

ЕНЕРГЕТИЧНІ СИСТЕМИ ТА КОМПЛЕКСИ

УДК 621.311:004

СТІЙКІСТЬ ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИЧНИХ СИСТЕМ ЯК ЗАДАЧА НЕЛІНІЙНОЇ МЕХАНІКИ

В.М. Авраменко, докт. техн. наук
Інститут електродинаміки НАН України,
пр. Перемоги, 56, Київ-57, 03680, Україна
e-mail: avr@ied.org.ua

Показано, що аналітичні методи нелінійної механіки, розвинені в колишньому Радянському Союзі у 30-х роках минулого століття, адекватні задачі стійкості великих електроенергетичних об'єднань як суттєво нелінійних динамічних систем. Нелінійність основного рівняння динаміки електроенергетичних систем – рівняння механічного руху інерційних мас ротора агрегату турбіна-генератор у поєднанні з автоматичними регуляторами потужності турбіни і збудження синхронного генератора призводить до утворення нелінійної неавтономної динамічної системи. Н.М. Крилов та Н.Н. Боголюбов розвинули теорію усереднення, яка дає змогу із заданою похибкою знаходити аналітичне рішення для нелінійної системи. Фактично цей же метод використовують для чисельного інтегрування рівнянь руху синхронних генераторів для аналізу стійкості електроенергетичних систем (ЕЕС), але він вимагає ефективної організації сумісного розв'язання системи диференціальних і алгебраїчних рівнянь, з яких складається модель динаміки ЕЕС. Імітаційне моделювання, виконане для реального режиму ОЕС України, який був додатково обважнений, показало, що за певних умов (наприклад, ремонтний режим), відповідно до передбачень теорії нелінійних систем, мале збурення може спричинити автоколивальний процес у автоматично регульованій динамічній системі. Бібл. 7, рис. 8.

Ключові слова: стійкість, електроенергетична система, нелінійна механіка, імітаційне моделювання.

Забезпечення стійкості великих електроенергетичних об'єднань (ЕЕО) є найважливішою задачею керування їх режимами. Складність задачі обумовлена тим, що об'єкти ЕЕО облаштовані пристроями автоматичного регулювання параметрів стану об'єкта, а відтак вони є неавтономною динамічною системою. Стійкість електроенергетичної системи як істотно нелінійної динамічної системи слід розглядати на теоретичному фундаменті загальної теорії стійкості А.М. Ляпунова.

Великий внесок у створення аналітичних методів дослідження нелінійних систем як розвитку теорії Ляпунова внесли школи Л.І. Мандельштама, А.А. Андронова, Н.М. Крилова, Н.Н. Боголюбова. Коливальний характер фізичних процесів властивий багатьом технічним системам і визначає їх стійкість. У класичній монографії 1937 г. [2] викладені основні ідеї загальної теорії коливальних нелінійних систем для випадку системи з одним ступенем свободи, яка описується одним або двома диференціальними рівняннями першого порядку. Автори [2] звертають увагу, що для лінійної системи, проста ідеалізація якої враховує втрати енергії в системі, відоме з теорії лінійних систем рішення, в якому процеси мають експоненціальне загасання, означає, що вони не є періодичними, хоча можуть мати коливальний характер. Така поведінка лінійної системи полегшує розуміння нелінійної системи з деякою мірою «нелінійності». Цим визначається значення і роль аналітичних методів як доповнення методів чисельного інтегрування рівнянь динаміки системи, за допомогою яких виконуються розрахунки динамічної стійкості електроенергетичних систем (ЕЕС), тобто стійкості при великих збуреннях.

Стійкість електромеханічної системи з позицій нелінійної механіки. Стійкість ЕЕС визначається взаємним електромеханічним рухом роторів синхронних генераторів електростанцій, зв'язаних в єдину систему електричною мережею.

