

О. Ю. ЧЕРНОУСЕНКО, Б. О. МАРИСЮК

ДОСЛІДЖЕННЯ НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ ВАЛОПРОВОДУ ТУРБОАГРЕГАТУ К-1000-60/3000 ПРИ КРУТИЛЬНИХ КОЛИВАННЯХ

Основне обладнання більшості українських енергоблоків теплових та атомних електростанцій вичерпало свій парковий ресурс. Тому доцільно здійснювати детальний аналіз залишкового ресурсу працюючого обладнання та впроваджувати комплекс заходів з метою продовження терміну його експлуатації. В роботі описана модель для дослідження напружено-деформованого стану валопроводу турбоагрегату К-1000-60/3000 при нештатних режимах роботи електрогенератора (коротке замикання). Результати розрахунку показали, що реактивний сплеск на бочці ротора турбогенератора, який виникає при аварійній ситуації призводить до появи крутильних коливань всього валопроводу. Амплітуда коливань є прямо пропорційною збуджуючій силі та обернено пропорційною демпфуючим властивостям системи. Демпфуючі характеристики об'єкту забезпечують розсіювання енергії вільних коливань після припинення дії реактивного сплеску. Найбільші амплітуди дотичних напружень виникають на ділянці валопроводу між паровою турбіною та електрогенератором. При трьохкратному перевищенні номінального крутного моменту на роторі в районі муфти між циліндром низького тиску (ЦНТ) та електрогенератором (ЕГ) виникають напруження в 126 МПа.

Ключові слова: АЕС, парова турбіна, коротке замикання, крутильні коливання.

O. CHERNOUSENKO, B. MARYSIUK

STUDY OF THE STRESS-STRAIN STATE OF THE SHAFT DUCT OF THE K-1000-60/3000 TURBINE UNIT DURING TORSIONAL OSCILLATIONS

The main equipment of most Ukrainian power units of thermal and nuclear power plants has exhausted its design resource. Therefore, it is expedient to carry out a detailed analysis of the residual resource of the working equipment and to implement a set of measures to extend its service life. The paper describes a model for studying the stress-strain state of the shaft of the K-1000-60/3000 turbo unit during abnormal generator operation modes (short circuit). The results of the calculation showed that the reactive surge on the rotor barrel of the turbogenerator, which occurs in an emergency situation, leads to the appearance of torsional vibrations of the entire shaft. The amplitude of oscillations is directly proportional to the excitation force and inversely proportional to the damping properties of the system. The damping characteristics of the object ensure the dissipation of the energy of free oscillations after the termination of the reactive surge. The largest amplitudes of tangential stresses occur in the section of the shaft between the steam turbine and the electric generator. When the nominal torque is exceeded three times, stresses of 126 MPa arise on the rotor in the area of the coupling between the low-pressure cylinder (LPC) and the electric generator (EG).

Key words: NPP, steam turbine, short circuit, torsional oscillations.

Вступ

Енергетична галузь – це стратегічно важливий сектор господарства, що забезпечує стабільне функціонування економіки країни, її енергетичну та економічну незалежність від інших держав. З ростом економіки також зростає і попит на енергоресурси. Для того щоб задовольнити усіх споживачів потрібно збільшувати джерела власної енергогенерації.

До об'єднаної енергосистеми, будь-якої, країни входять електростанції різного роду, тепло- та електромережі, що призначені для генерації, розподілу та передачі теплової, або електричної енергії для промислових і побутових споживачів. В Україні генерація електроенергії забезпечується традиційними джерелами, а саме атомними, тепловими та гідроелектростанціями. Також з кожним роком набувають все більшої популярності альтернативні джерела електроенергії. Сюди можна віднести енергію сонця, вітру, біомаси, геотермальну енергію та інші. Проте їх вклад в загальній енергогенерації є недостатньо великим, і навряд найближчими роками зможе конкурувати з долею традиційних джерел енергії.

У публічному звіті Міністерства енергетики України за підсумками 2021 року в об'єднаній енергосистемі було вироблено 156,6 млрд. кВт·год електроенергії, що на 5,2 % більше, ніж у 2020 році [1], [2].

Основну частку в загальному виробітку електричної енергії української енергосистеми за 12 місяців 2021 року становить генерація на АЕС – 55 %, дещо менша генерація на ТЕС та ТЕЦ – 29,3 %, ГЕС та ГАЕС – 6,7 %, генерація за допомогою відновлювальних джерела понад 8 %. Детальна структура зображена на рис. 1.

У нормативних документах Мінпаливенерго України [3] вказано, що парковий ресурс парових турбін К-200-130 та К-300-240 ПАТ ЛМЗ становить 220 тис. год. при загальній кількості пусків 800; парковий ресурс парових турбін К-800-240 ПАТ ЛМЗ становить 150 тис. год. при загальній кількості пусків 400; парковий ресурс парових турбін К-300-240 АТ «Українські енергетичні машини» становить 200 тис. год. при загальній кількості пусків 600; парковий ресурс парових турбін Т-250/300-240 АТ УТЗ становить 220 тис. год. при загальній кількості пусків 800.

