

УДК 621.316.9

**Д. Г. КОЛИУШКО, С. С. РУДЕНКО, Г. М. КОЛИУШКО****АНАЛИЗ СОСТОЯНИЯ ЗАЗЕМЛЯЮЩИХ УСТРОЙСТВ ДЕЙСТВУЮЩИХ  
ЭНЕРГООБЪЕКТОВ УКРАИНЫ**

В роботі проведено аналіз нормованих параметрів заземлювальних пристроїв (ЗП) енергооб'єктів України, що знаходяться в експлуатації. Сформовано базу даних результатів діагностики стану ЗП діючих енергооб'єктів. Отримано статистичні розподіли перевищення допустимих значень напруги дотику, напруги на ЗП та опору ЗП для підстанцій різних класів напруги. Обґрунтована необхідність виконання реконструкції ЗП у відповідності з вимогами щодо допустимого значення напруги дотику.

**Ключові слова:** заземлювальний пристрій, напруга дотику, опір, реконструкція, енергооб'єкт, статистичний розподіл.

В работе проведен анализ нормируемых параметров заземляющих устройств (ЗУ) энергообъектов Украины, находящихся в эксплуатации. Создана база данных результатов диагностики состояния ЗУ действующих энергообъектов. Получены статистические распределения превышения допустимых значений напряжения прикосновения, напряжения на ЗУ и сопротивления ЗУ для подстанций различных классов напряжения. Обоснована необходимость выполнения реконструкции ЗУ в соответствии с требованиями к допустимому значению напряжения прикосновения.

**Ключевые слова:** заземляющее устройство, напряжение прикосновения, сопротивление, реконструкция, энергообъект, статистическое распределение.

The diagnostics was performed for grounding grids more than 1 000 existing power plants. In this paper the standardized parameters grounding of the power plants, which are in operation in Ukraine, were analyzed. To solve this problem we compiled the statistical base of standardized parameters, we performed the analysis for the the statistical distributions of exceeding allowable value of the touch voltage, grounding voltage and grounding resistance for substations of different voltage classes. The necessity performing of grounding reconstruction in accordance with the requirements for allowable value of the touch voltage was substantiated.

**Keywords:** ground grids, voltage touch, resistance, reconstruction, power plant, statistical distribution.

**Постановка проблеми и анализ нормативных документов.** В настоящее время срок эксплуатации электрических подстанций Украины, в подавляющем большинстве случаев превышает 30 лет. За этот период заземляющее устройство (ЗУ) претерпевает значительные изменения, вследствие чего его нормируемые параметры могут превысить допустимые значения, а конструктивное исполнение перестает соответствовать требованиям нормативных документов. Наиболее часто встречающейся причиной нарушения целостности ЗУ становится коррозия заземлителей в процессе длительной эксплуатации, которую усугубляет высокая агрессивность грунта в месте расположения подстанции, например, вблизи или на территории промышленных объектов. Также имеют место: ошибки при монтаже ЗУ, подсоединение новых и замена старых единиц оборудования ОРУ без учета реальной схемы ЗУ, непреднамеренное нарушение целостности заземляющей сетки при земляных работах и т.д.

Текущее состояние ЗУ контролируется при помощи электромагнитной диагностики (ЭМД) [1] и на основании ее результатов разрабатываются рекомендации для проведения ремонтных работ по реконструкции и восстановлению ЗУ согласно требованиям нормативных документов [2-4].

В соответствии с ПУЭ [2] существуют два направления проектирования ЗУ для электроустановок напряжением более 1 кВ в электрических сетях с глухозаземленной нейтралью: первое – по допустимому значению напряжения прикосновения ( $U_{\text{прик}}$ ) и второе – по допустимому значению сопротивления ЗУ ( $R_{\text{ЗУ}}$ ).

Существует ряд общих требований к конструк-

тивному выполнению для указанных способов проектирования ЗУ: горизонтальный заземлитель (ГЗ) должен охватывать все единицы оборудования электроустановки, а продольные и поперечные ГЗ должны быть соединены в заземляющую сетку, при обеспечении как можно меньшей длины заземляющих проводников и стекании тока не менее чем в двух направлениях.

