

УДК 621.3.048.1

## СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ НЕРАВНОВЕСНО-КОМПЕНСАЦИОННОГО МЕТОДА ДИАГНОСТИКИ СОСТОЯНИЯ ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ АППАРАТОВ С КОНДЕНСАТОРНОЙ ИЗОЛЯЦИЕЙ

- САХНО А.А. канд. техн. наук, доцент кафедры электрических и электронных аппаратов национального университета "Запорожская политехника", Запорожье, Украина, e-mail: a.asakhno@yahoo.com
- СКРУПСКАЯ Л.С. Старший преподаватель кафедры электрических и электронных аппаратов национального университета "Запорожская политехника", Запорожье, Украина, e-mail: skrupskaya\_ls@gmail.com
- ДОМОРОЩИН С.В. аспирант кафедры электрических и электронных аппаратов национального университета "Запорожская политехника", Запорожье, Украина, e-mail: domoroshchin77@gmail.com

**Цель работы.** Исследование неравновесно-компенсационного метода диагностики состояния высоковольтных аппаратов с конденсаторной изоляцией, описание опыта использования метода, нахождение недостатков и преимуществ этого метода диагностики, разработка усовершенствования неравновесно-компенсационного метода.

**Методы исследования.** Исследование было проведено методом непрерывного контроля под рабочим напряжением ("онлайн") для вводов трех-фазной группы шунтирующих реакторов на класс напряжения 750кВ.

**Полученные результаты.** В результате проведенного исследования авторы разработали усовершенствованную математическую модель для неравновесно-компенсационного метода, которая учитывает влияние рабочего напряжения, и получили окончательную формулу для определения тока небаланса, которая позволяет значительно повысить достоверность диагностики. Улучшенная модель отличается тем, что учитывает дополнительные параметры - рабочее трехфазное напряжение, под воздействием которого находится изоляция электрических аппаратов. Полученные этой моделью значения фазы и амплитуды тока небаланса не будут зависеть от режимов работы сети, таких как асимметрия, например, и, соответственно, нет необходимости устанавливать завышенные уставки срабатывания аварийных сигналов, в отличие от «классического» метода, поскольку изменения параметров тока небаланса будут вызваны только изменениями активных потерь в изоляции или частичным пробоем изоляционной конструкции устройства.

**Научная новизна.** Авторы разработали усовершенствованную математическую модель для диагностики аппаратов высокого напряжения с конденсаторной изоляцией под рабочим напряжением. Результат вычисления новой модели не зависит от влияний рабочего напряжения (таких как асимметрии амплитуд и межфазовых углов).

**Практическая ценность.** Полученная модель может быть использована в разработке систем и устройств для непрерывной диагностики (мониторинга) основной изоляции аппаратов с конденсаторной изоляцией для классов напряжения 110 – 750 кВ.

**Ключевые слова:** неравновесно-компенсационный метод; конденсаторная изоляция; ток небаланса; емкость; тангенс угла диэлектрических потерь; непрерывный контроль; высоковольтные вводы.

### I. ВВЕДЕНИЕ

Технологические сбои, вызванные поломкой высоковольтных вводов и трансформаторов тока, являются одними из наиболее частых и экономически затратных для электростанций и электросетей. Поэтому с 1960 года научное сообщество и контролирующие органы уделяли особое внимание диагностике этого оборудования. За эти годы, компании-производители, энергогенерирующие и электросетевые предприятия, предприятия занимающиеся ремонтом и диагностикой промышленного оборудования, получили определенный опыт диагностики аппаратов в различных

режимах работы. В настоящее время существует два наиболее распространенных метода диагностики: с выводом оборудования из эксплуатации (под испытательным напряжением) (периодический контроль) и постоянный контроль под рабочим напряжением («в режиме онлайн»). Реже применяются периодические испытания под рабочим напряжением с выводом оборудования из эксплуатации и без него.

Существует два общепризнанных метода для выполнения оперативной диагностики вводов, основанные на измерении тока проводимости изоляции, а именно неравновесно-компенсационный метод и

дифференциальный метод.

Автоматический непрерывный мониторинг под рабочим напряжением имеет ряд преимуществ перед другими методами: частота анализа диагностических параметров, отсутствие влияния человеческого фактора и рабочее напряжение, которое позволяет определять основные дефекты изоляции.

Неравносечно-компенсационный метод (небаланса) в настоящее время является наиболее распространенным методом онлайн-мониторинга под рабочим напряжением. Этот метод описан в списке отечественных и зарубежных авторских работ [1-10]. Реализация этого метода встречается разнообразная: устройства КИВ-500Р с регулировочными трансформаторами ТПС-0,66, современные микропроцессорные устройства, такие как R1500 («Димрус», город Пермь), ZVCM (ZTZ-Service International Inc, USA) и другие.

Электроэнергетические компании имеют большой опыт эксплуатации приборов КИВ-500Р и других систем, основанных на данном методе. Однако этот опыт часто бывает отрицательным, в основном из-за подверженности влиянием внешних (по отношению к состоянию изоляции) факторов.

Основными факторами, влияющими на векторы фазового напряжения, являются:

- несимметричные изменения нагрузки (падения напряжения на разных фазах будут разными, что приведет к амплитудным и угловым искажениям векторов напряжения);

- изменения энергопотребления по датам, дням недели, сезонам, изменения в структуре генерирующих мощностей в энергосистеме, влияние погодных условий на линии электропередач;

- переключение устройства РПН;

- деформации обмоток трансформатора после токов короткого замыкания;

- изменения схемы в энергосистеме;

- компенсаторы реактивной мощности;

- изменения в направлении энергии, через контролируемый трансформатор, также могут привести к изменению углов между векторами фаз.

Все вышеперечисленное требует усовершенствования неравносечно-компенсационного метода, таким образом, чтобы метод был нечувствителен к изменениям внешних факторов, которые напрямую не зависят от технического состояния основной изоляции, а именно: амплитуд и фазовых углов фазных напряжений трехфазной системы.

## II. АНАЛИЗ ИССЛЕДОВАНИЙ И ПУБЛИКАЦИЙ

Усовершенствование метода неравносечно-компенсационного метода очень важно для правильного выявления дефектов изоляции под рабочим напряжением, поскольку эксплуатация устройства

типа КИВ-500Р, использующего этот метод, является обязательной для трансформаторного оборудования классом напряжения от 500кВ и выше. Таким образом, многие ученые уделяют большое внимание этому вопросу. Так, например, украинский ученый к.т.н. Глеб Шинкаренко в своей работе [13] на примерах из практики показал, что неравносечно-компенсационный метод является неэффективным и даже вредным. Также отрицательный опыт применения метода суммарного тока показан в [13, 14, 15] из-за ошибочной информации о значениях диагностических параметров и, соответственно, невозможности сделать вывод о техническом состоянии аппарата, в основном из-за влияния рабочего напряжения. Наиболее распространенной причиной недостоверных данных неравносечно-компенсационного метода являются изменения амплитуд и фаз (взаимных углов) векторов напряжения трехфазной сети. Поэтому учет этих влияний следует использовать для повышения достоверности этого метода диагностики.