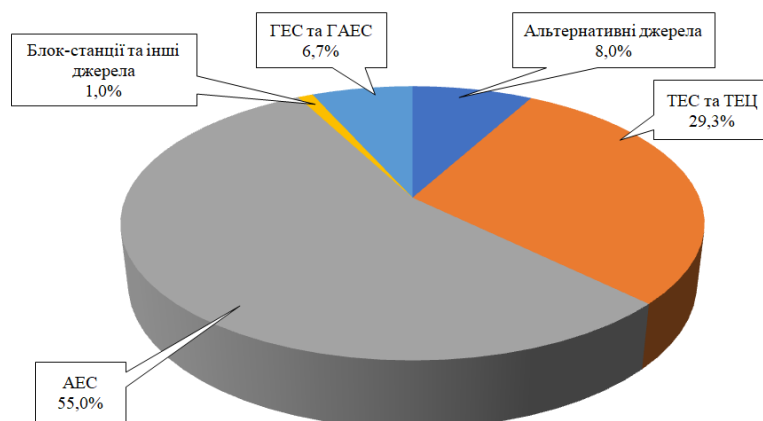


Рис. 1 – Структура виробництва електроенергії в ОЕС України за 2021 рік

Підсумовуючи вище наведену інформацію стає очевидним, що ресурс більшості вітчизняних енергоблоків ТЕС та ТЕЦ потужністю 100 – 800 МВт перевищив паркове значення. З 15 блоків атомних електростанцій 12 вже вичерпали парковий ресурс, а лише три енергоблоки одиничною потужністю 1000 МВт ще не напрацювали свій парковий ресурс. Це енергоблок № 6 ЗАЕС, введений в експлуатацію в 1995 році, енергоблок № 2 ХАЕС, що почав функціонувати в 2004 році, та енергоблок № 4 РАЕС, введений в експлуатацію 10 жовтня 2004 року. Також сьогодні частина енергоблоків теплових та атомних електростанцій не працює в енергосистемі України у зв'язку із захопленням територій російськими окупантами. Захоплена найбільша у Європі Запорізька атомна електростанція потужністю 6000 МВт.

Тому в українській об'єднаній енергосистемі існує гострий дефіцит як базових енергоблоків, так і високоманеврових джерел електроенергії. Для регулювання піків навантаження часто використовують пилувугільні енергоблоки потужністю 200 – 300 МВт [4]. Дані блоки проектувалися для роботи в базовій частині графіка навантаження, тож їх експлуатація в непередбачуваних заводами режимах призводить до суттєвого зменшення проектного ресурсу, тим самим збільшуються імовірності виникнення аварійних ситуацій різного роду.

Внаслідок злочинних дій Росії щодня відбувається руйнування критичної інфраструктури України. Суттєво пошкоджені та знищені не тільки об'єкти генерації, а й системи трансформування і передачі електроенергії [1], [2]. Тільки за перші 100 днів війни критичній інфраструктурі завдано збитків на понад \$30 млрд., зруйнована величезна кількість дорого вартісного енергетичного обладнання та тисячі кілометрів електромереж по всій країні [1], [2]. Тому актуальним стає надійна та безперерйна робота в енергосистемі України всіх наявних енергоблоків ТЕС та АЕС.

Мета роботи

Метою даної роботи є моделювання процесу появи крутильних коливань валопроводу парової турбіни К-1000-60/3000, що виникають внаслідок короткого замикання на лінії за електрогенератором та дослідження напружено-деформованого стану валопроводу при крутильних коливаннях.

Об'єкт дослідження та особливості чисельної моделі

В якості об'єкта дослідження було обрано валопровід парової турбіни К-1000-60/3000. Дана турбоустановка складається з п'яти робочих циліндрів, одного циліндра високого тиску (ЦВТ) і чотирьох циліндрів низького тиску (ЦНТ). Усі циліндри виконані двопотоковими та симетричними. Циліндри низького тиску розміщені симетрично, по обидва боки від циліндру високого тиску (по два ЦНТ з кожного боку). Нумерація циліндрів прийнята від регулятора швидкості (переднього підшипника турбіни) до електрогенератора.

Паротурбінна установка призначена для експлуатації в парі з реактором типу ВВЕР-1000 [5]. Номінальна електрична потужність становить 1000 МВт.

Сумарна довжина парової турбіни складає 50 м, а в парі з електрогенератором – 74 м.

Паротурбінна установка обладнана кінцевими ущільненнями. Вони знаходяться на ділянках виходу ротора турбіни з корпусу циліндру. Їх конструкція являє собою сегменти, що розміщені в обоймах та виточках гребне-подібної форми на статорі та роторі.

Кінцеві ущільнення перешкоджають підсмоктуванню повітря в турбіну на етапах набору вакууму і при роботі на малих витратах пари, а також перешкоджають витокам пари в приміщення машинного залу при навантаженнях турбоагрегату, коли тиск пари на виході з циліндру низького тиску вище тиску ущільнюючого пару в колекторі.

Для підтримування вакууму всередині турбіни і в конденсаторі, на кінцеві ущільнення подається пара, а також здійснюється відсмоктування з них повітря.

Циліндр високого тиску двох-поточний, має по п'ять ступенів тиску в кожному потоці, складається з двох корпусів, внутрішнього і зовнішнього. Ротор суцільно кований, має постійний кореневий діаметр усіх ступенів. В місцях виходу ротора з корпусу циліндра встановлені кінцеві ущільнення. Виконаний з хромонікелевої легованої сталі марки 30ХНЗМ1ФА.