Необходимо отметить, что требования как к значениям нормируемых параметров, так и к конструктивному выполнению ЗУ при разработке рекомендаций по указанным направлениям имеют ряд существенных различий. Например, напряжение на ЗУ при проектировании по допустимому  $R_{\text{ЗУ}}$  ограничивается значением 10 кВ, а также регламентируется значения самого сопротивления ЗУ (не более 0,5 Ом при удельном сопротивлении грунта не более 500 Ом·м). В то же время, при проектировании по первому направлению напряжение на ЗУ может превышать 10 кВ при соблюдении дополнительных условий, а значение  $R_{\text{ЗУ}}$  вообще не регламентируется.

ЗУ, выполненное в соответствии с допустимым напряжением прикосновения, не имеет дополнительных требований к конструктивному выполнению. В [2] лишь рекомендуется размещать продольные и поперечные ГЗ с учетом допустимой величины  $U_{\text{прик}}$  и удобства присоединения заземляемого оборудования. В случае же необходимости для снижения  $U_{\text{прик}}$  в местах оперативного обслуживания оборудования следует обустроить изоляционный слой (например, подсыпку щебнем) толщиной 0,1-0,2 м.

В случае проектирования ЗУ в соответствии с допустимой величиной  $R_{\text{ЗУ}}$  к его конструктивному

исполнению предъявляются жесткие требования. Вдоль каждой линии электрооборудования прокладываются продольные заземлители на расстоянии не более 1,5 м от оборудования, а поперечные заземлители располагают между оборудованием на фиксированном расстоянии между ними: 4,0; 5,0; 6,0; 7,5; 9,0; 11; 13,5; 16; 20 м в сторону увеличения от периферии к центру подстанции. К тому же размеры ячеек заземляющей сетки должны не превышать  $6 \text{ м} \times 6 \text{ м}$  в местах присоединения нейтралей силовых трансформаторов и короткозамыкателей. Глубина прокладки ГЗ должна быть 0,5-0,7 м, в то время как при проектировании ЗУ по допустимому  $U_{\text{прик}}$  она может составлять 0,3 м.

В практике эксплуатации электроустановок напряжением более 1 кВ в сетях с глухозаземленной нейтралью распространено ошибочное мнение, что если сопротивление ЗУ не превышает 0,5 Ом, то само ЗУ удовлетворяет всем требованиям по электробезопасности. При эксплуатации зачастую  $U_{\text{прик}}$  не контролируется, т.к. измерение его и приведение к реальным значениям токов КЗ является трудоемкой задачей [1] и должно выполняться с особой тщательностью во избежание методических ошибок. Кроме того, не проверяется конструктивное исполнение ЗУ на соответствие требованиям нормативных документов.

В связи с необходимостью проведения ремонтно-восстановительных работ ЗУ подстанций Украины, находящихся в эксплуатации, становится актуальным вопрос выбора направления реконструкции ЗУ: по допустимому значению  $U_{\text{прик}}$  или по допустимому значению  $R_{\text{ЗУ}}$ .

Сотрудниками НИПКИ «Молния» была выполнена ЭМД ЗУ более чем 1000 энергообъектов. Подробный анализ показал, что практически все ЗУ действующих подстанций не соответствуют нормативным требованиям к конструктивному исполнению и только наличие реальной исполнительной схемы на текущий момент и определенные на ее основании нормируемые параметры, позволяет оценивать состояние ЗУ.

Целью данной работы является определение оптимального направления реконструкции ЗУ на основании статистического анализа нормируемых параметров, полученных в ходе проведения ЭМД на действующих подстанциях Украины.

**Материалы исследования.** В настоящей работе на основании составленной базы данных для объектов, обследованных в период с 2001 по 2015 гг., проведен статистический анализ количества превышений допустимых значений нормируемых параметров ЗУ действующих подстанций. В качестве предельно допустимого  $R_{\text{ЗУ}}$  принималось значение 0,5 Ом, напряжения на ЗУ значения 5 и 10 кВ, а допустимое  $U_{\text{прик}}$  выбиралось исходя из величины времени срабатывания защиты по значениям, приведенным в [2].

В табл. 1 показан объем выборки по различным классам напряжения, которые рассматривались в работе.

Следует отметить, что подобная статистическая база данных получена впервые в мировой практике

(1004 действующих энергообъекта классами напряжения от 35 кВ до 750 кВ). Для сравнения известный анализ значений нормированных параметров ЗУ проведен швейцарской фирмой «Fachkommission für Hochspannungsfragen» базируется данных лишь 44 подстанций швейцарской федеральной железной дороги «Schweizerischen Bundesbahnen» [6].