## III. ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Целью данной статьи является анализ причин отрицательного опыта применения неравносечно-компенсационного метода для диагностики технического состояния изоляции высоковольтных конденсаторов (в основном, вводов и трансформаторов тока) и представление результатов совершенствования метода.

## IV. ИЗЛОЖЕНИЕ ОСНОВНОГО МАТЕРИАЛА И АНАЛИЗ ПОЛУЧЕННЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ

Неравносечно-компенсационный метод, основывается на двух предположениях:

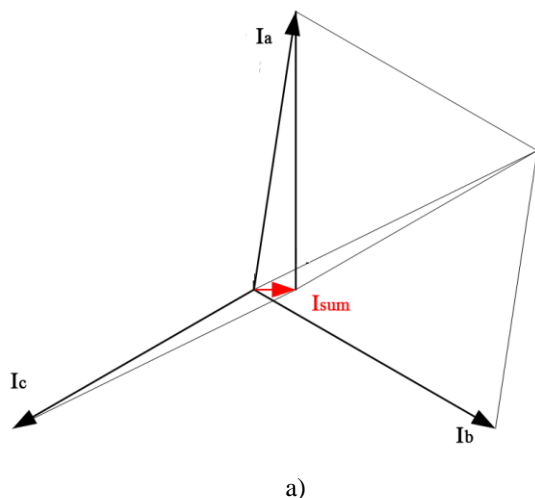
- трехфазная система напряжения симметрична (или может быть искусственно сделана симметричной, путем применения балансирующих коэффициентов во время первоначальной установки диагностического прибора) и остается неизменной в течение всего периода работы диагностического прибора);

- диагностические параметры трех аппаратов трехфазной группы не могут изменяться одновременно и в равной степени.

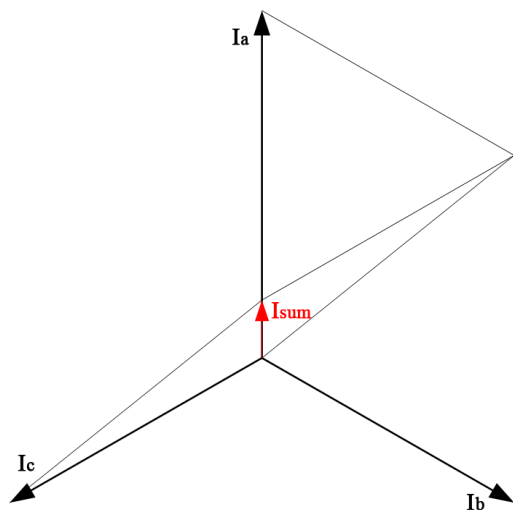
Метод подразумевает геометрическое суммирование трех векторов тока утечки основной изоляции трех высоковольтных аппаратов трехфазной группы. В идеальном случае, если состояния и емкости основных изоляций трех аппаратов равны, а трехфазная система напряжений симметрична (амплитуды равны, а межфазные углы по  $120^\circ$ ), суммарный ток будет равен нулю. При росте активных потерь или изменении емкости изоляции, фаза и амплитуда тока будут меняться, и это приведет к появлению тока, отличного от нуля – небаланс, который может быть измерен диагностическим прибором.

Амплитудное значение суммарного тока количественно определяет степень дефекта в изоляции, а его

угол показывает фазу устройства с дефектом.



а)



б)

**Рисунок 1.** Появление тока небаланса: а) –  $I_{sum}$  (суммарный ток) обусловлено увеличением активных потерь в изоляции прибора на фазе «А»; б) –  $I_{sum}$  вызвано шунтированием части основной изоляции аппарата на фазе «А».

Идеальная ситуация (с равными векторами токов утечки и симметричной системой напряжения) на практике никогда не встречается, поэтому для выравнивания вектора тока небаланса «в ноль» могут применяться различные решения, например, измерительные трансформаторы, которые могут изменять амплитуды токов утечки, коэффициенты для математической модели в микропроцессорных устройствах и др.

Вектор тока утечки изоляции зависит от вектора напряжения, приложенного к этой изоляции, активных потерь и емкости основной изоляции. Соответственно, вектор суммы токов зависит от 9 параметров:

$$\vec{I}_n = f(\vec{U}_a, \vec{U}_b, \vec{U}_c, C_{1a}, C_{1b}, C_{1c}, \operatorname{tg} \delta_{1a}, \operatorname{tg} \delta_{1b}, \operatorname{tg} \delta_{1c}),$$

где  $U_a, U_b, U_c$  – векторы фазных напряжений (фазы «А», «В», и «С» соответственно);

$C_{1a}, C_{1b}, C_{1c}$  – емкости основной изоляции аппаратов;

$\operatorname{tg} \delta_{1a}, \operatorname{tg} \delta_{1b}, \operatorname{tg} \delta_{1c}$  – значения тангенса угла диэлектрических потерь основной изоляции аппаратов.

Таким образом, математический расчет для определения тангенса угла диэлектрических потерь и емкости основной изоляции на основании такого метода малообоснован и малоэффективен. Для таких вычислений в некоторых диагностических приборах используются определенные допущения позволяющие решать систему из двух уравнений с 12 неизвестными параметрами. Для обеспечения решения такой системы уравнений производители средств диагностики применяют различные алгоритмы адаптации к режимам работы сети и оборудования. Описанные проблемы приводят к неправильным диагностическим заключениям, так как невозможно учесть все эти факторы в режиме реальной работы:

- изменения в нагрузках и другие факторы, которые могут вызвать изменения напряжения, не могут быть достоверно спрогнозированы;
- старение изоляции разных аппаратов несинхронное;
- разные аппараты могут иметь разную температуру изоляции.

Таким образом, совершенствование таких алгоритмов расчета, по мнению авторов, неэффективно, поскольку расчет диагностических параметров на основе вектора тока небаланса, а также диагностика устройств на основе этого метода никогда не будут эффективными без учета влияния значений векторов приложенного напряжения. Ниже приведен анализ реального случая искажения диагностического заключения о состоянии основной изоляции вводов, чтобы подтвердить это утверждение авторов.

Для контроля высоковольтных вводов трехфазной группы однофазных шунтирующих реакторов типа РОМ-110000/750 на распределительном устройстве 750 кВ был установлен прибор контроля вводов, принцип работы которого основанный на неравномерно-компенсационном методе.