Ротори циліндрів низького тиску також двох-поточні, мають по п'ять ступенів тиску в кожному потоці. Ротори зварно-ковані, з постійним кореневим діаметром. Виготовлені з роторної сталі марки 30ХНЗМ1ФА.

Потужність парової турбіни суттєво залежить від площі виходу відпрацьованої пари останніх ступенів. Проте зі збільшенням довжини робочих лопаток останніх ступенів циліндру низького тис-

ку, суттєво зростає маса лопаточного апарату. Тим самим збільшуються напруження, що виникають внаслідок відцентрових сил. Тому довгі робочі лопатки прийнято виконувати з матеріалу, що має значно нижчу густину, але при цьому його міцність залишається на достатньому рівні. Таким матеріалом є титанові сплави.

Густина титанового сплаву з якого виготовляють робочі лопатки останніх ступенів ЦНТ становить 4500 кг/м^3 , що майже вдвічі менше в порівнянні з густиною роторної сталі.

Для виконання розрахункової оцінки напружено-деформованого стану валопроводу та його пошкодження внаслідок крутильних коливань була виконана тривимірна геометрична модель з врахуванням його основних конструктивних елементів. Просторовий 3-D аналог роторів створено на основі паспортного креслення турбоагрегату К-1000-60/3000. Дана модель представлена на рис. 2.

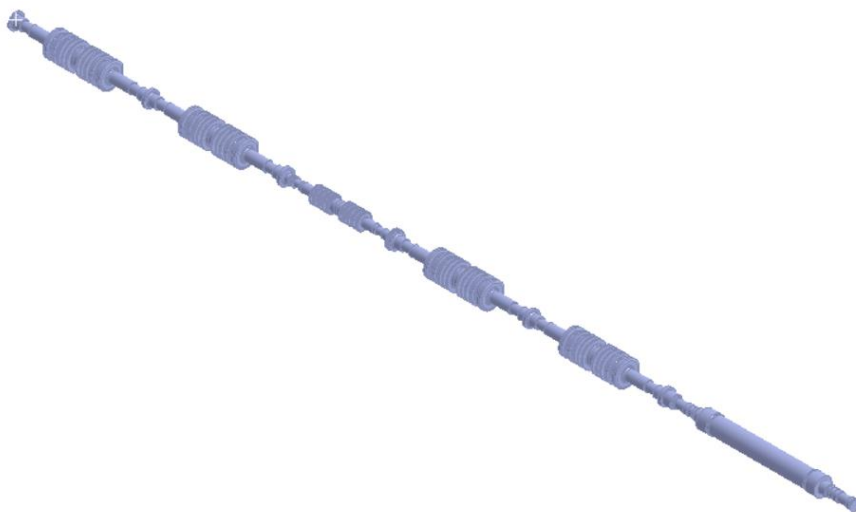


Рис. 2 – 3-D просторовий аналог валопроводу турбоагрегату К-1000-60/3000

Розрахункова оцінка напружено-деформованого стану валопроводу від крутильних коливань

Загальний статичний крутний моменти на валопроводі парової турбіни К-1000-60/3000 складається з суми моментів на роторі циліндру високого тиску та чотирьох роторах циліндрів низького тиску:

$$M_{ст.} = M_{ЦВТ} + 4M_{ЦНТ}. \quad (1)$$

При асинхронних включеннях генератора в електромережу, або коротких замиканнях на лінії, в електрогенераторі виникають значні електромагнітні реактивні моменти. За своєю амплітудою вони можуть перевищувати номінальне значення

крутного моменту в 3 – 12 разів, а тривалість їх дії може становити 0,01 – 0,26 с. Величина реактивного крутного моменту, що виникає внаслідок асинхронного включення та короткого замикання залежить від багатьох факторів, та як правило носить випадковий характер.

Реактивний момент на роторі електрогенератора в разі короткого замикання визначається за наступною залежністю:

$$M_P = M_{EG} + M_{КЗ}, \quad (2)$$

де M_{EG} – статичний крутний момент електрогенератора, що зумовлений його електромагнітним опором;

$M_{КЗ}$ – крутний момент, що виникає на роторі електрогенератора внаслідок короткого замикання.

В [6] наведено залежність для оцінки реактивного електромагнітного моменту, що виникає в генераторі внаслідок короткого замикання:

$$M_{\text{КЗ}} = kM_{\text{Н}}(a_0 + a_1 \sin(\omega t) + a_2 \sin(2\omega t)), \quad (3)$$

де $M_{\text{Н}}$ – номінальний крутний момент;

a_1, a_2, a_3 – безрозмірні коефіцієнти, які обираються в залежності від типу електрогенератора і типу короткого замикання;

ω – кутова швидкість ротора, рад/с;

t – тривалість дії короткого замикання, с.

При трьохфазному короткому замиканні безрозмірний коефіцієнт a_2 дорівнює нулю. Тоді залежність (3) набуває наступного вигляду:

$$M_{\text{КЗ}} = kM_{\text{Н}}(a_0 + a_1 \sin(\omega t)). \quad (4)$$

Зміна в часі крутного моменту на турбогенераторі, що виникає внаслідок короткого замикання розрахована по залежності 4 наведена на рис. 3.

