022.108777

15 **Bo, Zhang, Jinliang, He, Yukuan, Jiang, Qian Li and Leishi Xiao.** «Experimental research on interference in secondary cable from short-circuit current in substations» 2015 International Symposium on Lightning Protection (XIII SIPDA), Balneario Camboriu, Brazil. – 2015. – P. 137–140. – https://doi.org10.1109/SIPDA.2015.7339298

16 **Kangozhin, B.R., Zharmagambetova, M.S., Dautov, S.S.** Switching impulse interference at a traction substation // Industrial transport of Kazakhstan, 2020 – No. 3 (68). – ISSN 1814-5787, 70–76 p.

17 **Kangozhin, B.R., Zharmagambetova, M.S., Dautov, S.S., Baltash, O.Zh.** The influence of cable shielding on the EMC of signaling and interlocking devices // Vestnik KazATK No. 2 (113), 2020. – ISSN 1609-1817, 256–263 p.

Поступило в редакцию 26.04.26.
Поступило с исправлениями 25.05.26.
Принято в печать 31.08.26.

С. С. Даутов[1], Б. Р. Кангожин[2],
*М. С. Жармағамбетова[3],*М. Б. Сатенова[4]*
[1,2,3,4]Мұхаметжан Тынышбаев атындағы ALT Университеті,
Қазақстан Республикасы, Алматы қ.
26.04.26 ж. баспаға түсті.
25.05.26 ж. түзетулерімен түсті.
31.08.26 ж. басып шығаруға қабылданды.

ҚЫСҚА ТҰЙЫҚТАЛУ КЕЗІНДЕ 220 КВ ЭЛЕКТР ҚОСАЛҚЫ СТАНЦИЯСЫНЫҢ ҚОРҒАНЫС ЖӘНЕ АВТОМАТТАНДЫРУ ТІЗБЕКТЕРІНДЕГІ ЖОҒАРЫ ЖИІЛІКТІ КЕДЕРГІЛЕР

Мақалада жоғары кернеулі электр қосалқы станциясының жерге тұйықталу құрылғысының потенциалы көтерілген кезде микропроцессорлық релелік қорғаныс жүйелерінің бақылау кабельдерінде пайда болатын жоғары жиілікті, дифференциалды кедергілердің табиғи имитациялау зерттеу нәтижелері ұсынылған. Тәжірибе технологиялық үдеріске әсер етпейтін, қысқа тұйықталу тогының жоғары жиілікті құрамын имитациялайтын 0,5-2 МГц жиіліктегі қозғалмалы, жоғары жиілікті импульстік генераторды пайдалану арқылы «KEGOK» АҚ Шымкенттегі іске қосылып тұрған 500 кВ қосалқы станциясында жүргізілді. Қолданыстағы есептеу

әдістері нақты жұмыс жағдайларында жерге қосу құрылғысының нақты әлеуетті таралуын және импульстік кедергісін әрқашан ескере бермейді. Сондықтан, заттай өлшемдер басымдыққа ие болуда.

Жерге қосу құрылғысының потенциалының импульстік мәндері анықталды, екінші реттік тізбектерге кедергілердің берілу коэффициенті есептелді. Қысқа тұйықталу тогының жоғары жиілікті құрамының нақты мәндеріне қайта есептеу жүргізілді. Зерттеу нәтижесінде импульстік жерге тұйықтау кедергісінің белгілі бір мәндерінде қосалқы станциялардың екінші реттік тізбектерінің интерфейстері үшін дифференциалды кедергі деңгейі 1 кВ рұқсат етілген шегінен асып кетуі мүмкін екендігі анықталды.

Индукцияланған кернеу амплитудасының жерге қосылған жабдықтың импульстік кедергісіне тәуелділігі көрсетілген және жерге қосу құрылғысын жаңарту арқылы жоғары жиілікті кедергі деңгейін төмендетуге арналған инженерлік шаралар ұсынылған.

Кілтті сөздер: электромагниттік үйлесімділік, 500 кВ электрлік қосалқы станция, жоғары жиілікті кедергілер, импульстік жерге тұйықтау кедергісі, дифференциалды кедергілер, екінші реттік тізбектер.

S. S. Dautov[1], B. R. Kangozhin[2],
*M. S. Zharmagambetova[3], *M. B. Satenova[4]*
[1,2,3,4]Mukhametzhan Tynyshpayev ALT University,
Republic of Kazakhstan, Almaty.
Received 26.04.26.
Received in revised form 25.05.26.
Accepted for publication 31.08.26 .

HIGH-FREQUENCY INTERFERENCE IN THE PROTECTION AND AUTOMATION CIRCUITS OF A 220 KV ELECTRICAL SUBSTATION DURING SHORT CIRCUITS

This article presents the results of a full-scale simulation study of high-frequency differential interference occurring in the control cables of microprocessor-based relay protection systems during a grounding potential rise at a high-voltage electrical substation. The experiment was conducted at the operating 500 kV Shymkent substation of JSC KEGOK using a portable high-frequency pulse generator with frequencies

of 0.5–2 MHz, simulating the high-frequency component of a short-circuit current without affecting the process. Existing calculation methods do not always take into account the actual potential distribution and impulse resistance of the grounding device under real operating conditions. Therefore, in-kind measurements are becoming a priority.

The pulsed potential values of the grounding device were determined, the noise transfer coefficient to secondary circuits was calculated, and the high-frequency component of the short-circuit current was converted to actual values. It was established that, at certain values of the pulsed grounding resistance, the differential noise level may exceed the permissible threshold of 1 kV for substation secondary circuit interfaces.

The dependence of the induced voltage amplitude on the pulsed resistance of grounded equipment is demonstrated, and engineering measures are proposed for reducing the level of high-frequency noise by upgrading the grounding device.

Keywords: electromagnetic compatibility, 500 kV electrical substation, high-frequency interference, impulse grounding resistance, differential interference, secondary circuits.

Теруге 07.09.2026 ж. жіберілді. Басуға 30.09.2026 ж. қол қойылды.
Электронды баспа
19,0 Mb RAM
Шартты баспа табағы 34,4. Таралымы 300 дана. Бағасы келісім бойынша.
Компьютерде беттеген: Шукитова А. Б.
Корректор: А. Р. Омарова, Д. А. Кожас
Тапсырыс № 4601

Сдано в набор 07.09.2026 г. Подписано в печать 30.09.2026 г.
Электронное издание
19,0 Mb RAM
Усл. печ. л. 34,4. Тираж 300 экз. Цена договорная.
Компьютерная верстка: Шукитова А. Б.
Корректор: А. Р. Омарова, Д. А. Кожас
Заказ № 4601

«Toraighyrov University» баспасынан басылып шығарылған
Торайғыров университеті
140008, Павлодар қ., Ломов к., 64, 137 каб.

«Toraighyrov University» баспасы
Торайғыров университеті
140008, Павлодар қ., Ломов к., 64, 137 каб.
67-36-69
E-mail: kereku@tou.edu.kz
www.vestnik-energy.tou.edu.kz