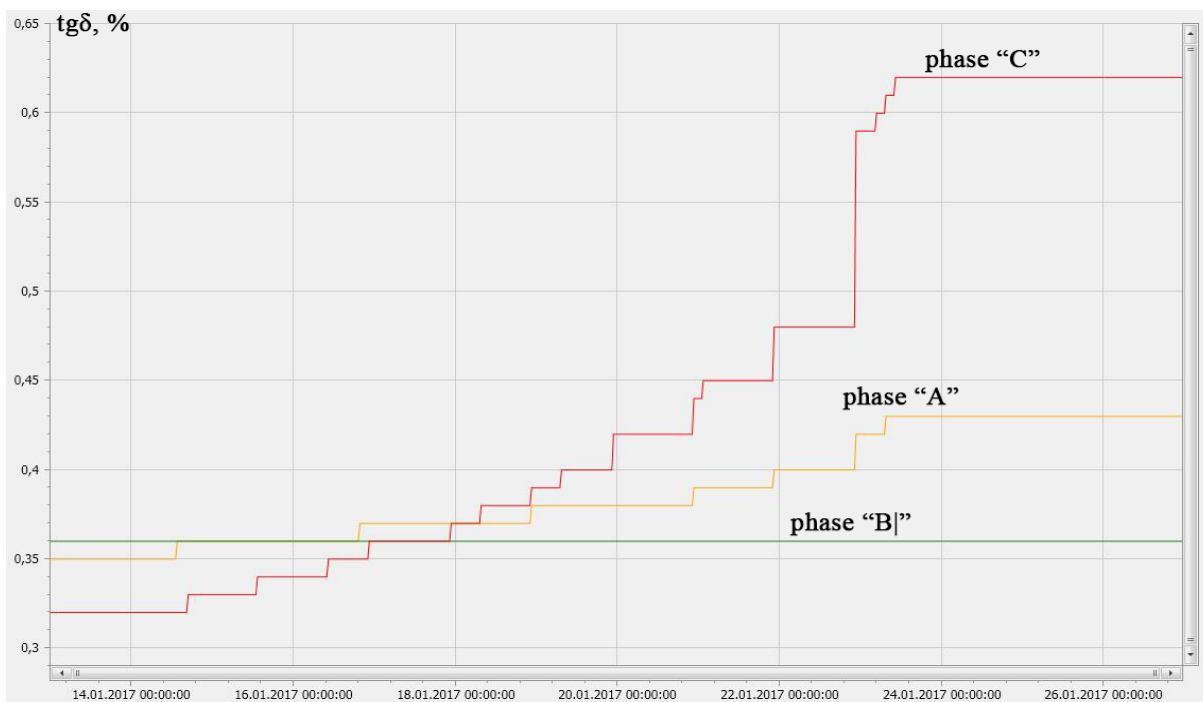
Было зафиксировано увеличение значений тангенса угла диэлектрических потерь главной изоляции вводов на фазах «А» и «С» (рис.2).

Двойное увеличение значения параметра на фазе «С» в течение короткого периода времени (менее 10 дней) является основанием для проведения дополнительных испытаний ввода при выводе оборудования из эксплуатации.

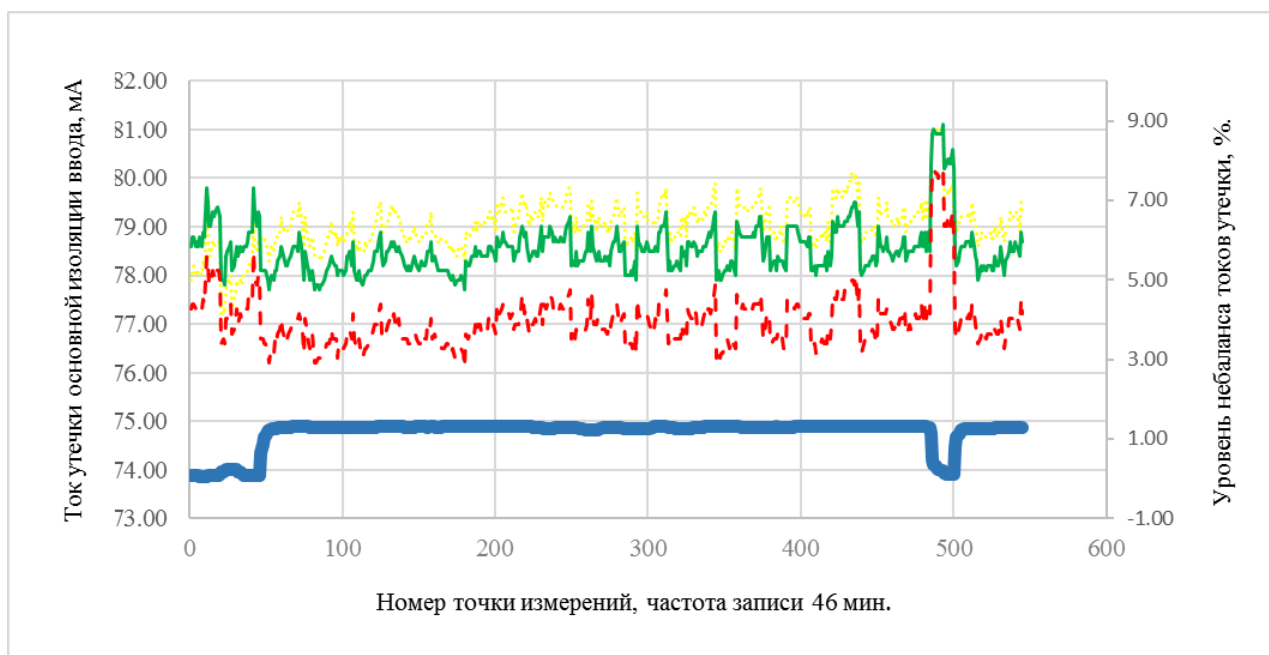
Однако детальный анализ этого случая, основан-

ний на данных системы онлайн-мониторинга SAFE-T (производства ООО «Энергоавтоматизация», Запорожье, Украина), показал, что этот случай не является результатом дефектов изоляции вводов, а является классическим примером недостатков неравновесно-компенсационного метода. На рисунке 3 показаны графики тока утечки основной изоляции трех вводов.

(точки – фаза. «А», сплошная линия – фаза «В», пунктирная линия – фаза «С», толстая сплошная линия – значение амплитуды вектора тока небаланса (отношение амплитуды к среднему значению трех амплитуд токов утечки в процентах). Анализ подтверждает несимметричное увеличение текущего значения тока утечки изоляции фазы ввода «А».



**Рисунок 2.** Изменение значений тангенса угла диэлектрических потерь основной изоляции высоковольтных вводов, зарегистрированные прибором контроля на основе классического неравновесно-компенсационного метода



**Рисунок 3.** Токи утечки основной изоляции вводов

На рис. 4 представлены графики рабочих фазных напряжений, а также представлены изменения вектора напряжения небаланса. Небаланс напряжений представлен в условных единицах только для качественной оценки его наличия.