Таблица 1 – Объем выборки по различным классам напряжения, рассмотренные в работе

Класс напряжения, кВ	110	150	220 и более
Число ОРУ станций и подстанций	346	129	110

Измерение нормируемых параметров производилось согласно методике описанной в [1-5] по принципу амперметра-вольтметра:  $R_{\text{ЗУ}}$  определялось с помощью однолучевой или двухлучевой схемы, при этом вспомогательный токовый электрод располагался на расстоянии 1,5-3 D, где D – наибольшая диагональ ЗУ, а расстояние до потенциального вспомогательного электрода  $(0,62 \div 1)$  от расстояния до токового электрода. Напряжение прикосновения  $U_{\text{прик}}$  определялось по аналогичной схеме в нескольких контрольных точках. При этом в качестве вспомогательного потенциального электрода использовалась медная пластина, имеющая резистор с сопротивлением 1 кОм. Сам же вспомогательный потенциальный электрод располагался на расстоянии 0,8 м от исследуемой единицы оборудования. На основании полученных данных в ходе проведения ЭМД ЗУ (реального расположения ЗУ и электрофизических характеристик грунта) производились расчеты значения  $U_{\text{прик}}$  для остальных единиц оборудования.

Выполнить корректное измерение  $R_{\text{ЗУ}}$  и  $U_{\text{прик}}$  в ряде случаев не представляется возможным, что обусловлено расположением подстанции в черте города с плотной застройкой или на территории промышленного объекта [7], а также большими размерами ЗУ [8]. Поэтому в соответствии с [1] и на основании результатов ЭМД ЗУ осуществляется расчет значений  $R_{\text{ЗУ}}$  и  $U_{\text{прик}}$  с использованием вспомогательных измерений, позволяющих проверить адекватность расчетной модели реальным условиям.

На рис. 1 приведено процентное превышение допустимого сопротивления ЗУ для обследованных подстанций, на которых осуществлялось измерение  $R_{\text{ЗУ}}$  (объем выборки для соответствующих классов напряжения составлял: 110 кВ – 153 подстанции, 150 кВ – 50 подстанций, 220 и более кВ – 54 подстанции).

Как видно из графиков как для расчетной величины  $R_{\text{ЗУ}}$ , так и для измеренной наблюдается одинаковая тенденция: наиболее часто превышения наблюдаются на ЗУ энергообъектов классом напряжения 110 кВ (17,6 и 7,8 % соответственно), а самый низкий процент – для энергообъектов классом 220 и более кВ (3,6 и 1,9 % соответственно). Это объясняется тем, что сама величина  $R_{\text{ЗУ}}$  в основном определяется периметром ЗУ и электрофизическими характеристиками грунта, при этом наличие ГЗ внутри контура ЗУ оказывает слабое влияние на значение  $R_{\text{ЗУ}}$ , а периметр ЗУ

подстанций классом напряжения 220 кВ и выше, как правило, существенно больше, чем у подстанций 110-150 кВ.

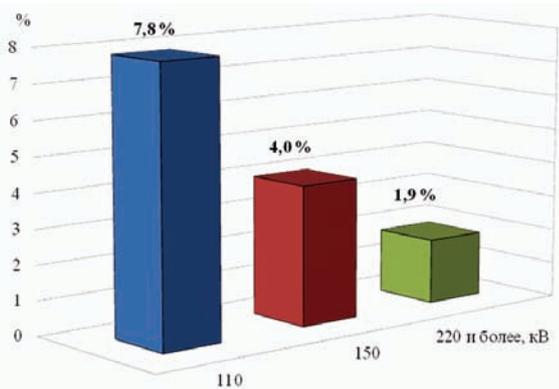


Рисунок 1 – Процентное число превышений измеренным  $R_{зу}$  допустимого значения

