

## ЕНЕРГЕТИЧНІ СИСТЕМИ ТА КОМПЛЕКСИ

УДК 621.311:004

### ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКАЯ СИСТЕМА КАК ОБЪЕКТ НЕЛИНЕЙНОЙ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКИ

**В.Н. Авраменко**, докт. техн. наук  
Институт электродинамики НАН Украины,  
пр. Победы, 56, Киев-57, 03057, Украина  
e-mail: [avr@ied.org.ua](mailto:avr@ied.org.ua)

*На примере ответственного сечения ОЭС Украины показано, что современные электроэнергетические объединения, оснащенные автоматическими регуляторами режимных параметров, являются существенно нелинейным динамическим объектом. Метод исследования – имитационное моделирование возмущенных процессов в ЭЭС. В качестве малого возмущения принято отключение 5 % нагрузки мощной подстанции киевского энергоузла, для генератора блока № 2 Хмельницкой АЭС учитывался реально установленный на станции автоматический регулятор возбуждения сильного действия, нагрузка учитывалась статическими характеристиками по напряжению и частоте. Для достижения цели выполнено сравнение аналитических и численных методов анализа устойчивости нелинейных систем. Расчетами на тестовой схеме, в основе которой сечение Запад-Винница ОЭС Украины, показано, что для проверки ее устойчивости «в малом» может быть недостаточно анализа линеаризованной модели ЭЭС. В ремонтных режимах ОЭС Украины могут возникать ситуации, когда действие АРВ генераторов приводит к длительным колебаниям параметров режима и опасности нарушения устойчивости ОЭС. Таким образом, показано, что электроэнергетическая система является существенно нелинейной динамической системой и анализ устойчивости современных ЭЭС нужно выполнять с учетом их нелинейности. Разработанные и программно реализованные в ИЭД НАН Украины алгоритмы численного решения задачи динамики ЭЭС эффективно учитывают ее нелинейность и позволяют анализировать устойчивость не только по отношению к большим, но и малым конечным возмущениям. Библ. 6, рис. 6.*

**Ключевые слова:** электроэнергетическая система, нелинейная система, аналитический метод, численный метод, статическая устойчивость, конечное возмущение.

**Одним из основных направлений деятельности** созданного в 1947 году Института электродинамики НАН Украины (тогда Институт электротехники АН УССР) являются исследования, связанные с моделированием режимов электроэнергетических объектов и систем управления ими.

Назначение электроэнергетической системы и задача системного оператора, который управляет ею, – надежная и устойчивая передача электроэнергии от ее производителя к потребителям.

В современных ЭЭС производство электроэнергии осуществляется на электростанциях большой мощности путем преобразования механической энергии в электрическую в агрегатах турбина–синхронный генератор.

Механическое движение (вращение ротора агрегата) происходит под действием двух противоположно направленных моментов – механического (турбины) и электромагнитного. Электромагнитный момент является результатом взаимодействия магнитно-связанных электрических контуров ротора и статора. Это взаимодействие реализуется в форме дифференциальных уравнений, записанных на основе закона электромагнитной индукции Фарадея.

В современных ЭЭС передача электроэнергии от электростанций потребителям осуществляется переменным током по электрической сети, которая соединяет обмотки статоров синхронных генераторов. При одинаковой частоте вращения роторов генераторов энергосистемы в электрической цепи, которую образуют обмотки статоров генераторов и соединяю-

щая их электрическая сеть, устанавливается стационарный гармонический процесс изменения токов и напряжений, который может быть описан комплексными алгебраическими уравнениями.

**Методы исследования нелинейных динамических систем.** Электроэнергетическая система в процессе функционирования испытывает разнообразные возмущения и должна быть устойчива по отношению к ним. Устойчивость динамических систем анализируется на основе уравнений динамики. Динамику ЭЭС определяет электромеханическое движение роторов агрегатов электростанций. Реакция электрической подсистемы ЭЭС на изменение состояния механической подсистемы (углов ротора и скорости его вращения) в форме электромагнитного момента, уравнивающего электромеханическую систему и обеспечивающего ее устойчивость, существенно нелинейна.

