

УДК 621.928.83

## ЗМЕНШЕННЯ КРУТИЛЬНИХ КОЛИВАНЬ ВАЛОПРОВОДІВ ПОТУЖНИХ ТУРБОГЕНЕРАТОРІВ ЗА ДОПОМОГОЮ АСИНХРОННОГО ДЕМПФІРУВАЛЬНОГО ПРИСТРОЮ

Ю.В. Куєвда, В.П. Куєвда, канд. техн. наук, С.М. Балюта, докт. техн. наук

Національний університет харчових технологій,  
вул. Володимирська, 68, Київ, 01601, Україна  
e-mail: julia@kuevda.com, vpkuevda@gmail.com

*Розглянуто роботу асинхронного демпфівального пристрою (АДП) для покращення якості перехідних електро-механічних процесів у потужних турбогенераторах. Розраховано параметри АДП, створено його модель у Matlab Simulink та змодельовано перехідні процеси при несинхронному ввімкненні турбогенератора на холостому ході в систему нескінченної потужності, а також при трифазному короткому замиканні поза трансформатором та подальшому автоматичному повторному ввімкненні (АПВ) турбогенератора при його номінальному навантаженні. Показано, що АДП, демпфівуючи хитання ротора турбогенератора, суттєво покращує динамічні властивості розрахованих перехідних процесів, значно знижуючи час хитань ротора та кількість критичних значень механічних крутних моментів у особливо напруженому перетині валопроводу між ротором генератора та циліндром низького тиску турбіни. Бібл. 12, рис. 5.*

**Ключові слова:** асинхронна машина, турбогенератор, демпфівування хитань ротора, несинхронне ввімкнення, коротке замикання, автоматичне повторне ввімкнення.

**Введення.** Однією з можливих причин руйнування валопроводів турбін на теплових та атомних електростанціях є зародження і розвиток тріщин утоми в матеріалі валопроводів їх роторів, викликаних дією на них динамічних крутних моментів, що обумовлюються електромагнітними перехідними процесами в генераторі [2, 6, 7]. Особливу роль при цьому відіграє низькочастотна складова закручувальних електромагнітних моментів, яка може збільшити час дії критичних значень механічних напружень в окремих перетинах валопроводу.

**Аналіз досліджень.** Функції демпфівування низькочастотних хитань роторів турбогенераторів зазвичай беруть на себе їх демпферні обмотки або системні стабілізатори (PSS). Але, як показують дослідження [3, 8, 10], потужності їхньої дії не завжди вистачає для суттєвого зниження амплітудних значень та часу дії періодичних електромагнітних моментів за рахунок демпфівування їхньої низькочастотної складової. Тому, щоб покращити показники перехідного процесу, необхідно вживати додаткові заходи чи пристрої.

**Постановка задачі.** Предметом таких досліджень є застосування асинхронного демпфівуючого пристрою (АДП) та математичне моделювання його ефективності під час деяких перехідних електромагнітних процесів на прикладі ТГВ-200.

**Основні результати.** У роботі [5] авторами було запропоновано електромашинний агрегат, що складається з основної електричної машини синхронного типу та допоміжної електричної машини асинхронного типу для демпфівування низькочастотних хитань ротора основної машини під час перехідних процесів.

Конструкція та схема розміщення цього електромашинного агрегату представлені на рис. 1. Агрегат складається з основної електричної машини синхронного типу, наприклад, турбогенератора, яка містить осердя 1 статора з трифазною обмоткою 2 та її затискачами 3, ротор 4 з обмоткою збудження 5, напіввали 6 та 7 з підшипниковими вузлами, відповідно 8 та 9, і допоміжного асинхронного пристрою (АДП) 10, який має установлені у корпусі 11 осердя 12 статора з трифазною обмоткою 13, зробленою на кількість пар полюсів і номінальну напругу такі ж самі, як і у обмотки 2 основної машини, та осердя ротора 14 з короткозамкненою обмоткою 15. При цьому осердя ротора 14 встановлено жорстко на напіввал ротора 7 основної машини, а виводи 16 обмотки 13 статора асинхронної машини 10 безпосередньо, тобто без узгоджуючого трансформатора підключаються до затискачів 3 основної машини за допомогою швидкодіючого автоматичного вимикача 17.