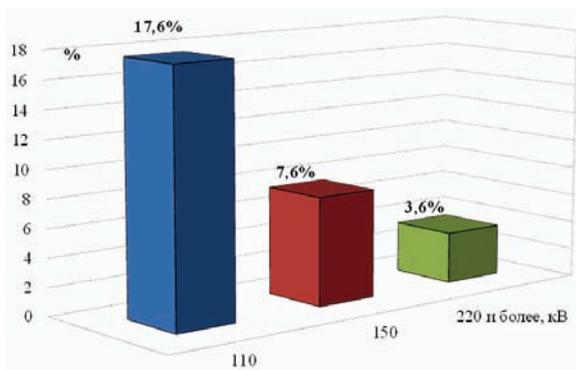


Рисунок 2 – Процентное число превышений расчетным  $R_{зу}$  допустимого значения

На  $U_{прик.}$  влияют четыре основных фактора: частота прокладки ГЗ вблизи оборудования с целью выравнивания потенциала, электрофизические характеристики грунта (соотношение удельных электрических сопротивлений и мощность слоев грунта), ток КЗ и наибольшая диагональ ЗУ.

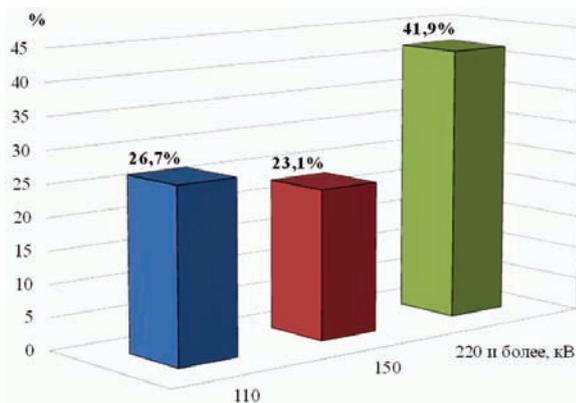


Рисунок 3 – Процентное число превышений  $U_{прик.}$  допустимого значения при КЗ за пределами ОРУ

На рис. 3 и рис. 4 приведено процентное превышение допустимого  $U_{прик.}$  для обследованных подстанций (см. табл. 1). При этом рассмотрены два случая однофазного КЗ: за пределами подстанции (рис. 3)

и КЗ на шинах подстанции (рис. 4). Следует отметить, что в этом случае наблюдается обратная тенденция: наиболее часто превышение допустимого значения напряжения прикосновения наблюдается на энергообъектах классом напряжения 220 и более кВ, а на энергообъектах 110 и 150 кВ частота превышения практически одинакова.

На рис. 5 приведено процентное превышение допустимого  $U_{прик.}$  при КЗ на шинах подстанций для ЗУ, у которых  $R_{зу}$  находится в пределах нормы (объем выборки для соответствующих классов напряжения составлял: 110 кВ – 300 подстанций, 150 кВ – 122 подстанции, 220 и более кВ – 105 подстанций).

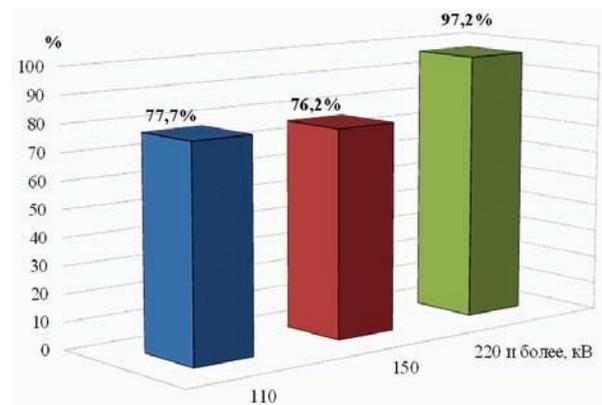


Рисунок 4 – Процентное число превышений  $U_{прик.}$  допустимого значения при КЗ на ОРУ

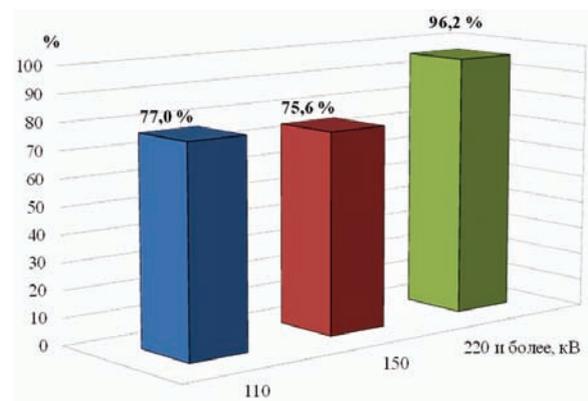


Рисунок 5 – Процентное число превышений  $U_{прик.}$  допустимого значения при КЗ на ОРУ

Полученные данные соответствуют тенденции, приведенной на графике рис. 4 и являются доказательством того, что обеспечение требуемой в нормативной документации величины  $R_{зу}$  для электроустановок напряжением выше 1 кВ в сети с глухозаземленной нейтралью не гарантирует электробезопасность обслуживающего персонала, т.е. при  $R_{зу} < R_{зу \text{ допустимое}}$  наблюдается  $U_{прик.} > U_{прик. \text{ допустимое}}$ .