Особливість моделі динаміки ЕЕС полягає в тому, що з точністю, достатньою для розв'язання задачі стійкості паралельної (спільної) роботи синхронних машин, можна нехтувати швидкозагасаючими електромагнітними процесами в електричній мережі. Внаслідок цього електричний зв'язок синхронних генераторів між собою на малому інтервалі процесу описується системою рівнянь в комплексній формі квазістаціонарного електричного режиму у колах змінного струму і модель динаміки набуває виродженого вигляду:

$$\frac{dX_1}{dt} = F_1(X_1, X_2, t); \quad F_2(X_1, X_2) = 0,$$

де X_1 – вектор інтегрованих змінних; X_2 – вектор неінтегрованих змінних. Відповідно вектор-функція F_1 характеризує підсистему змінних, які визначаються чисельним інтегруванням диференціальних рівнянь, а F_2 – це сукупність алгебраїчних рівнянь квазістаціонарного електричного режиму ЕЕС у кожний момент часу t . Відзначимо, що лінеаризація сукупної системи диференціальних і алгебраїчних рівнянь для аналізу статичної стійкості ЕЕС в разі моделювання потужності навантаження у вузлах регульованої ЕЕС статичними характеристиками призводить до диференціальних рівнянь зі змінними коефіцієнтами, що треба враховувати в аналізі результатів, одержаних з використанням лінеаризованих рівнянь.

Стійкість до малих збурень (статична стійкість) досліджується з використанням лінеаризованих рівнянь динаміки. Серед публікацій вітчизняних дослідників у цій галузі можна назвати роботи [3, 5]. Разом з тим розуміння стійкості сучасних ЕЕС як характеристики коливань суттєво нелінійної динамічної системи, яка зазнає різноманітних збурень, спонукало до створення методів і практичних програмних засобів, які втілюють таке розуміння. Приклад такого підходу – дослідження електромеханічних коливань в ОЕС України міжнародною групою науковців [6, 7]. Тут поєднуються результати аналітичного дослідження лінеаризованої системи з чисельним розрахунком перехідного процесу після конкретного збурення на основі повної моделі динаміки великого енергетичного об'єднання.

Розгляд стійкості електроенергетичних систем з позицій нелінійної механіки дає змогу інтерпретувати чисельні розрахунки складного електромеханічного руху системи і створювати нові засоби аналізу стійкості. Аналітичні підходи, які мають результатом функціональну залежність параметрів стану ЕЕС від часу, створюють загальну картину динаміки системи, але вимагають використання лінеаризованих рівнянь. Чисельні методи дають можливість отримати конкретні коливання параметрів стану і з їх використанням налаштовувати засоби протиаварійного керування, які забезпечують стійкість ЕЕС. Однак виникає проблема точності чисельного аналізу: використовувані засоби аналізу не повинні допускати накопичення обчислювальної похибки на тривалому інтервалі розрахунку. Вирішувати цю проблему допомагають ідеї нелінійної механіки.

Регулювання потужності (а відтак і моменту) турбін агрегатів електростанцій дає змогу підтримувати з високою точністю частоту обертання ротора (а відтак частоту електрорушійних сил – ЕРС). Це створило умови для застосування з метою аналізу стаціонарних станів електричних кіл змінного струму символічного методу, який ґрунтується на перетворенні синусоїдно змінюваних в часі величин (струмів, напруги, ЕРС) в алгебраїчні рівняння в комплексній формі. У класичній монографії Н.М. Крилова і Н.Н. Боголюбова «Введение в нелинейную механику» [4] показано, що ці рівняння Кірхгофа як рівняння балансу струмів у вузлах та ЕРС і напруг у контурах придатні не тільки для стаціонарного режиму системи синхронних машин, коли їхня частота обертання незмінна (постійна), але й у разі незначних відхилень її від номінальної (заданої) в процесі коливань, тобто коли ця коливальна система близька до лінійної.

Основна ідея цих вчених полягає в тому, що для початкової аналітичної форми рішення приймається без точного математичного доведення та форма (функція) руху, яка виникає безпосередньо з аналізу об'єкта в умовах малих збурень, які дають підстави для лінеаризації рівнянь динаміки. Автори дуже наочно показують це на прикладі добре відомого механічного об'єкта – математичного (ідеального) маятника, коливання якого відбуваються під

дією сили тяжіння. Відомо, що коли кутове відхилення маятника мале, його коливання мають гармонічний характер, але коли кут збільшується, зростає відхилення функції коливання від синусоїди. Крилов і Боголюбов запропонували враховувати цю обставину через введення в рівняння малого параметру ϵ таким способом, щоб диференціальне рівняння, яке треба інтегрувати, перетворилося на лінійне. Такий спосіб автори назвали еквівалентною лінеаризацією. Апроксимаційні методи нелінійної механіки стають у нагоді в інтерпретації результатів чисельного розрахунку складного електромеханічного руху нелінійної динамічної системи.