Асинхронний демпфувальний пристрій працює таким чином:

- під час сталого режиму роботи синхронного турбогенератора (тобто без низькочастотних механічних коливань його ротора) обмоткою статора 13 АДП створюється магнітне поле, яке синхронно обертається з ротором 14 і не наводить в обмотці останнього ніяких струмів, тобто не створює електромагнітних моментів, діючих на ротор АДП;
- механічні низькочастотні коливання ротора 4 основної електричної машини можуть виникнути при будь-яких раптових порушеннях або змінах режиму роботи цієї машини, наприклад, за скиданням чи накиданням навантаження, змінах струму збудження, відключеннях чи підключеннях ділянки паралельної лінії, що зв'язує синхронну машину з потужною електричною системою, коротких замиканнях у лінії та наступних його відключеннях і т. ін.

Основними заспокоюючими силами для вказаних механічних коливань ротора синхронного турбогенератора відносно синхронної частоти обертання його поля статора є гальмівні зусилля, що виникають при взаємодії поля статора та струмів у контурах ротора (масив тіла самого ротора, якщо ротор не шихтований, та його демпферна обмотка), наведених низькочастотними коливаннями струму в обмотці статора. Але в синхронному турбогенераторі, який має досить великий повітряний зазор між статором і ротором, магнітний зв'язок між демпферними контурами його ротора та обмоткою статора є відносно слабким, що різко послаблює демпфуючі властивості вторинних контурів цього ротора.

У електромашинному агрегаті [5] суттєвому демпфіванню низькочастотних коливань ротора турбогенератора сприяє асинхронна машина 10, ротор 14 якої розміщений на одному валу з ротором 4 основної машини і має мінімально можливий з механічної точки зору повітряний зазор зі своїм статором 12, що призводить до різкого підвищення магнітного зв'язку між статором та ротором цієї машини і в свою чергу значно підвищує її демпферні властивості.

Розміри та електричні параметри АДП розраховуються окремо під конкретний турбогенератор згідно з методологією розрахунку, наведеною у [4]. В нашому випадку ці параметри були розраховані для роботи АДП з турбогенератором ТГВ-200.

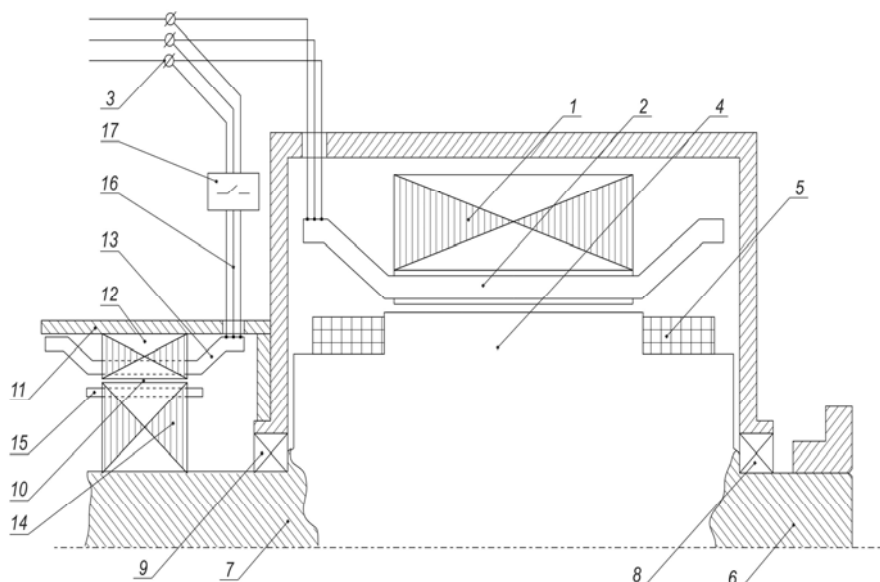


Рис. 1

#### Основні параметри статора АДП:

зовнішній діаметр заліза, м.....	1,5
діаметр розточки, м.....	0,65
довжина пакета, м.....	2,0
зубцева поділка, м.....	0,0425
висота спинки, м.....	0,345
кількість пазів.....	48
глибина паза, м.....	0,08
ширина паза, м.....	0,02.