Дополнительным фактором влияния на способ исследования устойчивости ЭЭС является то, что оно должно выполняться с обязательным учетом противоаварийной автоматики, действие которой может существенно изменить топологию и динамические свойства объекта. Это можно обеспечить с необходимой для практики конкретностью только имитационным моделированием динамики как совокупностью компьютерных расчетов с помощью программных средств, в которых реализованы математические модели динамики элементов ЭЭС, включая средства автоматического регулирования параметров режима и противоаварийного управления, что выдвигает повышенные требования к эффективности применяемых методов численного решения задачи.

Однако использование имитационного моделирования для анализа устойчивости «в малом» дает конкретную реализацию аварийного процесса во всей его полноте при заданном первичном возмущении, но затрудняет выделение основного содержания процесса, который определяет устойчивость системы. Эту задачу решают аналитические методы исследования устойчивости. К началу 30-х годов развитие радиотехники инициировало разработку аналитических методов решения задач нелинейной механики. Благодаря работам академиков Н.М. Крылова, Н.Н. Боголюбова, Л.И. Мандельштама, А.А. Андропова, бывший Советский Союз занимал лидирующее положение в мировой науке в этой области.

Следует отметить, что в классической монографии Н.М. Крылова и Н.Н. Боголюбова «Введение в нелинейную механику», изданной в 1937 году в АН УССР [5], наряду с ламповыми генераторами – нелинейными объектами в радиотехнике рассматривалась устойчивость синхронного генератора, работающего на шины бесконечной мощности. К тому времени развитие электроэнергетических систем привело к возникновению проблемы их устойчивости и инициировало создание способов ее решения. Среди тех, кто занимался этой проблемой, следует назвать проф. С.А. Лебедева и доцента Харьковского электротехнического института Л.В. Цукерника.

Наиболее эффективным является совместное использование аналитических и численных методов исследования динамических систем. Применительно к электрическим цепям с нелинейными элементами такой подход применяет член-корр. НАН Украины Н.А. Шидловская [6]. Исследования электромагнитного поля в электрических машинах также приводят к нелинейным дифференциальным уравнениям (ДУ), для решения которых применяют комбинированные численно-аналитические методы. Например, в работе [4] такой метод использован для специфической конструкции синхронного двигателя.

**Анализ устойчивости больших электроэнергетических систем.** Задача динамической устойчивости современных сложных ЭЭС, т.е. устойчивости при больших возмущениях (короткое замыкание, отключение линий и генераторов ЭЭС и т.п.) решается путем численного интегрирования уравнений динамики синхронных машин и автоматических регуляторов агрегатов электростанций при описании процессов в электрической сети комплексными алгебраическими уравнениями (АУ) квазистационарного режима. Совокупная система уравнений динамики ЭЭС относится к классу жестких систем дифференциальных уравнений (ДУ), для численного решения которых эффективны неявные методы. В программных комплексах расчета устойчивости, разработанных в ИЭД НАН Украины, используются методы



Назва...	Состав	Перето...	Перето...	Ток ли...
	808-703 ХАЭС... -ЧАЭС750.	-928.1	257.7	767.6
	809-803 ХАЭС330. -ШЕПЕТОВ.	-411.4	72.0	706.4
	945-827 ЗУ 750 -ВН-750..	-838.3	463.9	806.5
	810-818 ХМЕЛЬНИЦ -БАР....	-250.4	47.9	433.1
	905-821 ИВ.ФРАНК -ЧЕРНОВЦЫ	-357.1	84.0	646.9
Зап-Вин	803-712 ШЕПЕТОВ. -ЖИТОМИР.	-2785.3	925.5	
	703-727 ЧАЭС750. -ЧАЭС330.	-325.9	76.5	565.1
	703-727 ЧАЭС750. -ЧАЭС330.	-378.3	-36.3	306.7
	703-727 ЧАЭС750. -ЧАЭС330.	-364.7	-35.6	295.7