На рисунке 5 представлены графики токов нагрузки, эти графики качественно повторяют график токов утечки, потому что токи обмотки меняются в соответствии с изменениями приложенного напряжения. Увеличение тока обмотки (нагрузки) шунтирующего реактора на фазе «А» привело к увеличению температуры верхних слоев масла в этом реакторе

(рис. 6), по сравнению с двумя другими реакторами, что вызвало температурное увеличение диэлектрических потерь основной изоляции ввода этого реактора, и является нормальным явлением, то есть не связано с дефектами в изоляции это ввода.

Таким образом, анализ данных, представленных на рисунках 3-6, дает четкий представление о том, что появление вектора небаланса токов утечки (рис. 7) обусловлено изменением параметров напряжения питания.

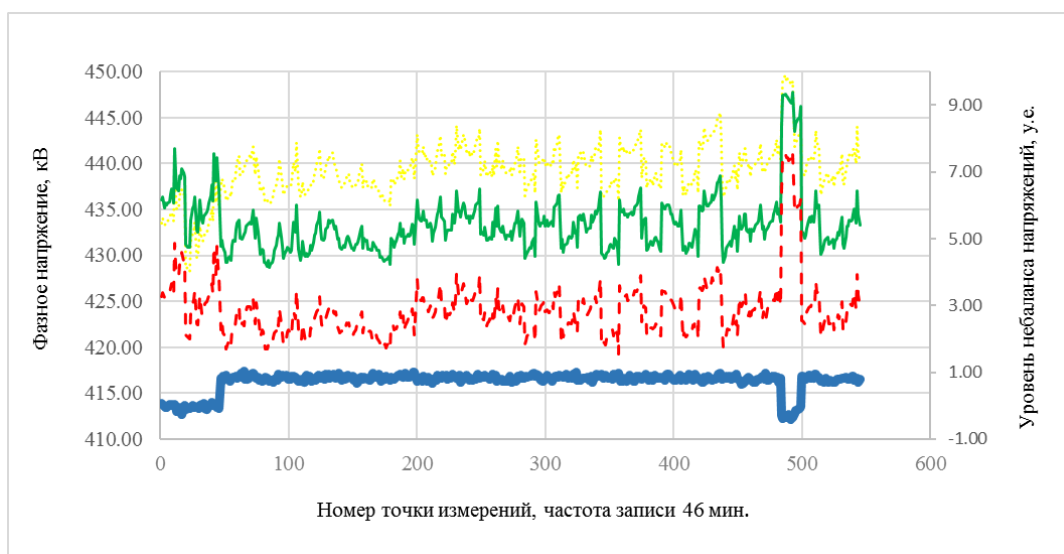


Рисунок 4. Фазные напряжения

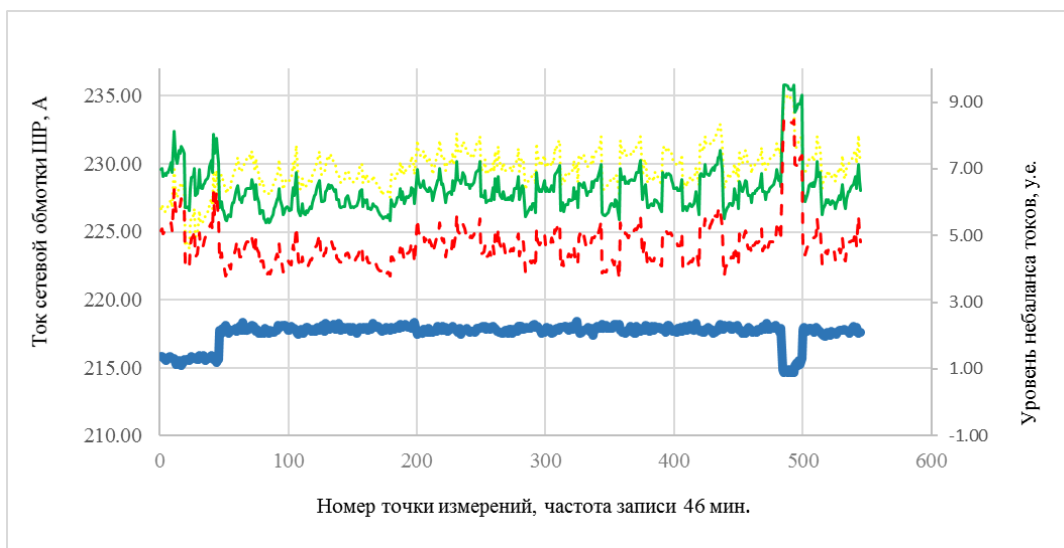


Рисунок 5. Токи обмоток реактора

Последующий анализ режимов работы сети подтвердил подключение несимметричной нагрузки к линии, что вызвало указанное изменение напряжений. Изменения токов утечки вводов были вызваны про-

порциональными изменениями напряжений, приложенных к изоляции вводов, но не вызваны изменениями технического состояния изоляции вводов. На рис. 7 представлен ток небаланса на полярном графике.

