

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ ПРОЦЕСІВ В ОБМОТКАХ ТРАНСФОРМАТОРА НАПРУГИ НОМ-10 ЗА ДІЇ ВІЛЬНИХ СКЛАДОВИХ ВНУТРІШНІХ ПЕРЕНАПРУГ МЕРЕЖІ

О Маліновський А.А., Бучковський Р.В., Никонець О.Л., Гуцин Є.Ю., 2012

За аварійних режимів у мережі з частотами вільних складових в діапазонах 350 – 700 Гц, 3600 – 3800 Гц, 20000 Гц, 37000 Гц, 70000 Гц можливе пошкодження трансформаторів напруги НОМ-10 внаслідок явища внутрішнього резонансу. Масове впровадження в мережах 10 кВ вакуумних вимикачів, процес вимикання яких зумовлює високочастотні перенапруги, може стати додатковим фактором зростання аварійності трансформаторів напруги.

Ключові слова: трансформатор напруги, обмотки трансформатора, перенапруга, ізоляція електрообладнання, внутрішній резонанс, вхідний опір, частотна характеристика, частота вільної складової струму, функція передачі, кратність перенапруг, вакуумний вимикач.

During network faults with frequencies of free current components in the ranges 350 – 700 Hz, 3600 – 3800 Hz, 20000 Hz, 37000 Hz, 70000 Hz damages to voltage transformers are possible due to phenomenon of internal ferroresonance. Mass introduction of vacuum circuit breakers (shutdown process of which causes high-frequency overvoltages) in 10 kV networks may become an additional factor in the growth of voltage transformer faults.

Key words: voltage transformer, transformer winding, overvoltage, insulation of electrical equipment, internal resonance, internal impedance, frequency characteristic, frequency of free current component, overvoltage ratio transfer function, vacuum circuit breaker (vacuum switch)

Постановка проблеми

Аналіз пошкоджуваності трансформаторів напруги класу 10 кВ [1] показав, що починаючи з 1993 року частка їх виходу з ладу лавиноподібно зросла з 5 % в 1993–1998 рр. до 19,1 % в 2001 р. За 2000–2002 рр. пошкоджено 57,6 % всього парку. На нашу думку, це пояснюється старінням всього парку трансформаторів напруги, а також появою в мережах нового неврахованого раніше фактора.

Масове пошкодження ізоляції обладнання ставить під сумнів обґрунтованість прийнятих в чинній нормативній базі рівнів ізоляції, які базуються на традиційному розумінні явищ в устаткуванні з обмотками високої напруги. Вищенаведене зумовлює необхідність ретельного аналізу взаємозв'язків між електричними процесами в ізоляції та електромагнітними процесами в обмотках трансформатора.

Аналіз сучасних досягнень та публікацій

В [5] обґрунтовано, що головною причиною пошкоджуваності виткової ізоляції під дією внутрішніх перенапруг є явище внутрішнього резонансу в системі «обмотка – ізоляція». Існування цього явища обумовлює необхідність кардинальної зміни підходів до вибору внутрішньої ізоляції електроустаткування з обмотками високої напруги (ВН) та методів обґрунтування розрахункових перенапруг на її елементах.

Задача досліджень

За частотними характеристиками (функціями передачі) системи «обмотка – ізоляція» трансформатора з'ясувати особливості прояву явища внутрішнього резонансу в окремих точках

обмотки ВН найпростіших трансформаторів напруги НОМ-10, частка яких в експлуатації становить близько 15 % загального парку трансформаторів напруги.

Виклад основного матеріалу досліджень

Для проведення запланованого експерименту на кришку бака трансформатора напруги виведено відпайку з середини обмотки ВН. Як джерело живлення, що відтворює вільну складову внутрішніх перенапруг мережі зі змінною частотою, використовувався генератор низькочастотних сигналів ГЗ-109; для вимірювання напруг – вольтметри типу В7-21А з високим входним опором (не менше 8 МОм, входна ємність не більше 100 пФ). Для підвищення точності вимірювань запропоновано послідовне увімкнення двох вольтметрів.

Схеми дослідів наведені на рис. 1, а, б, в.