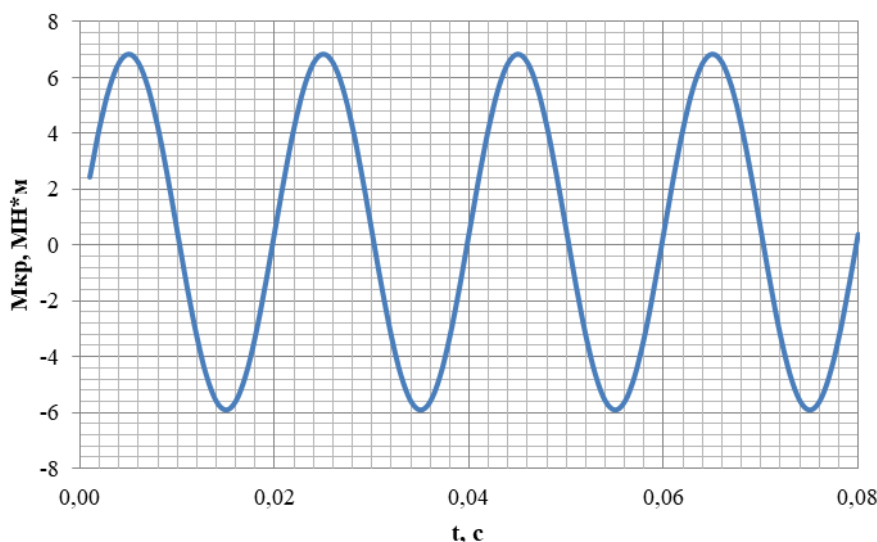


Рис. 3 – Зміна реактивного крутного моменту на турбогенераторі при короткому замиканні ($k = 3$)

Після припинення дії реактивного сплеску крутного моменту, що виник внаслідок аварійної ситуації (асинхронне включення, коротке замикання) спостерігається згасання амплітуди вільних коливань валопроводу. В першу чергу, розсіювання енергії відбувається завдяки демпфуючим властивостям матеріалу валопроводу.

Демпфування – це здатність системи поглинати енергію коливань. Виділяють декілька типів демпфування: демпфування в матеріалі, в'язке демпфування та демпфування тертям.

Демпфування в матеріалі виникає завдяки складній міжмолекулярній взаємодії всередині матеріалу. При цьому енергія системи поглинається самим матеріалом та виділяється у вигляді теплоти. При в'язкому типі демпфування енергія розсіюється при русі системи в рідкому, парогазовому, або газовому середовищі. У випадку демпфування тертям енергія системи розсіюється за рахунок ковзання частин механізму. При цьому енергія коливань зменшується через втрати на тертя і виділяється у вигляді шуму та теплоти.

Особливу увагу демпфуючим характеристикам системи необхідно приділяти при резонансних коливаннях. Так численні дослідження підтверджують той факт, що амплітуда коливань є прямо пропорційною збуджуючій силі, але обернено

пропорційною демпфуючим властивостям системи.

Раніше дослідження напружено-деформованого стану валопроводу турбоагрегату К-200-230 при крутильних коливаннях були проведені в роботах [7] – [9]. Показано, що в елементах валопроводу можливо виникнення утомного пошкодження, рівень якого в загальному випадку визначається циклічною міцністю матеріалу валопроводу при крутильних коливаннях, параметрами реактивного крутного моменту та рівнем демпфування коливань в механічній системі. Враховуючи потенційну загрозу явища і значну невизначеність параметрів навантаження в перспективі необхідна організація безперервного моніторингу змін крутного моменту по валопроводу та створення на його базі автоматизованої системи оцінки циклічного пошкодження валопроводу в результаті дії експлуатаційних динамічних крутних навантажень.

Дослідження напружено-деформованого стану валопроводу турбоагрегату К-1000-60/3000 при крутильних коливаннях, що виникли внаслідок короткого замикання на лінії за електрогенератором здійснено в тривимірній постановці з використанням програмного комплексу ANSYS. Для математичної моделі задавалися фізико-механічні

властивості хромонікелевої легованої сталі марки 30ХНЗМ1ФА та інші граничні умови (коефіцієнт демпфірування, температура, крутні моменти на ступенях парової турбіни та генераторі).

За допомогою моделювання в комплексі ANSYS отримані графіки зміни дотичних напружень в часі, з моменту появи реактивного сплеску на електрогенераторі до моменту затухання вільних коливань валопроводу. Найбільші напруження, як і очікувалося, виникли в області жорстких напівмуфт та на ділянках кріплення обойм опорних підшипників.

Розподіл дотичних напружень по довжині валопроводу турбоагрегату К-1000-60/3000 в момент їх екстремуму зображено на рис. 4.

Дослідження напружено-деформованого стану валопроводу потребувало побудови графіків зміни тангенціальних напружень в часі на найбільш напружених ділянках. Дані графіки зображені на рис. 5 – 9. За початок відліку брався момент появи реактивного сплеску, який виник внаслідок аварійної ситуації.