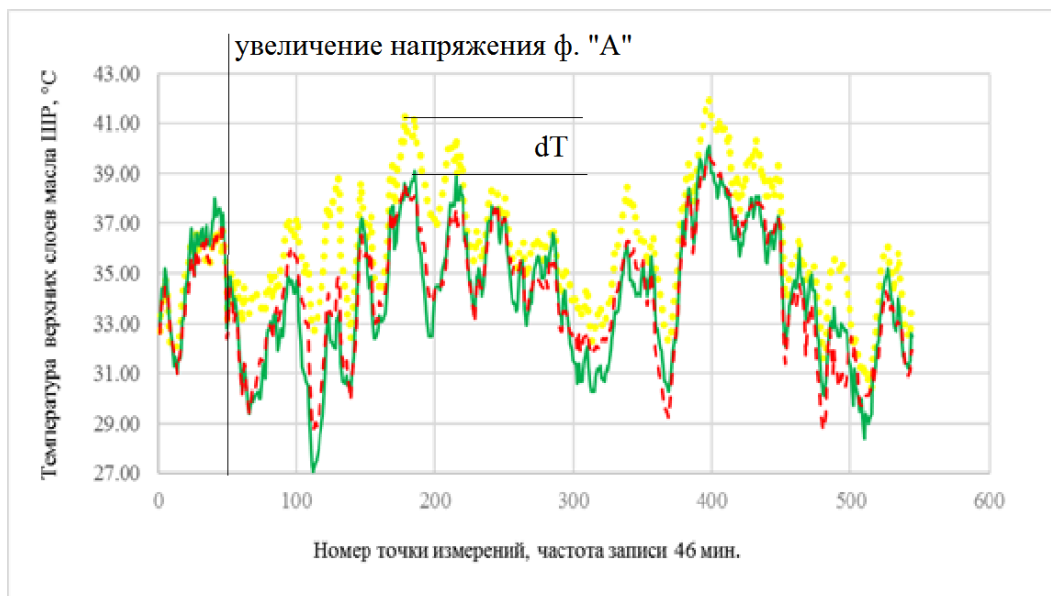


Рисунок 6. Температура верхних слоев масла реакторов

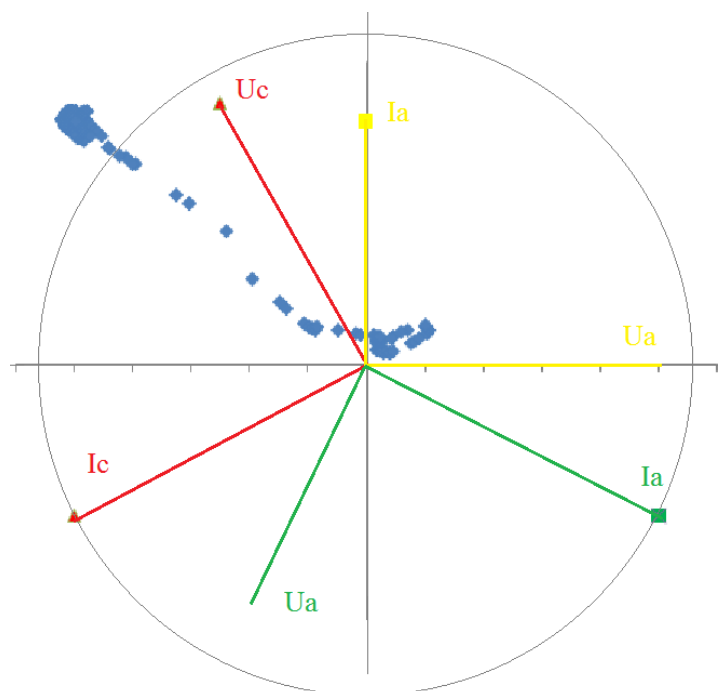


Рисунок 7. Полярный график тока небаланса главной изоляции вводов, рассчитанный по «классическому» методу

Значения различных измерений показаны квадратными точками, где каждая точка соответствует одному измерению. Тем не менее, в этом случае появление вектора тока небаланса было интерпретировано диагностическим прибором как изменение значений характеристик изоляции (показано на рисунке 2). Таким образом, данный случай, как и 99% случаев, когда возникает ток небаланса, не являлся следствием ухудшения состояния изоляции вводов, а влиянием

режимов работы сети. Все изменения взаимных углов между фазовыми напряжениями и их амплитудами, которые имели место после первоначальной балансировки диагностического прибора, автоматически приводят к ошибкам в расчетах и ошибочным диагностическим выводам. Вторым отрицательным фактором неравномерно-компенсационного метода является тот факт, что диагностические инструменты на его основе не могут обнаружить дефект изоляции даже на опас-

ной стадии развития, поскольку предаварийная настройка таких устройств составляет 3%, аварийная настройка - 5 -7% от среднего значения токов утечки. На практике существуют случаи настройки и более высоких значений этих уставок, что часто приводит к тому, что работа диагностического прибора, основанная на неравновесно-компенсационном методе, активирует систему пожаротушения оборудования из-за полного отказа ввода (полного пробоя изоляции). Более низкие пороговые значения вводят в заблуждение оперативный персонал, а также могут привести к необоснованным заключениям. Отечественный ученый Глеб Шинкаренко в своей работе [13] на примерах из практики показал, что метод малоэффективен и даже отрицателен. Он разработал ряд схем, которые позволяют точно определять параметры этих устройств в соответствии с режимами работы подстанции на основе «жесткой» релейной логики. Однако с учетом современного развития микропроцессорной техники применение релейной логики существенно усложняет реализацию таких диагностических схем. Поэтому авторы предлагают способ усовершенствования неравновесно-компенсационного метода для устранения его ограничений. Метод может быть применен в системах и микропроцессорных устройствах онлайн-мониторинга. Суть улучшения заключается в следующем:

- сигналы фазных рабочих напряжений, как и токи утечки, должны быть подключены к устройству;

- диагностический прибор в момент ввода в эксплуатацию должен записать и хранить параметры (амплитуда, начальная фаза) фазных напряжений и токов утечки основной изоляции;

- сумма текущего векторного значения должна быть рассчитана в комплексной форме по формуле:

$$I_H^* = \frac{|U_{ae}^*|}{U_{ae}^*} \left[ \frac{I_a^* \cdot U_{ae}^*}{U_a^*} + \frac{I_b^* \cdot U_{be}^*}{U_b^*} + \frac{I_c^* \cdot U_{ce}^*}{U_c^*} - (I_{ae}^* + I_{be}^* + I_{ce}^*) \right]$$

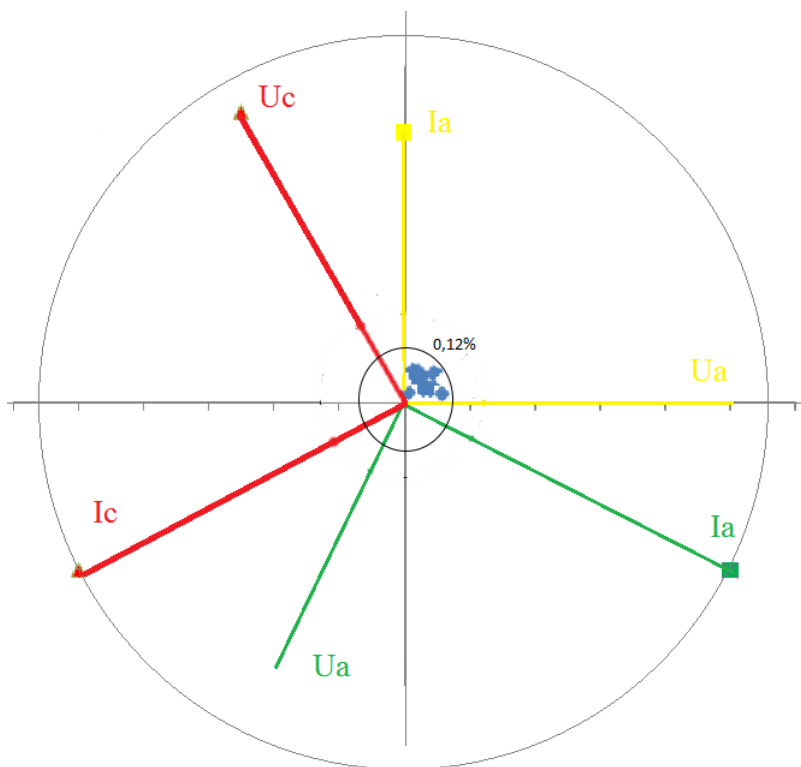
где  $U_{ae}, U_{be}, U_{ce}$  – начальные значения (при вводе в эксплуатацию) векторов фазных напряжений (фазы “А”, “В”, и “С” соответственно);

$I_{ae}, I_{be}, I_{ce}$  – начальные значения (при вводе в эксплуатацию) векторов токов утечки главной изоляции вводов (фазы “А”, “В”, и “С” соответственно);

$U_a, U_b, U_c$  – измеренные значения векторов фазных напряжений (фазы “А”, “В”, и “С” соответственно);

$I_a, I_b, I_c$  – измеренные значения векторов токов утечки главной изоляции вводов (фазы “А”, “В”, и “С” соответственно).