#### Основні параметри шихтованого короткозамкненого ротора АДП:

зовнішній діаметр бочки, м.....	0,647
довжина бочки, м.....	2,0

кількість стержнів обмотки .....	38
діаметр стержня, м.....	0,03
матеріал стержня .....	алюміній.

Індуктивні та активні опори АДП зведені до таких параметрів обмотки статора:	
активний опір обмотки статора АДП дорівнює, Ом .....	0,00827
опір взаємодукції між обмотками ротора та статора, Ом.....	23,8
індуктивний опір розсіювання обмотки статора, Ом.....	0,157
активний опір обмотки ротора, Ом.....	0,00781
індуктивний опір розсіювання обмотки ротора, Ом.....	0,0863.

Чисельні дослідження проводилися в системі імітаційного моделювання Simulink пакета Matlab з урахуванням та без урахування АДП. Для створення моделі, показаної на рис. 2, автори користувалися бібліотекою електротехнічних пристроїв SimPowerSystems. Турбогенератор ТГВ-200 моделювався у відносних одиницях за допомогою блока Synchronous Machine pu Fundamental (блок TGV-200, рис. 2) з параметрами, представленими на рис. 3. Блок Synchronous Machine в Matlab моделювався за допомогою системи рівнянь Парка-Горєва [9].

В блоці Synchronous Machine враховується тільки одна маса, що обертається. Для моделювання крутних моментів у перерізах валопроводу між масами ступенів турбіни та бочки ротора генератора було обрано чотиримасову модель турбіна-генератор [12, 11]. У цій моделі турбіна поділяється на три маси: циліндр високого тиску (ЦВТ), циліндр середнього тиску (ЦСТ) та циліндр низького тиску (ЦНТ), а ротор генератора враховується однією масою. Для урахування турбінних мас моделі було створено окрему підсистему Mass123. У ній за допомогою стандартної бібліотеки Simulink було відтворено схему системи звичайних диференціальних рівнянь [1], яка описує пружне з'єднання мас турбіни, що обертаються, та пружне приєднання їх до маси бочки ротора генератора. Входами підсистеми є ковзання  $\langle dw \rangle$  і кут між ЕРС генератора та напругою мережі  $\langle dteta \rangle$ , виходами є моменти  $\langle Te1 \rangle$ ,  $\langle Te1C \rangle$ ,  $\langle Te2C \rangle$ ,  $\langle Te3C \rangle$  – закручувальний, що діє з боку турбіни на ротор турбогенератора, та крутні в перерізах ТГВ-ЦНТ, ЦНТ-ЦСТ, ЦСТ-ЦВТ відповідно.

У моделі також було враховано трансформатор (блок Transformer, рис. 2), лінію електропередачі (блок Line) між електромашинним агрегатом та системою нескінченної потужності (блок Infinite power system). Трифазне коротке замикання моделювалося за допомогою блока Fault.