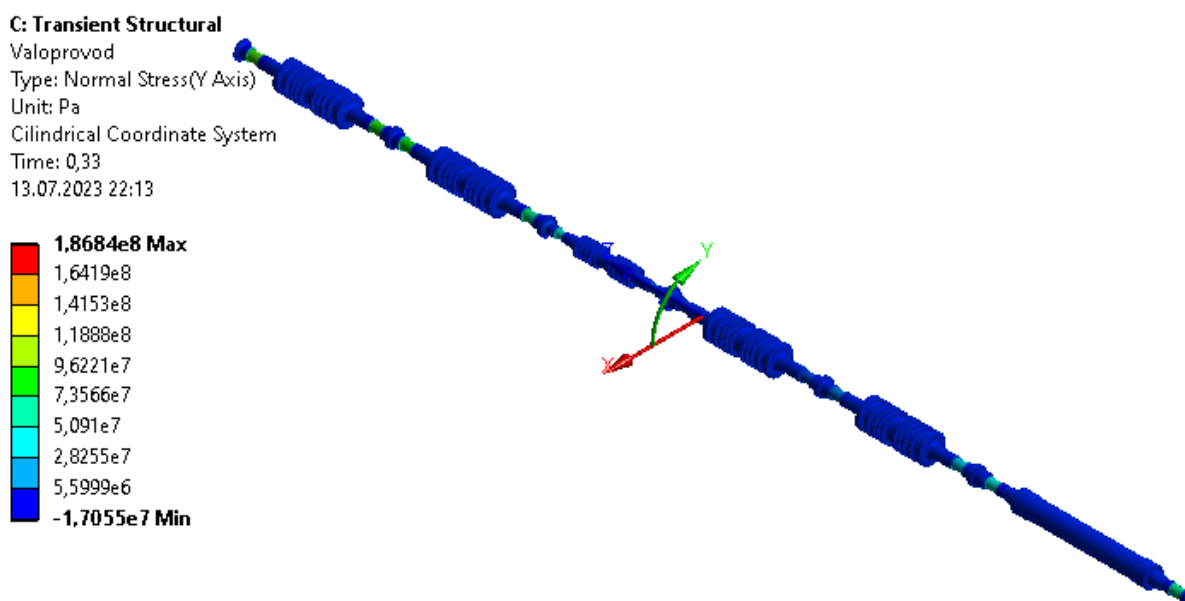


Рис. 4 – Дотичні напруження валопроводу турбоагрегату К-1000-60/3000 в момент часу 0,33 с

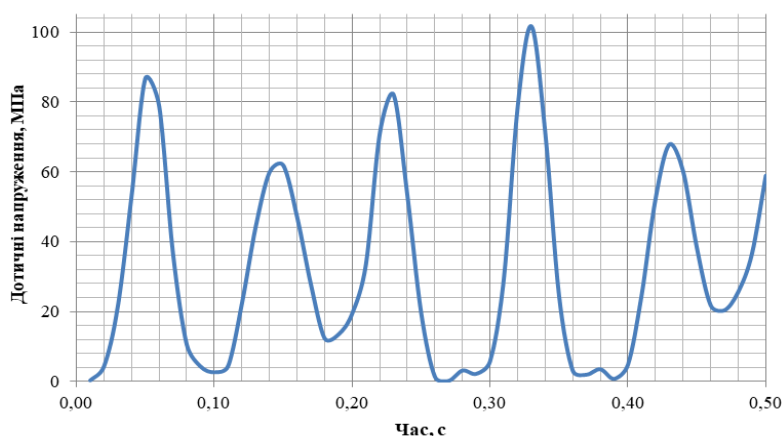


Рис. 5 – Дотичні напруження валопроводу турбоагрегату К-1000-60/3000 між ЦНТ-1 та ЦНТ-2

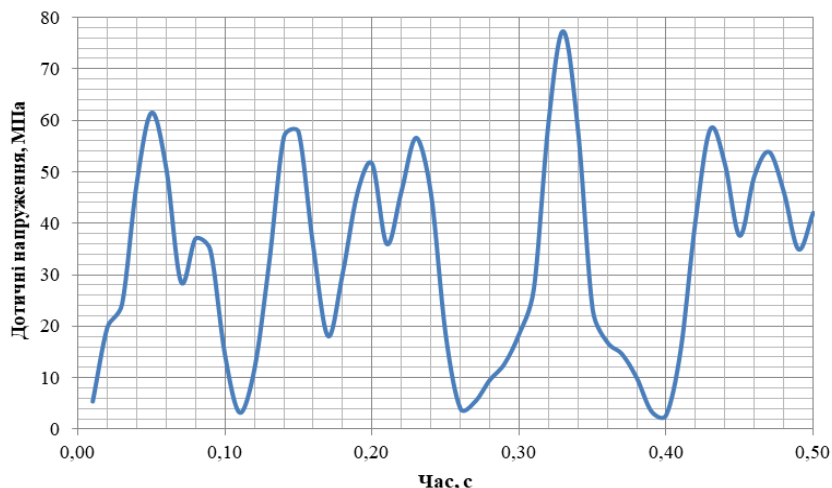


Рис. 6 – Дотичні напруження валопроводу турбоагрегату К-1000-60/3000 між ЦНТ-2 та ЦВТ