Как указывалось выше, величина напряжения на ЗУ также регламентируется: превышение значения 10 кВ допускается лишь на ЗУ выполненном по требованиям к  $U_{прик.}$  [2]. В случае же превышения значения 5 кВ необходимо применить средства защиты изоляции кабелей связи и телемеханики, отходящих от электроустановки, и выноса высокого потенциала за ее пределы. Следует отметить, что величина на-

пряжения на ЗУ фактически определяется значением  $R_{3У}$  и током КЗ.

На рис. 6 и рис. 7 приведено процентное превышение допустимого напряжения на ЗУ значений 5 и 10 кВ соответственно, для случаев, где  $R_{3У}$  находится в пределах нормы (объем выборки для соответствующих классов напряжения составлял: 110 кВ – 300 подстанций, 150 кВ – 122 подстанции, 220 и более кВ – 105 подстанций).

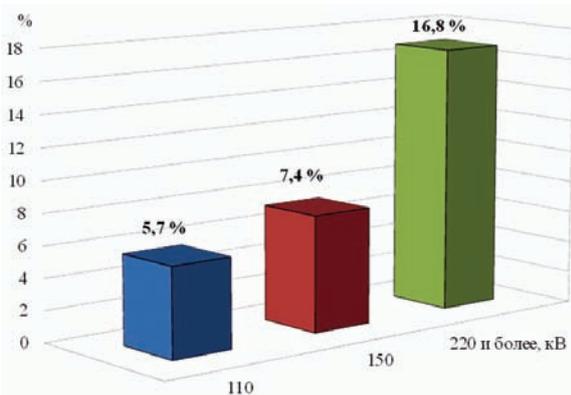


Рисунок 6 – Процентное число превышений  $U_{3У}$  допустимого значения 5 кВ

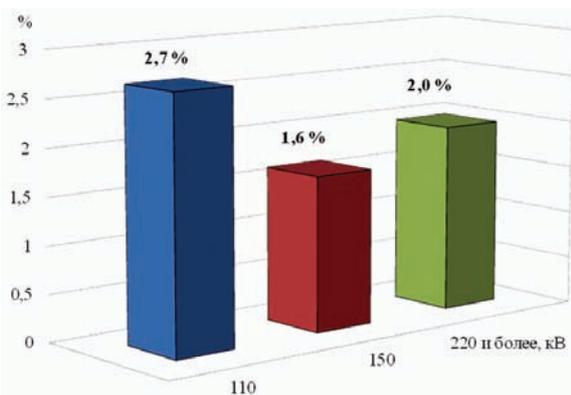


Рисунок 7 – Процентное число превышений  $U_{3У}$  допустимого значения 10 кВ

Таким образом, для ряда подстанций (см. рис. 7) для ЗУ, выполненных по требованиям к  $R_{3У}$ , наблюдаются значения напряжения выше 10 кВ, а для значительной части подстанций (см. рис. 6) следует применять специальные средства защиты изоляции кабелей связи и телемеханики, отходящих от электроустановки, и выноса высокого потенциала за ее пределы, т.к. напряжение на ЗУ превышает 5 кВ. Для обеспечения напряжения на ЗУ в пределах регламентированных значений на указанных энергообъектах необходимо ограничивать величину  $R_{3У}$  до значений существенно ниже 0,5 Ом.

### Выводы

Результаты анализа нормируемых параметров ЗУ 585 действующих подстанций классом напряжения 110 и выше кВ, обследованных в период с 2001 по 2015 гг., показал:

1. Сопротивление ЗУ большинства подстанций не превышают регламентированное в нормативных до-

кументах допустимое значение.