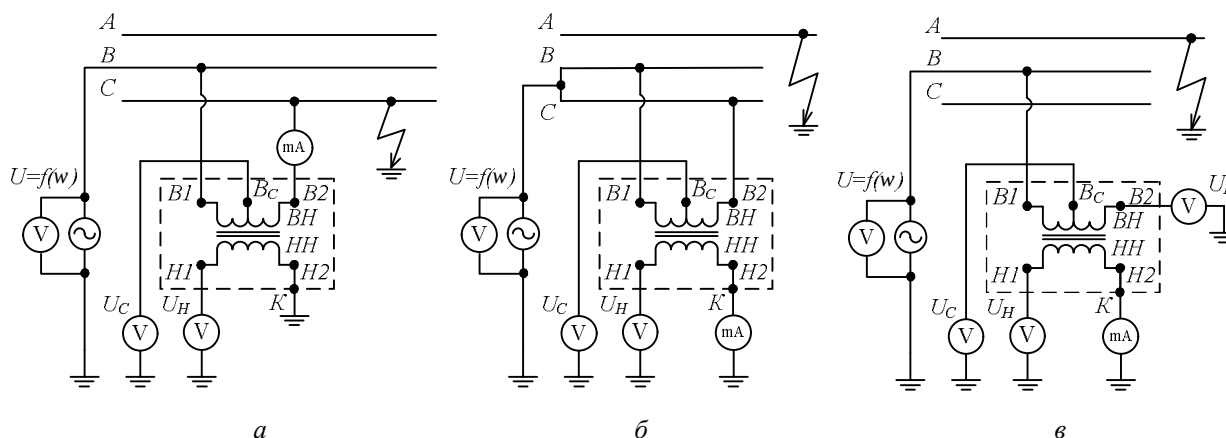


Рис. 1. Схеми дослідів:

а – режим замикавання на землю однієї з фаз, до яких приєднаний НОМ-10;

б – режим замикавання на землю фази мережі, до якої НОМ-10 не приєднаний;

в – аварійний режим НОМ-10 після спрацювання одного з запобіжників у колі обмотки ВН НОМ-10

Залежності значень входного опору НОМ-10 від частоти для кожної зі схем дослідів наведені на рис. 2, з якого видно, що в кожному досліджуваному режимі НОМ-10 резонансні процеси виникають за різних частот. Важливо, що в кожному випадку резонанси напруг чергуються з резонансами струмів. На частотах, що відповідають резонансу напруг в обмотках трансформатора, напруги можуть виникати перенапруги, значення яких перевищують значення прикладеної до трансформатора напруги.

Специфіка об'єкта досліджень полягає у його порівняно малих розмірах. Тому вимірювання напруг відносно корпусу приладами В7-21А (незважаючи на їх високий входний опір) призводить до змін результуючих параметрів ізоляції НОМ-10 і, відповідно, частот, за яких відбуваються резонанси.

Для ілюстрації наведеного на рис. 3 для схеми рис.1.а наведено значення входного опору НОМ-10, запозичене з рис. 2, а, а також значення входного опору для випадків додаткового вимірювання напруги на відпайці з середини обмотки ВН. Як видно, резонансні частоти змінилися. Отже, отримані в результаті експериментального дослідження залежності кратностей перенапруг від частоти потребують коректування резонансних частот з використанням залежностей рис. 2, знятих без приєднаних до відпайки вольтметрів.

На рис. 4 наведені функції передачі за напругою для схеми дослідів рис. 1, а. Для можливості точнішого визначення резонансних частот на рис.4 наведені функції передачі $K_H = U_H / U$ з одночасним зніманням функції передачі $K_C = U_C / U$ та для випадку без вимірювання K_C . На нашу думку, правильніше прив'язувати отриману кратність перенапруг U_C до резонансної частоти U_H , що відповідає досліді без вимірювання K_C . З рис. 4 видно, що напруга в середній точці обмотки ВН за частоти 2250 Гц (що відповідає частоті 3800 Гц випадку без вольтметрів у середній точці обмотки ВН) в 3,93 раза вища за прикладену до цілої обмотки, тобто градієнти електричної напруженості на

поздовжній ізоляції обмотки зросли у 7,86 раза. Важливо також, що на частотах 20500 Гц, 37000 Гц та 70000 Гц перенапруги на обмотці НН досягають відповідно 1,57, 2,12 та 4,39 крат, що небезпечно як для ізоляції обмотки НН, так і для приладів, що приєднані до неї.