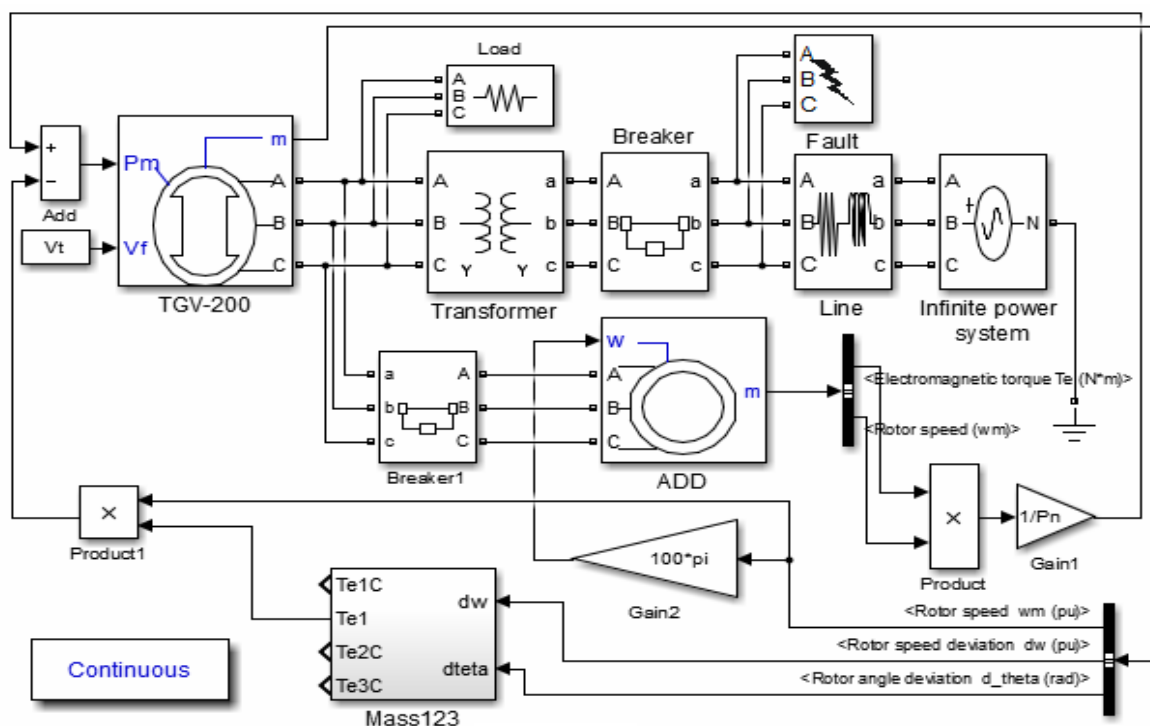


Рис. 2

Асинхронний демпфувальний пристрій моделювався за допомогою стандартного блока Asynchronous Machine SI Units бібліотеки SimPowerSystems. На рис. 2 – блок ADD (Asynchronous Dumping Device). Блок Asynchronous Machine в Matlab моделюється за допомогою рівнянь відносно перпендикулярних осей  $dq$  [9], де вісь  $d$  може бути спрямована трьома способами: rotor – нерухома відносно ротора, stator – нерухома відносно статора, synchronous – обертається разом з полем. У цьому дослідженні було обрано тип спрямування rotor. Щоб врахувати жорстке з'єднання роторів основної та допоміжної машин, було створено зв'язок між виходом <Rotor speed  $\omega_m(\text{pu})$ > блока TGV-200 та частоти обертання < $\omega$ > блока ADD, а також зв'язок між вихідною потужністю блока ADD (добуток виходів <Electromagnetic torque  $T_e(N\cdot m)$ > та <Rotor speed( $\omega_m$ )>) та вхідною потужністю < $P_m$ > блока TGV-200.

На рис. 4 представлені результати двох розрахунків (при відсутності АДП та при його наявності) залежності від часу крутного моменту у відносних одиницях у перерізі між генератором та циліндром низького тиску турбіни, що знімається з виходу <TeIC> блока Mass123, при несинхронному включенні генератора з холостого ходу за умови, що початковий кут між ЕРС генератора та напругою мережі дорівнює  $120^\circ$ . Це є найгіршими умовами несинхронного ввімкнення за кутом при всіх інших ідеальних параметрах увімкнення.

На рис. 5 наведені результати аналогічних розрахунків залежності від часу крутних моментів у тому ж перерізі валопроводу при трифазному короткому замиканні безпосередньо за трансформатором та подальшому АПВ генератора при його номінальному навантаженні з  $\cos\phi_n = 0,85$ .