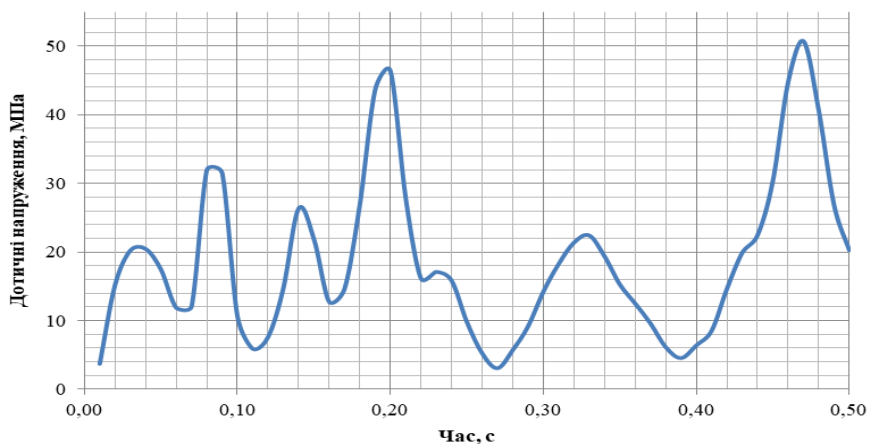


Рис. 7 – Дотичні напруження валопроводу турбоагрегату К-1000-60/3000 між ЦВТ та ЦНТ-3

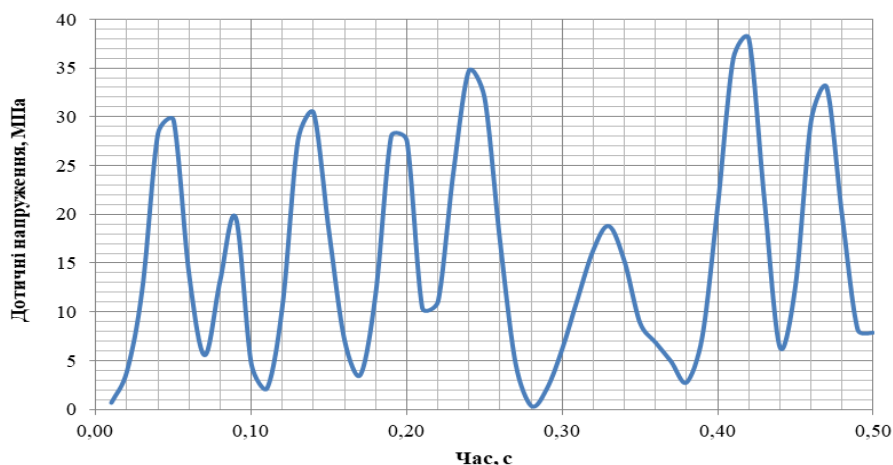


Рис. 8 – Дотичні напруження валопроводу турбоагрегату К-1000-60/3000 між ЦНТ-3 та ЦНТ-4

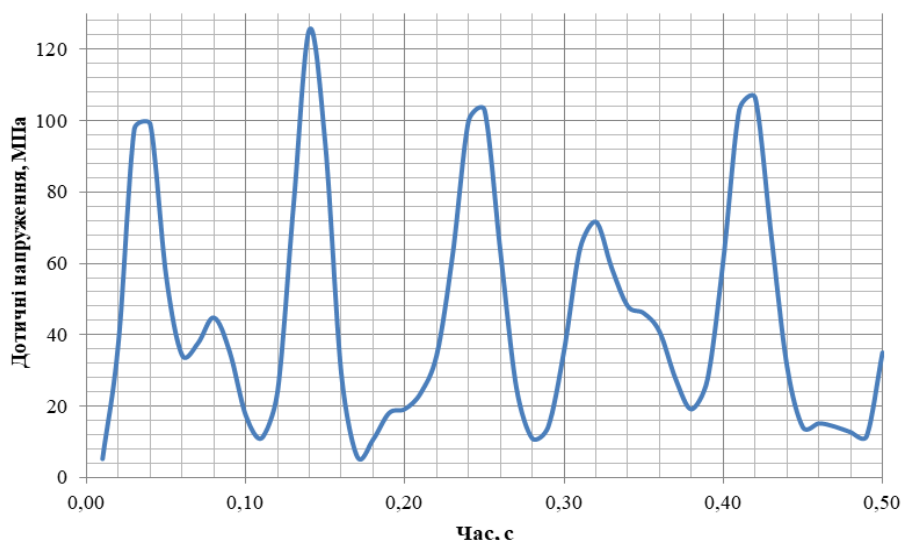


Рис. 9 – Дотичні напруження валопроводу турбоагрегату К-1000-60/3000 між ЦНТ-4 та генератором

Моделювання напружено-деформованого стану валопроводу внаслідок реактивного крутного сплеску бігармонічної форми на електрогенераторі дозволило отримати важливу інформацію, щодо розподілу дотичних напружень по довжині роторів турбоагрегату.

Аналізуючи графіки рис. 5 – 9 необхідно зазначити, що екстремум дотичних напружень досягає в момент дії реактивного сплеску тільки на ділянці валопроводу між паровою турбіною та генератором. На усіх інших ділянках максимум спостерігається вже після припинення дії реактивного сплеску крутного моменту, тобто в період вільних коливань.