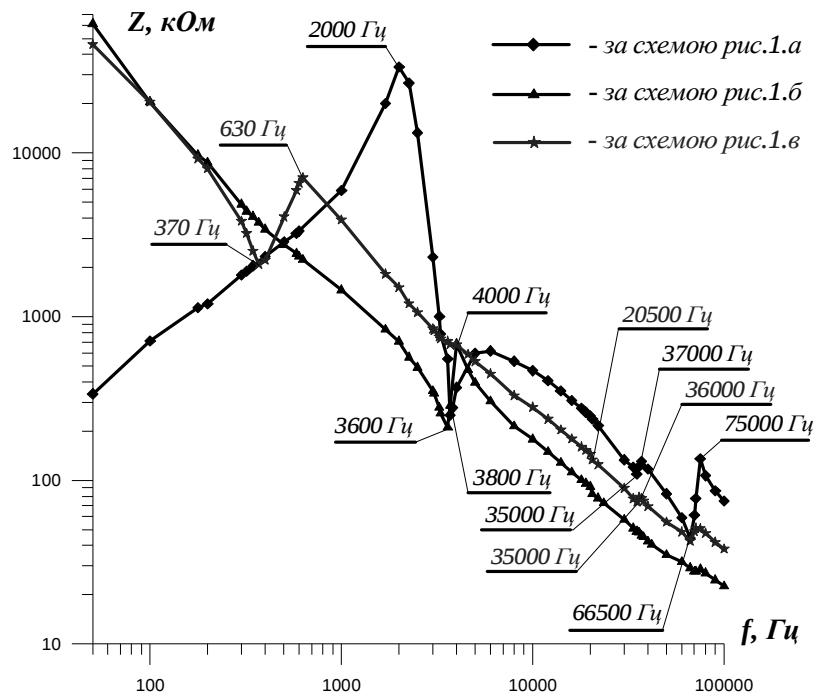


Рис. 2. Залежності вхідного опору НОМ-10 для схем дослідів за рис. 1 від частоти вільної складової внутрішніх перенапруг мережі

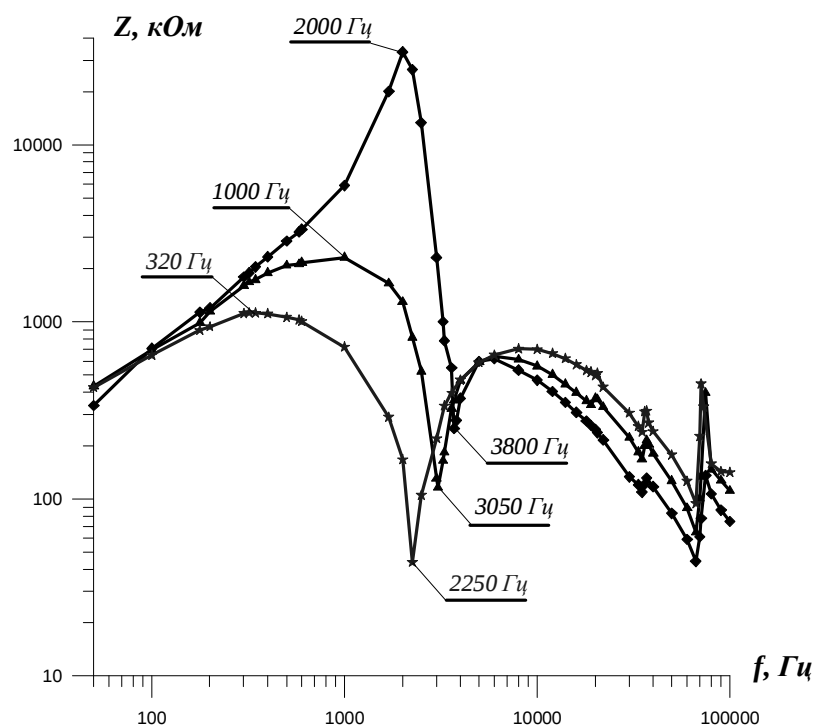


Рис. 3. Частотні характеристики вхідних опорів для дослідів за рис. 1, а:

- за відсутності вольтметрів на відпайці з середини обмотки ВН;
- за наявності першого вольтметра на відпайці з середини обмотки ВН;
- за наявності двох вольтметрів на відпайці з середини обмотки ВН

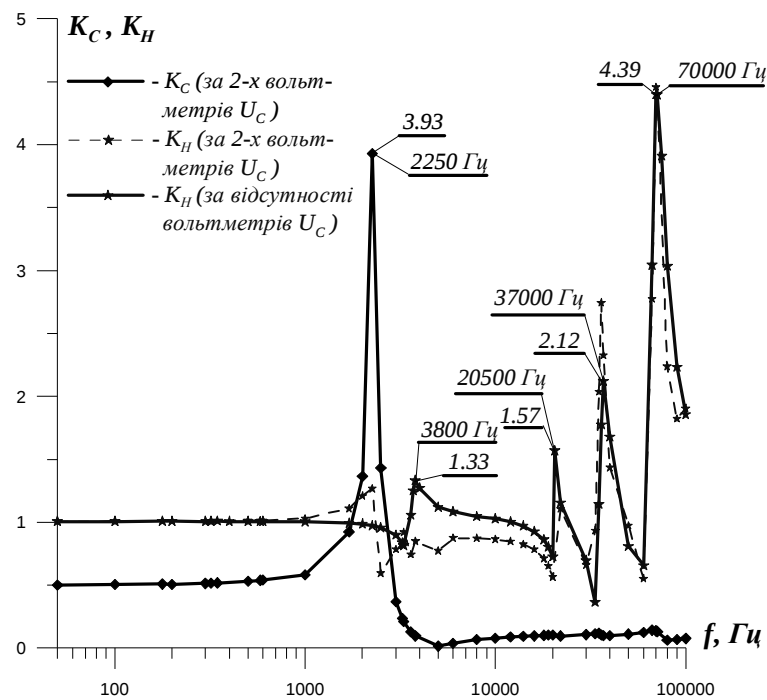


Рис. 4. Залежність функцій передачі напруги в середині обмотки ВН та напруги обмотки НН для схеми дослідів рис. 1, а від частоти вільної складової внутрішніх перенапруг мережі

На рис. 5 наведені функції передачі за напругою для схеми дослідів рис. 1, б. Резонанс напруг для середини обмотки ВН настає практично за тієї ж частоти (2250 Гц), що і для схеми рис. 1, а, але кратність перенапруг збільшується практично вдвічі. Відмінністю цього режиму від режиму рис. 1, а є багатократне зменшення перенапруг на обмотці НН за частот 36500 Гц та 70000 Гц.

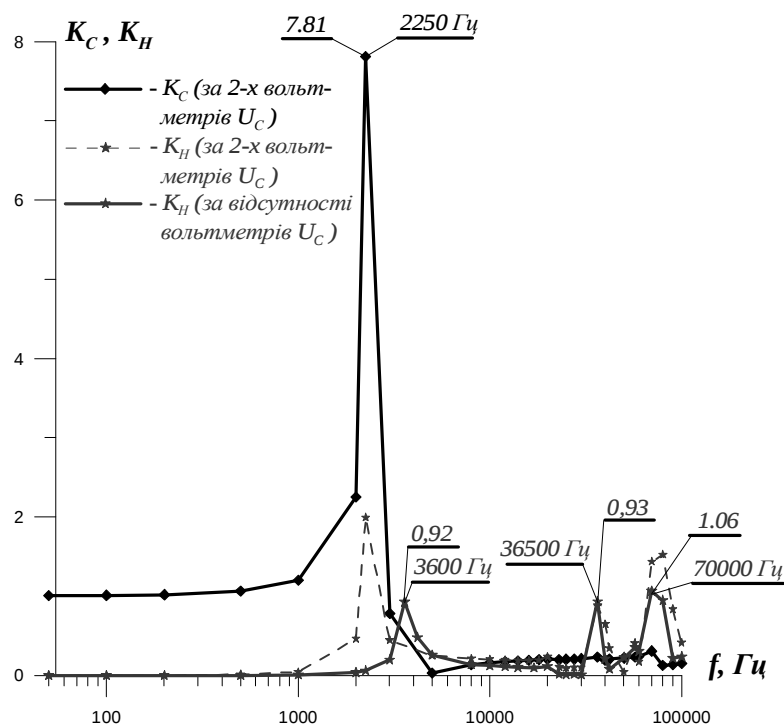


Рис. 5. Залежність функцій передачі напруги в середині обмотки ВН та напруги обмотки НН для схеми дослідів рис. 1, б від частоти вільної складової внутрішніх перенапруг мережі

Значно цікавішими є процеси для схеми досліду рис. 1, в, але вони виявилися найскладнішими з погляду адекватної їх реєстрації. Вище наголошено, що під'єднання вольтметрів впливає на параметри цих процесів.