Розвинена Криловим і Боголюбовим теорія усереднення показала, яким чином треба будувати розв'язання нелінійного рівняння руху, щоб одержати в результаті аналітичну функцію, яка із заданою похибкою відрізняється від точного розв'язку. Фактично таким способом здійснюється чисельне інтегрування рівнянь руху синхронних генераторів для аналізу стійкості переходу після великих збурень. У цих розрахунках на малому інтервалі часу для генераторів фіксуються вектори ЕРС у комплексній площині, а електрична потужність визначається з використанням рівнянь Кірхгофа, фіксуючи на інтервалі розрахунку частоту обертання кожної машини. Ця частота на мале ϵ відрізняється від єдиної для усієї мережі частоти напруги, іншими словами, виконується розрахунок квазістаціонарного гармонічного стану мережі, тоді як у рівнянні механічного руху сума моментів не дорівнює нулю, і це є джерелом руху електромеханічної системи, якою є ЕЕС.

Реальні системи завжди не консервативні, тому що в них відбуваються втрата енергії і перетворення електроенергії в потрібну споживачеві форму, а агрегати електростанцій великих ЕЕС облаштовані регуляторами, які змінюють потужність турбін і збудження синхронних генераторів залежно від зміни стану ЕЕС. Внаслідок дій цих регуляторів відбувається обмін енергією двох систем – механічної, носієм якої є обертальні маси ротора, і електромагнітної, яка накопичується в електричних колах статора машини. Цей обмін відображає реактивна потужність генератора, яка залежить від коливань напруги, на які реагує АРЗ. Неконсервативний характер динамічної системи, якою є ЕЕС, вимагає ретельно аналізувати результати розрахунку перехідного процесу. Інтерпретувати ці результати допомагають ідеї нелінійної механіки.

Швидкодіючі АРЗ, які діють на відхилення і похідні змінних стану ЕЕС (напруги, частоти), загострюють цю проблему, тому що спричиняють утворення жорсткої системи диференціальних рівнянь, а це вимагає використання неявних методів чисельного інтегрування.

Призначення автоматичних регуляторів збудження (АРЗ), окрім регулювання напруги, підвищувати рівень стійкості ЕЕС, але в разі невдалої конструкції або недосконалого налаштування сучасних швидкодіючих АРЗ з великими значеннями коефіцієнтів регулювання в складних схемно-режимних умовах ЕЕС може утворитися резонанс дії АРЗ і частоти вільних коливань системи, що спричиняє наростання амплітуди коливань і порушення стійкості ЕЕС.

Як показує теорія нелінійних коливань, нелінійні елементи динамічної системи можуть спричинити виникнення автоколивальних процесів, небезпечних для системи. Такі ситуації не може визначити аналітичний апарат, який традиційно використовується для аналізу стійкості системи до малих збурень і базується на лінеаризованих рівняннях динаміки. Розрахунковим дослідженням (імітаційним моделюванням) покажемо, що нелінійність динаміки сучасних електроенергетичних об'єднань необхідно враховувати в задачах визначення стійкості ЕЕС до малих збурень (статичної стійкості), а ефективним засобом дослідження коливної статичної стійкості є програмний комплекс АВР-74, розроблений в Інституті електродинаміки НАН України [1].

Дослідження збуреного руху електроенергетичної системи. Досліджувався реальний режим ОЕС України, одержаний оцінюванням стану ЕЕС 2.03.2012 р. 19:30, який був додатково обважнений. Предмет дослідження – статична стійкість у перетині ОЕС України Захід-Вінниця. Перетоки потужності по лініях перетину в базовому режимі показані на рис. 1.

Обважнення базового режиму виконано шляхом завантаження генераторів Хмельницької і Рівненської АЕС на 630 МВт з одночасним розвантаженням Трипільської

Назва...	Состав	Перето...	Перето...	Ток ли...
6460-727 МОЗЫРЬ	-ЧАЭС330.	93.3	-50.0	172.4
ОЭС_Ки...		-1704.7	494.1	
808-703 ХАЭС...	-ЧАЭС750.	-582.2	273.2	534.7
945-827 ЗЧ 750	-ВН750...	-106.7	450.9	374.2
809-803 ХАЭС330.	-ШЕПЕТОВ.	-476.6	18.1	797.8
905-821 ИВ ФРАНК	-ЧЕРНОВЦЫ	-148.4	11.6	266.0
810-818 ХМЕЛЬНИЦ	-БАР.....	23.5	52.6	46.6
ЗАП_ВИН		-1290.4	806.4	