Рис. 2

Назва...	Состав	Перето...	Перето...	Ток ли...
	808-703 ХАЭС... -ЧАЭС750.	-1262.8	103.5	1070.1
	809-803 ХАЭС330. -ШЕПЕТОВ.	-81.1	17.6	144.0
	945-827 ЗУ 750 -ВН-750..	-1030.1	405.7	967.6
	810-818 ХМЕЛЬНИЦ -БАР....	-352.3	57.6	630.2
	905-821 ИВ.ФРАНК -ЧЕРНОВЦЫ	-379.9	86.2	714.4
Зап-Вин	803-712 ШЕПЕТОВ. -ЖИТОМИР.	-3106.2	670.6	
	703-727 ЧАЭС750. -ЧАЭС330.	-0.0	-0.0	0.0
	703-727 ЧАЭС750. -ЧАЭС330.	-586.5	-56.0	500.4
	703-727 ЧАЭС750. -ЧАЭС330.	-565.4	-54.9	482.4

Рис. 3

Проверка статической устойчивости этого режима выполнена путем расчета с помощью программного комплекса АВР-74, разработанного в Институте электродинамики, электромеханического переходного процесса при малом конечном вомущении, а именно отключении 6 МВт нагрузки (5 %) в узле 706 (ПС «Нивки»). Расчеты выполнялись при неизменной мощности турбин энергоблоков. Для генератора энергоблока №2 ХАЭС учитывался реально установленный на станции автоматический регулятор возбуждения сильного действия (АРВ-СД). Для генераторов Хмельницкой и Ровенской АЭС использовалась модель синхронной машины с двумя демпферными контурами ротора. Нагрузка учитывалась статическими характеристиками по напряжению и частоте со стандартными значениями коэффициентов. Результаты расчета показаны на рис. 4-6.

Визуальный анализ графических результатов расчета показывает возникновение автоколебаний, вызванных нелинейностью рассматриваемой динамической системы. Математическая модель динамики ЭЭС, на основе которой выполняется численный расчет, вследствие представления нагрузки статическими характеристиками преобразуется в систему дифференциальных уравнений с переменными коэффициентами, а это может приводить, как показывает теория нелинейных систем [3], к нарушениям устойчивости «в малом», которые не выявляет линеаризованная модель первого приближения.

Действительно (см. рис. 4), малое возмущение в системе вызывает отклонения напряжения, на которые реагирует АРВ, возникают колебания напряжения возбуждения  $u_f$ ,