Спрацювання запобіжника (схема рис. 1, в) за дії з боку мережі перенапруг в діапазоні частот 350 – 700 Гц спричиняє появу перенапруг на тому виводі обмотки ВН, який не має зв'язку з мережею. За частоти 320 Гц (що відповідає частоті 500 Гц випадку без вольтметра в середній точці обмотки ВН) кратність перенапруг досягає значень 3,27. Крім зазначеного небезпечного діапазону частот перенапруг має місце додатковий діапазон частот 3600–3800 Гц, який збігається з небезпечним діапазоном для режимів роботи схем рис. 1, а, б.

Цікаво, що кратність перенапруги K_C для середньої точки обмотки ВН на частотах 350–700 Гц на рівні 1,89 приблизно вдвічі менша, ніж K_B , але за частот 3600–3800 Гц навпаки $K_C = 2,14$, що більше ніж значення $K_B = 1,47$. Кратності перенапруг з боку обмотки НН в діапазоні частот 20–70 кГц практично збігаються з кратностями перенапруг для схеми рис. 1, а.

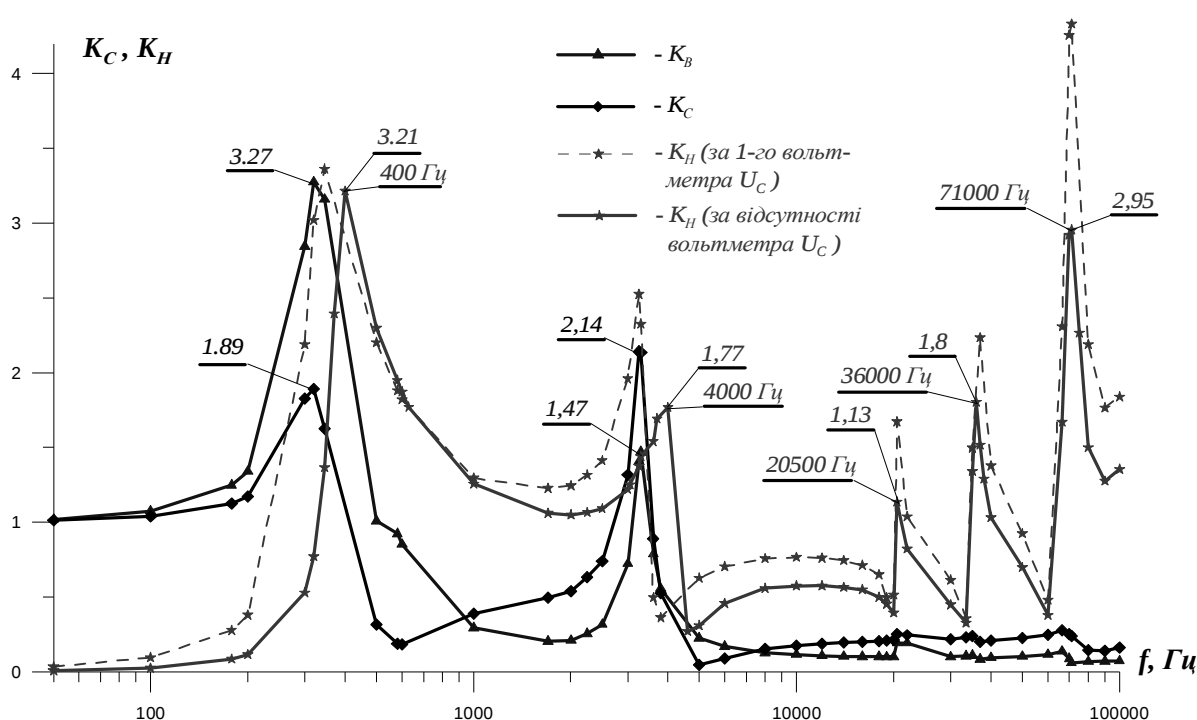


Рис. 6. Залежність функцій передачі напруги в середині та в кінці обмотки ВН, а також напруги обмотки НН для схеми досліду рис. 1, в від частоти вільної складової внутрішніх перенапруг мережі