Слово «начальный» означает - в момент первого включения (ввода в эксплуатацию) диагностического прибора.



**Рисунок 8.** Полярный график тока небаланса главной изоляции вводов, рассчитанный по усовершенствованной модели.

Полученные этим методом значения фазы и амплитуды вектора небаланса не будут зависеть от режимов работы сети, и, соответственно, нет необходимости устанавливать слишком высокие настройки работы аварийных уставок.

Пересчет значения тока небаланса, для приведенного случая изменения напряжения, анализ которого показан на рис. 2-6 по формуле, предложенной авторами, показывает отсутствие значимых значений вектора суммарного тока, его малые значения обусловлены только температурным изменением значений тангенса угла диэлектрических потерь изоляции ввода фазы «А», которые не компенсируются в предложенной формуле. Эти изменения вектора тока небаланса малы и не приведут к превышению каких-либо диагностических порогов, а также не будут зависеть от «ошибок» в этих вычислениях, что означает, что диагностический инструмент выдаст правильное диагностическое заключение, что и было целью данного исследования.

## V. ВЫВОДЫ

Проведен анализ причин отрицательного опыта применения неравновесно-компенсационного метода для диагностики технического состояния изоляции высоковольтных конденсаторов (преимущественно вводов и трансформаторов тока) и представлены результаты усовершенствования метода. Неравновесно-компенсационный метод мониторинга состояния изоляции получил широкое распространение из-за простоты реализации, однако из-за недостатков, которые наблюдаются в данной работе, диагностические инструменты, основанные на этом методе приносят больше вреда, чем пользы, из-за диагностических ошибок. Предлагаемая в работе усовершенствованная модель для расчета тока небаланса позволяет избежать основных недостатков «классического» метода. На примере показано отсутствие значимых амплитудных значений вектора тока небаланса при асимметрии рабочего напряжения при использовании усовершенствованной модели, в отличие от «классической». Применение усовершенствованной модели позволит диагностическим приборам выдать правильное диагностическое заключение, в большинстве случаев. Однако, диагностические заключения, основанные как на «классическом», так и на улучшенном методах, должны основываться только на значениях амплитуды и фазы вектора тока небаланса, а не на расчетах параметров: тангенса угла диэлектрических потерь и емкости основной изоляции, поскольку такой расчет не может быть правильно выполнен по причинам, которые были проанализированы в работе. При проектировании диагностических приборов необходимо обращать внимание на гальваническую развязку цепей от разных вводов (особенно при контроле аппаратов трехфазной группы однофазного оборудования) для исключения влияния неэвипотенциальностей точек заземления. Также необходимо обратить внима-

ние на схемы подключения, элементы защиты изоляции измерительного вывода от перенапряжений и от обрыва кабеля, которые соединяют вывод с диагностическим прибором, поскольку существующие на практике схемы подключения часто являются источниками дополнительных ошибок для диагностики, и иногда являются причиной отказа вводов.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Сви П. М. Контроль изоляции оборудования высокого напряжения.-2-е изд., перераб. и доп. / П. М. Сви. — М. : Энергоатомиздат, 1988. — 128 с.: ил.
- [2] Berler Z. On-line Monitoring System for High-Voltage transformer and Bushing Insulation [Электронный ресурс] / Z. Berler, L.Letitskaya, V.S.Rashkes [at al] // ZTZ—Services Technical Paper, 2005. — 4 с. — Режим доступа: [www.ztzservice.com](http://www.ztzservice.com).
- [3] Brusetti R.. Experience with On-line Diagnostics for Bushings and Current Transformers [Электронный ресурс] / Robert Brusetti // International Electrical Testing Association (NETA). — 2002. — 4 с. — Режим доступа : [http://www.electricenseyonline.com/?page=showarticle&mag\\_ =18&article=139](http://www.electricenseyonline.com/?page=showarticle&mag_ =18&article=139)
- [4] Kane C. On-Line Transformer Diagnostics [Электронный ресурс]/ Claude Kane, Alexander Golubev // Electrical Diagnostic Innovations Technical Papers. — 2005. — 6 с. — Режим доступа : <http://www.elec-di.com/technicalpaper.html>.
- [5] Живодерников С. В Диагностика изоляции вводов и трансформаторов тока высокого напряжения / С. В. Живодерников, А. Г. Овсянников, В. А. Русов // Энергоэксперт. — 2009. — №1. — С. 26—29.
- [6] Коняев А. А. Измерительно-информационная система для контроля состояния оборудования с бумажно-масляной изоляцией конденсаторного типа [Электронный ресурс] / А. А. Коняев // Техническая документация ЗАО «Промэлектроника». — 6 с. — Режим доступа : <http://www.prel.ru>.
- [7] Крылов И. П. Автоматизированная система диагностики оборудования с бумажно—масляной изоляцией конденсаторного типа [Электронный ресурс] / И. П. Крылов, Ю. А. Рюмин, А. Б. Штейнгауэр [и др.] — 2004. —6 с. — Режим доступа : [http://rza.socdu.ru/2009/tezis2004/096\\_promel.pdf](http://rza.socdu.ru/2009/tezis2004/096_promel.pdf)
- [8] Кужеков С. Л. О контроле состояния бумажно-масляной изоляции конденсаторного типа трансформаторов тока 110 кв и выше / С. Л. Кужеков, Н. Р. Чумах // Энергетик. — 2007. — № 1. — С. 37—39.
- [9] Кужеков С. Л. Система защиты маслонаполненных трансформаторов тока и вводов силовых



трансформаторов КТУ-5 [Электронный ресурс] / С. Л. Кузнецов, Н. Р. Чумак [и др.]. — ООО НПФ «Квазар». Режим доступа: [ftp://ftp.soups.ru/RZA/dobav\\_dokl/Kuznekov%20Kvazar.doc](ftp://ftp.soups.ru/RZA/dobav_dokl/Kuznekov%20Kvazar.doc)

- [10] Особенности измерения параметров вводов под рабочим напряжением. Методическое пособие. — Пермь: ПФ «Вибро-центр», 2004. — 16 с.
- [11] Пат. US 6.177.803 B1 United States Patent, МПК G01R 31/42, 324/551, 552, 334/557, 662, 541, 691. Monitoring Elements in a Multi—Phase Alternating Current Network / D. Traine, Ph. Guggenberg, G. Cavigelli.; заявитель и патентообладатель: Double Engineering Company Watertown, MA, US, #08/475.407; заявл. 07,07.1995; опубл. 23,01.2001, — 12 с.
- [12] Система контроля токов проводимости и тангенса угла потерь маслонеполненных вводов под рабочим напряжением R1500. Руководство пользователя. — Пермь: ПФ «Вибро-центр», 2004. — 32 с.
- [13] Шинкаренко Г. В. Контроль опорных трансформаторов тока и вводов силовых трансформаторов под рабочим напряжением в энергосистемах

Украины / Г. В. Шинкаренко // Электрические станции. — 2001. — №5. — С. 55—62.