Рис. 1

Назва...	Состав	Перето...	Перето...	Ток ли...
6460-727 МОЗЫРЬ	-ЧАЭС330.	87.4	-46.8	166.9
ОЭС_Ки...		-2256.0	165.1	
808-703 ХАЭС...	-ЧАЭС750.	-1061.7	130.1	900.5
945-827 ЗЧ 750	-ВН750...	-429.8	428.2	498.4
809-803 ХАЭС330.	-ШЕПЕТОВ.	-121.9	-2.7	206.1
905-821 ИВ ФРАНК	-ЧЕРНОВЦЫ	-203.8	34.7	365.7
810-818 ХМЕЛЬНИЦ	-БАР.....	-96.6	64.0	174.4
ЗАП_ВИН		-1913.8	654.3	

Рис. 2

NPB	TB	UFM...	UFM...	IFM...	CB	TR	UR...	UR...	NRF	B	B1	KF	KF1	KIF1	KIF	KI
11	0.16...	2.00...	-2.00...	9.00...	0	0.15...	2.00...	-2.00...	1	-25.0...	-2.80...	4.50...	1.90...	-1.25...	0.00...	0.00...

Рис. 3

збуреного руху (напруга на зажимах, напруга збудження, активна потужність генератора енергоблока № 2 ХАЕС, активна і реактивна потужності і струм ПЛ-750 кВ ХАЕС-ЧАЕС)

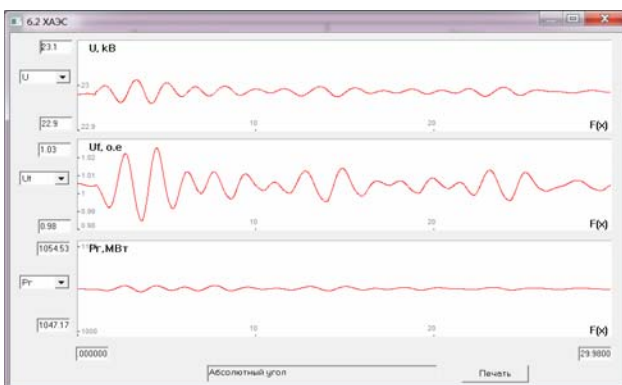


Рис. 4

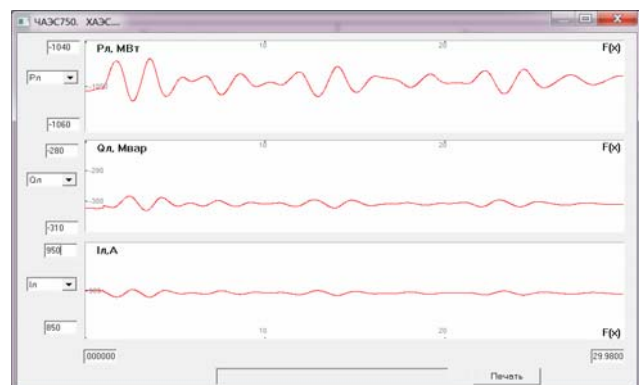


Рис. 5

ТЕС. Як додаткове обважнення виводилась у ремонт ПЛ 330 кВ Шепетівка-Житомир. На рис. 2 показані перетоки потужності в обважненому режимі.

Для визначення стійкості ОЕС до малих збурень виконано розрахунки електромеханічних перехідних процесів після малого скінченного збурення з урахуванням індивідуального руху синхронних генераторів з використанням програмного комплексу АВР-74. Досліджувана модель має 714 вузлів і 69 генераторів. Перехідний процес розраховувався при вимиканні навантаження потужністю 20 МВт (5 %) на ПС «Нивки». Для генераторів 1000 МВт ХАЕС і РАЕС враховувалася дія автоматичних регуляторів сильної дії (АРЗ-СД), якими вони реально обладнані. Розрахунки виконані для певного (стандартного) налаштування АРЗ, параметри якого показані на рис. 3.