Явище внутрішнього резонансу створює потенційні можливості пошкодження трансформаторів напруги НОМ-10 за існування в мережі живлення аварійних режимів з частотами вільної складової в діапазонах 350–700 Гц, 3600–3800 Гц, 20000 Гц, 37000 Гц, 70000 Гц.

На рис. 7 наведена запозичена з [6] стилізована осцилограма напруги на обмотці електродвигуна в досліді невеликого вимкнення приєднання з загальмованим двигуном за наявності обмежувача перенапруг, встановленого паралельно до головних контактів вакуумного вимикача. Декларується, що запропонований метод захисту дозволяє знизити перенапруги, які діють на ізоляцію двигуна до рівня, меншого, ніж у разі застосування олійного або малоолійного вимикача.

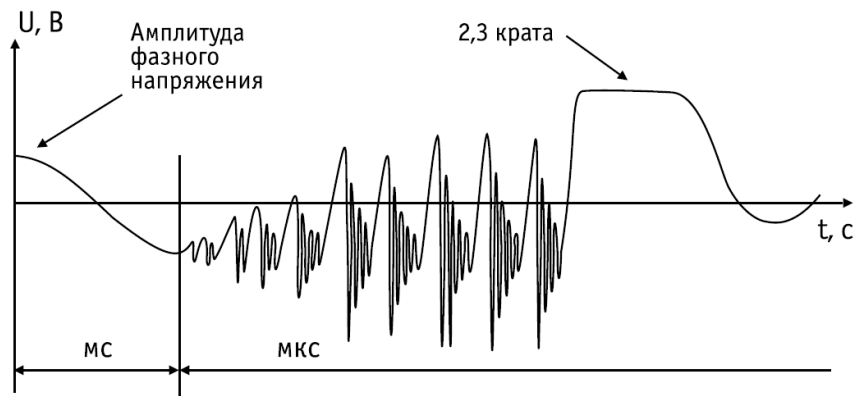


Рис. 7. Осцилограма напруги на обмотці електродвигуна в досліді невдалого вимкнення присіднання з загальмованим двигуном

Як видно з рис. 7, на ізоляцію електрообладнання діє цілий спектр високочастотних перенапруг. Рекомендації [6] розраховані на обмеження амплітуди перенапруг і не враховують того факту, що високочастотна складова перенапруг спричиняє досліджені в роботі резонансні явища всередині об'єму електрообладнання.

Висновки

Масове впровадження в мережах 10 кВ в останні роки вакуумних вимикачів 10 кВ, що зумовлюють в момент відімкнення виникнення високочастотних перенапруг, може бути додатковим фактором підвищення аварійності трансформаторів напруги.

1. Ганус А.И., Старков К.А. Повреждаемость трансформаторов напряжения в областных электрических сетях АК «Харьковоблэнерго» и мероприятия по ее снижению // *Світлотехніка і електроенергетика*. – 2003. – № 1. – С. 76–81. 2. ГОСТ 1516.3–96. Межгосударственный стандарт, электрооборудование переменного тока на напряжение от 1 до 750 кВ. Требования к электрической прочности изоляции. – К.: Госстандарт Украины, 1999. 3. А.В. Сапожников, Уровни изоляции электрооборудования высокого напряжения. Нормы и методы испытания электрической прочности. – М.: Энергия, 1969. – 296 с. 4. ГОСТ 1516.2-97, Межгосударственный стандарт, Электрооборудование и электроустановки переменного тока на напряжение 3 кВ и выше, Общие методы испытаний электрической прочности изоляции. – К.: Госстандарт Украины, 1999. – 32 с. 5. Никонець Л.О., Федів Є.І., Молнар М.М. Фізичні явища в електрообладнанні з обмотками високої напруги // *Енергетика та електрифікація*. – 2008. – № 3. – С. 49–52. 6. Таврида Електрик, Выключатели вакуумные серии ВВ / TEL, АРТА 674 152.001 РЭ.