- [14] Stirl T. Condition Monitoring and Diagnosis for Power Transformers their Bushings, Tap Changer and Insulation System [Электронный ресурс] / Tobias Stirl, Raimund Skrzypek, Stefan Tenbohlen [at al] // CMD, Changwong, Korea. — 2006. — 6 с. — Режим доступа: <http://www.uni-stuttgart.de/ieh/forschung/veroeffentlichungen/Online>.
- [15] Мордкович А. Г. О построении подсистем мониторинга, управления и диагностики оборудования подстанций сверхвысокого напряжения и их интеграции в АСУ ТП ПС / А. Г. Мордкович, П. А. Горожанкин // Электрические станции. — 2007. — № 6. — С. 30—38.
- [16] Методические указания по техническому обслуживанию устройства КИВ : МУ 34-70-39-83. — [введен 1983-08-01]. — М. : СПО Союзтехэнерго, 1983 — 32 с.

Стаття надійшла до редакції 10.12.2019

## ВДОСКОНАЛЕННЯ НЕРІВНОВАЖНО-КОМПЕНСАЦІЙНОГО МЕТОДУ ДІАГНОСТИКИ СТАНУ ВИСОКОВОЛЬТНИХ АПАРАТІВ З КОНДЕНСАТОРНОЮ ІЗОЛЯЦІЄЮ

САХНО О.А.

канд. техн. наук, доцент кафедри електричних та електронних апаратів національного університету "Запорізька політехніка", Запоріжжя, Україна, e-mail: a.asakhno@yahoo.com

СКРУПСЬКА Л.С.

старший викладач кафедри електричних та електронних апаратів національного університету "Запорізька політехніка", Запоріжжя, Україна, e-mail: skrupskaya\_ls@gmail.com

ДОМОРОЩИН С.В.

аспірант кафедри електричних та електронних апаратів національного університету "Запорізька політехніка", Запоріжжя, Україна, e-mail: domoroshchin77@gmail.com

**Мета роботи.** Дослідження нерівноважно-компенсаційного методу діагностики стану високовольтних апаратів з конденсаторною ізоляцією, опис досвіду використання методу, знаходження недоліків та переваг цього методу діагностики, розробка вдосконалення нерівноважно-компенсаційного методу.

**Методи дослідження.** Дослідження було виконано методом неперервного контролю під робочою напругою ("онлайн") для введів трьох-фазної групи шунтуючих реакторів напругою 750 кВ.

**Отримані результати.** В результаті проведеного дослідження автори розробили вдосконалену математичну модель для нерівноважно-компенсаційного методу, яка враховує вплив робочої напруги, і отримали остаточну формулу для визначення струму небалансу, яка дозволяє значно підвищити достовірність діагностики. Покращена модель відрізняється тим, що враховує додаткові параметри - робочу трифазну напругу, під впливом якої знаходиться ізоляція електричних апаратів. Отриман за допомогою цієї моделі значення фази і амплітуди струму небалансу не залежатимуть від режимів роботи мережі, таких як асиметрія, наприклад, і, відповідно, немає необхідності встановлювати завищені уставки спрацьовування аварійних сигналів, на відміну від «класичного» методу, оскільки зміни параметрів струму небалансу будуть викликані тільки змінами активних втрат в ізоляції або частковим пробом ізоляційної конструкції електричного апарата.

**Наукова новизна.** Автори розробили вдосконалену математичну модель для діагностики апаратів високої напруги з конденсаторною ізоляцією. Результат нової моделі не залежить від впливів робочої напруги (таких

як асиметрія амплітуд і межфазових кутів).

**Практична цінність.** Отримана модель може бути використана в розробці систем та пристроїв для неперервної діагностики (моніторингу) стану головної ізоляції апаратів з конденсаторною ізоляцією на класи напруги 110 – 750 кВ.

**Ключові слова:** нерівноважно-компенсаційний метод; конденсаторна ізоляція; струм небалансу; ємність, тангенс кута діелектричних втрат, неперервний контроль, високовольтні вводи.

## IMPROVEMENT OF THE NONEQUILIBRIUM-COMPENSATION METHOD FOR STATE DIAGNOSTICS OF HIGH-VOLTAGE APPARATUS WITH CONDENSER INSULATION

SAKHNO A.A. Phd, Associate professor of electric and electronic apparatus department, National University “Zaporizhzhia Polytechnic”, Zaporizhzhia, Ukraine, e-mail: a.asakhno@yahoo.com;

SKRUPSKAYA L.S. Senior lecturer of electric and electronic apparatus department, National University “Zaporizhzhia Polytechnic”, Zaporizhzhia, Ukraine e-mail: skrupskaya\_ls@gmail.com;

DOMOROSHCHYN S.V. post-graduate electric and electronic apparatus department, Zaporizhzhia National Technical University, Zaporizhzhia, Ukraine, e-mail: domoroshchin77@gmail.com

**Purpose.** Investigation of the nonequilibrium-compensation method for diagnosing the state of high-voltage devices with capacitor isolation, a description of the experience of using the method, finding the disadvantages and advantages of this diagnostic method, the development of improvements to the nonequilibrium-compensation method.

**Methodology.** The study was carried out by the method of continuous monitoring under operating voltage (“online”) for bushings of a three-phase group of shunt reactors to a voltage class of 750 kV.

**Findings.** As a result of the study, the authors developed an improved mathematical model for the nonequilibrium-compensation method, which takes into account the influence of the operating voltage, and received the final formula for determining the unbalance current, which can significantly increase the reliability of the diagnosis. The improved model is different in that it takes into account additional parameters - a working three-phase voltage, under the influence of which is the insulation of electrical devices. The values of the phase and amplitude of the unbalance current obtained using the model will not depend on the network operating modes, such as asymmetry, for example, and, accordingly, there is no need to set the overshoot alarm settings and equipment shutdowns, unlike the “classical” method, since the parameters change unbalance current will be caused only by changes in active losses in isolation or partial breakdown of the insulation design of the device.