З рис. 4 та 5 можна визначити, що за наявності АДП значно швидше заспокоюється низькочастотна складова моментів під час розглянутих перехідних електромеханічних процесів.

**Висновки.** На основі проведених розрахункових експериментів показано, що застосування АДП при несинхронному ввімкненні турбогенератора у систему нескінченної потужності та при трифазовому короткому замиканні безпосередньо за трансформатором та подальшому АПВ генератора при його номінальному навантаженні значно знижує низькочастотну складову коливань крутного моменту в найбільш навантаженому перерізі валопроводу між турбіною та генератором. Таким чином, АДП забезпечує більшу довговічність роботи його валопроводу, підвищуючи надійність роботи турбоагрегату в цілому.

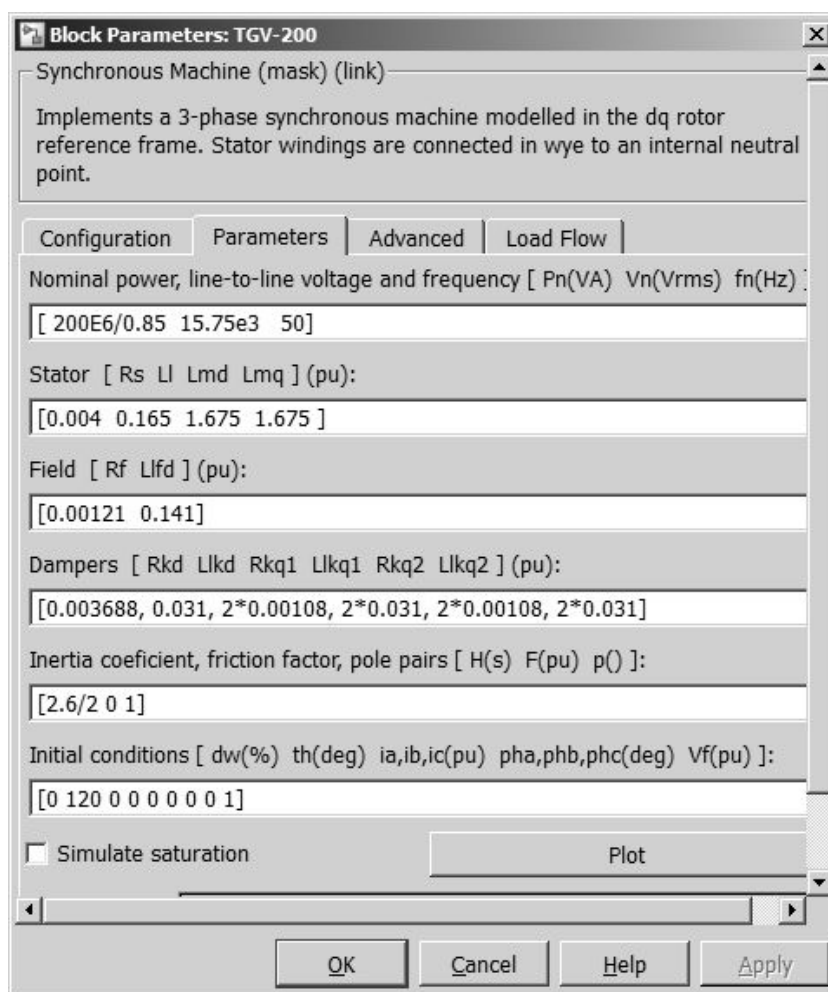