При даному моделюванні небезпечною є тільки ділянка між паровою турбіною та генератором. Тут максимальне значення дотичних напружень становлять 99 МПа, 126 МПа, 103 МПа та 107 МПа.

На інших ділянках валопроводу дотичні напруження значно менші за границю витривалості роторної сталі, що не призводить до пошкодження металу.

Висновки

Отримана модель дослідження напружено-деформованого стану валопроводу турбоагрегату К-1000-60/3000 внаслідок крутильних коливань, що виникають при аварійних ситуаціях електричного характеру (короткі замикання, асинхронне включення). Модель дозволяє отримати значення дотичних напружень на всіх ділянках валопроводу.

Основними факторами, що визначають інтенсивність крутильних коливань є тривалість реактивного сплеску та його початкова амплітуда. Збі-

льшення початкової амплітуди збуджуючої сили призводить до зростання інтенсивності крутильних коливань всього валопроводу турбоагрегату, та як наслідок до сильнішого пошкодження металу.

Рівень демпфірування системи чинить обернено пропорційний вплив на амплітуди коливань. Так збільшення демпфуючих властивостей об'єкту призводить до зменшення амплітуди дотичних напружень, тим самим зменшується кількість пошкоджуючих циклів коливань.

Результати розрахунку показали, що найбільші інтенсивності дотичних напружень виникають на ділянці валопроводу турбоустановки К-1000-60/3000 між паровою турбіною та електрогенератором та складають 126 МПа, тому саме на даній ділянці буде спостерігатись максимальне пошкодження металу.

Багаторазове повторення пошкоджуючих циклів коливань з амплітудами, що перевищують межу витривалості роторної сталі призведе до накопичення пошкодження в металі валопроводу та подальшого зародження і розвитку тріщин циклової втоми.

Результати вище наведеного моделювання будуть використані для подальшого дослідження пошкодження металу валопроводу турбоагрегату К-1000-60/3000 та прогнозування його залишкового ресурсу.

Список літератури

1. Особливості вітчизняного виробництва електроенергії / ТОВ «Українська енергетична біржа». – 2022. – Назва з екрану. – URL: <https://www.ueex.com.ua/presscenter/news/osoblivosti-vitchiznyanogo-virobnitstva-elektroenergii/> (дата звернення: 12.12.2023).