На рис. 4, 5 наведено графіки електричних параметрів

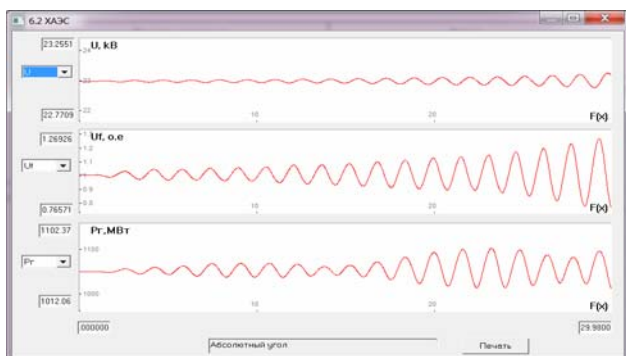


Рис. 6

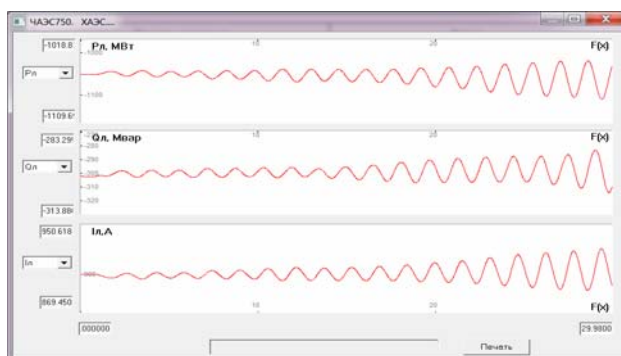


Рис. 7

для стандартного налаштування АРЗ. Загасання коливань свідчить про статичну стійкість досліджуваного режиму.

Виконано також розрахунки за умови збільшення коефіцієнта регулювання збудження за відхиленням напруги до -40 , при тому, що його максимальне значення дорівнює -50 . Графіки розрахованого перехідного процесу показують наростання амплітуди коливань і виникнення автоколивального процесу зі значною амплітудою коливань, як наслідок дії АРЗ в умовах незмінної потужності турбін агрегатів енергоблоків (рис. 6-8).

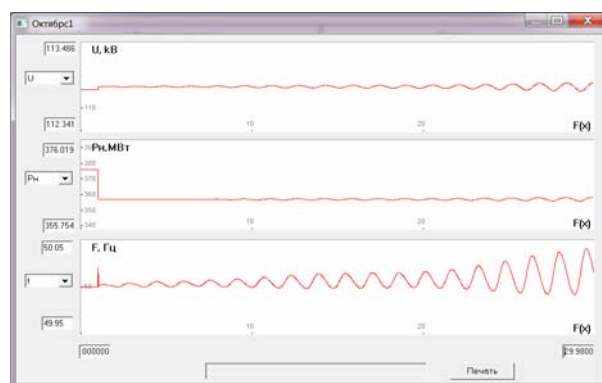


Рис. 8

Висновки. 1. Розрахунками реальних збурених рухів (електромеханічних коливань) в ОЕС України показано, що реалізовані в програмному комплексі аналізу стійкості ЕЕС АВР-74 методи розрахунку, в яких використовується аналітичне інтегрування нелінійних рівнянь механічного руху при фіксованих (усереднених на інтервалі) значеннях вхідних змінних, фактично реалізують принцип усереднення Крилова і Боголюбова, що забезпечує ефективність алгоритму чисельного інтегрування жорсткої системи рівнянь динаміки ЕЕС, реалізованого у програмних засобах, розроблених в Інституті електродинаміки, і коректний розрахунок тривалих процесів після малого збурення.

2. За певних умов (наприклад, ремонтний режим) як наслідок реакції неавтономної нелінійної динамічної системи на малі збурення в електроенергетичному об'єднанні можуть виникати автоколивальні процеси з великою амплітудою коливань, які створюють загрозу порушення стійкості ОЕС.

1. Авраменко В.Н. Модели, методы и программные средства для расчета и анализа переходных режимов и устойчивости ЭЭС. *Праці Інституту електродинаміки НАН України*. Київ, 2007. Вип. 18. С. 12–26.
2. Андронов А.А., Витт А.А., Хайкин С.Э. Теория колебаний. Москва. Наука. 1981. 568 с.
3. Кириленко О.В., Буткевич О.Ф., Рибіна О.Б. Низькочастотні коливання режимних параметрів об'єднаних енергосистем та запобігання системним аваріям. *Праці Інституту електродинаміки НАН України*. Київ. 2014. Вип. 38. С. 30–39.
4. Крылов Н.М., Боголюбов Н.Н. Введение в нелинейную механику. Изд. АН УССР. Киев. 1937. 403 с.
5. Яндутьський О.С., Марченко А.А., Мацейко В.В. Дослідження властивостей низькочастотних коливань на основі синхронізованих векторних вимірів. *Технічна електродинаміка*. 2014. № 5. С. 74–76.
6. Kundur P., Paserba J., Ajarapu V. Definition and Classification of Power System Stability. *IEEE Transactions on power systems*. 2004. Vol.19. № 2. P. 1387–1401.
7. Pavlovskiy V., Lukianenko L., Lenga O., Lambillon V., Rese L. Analysis of electromechanical oscillation in the IPS of Ukraine using eurostag and digsilent powerfactory software tools. *Технічна електродинаміка*. 2015. № 5. С. 42–51.