Рис. 3

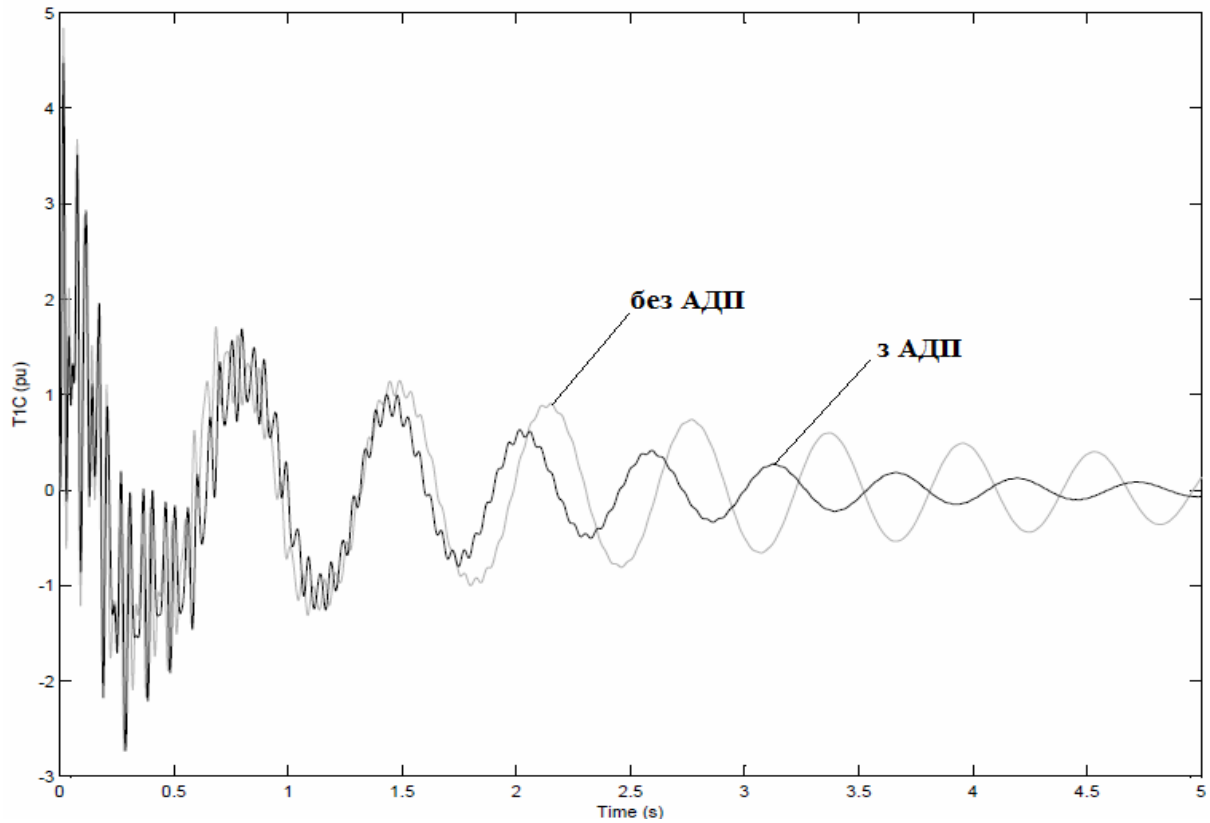


Рис. 4

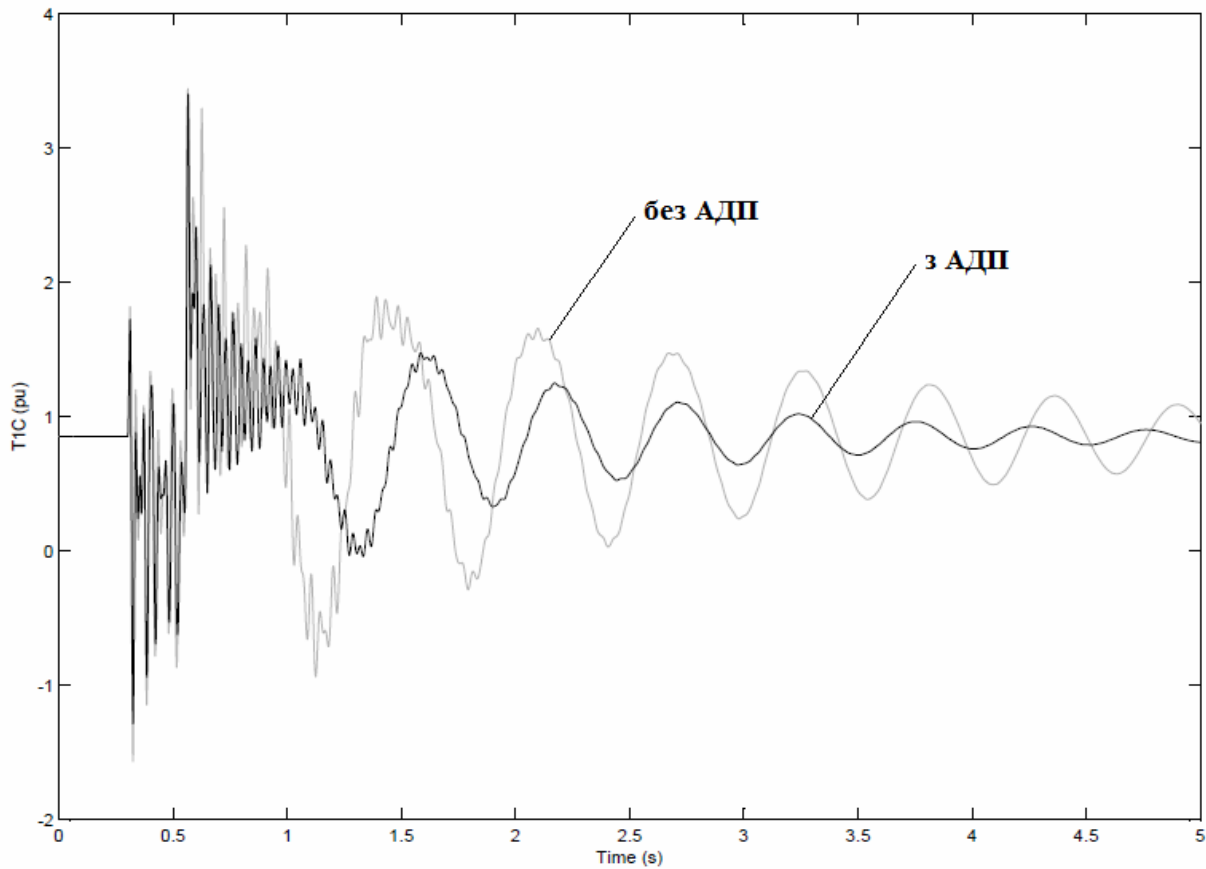


Рис. 5

1. Бовсуновский А.П., Кувєда Ю.В. Учёт качаний валопровода турбоагрегата при оценке усталостной поврежденности его элементов в процессе успешного несинхронного включения // Пр. Ін-ту електродинаміки НАН України: Зб наук. пр – К.: ІЕД НАНУ, 2015. – Вип. 42. – С. 56–59.