**Originality.** The authors developed an advanced mathematical model for the diagnosis of high voltage apparatus with capacitor isolation under operating voltage. The result of the calculation of the new model does not depend on the effects of operating voltage (such as asymmetries of amplitudes and interphase angles).

**Practical value.** The obtained model can be used in the production of systems and devices for continuous diagnostics (monitoring) of the main insulation of high-voltage bushings at voltage classes of 110 - 750 kV.

**Keywords:** nonequilibrium-compensation method; condenser insulation; unbalance current; capacitance; tangent of dielectric losses; continuous monitoring; high voltage bushings.

### REFERENCES

- [1] Svi P. M. Control' izolyazui oborydovaniya vysokogo napryazheniya [Control of insulation of high voltage equipment].-2-e izd., pererab. Idop. / P. M. Svi. — M. :Energoatomizdat, 1988. — 128 s.:il.
- [2] Berler Z. On-line Monitoring System for High-Voltage transformer and Bushing Insulation [Elektronni resyrs] / Z. Berler, L.Letitskaya, V.S.Rashkes [at al] // ZTZ—Services Technical Paper, 2005. — 4 s. — Rezhum dostypa: www.ztzservice.com.
- [3] Brusetti R.. Experience with On-line Diagnostics for agnostic of insulation of high voltage bushings and Bushings and Current Transformers [Elektronni resyrs] / Robert Brusetti // International Electrical Testing Association (NETA). – 2002. — 4 s. — Rezhum dostypa:[http://www.electricenergyonline.com/?page=showarticle&mag\\_=18&article=139](http://www.electricenergyonline.com/?page=showarticle&mag_=18&article=139)
- [4] Kane C. On-Line Transformer Diagnostics [Elektronni resyrs]/ Claude Kane, Alexander Golubev // Electrical Diagnostic Innovations Technical Papers. — 2005. — 6 s. — Rezhum dostypa : <http://www.eledi.com/technicalpaper.html>.
- [5] Zhuvodernikov S. V Diagnostika izolyazui vvodov I transformatorov toka vysokogo napryazheniya [Di current transformers] / S. V. ZhuvodernikovA. G.

- Ovsyannikov, V. A. Rysov // *Energoekspert*. — 2009. — №1. — S. 26—29.
- [6] Konyaev A. A. Izmeritelno-informazuonnaya Sistema dlya kontrolya sostoyaniya oborydovaniya s bymazhno-maslyanoi izolyazuei kondensatornogo tipa [Measuring-informational system for control of equipment condition with paper-oil insulation of condenser type], [Elektronni resyrs] / A. A. Konyaev // *Technicheskaya dokumentazuya ZAO «Prom elektronika»*. — 6 s. — Rezhum dostupa : <http://www.prel.ru>.
- [7] Krulov I. P. Avtomatizirovannaya sistema diagnostiki oborydovaniya s bymazhno-maslyanoi izolyazuei kondensatornogo tipa [Automotive system of equipment diagnostic with paper-oil insulation of condenser type], [Elektronni resyrs] / I. P. Krulov, Yu. A. Ryumin, A. B. Shteingayer [i dr.] — 2004. — 6 s. — Rezhum dostupa : [http://rza.socdu.ru/2009/tezis2004/096\\_promel.pdf](http://rza.socdu.ru/2009/tezis2004/096_promel.pdf)
- [8] Kyzhekov S. L. O kontrole sostoyaniya bymazhno-maslyanoi izolyazui kondensatornogo tipa transformatorov toka 110 kv I vushe [About control of paper-oil insulation of condenser type condition of current transformers 110 kV and above] / S. L. Kyzhekov, N. R. Chymax // *Energetik*. — 2007. — № 1. — S. 37—39.
- [9] Kyzhekov S. L. Sistema zash'tu maslonapolnennux transformatorov toka I vvodov silovux transformatorov KTY-5 [System of oil-filled current transformers and power transformers bushings protection] [Elektronni resyrs] / S. L. Kyzhekov, N. R. Chymak [i dr.]. — OOO NPF «Kvazar». Rezhum dostupa: [ftp://ftp.soups.ru/RZA/dobav\\_dokl/Kyzhekov%20Kvazar.doc](ftp://ftp.soups.ru/RZA/dobav_dokl/Kyzhekov%20Kvazar.doc)
- [10] Osobennosti izmereniya parametrov vvodov pod rabochim napryazheniem [Features of bushings parameters measuring under operation voltage]. Metodicheskoe posobie. — Perm': PVF «Vibrozentr», 2004. — 16 s.
- [11] Pat. US 6.177.803 B1 United States Patent, МПК G01R 31/42, 324/551, 552, 334/557, 662, 541, 691. Monitoring Elements in a Multi—Phase Alternating Current Network / D. Traine, Ph. Guggenberg, G. Cavigelli .; zayavitel' I patentoobladatel' : Double Engineering Company Watertown, MA, US, #08/475.407; zayavl. 07,07.1995; opybl. 23,01.2001, — 12 s.
- [12] Sistema kontrolya tokov provodimosti I tangensa ygla poter' maslo napolnennux vvodov pod rabochim napryazheniem R1500 [Control system of currents conductivity and tangent of dielectric losses of oil-filled bushings under operation voltage R1500]. Rykovodstvo pol'zovatelya. — Perm': PVF «Vibrozentr», 2004. — 32 s.
- [13] Shinkarenko G. V. Kontrol' opornux transformatorov toka I vvodov silovux transformatorov pod rabochim napryazheniem v energosistemax Ykrainu [Control of supporting current transformers under operation voltage in the energosystems of Ukraine] / G. V. Shinkarenko // *Elektricheskie stanzui*. — 2001. — №5. — S. 55—62.
- [14] Stirl T. Condition Monitoring and Diagnosis for Power Transformers their Bushings, Tap Changer and Insulation System [Elektronni resyrs] / Tobias Stirl, Raimund Skrzypek, Stefan Tenbohlen [at al] // CMD, Changwong, Korea. — 2006. — 6 s. — Rezhum dostupa: <http://www.uni-stuttgart.de/ieh/forschung/veroeffentlichungen/Online>.
- [15] Mordkovich A.G. O postroenii podsystem monitoring, upravleniya I diagnostiki oborydovaniya podstanzui sverxvysokogo napryazheniyai ix integrazui v ASYTTPS [About creating of monitoring subsystems, control and diagnostic of substations equipment of ultra high voltage and its integration in ASYTTPS] / A. G. Mordkovich, P. A. Gorozhankin // *Elektricheskiesstanzui*. — 2007. — № 6. — S. 30—38.
- [16] Metodicheskie ykazaniya po texnicheskomy obslyzhuvaniyu ystroistva KIV [Methodical instructions of device KIV technical service] : MY 34-70-39-83. — [vveden1983-08-01]. — M. : SPOSoyuztexno, 1983 — 32 s.