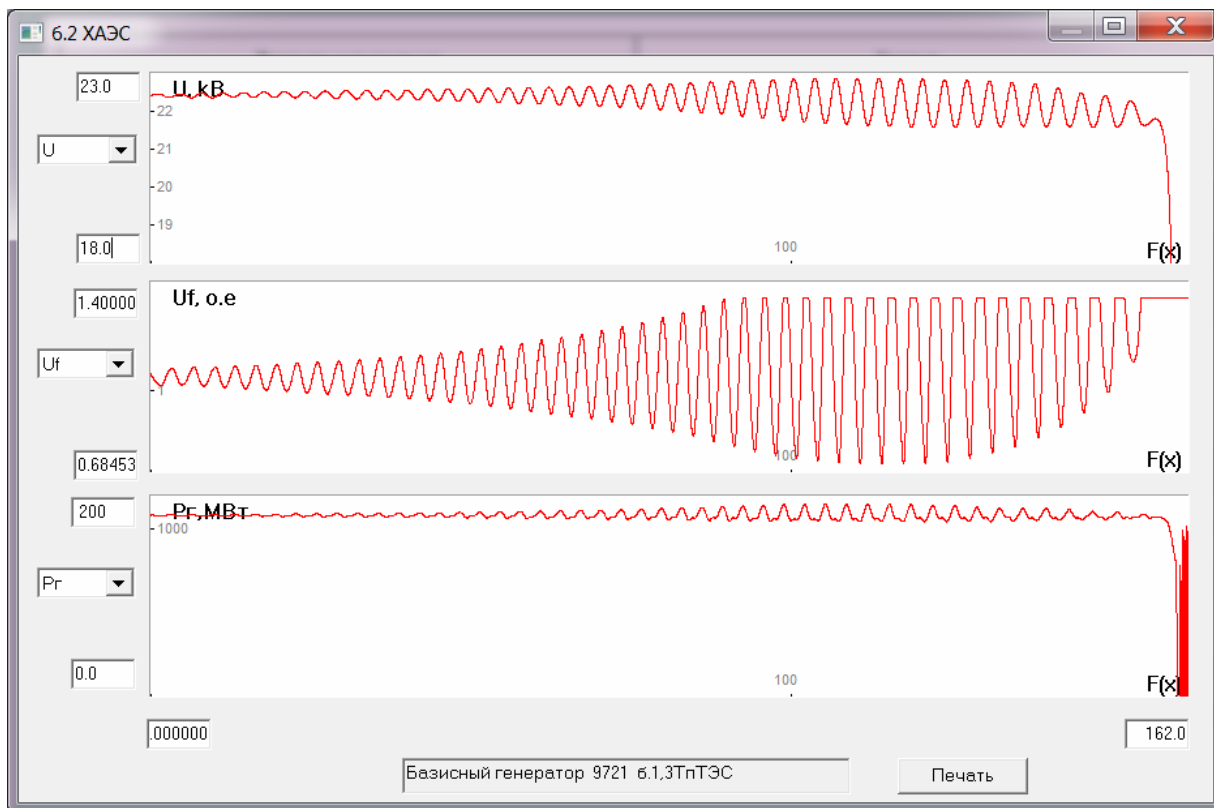


Рис. 4

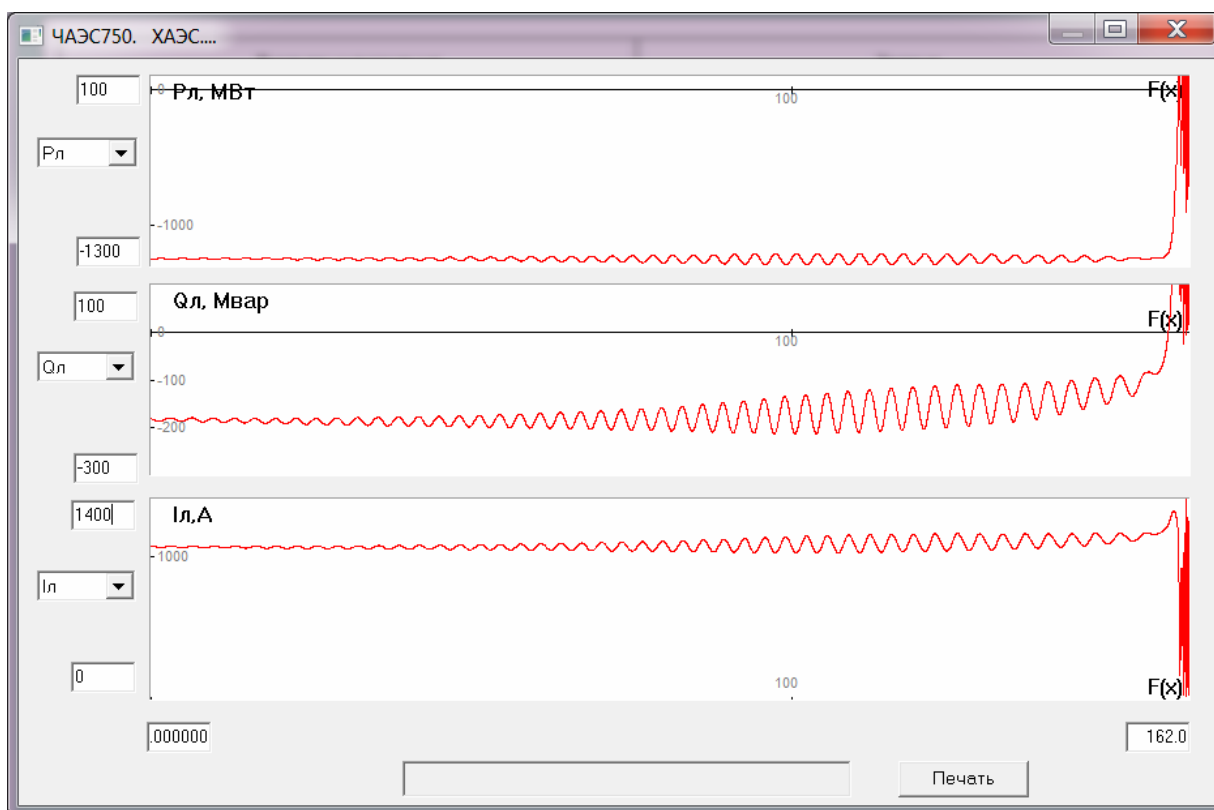


Рис. 5

которые вызывают изменения активной и реактивной мощности генератора. Изменения  $u_f$  приводят также к изменениям реактивной мощности, которая выдается по линии 750 кВ ХАЭС-ЧАЭС (рис. 5), что приводит к медленному снижению напряжения в узле нагрузки 723 ПС «Северная» (рис. 6). Через 160 с этот очень медленный процесс ускорится и