2. Бовсуновський А.П., Куєвда В.П., Куєвда Ю.В., Штефан С.В. Втомне пошкодження валопроводу парової турбіни при несинхронному підключенні до мережі турбогенератора // Вібрації в техніці та технологіях. – 2013. – № 4(72). – С. 48–55.
3. Кадхем Б.Т. Исследование крутильных колебаний валопроводов турбоагрегатов в энергосистемах с устройствами продольной емкостной компенсации и разработка способов их подавления / Дис. ... канд. техн. наук: 05.14.02; Санкт-Петербургский политехнический университет. – 2009. – 136 с.
4. Копылов И.П., Клоков Б.К., Морозкин В.П., Токарев Б.Ф. Проектирование электрических машин: Учебник для вузов. – М.: Изд-во Юрайт, 2011. – 767 с.
5. Куєвда В.П., Балюта С.Н., Куєвда Н.В. Электромашинный агрегат / 1678187 Авт. свид. СССР А1 Н 02 К 55/100, 17/00 // ДСП. – 1991.
6. Титко А.И., Васьковский Ю.Н., Ахременко В.Л. Условия возникновения и роста трещин в роторе турбогенератора вследствие электродинамических воздействий в аномальных режимах // Техн. електродинаміка. – 2012. – № 4. – С. 46–51.
7. Титко А.И., Федоренко Г.М., Грубой А.П., Чередник В.И. Электродинамические усилия в лобовых частях обмоток ротора и статора турбогенератора при переходных процессах в режимах самосинхронизации // Техн. електродинаміка. – 2009. – № 3. – С. 26–29.
8. Толстов М.В., Усков А.А. Синтез нечеткого системного стабилизатора синхронного генератора в пакете MATLAB // Программные продукты и системы. – 2007. – №3. – С. 81–83.
9. Черных И.В. Моделирование электротехнических устройств в MATLAB, SimPowerSystems и Simulink. – М.: ДМК Пресс, СПб: Питер, 2008. – 288 с.
10. Шхати Х.В. Развитие методов математического моделирования переходных процессов современных генераторов для повышения эксплуатационных показателей их работы / Дис. ... докт. техн. наук: 05.14.02; Санкт-Петербургский политехнический университет. – 2008. – 393 с.
11. Bovsunovskii A.P., Chernousenko O.Yu., Shtefan E.V., Bashta D.A. Fatigue damage and failure of steam turbine rotors by torsional vibrations // Strength of Materials. – 2010. – 42 (1). – P. 108–113.
12. Bovsunovskii A.P. Torsional vibration in steam turbine shafting in turbogenerator abnormal modes of operation // Strength of Materials. – 2012. – 44 (2). – P. 177–186.

УДК 621.928.83

**Ю.В. Куєвда, В.П. Куєвда**, канд. техн. наук, **С.Н. Балюта**, докт. техн. наук

Национальный университет пищевых технологий,  
ул. Владимирская, 68, Киев, 01601, Украина

#### **Уменьшение крутильных колебаний валопроводов мощных турбогенераторов с помощью асинхронного демпфирующего устройства**

*Рассмотрено действие асинхронного демпфирующего устройства (АДУ) для улучшения качества переходных электромеханических процессов в мощных турбогенераторах. Рассчитаны параметры АДУ, создана его модель в Matlab Simulink и смоделирован переходный процесс при несинхронном включении турбогенератора на холостом ходу в систему бесконечной мощности, а также при трехфазном коротком замыкании за трансформатором и дальнейшем автоматическом повторном включении (АПВ) турбогенератора при его номинальной нагрузке. Показано, что АДУ, демпфируя качания ротора, существенно улучшает динамические свойства рассчитанных переходных процессов, значительно снижая время качаний ротора и количество критических значений механических крутящих моментов в особенно напряженном сечении валопровода между ротором генератора и цилиндром низкого давления турбины. Библи. 12, рис. 5.*

**Ключевые слова:** асинхронная машина, турбогенератор, демпфирование качаний ротора, несинхронное включение, короткое замыкание, автоматическое повторное включение.

**Yu. Kuievda, V. Kuevda, S. Baluta**

National University of Food Technologies,  
Volodymyrska St., 68, Kyiv, 01601, Ukraine

#### **DECREASING SHAFT SWINGS OF POWERFUL TURBOGENERATORS BY MEANS OF AN ASYNCHRONOUS DAMPING DEVICE**

*In the article an asynchronous damping device (ADD) is proposed to improve the quality of transient electromechanical processes in powerful turbogenerators. The parameters of ADD were calculated, its model in Matlab Simulink was created. The transition processes was simulated as out-of-phase closing of a no-load turbogenerator into the infinite power system and transient three-phase fault with automatic re-closing of a fully loaded turbogenerator. The article shows that ADD, damping rotor swings, significantly improves quality of transient processes, reducing the time of shaft swings and the number of critical values of mechanical torque in certain sections of the shafting. References 12, figures 5.*

**Key words:** asynchronous machine, turbogenerator, damping rotor swings, out-of-phase closing, short circuit, automatic re-closing.

Надійшла 10.11.2015

Received 10.11.2015

Остаточний варіант 14.11.2016

Accepted 14.11.2016