2. Інтегрований звіт 2020: фінансові та нефінансові показники / ДТЕК. – 2020. – Назва з екрану. – URL: https://dtek.com/investors_and_partners/reports/2020/ (дата звернення: 12.12.2023).
3. НД МПЕ України. Контроль металу і продовження терміну експлуатації основних елементів котлів, турбін і трубопроводів теплових електростанцій : СОУ-Н МПЕ 40.17.401:2021. – Офіц. вид. – Київ : ГРІФРЕ: М-во палива та енергетики України, 2021. – 214 с. – (Нормативний документ Мінпаливенерго України, Типова інструкція).
4. Черноусенко О. Ю. Оцінка залишкового ресурсу та подовження експлуатації парових турбін великої потужності (частина 3) [Електронний ресурс] : монографія для науковців та докторів філософії за спеціальністю 144 «Теплоенергетика» / О. Ю. Черноусенко, Д. В. Риндюк, В. А. Пешко (1 файл: 16,1 Мбайт). – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2020. – 308 с. – Назва з екрану. – URL: <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/41565> (дата звернення: 12.12.2023).
5. Турбина паровая К-1000-60/3000. Техническое описание и инструкция по эксплуатации № 1-Э-ТЦ-2. – Вараш : НАЭК «ЭНЕРГОАТОМ», 2006. – 112 с.
6. Гришин М. М. Динаміка системи роторів турбоагрегату потужністю 1100 МВт / Н. М. М. Гришин, Б. П. Зайцев, О. К. Морачковський, Ю. Г. Пащенко, О. Г. Кантор // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Енергетичні та теплотехнічні процеси й устаткування. – 2019. – № 3(1328). – С. 55–60. – Бібліогр.: 6 назв. – ISSN 2078-774X (print). – ISSN 2707-7543 (on-line). – DOI: <https://doi.org/10.20998/2078-774X.2019.03.08>.
7. Бовсуновский А. П. Усталостное повреждение и разрушение роторов паровых турбин в результате крутильных колебаний / А. П. Бовсуновский, О. Ю. Черноусенко, Е. В. Штефан, Д. А. Башта // Проблемы мощности. – 2010. – № 1. – С. 144–151. – ISSN 0556-171X (print). – ISSN 1573-9325 (on-line). – Бібліогр.: 8 назв. – URL: <http://dspace.nbuv.gov.ua/handle/123456789/111652> (дата звернення: 12.12.2023).
8. Черноусенко О. Ю. Рационализация подходов числового моделирования геометрично-складного оборотового обладнання электрических станций / О. Ю. Черноусенко, В. А. Пешко, Б. О. Марисюк // Энергетика: экономика, технологии, экология. – 2019. – № 3(57). – С. 30–36. – Бібліогр.: 6 назв. – ISSN 1813-5420 (print). – ISSN 2308-7382 (on-line). – DOI: <https://doi.org/10.20535/1813-5420.3.2019.196372>.
9. Chernousenko O. Estimation of Steam Turbine Shafts Fatigue Damage Caused by Torsional Vibrations / O. Chernousenko, V. Peshko, B. Marisyuk, A. Bovsunovsky // Proceedings of the 8th International Conference on Fracture, Fatigue and Wear. FFW 2020. Lecture Notes in Mechanical Engineering. Springer, Singapore. – pp. 533–541. – ISBN 978-981-15-9893-7. – DOI: https://doi.org/10.1007/978-981-15-9893-7_39.
- domestic production of electricity], Access mode: <https://www.ueex.com.ua/presscenter/news/osoblivostivitchiznyanogo-virobnitstva-elektroenergi/> (accessed 12 December 2023).
2. DTEK (2020), Integrovany`j zvit 2020: finansovi ta nefinansovi pokazny`ky` [Integrated report 2020: financial and non-financial indicators], Access mode: https://dtek.com/investors_and_partners/reports/2020/ (accessed 12 December 2023).
3. (2021), *ND MPE Ukrainy`. Kontrol` metalu i prodovzhennya terminu ekspluatatsiyi osnovny`x elementiv kotliv, turbin i truboprovodiv teplovy`x elektrostancij`* : SOU-N MPE 40.17.401:2021 [Metal control and extension of the service life of the main elements of boilers, turbines and pipelines of thermal power plants: SOU-N MPE 40.17.401:2021], GRIFRE, M-vo palyva ta energetyky Ukraїny, Kyiv, 214 p.
4. Chernousenko O., Ryndyuk D., Peshko V. (2020), *Ocinka zalyshkovogo resursu ta podovzhennya ekspluatatsiyi parovy`x turbin vely`koyi potuzhnosti (chasty`na 3)* [Assessment of residual life and service life extension of large power steam turbines (part 3)], National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", Kiev, Ukraine, 308 p, Access mode: <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/41565> (accessed 12 December 2023).
5. (2006), *Turbina parovaya K-1000-60/3000. Texnicheskoe opisaniye i instrukciya po e`kspluatatsii № 1-E'-TC-2* [Steam turbine K-1000-60/3000. Technical description and operating instructions No. 1-E-TC-2], NAEK "ENERGOATOM", Varash 112 p.
6. Hryshyn M., Zaytsev B., Morachkovskyy O., Pashchenko Yu., Kantor O. (2019), "The Dynamics of a Rotor System of a 1100 MW Turbine Unit", *Bulletin of NTU "KhPI". Series: Power and heat engineering processes and equipment*, no. 3(1328), pp. 55–60, ISSN 2078-774X (print), ISSN 2707-7543 (on-line), <https://doi.org/10.20998/2078-774X.2019.03.08>.
7. Bovsunovsky`j A. P., Chernousenko O. Yu., Shtefan E. V., Bashta D. A. (2010), "Ustalostnoye povrezhdeniye i razrusheniye rotorov parovy`x turbin v rezul'tate krutil'ny`x kolebanij [Fatigue damage and destruction of steam turbine rotors as a result of torsional vibrations]", *Strength of Materials*, no 1, pp. 144–151, ISSN 0556-171X (print), ISSN 1573-9325 (on-line), Access mode: <http://dspace.nbuv.gov.ua/handle/123456789/111652> (accessed 12 December 2023).
8. Chernousenko O., Peshko V., Marysiuk B. (2019), "Rationalization of the Approaches of Numerical Simulation of the Geometrically Complex Rotating Equipment of Electrical Stations", *Power engineering: economics, technique, ecology*, no 3(57), pp. 30–36, ISSN 1813-5420 (print), ISSN 2308-7382 (on-line), <https://doi.org/10.20535/1813-5420.3.2019.196372>.
9. Chernousenko O., Peshko V., Marisyuk B., Bovsunovsky A. (2020), "Estimation of Steam Turbine Shafts Fatigue Damage Caused by Torsional Vibrations", *Proceedings of the 8th International Conference on Fracture, Fatigue and Wear. FFW 2020. Lecture Notes in Mechanical Engineering. Springer, Singapore*, pp. 533–541, ISBN 978-981-15-9893-7, DOI: https://doi.org/10.1007/978-981-15-9893-7_39.

References (transliterated)

1. LLC Ukrainian Energy Exchange (2022), *Osobly`vosti vitchy`znyanogo vy`robny`ctva elektroenergiyi* [Peculiarities of

Надійшла (received) 22.10.2023

Відомості про авторів / About the Authors

Черноусенко Ольга Юрївна (Chernousenko Olga) – доктор технічних наук, професор, КПІ ім. Ігоря Сікорського, завідувач кафедри теплової та альтернативної енергетики; м. Київ; тел.: (050) 413–40–50; e-mail: chernousenko20a@gmail.com; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1427-8068>. Scopus 6507954096.

Марисюк Богдан Олександрович (Marisyuk Bogdan) – аспірант кафедри теплової та альтернативної енергетики, КПІ ім. Ігоря Сікорського, м. Київ; тел.: (097) 394–03–17; e-mail: bodia.marisyuk@gmail.com; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1099-0290>. Scopus 57222086897.