УДК 621.311.004

В. Н. Авраменко, докт. техн. наук
 Інститут електродинаміки НАН України,
 пр. Перемоги, 56, Київ-57, 03057, Україна

Устойчивость электроэнергетических систем как задача нелинейной механики

Показано, что аналитические методы нелинейной механики, развитые в бывшем Советском Союзе в 30-х годах прошлого века, адекватны задаче устойчивости больших электроэнергетических объединений как существенно нелинейных динамических систем. Нелинейность основного уравнения динамики электроэнергетических систем – уравнения механического движения инерционных масс ротора агрегата турбина-генератор в сочетании с автоматическими регуляторами мощности турбины и возбуждения синхронного генератора приводит к образованию нелинейной неавтономной динамической системы. Н.М. Крылов и Н.Н. Боголюбов развили теорию усреднения, которая позволяет с заданной погрешностью находить аналитическое решение для нелинейной системы. Фактически этот же метод используют для численного интегрирования уравнений движения синхронных генераторов для анализа устойчивости ЭЭС, но он требует эффективной организации совместного решения системы дифференциальных и алгебраических уравнений, из которых состоит модель динамики ЭЭС. Имитационное моделирование, выполненное для реального режима ОЭС Украины, который был дополнительно утяжелен, показало, что при определенных условиях (например, ремонтный режим), в соответствии с предсказаниями теории нелинейных систем, малое возмущение может вызвать автоколебательный процесс в автоматически регулируемой динамической системе. Библиография 7, рис. 8.

Ключевые слова: устойчивость, электроэнергетическая система, нелинейная механика, имитационное моделирование.

V. M. Avramenko

Institute of Electrodynamics of the National Academy of Sciences of Ukraine,
Peremohy, 56, Kyiv-57, 03680, Ukraine

Stability of electric power systems as the task of nonlinear mechanics

It is showed that the analytical methods of nonlinear mechanics, developed in Soviet Union in 30th of the last century, are adequate the task of stability of large electric power pools as substantially nonlinear dynamic systems. Equation of mechanical motion of the rotor inertia masses of turbine and generator is basic equation of dynamics of the electric power system. Its non-linearity in combination with the automatic regulators of power of turbine and excitation of synchronous generator results in formation of the nonlinear nonautonomous dynamic system. N.M. Krylov, N.N. Bogolyubov developed the theory of doing middle, which allows with the set error to find an analytical decision for the nonlinear system. Actually the same method is used for numeral integration of motion equations of synchronous generators for the analysis of EPS stability, but it requires effective organization of joint decision of the system of differential and algebraic equations which form the model of EPS dynamics. Simulation, executed for the real mode of UPS of Ukraine, which was additionally made heavier, showed that at certain terms (for example, repair mode), in accordance with predictions of the nonlinear systems theory, small disturbances can cause an autooscillations in the automatically controlled dynamic system. References 7, figures 8.

Key words: stability, electric power system, nonlinear mechanics, simulation method.

Надійшла 26.12.2017

Received 26.12.2017

УДК 621.315.1

ДОСЛІДЖЕННЯ РЕЗОНАНСНИХ ПЕРЕНАПРУГ У МАГІСТРАЛЬНИХ ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖАХ 750 кВ З НЕСИНУСОЇДАЛЬНИМ ДЖЕРЕЛОМ СПОТВОРЕННЯ ЗА ДОПОМОГОЮ ШТУЧНОЇ НЕЙРОННОЇ МЕРЕЖІ**В.В. Кучанський**, канд. техн. наук

Інститут електродинаміки НАН України,
пр. Перемоги, 56, Київ, 03057, Україна,
e-mail: skilldur@ukr.net

Розглянуто резонансні перенапруги, що виникають внаслідок підключення автотрансформатора до електричної мережі. Проведено дослідження, присвячені актуальній науковій та практичній задачі – розробка моделей для аналізу резонансних перенапруг при їх виникненні, розвитку та існуванні. Розроблено штучну нейронну мережу контролю перенапруг та функціональні моделі для її налагодження. Досліджено застосування розробленої мережі для виявлення факторів, які мають найбільший вплив на появу та кратність перенапруг в електричній мережі.