2. У абсолютного большинства подстанций при КЗ на шинах наблюдается превышение напряжения прикосновения на обслуживаемом оборудовании (от 76,2 % до 97,2 % для соответствующих классов напряжения), даже если сопротивление ЗУ находится в пределах нормы (от 75,6 % до 96,2 % случаев превышения).

3. Короткое замыкание за пределами электроустановки приводит к превышению допустимого значения напряжения прикосновения на значительной части подстанций (от 23,1 % до 41,9 % для соответствующих классов напряжения).

4. Для значительной части электрических станций и подстанций (от 1,6 % до 16,8 %) в зависимости от класса напряжения объекта и допустимого значения напряжения на ЗУ необходимо обеспечивать сопротивление ЗУ существенно меньше 0,5 Ом.

Таким образом, удовлетворение требования по допустимому значению сопротивления ЗУ не гарантирует электробезопасность обслуживающего персонала электроустановки в случае возникновения аварийной ситуации, т.е. значение сопротивления ЗУ не позволяет однозначно судить о пригодности ЗУ к дальнейшей эксплуатации. Поэтому проведение реконструкции ЗУ действующих электроустановок предпочтительнее выполнять в соответствии с требованиями к напряжению прикосновения, что позволит обеспечить электробезопасность обслуживающего персонала во всех режимах работы.

### Список литературы:

1. Випробування та контроль пристроїв заземлення електроустановок. Типова інструкція. СОУ 31.2-21677681-19:2009 – [Чинний від 2010–03–29]. – К. : Мінпаливенерго України, 2010. – 54 с. – (Національний стандарт України).
2. Правила улаштування електроустановок. [Чинне від 20.11.2014]. – Х. : Міненерговугілля України, 2014. – 793 с. – (Національний стандарт України).
3. IEEE Std.80-2000 IEEE Guide for Safety in AC Substation Grounding. – New York : The Institute of Electrical and Electronic Engineers. – 2000. – 192 p.
4. IEEE Std. 81-2012 Guide for Measuring Earth Resistivity, Ground Impedance and Earth Surface Potentials of a Grounding System. – New York : The Institute of Electrical and Electronic Engineers. – P. 1– 86
5. Борисов П. К. Методика исследования заземляющих устройств объектов электроэнергетики / П.К. Борисов, Г. М. Колушко, Г.И. Гримуд и др. // Энергетика и электрификация. – 2000. – №4. – С. 29 – 32.
6. Lörtscher M. Bahnrückstromführung und Erdung beim Unterwerk Zürich der Schweizerischen Bundesbahnen / M. Lörtscher, H. Voegeli. – Zürich : Elektrische Bahnen, 2001. – Н. 1-2, S. 51-63.
7. Колушко Г. М. К вопросу повышения точности расчета нормируемых параметров заземляющих устройств действующих электроустановок / Г.М. Колушко, Д.Г. Колушко, С.С. Руденко // Электротехника и электромеханика. – 2014. – № 4. – С. 65-70.
8. Колушко Д. Г. Электрофизические характеристики грунта в местах расположения энергообъектов Украины / Д. Г. Колушко, С. С. Руденко, Г. М. Колушко // Электротехника і електромеханіка. – 2015. – № 3. – С. 67-72.

**References (transliterated):**

1. Viprobuвання ta kontrol' pristroyiv zazemlennya elektroustanovok. Tipova instruktsiya. SOU 31.2-21677681-19:2009 [Test and control devices, electrical grounding. Standard instruction. SOU 31.2-21677681-19:2009]. Kyiv: Minenergovugillya Ukrainy Publ., 2010. 54 p.

2. Pravila ulashtuvannya elektroustanovok. [Rules of the device electroinstallations]. Kharkiv: Minenergovugillya Ukrainy Publ., 2014. 793 p.

3. IEEE Std.80-2000 IEEE Guide for Safety in AC Substation Grounding. – New York: The Institute of Electrical and Electronic Engineers. 2000. 192 p.

4. IEEE Std. 81-2012 Guide for Measuring Earth Resistivity, Ground Impedance and Earth Surface Potentials of a Grounding System. New York: The Institute of Electrical and Electronic Engineers. pp. 1–86

5. Borisov R. K., Koliushko G. M., Grimud G. I. [et al]. Technique to study the ground grids of electric power facilities.

Energetika i elektrifikatsiya – Energy and Electrification, 2000, no. 4, pp. 29 – 32.

6. Lörtscher M., Voegeli H. Bahnrückstromführung und Erdung beim Unterwerk Zürich der Schweizerischen Bundesbahnen. Zürich: Elektrische Bahnen, 2001. H. 1-2, S. 51-63.

7. Koliushko G. M., Koliushko D. G., Rudenko S. S. On the problem of increasing of the computation accuracy for rated parameters of active electrical installation ground grids. Elektrotehnika i elektromekhanika – Electrical engineering & electromechanics, 2014 no.4, pp. 65-70. (Rus) doi: 10.20998/2074-272X.2014.4.13

8. Koliushko D. G., Rudenko S. S. Analysis of electro-physical characteristics of grounds in the vicinity electrical substation of Ukraine. Elektrotehnika i elektromekhanika – Electrical engineering & electromechanics, 2015, no.3, pp. 67-72. (Rus). doi: 10.20998/2074-272X.2015.3.10

Поступила (received) 10.03.2017

*Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions*

**Аналіз стану заземлювальних пристроїв діючих енергооб'єктів України / Д. Г. Колюшко, С. С. Руденко, Г. М. Колюшко // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Техніка та електрофізика високих напруг. – Х.: НТУ «ХПІ», 2017. – № 15 (1237). – С. 44-48. – Бібліогр.: 8 назв. – ISSN 2079-0740.**

**Анализ состояния заземляющих устройств действующих энергообъектов Украины / Д. Г. Колюшко, С. С. Руденко, Г. М. Колюшко // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Техніка та електрофізика високих напруг. – Х.: НТУ «ХПІ», 2017. – № 15 (1237). – С. 44-48. – Бібліогр.: 8 назв. – ISSN 2079-0740.**

**Analysis state of grounding grids of existing power plants of Ukraine / D. G. Koliushko, S. S. Rudenko, G. M. Koliushko // Bulletin of NTU "KhPI". Series: Technique and electrophysics of high voltage. – Kharkiv: NTU "KhPI", 2017. – № 15 (1237). – С. 44-48. – Bibliogr.: 8. – ISSN 2079-0740.**

*Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors*

**Колюшко Денис Георгійович** – кандидат технічних наук, старший науковий співробітник кафедри «Автоматизовані електромеханічні системи», старший науковий співробітник, НТУ «ХПІ», e-mail: den@kpi.kharkov.ua

**Колюшко Денис Георгиевич** – кандидат технических наук, старший научный сотрудник кафедры «Автоматизированные электромеханические системы», старший научный сотрудник, НТУ «ХПІ», e-mail: den@kpi.kharkov.ua.

**Koliushko Denys Georgiyovich** – Candidate of Technical Sciences (Ph. D.), Senior Research Officer at the Department of «Automated electromechanical systems, Senior Research Scientist, NTU "KhPI", e-mail: den@kpi.kharkov.ua.

**Руденко Сергій Сергійович** – молодший науковий співробітник НДПКИ «Молнія» НТУ «ХПІ»; тел.: (054) 707-66-71; e-mail: serhij\_rudenko@ukr.net

**Руденко Сергей Сергеевич** – младший научный сотрудник НИПКИ «Молния» НТУ «ХПІ»; тел.: (054) 707-66-71; e-mail: serhij\_rudenko@ukr.net

**Rudenko Serhiy Serhiyovych** – Research Assistant of Design -&- Research Institute "Molniya", NTU "KhPI"; tel.: (054) 707-66-71; e-mail: serhij\_rudenko@ukr.net.

**Колюшко Георгій Михайлович** – кандидат технічних наук, старший науковий співробітник, НТУ «ХПІ» провідний науковий співробітник НДПКИ «Молнія»; тел.: (054) 707-61-77; e-mail: nio5\_molniya@ukr.net.

**Колюшко Георгий Михайлович** – кандидат технических наук, старший научный сотрудник, НТУ «ХПІ», ведущий научный сотрудник НИПКИ «Молния»; тел.: (054) 707-61-77; e-mail: nio5\_molniya@ukr.net.

**Koliushko Georgiy Mykhaylovich** – Candidate of Technical Sciences (Ph. D.), Senior Research Scientist, NTU "KhPI", Leading Researcher of Design -&- Research Institute "Molniya"; tel.: (054) 707-61-77; e-mail: nio5\_molniya@ukr.net.