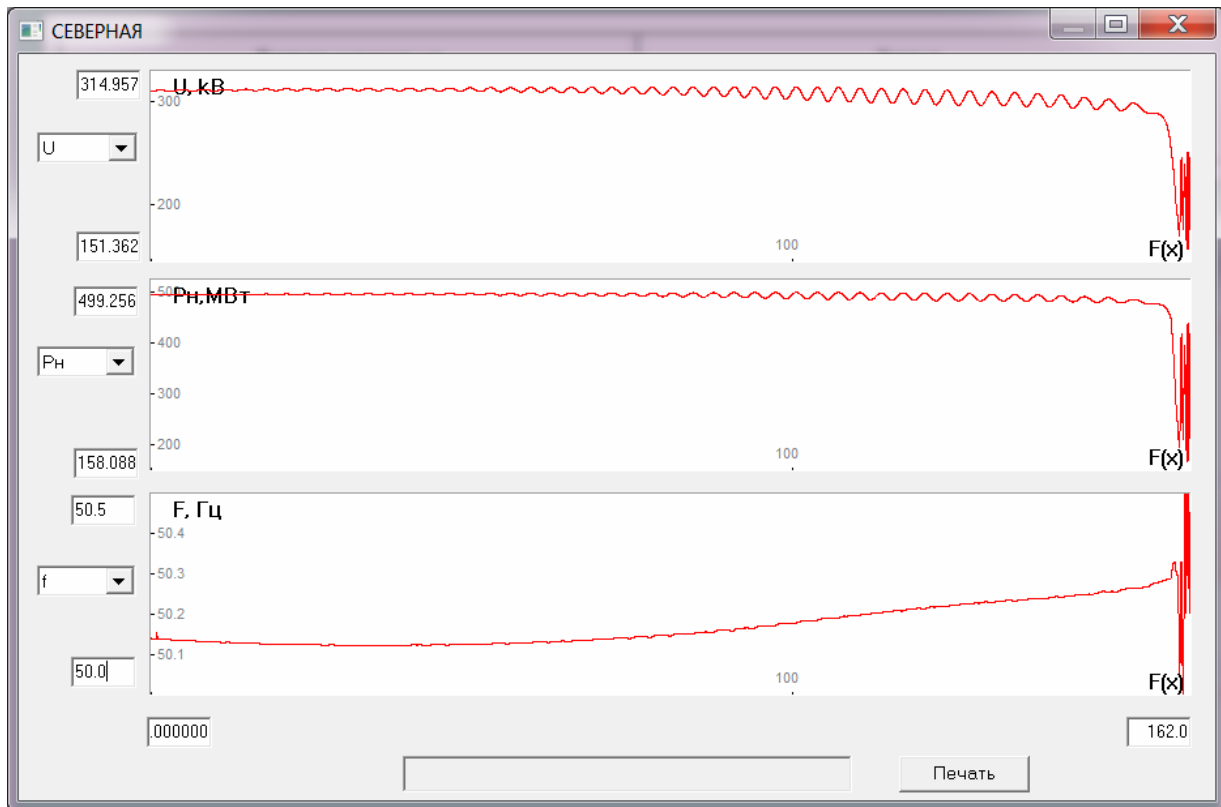


Рис. 6

происходит апериодическое нарушение устойчивости по ВЛ 750 кВ ХАЭС-ЧАЭС и в целом по сечению Запад-Винница.

Такой является картина возмущенного движения неавтономной нелинейной динамической системы с многими степенями свободы, в которой взаимодействие электромеханической подсистемы с электрической осуществляется с участием автоматических регуляторов механических и электрических координат состояния системы.

**Выводы.** 1. Имитационным моделированием устойчивости ОЭС Украины в сечении Запад-Винница показано, что нелинейность электроэнергетической системы как динамической может приводить в особых условиях (внеплановый ремонт оборудования и т.п.) к нарушению статической устойчивости, которое не выявляет анализ линеаризованных уравнений динамики ЭЭС.

2. Численное решение задачи устойчивости ЭЭС, алгоритмы которого учитывают особенности ЭЭС как нелинейной системы, позволяет анализировать устойчивость ЭЭС не только при больших возмущениях, но и «в малом» (статическая устойчивость) путем расчета переходного процесса при малом конечном возмущении.

1. Авраменко В.Н., Крылов В.А., Черненко П.А., Прихно В.Л. Математические модели и программные средства для решения задач автоматизированного диспетчерского управления энергосистемами. – Киев: Ин-т электродинамики НАН Украины, 2012. – 303 с.
2. Авраменко В.Н., Юнеева Н.Т., Гуреева Т.М., Бабич Н.А. Тестовая модель ОЭС для сравнения компьютерных моделей анализа устойчивости и живучести ОЭС Украины // Электрические сети и системы. – 2017. – № 4.
3. Андронов А.А., Витт А.А., Хайкин С.Э. Теория колебаний. – М.: Наука, 1981. – 568 с.
4. Кондратенко І.П., Ращепкін А.П., Ващишин Д.Д. Електромеханічне перетворення енергії в плоскому лінійному генераторі з постійними магнітами // Пр. Ін-ту електродинаміки НАН України: Зб. наук. пр. – К.: ІЕД НАНУ, 2012 – Вип. 33. – С. 39–45.
5. Крылов Н.М., Боголюбов Н.Н. Введение в нелинейную механику. – Киев: Изд. АН УССР, 1937. – 403 с.
6. Шидловська Н.А., Самойленко В.Г. Про деякі задачі нелінійної електротехніки і математичні методи їх дослідження // Техн. електродинаміка. – 2008. – № 5. – С. 3–11.

УДК 621.311:004

**В.М. Авраменко**, докт. техн. наук

Інститут електродинаміки НАН України

пр. Перемоги, 56, Київ-57, 03057, Україна

**Електроенергетична система як об'єкт нелінійної електроенергетики**

Дана характеристика електроенергетичної системи як істотно нелінійної динамічної системи. Виконано порівняння аналітичних і чисельних методів аналізу стійкості нелінійних систем. Розрахунками за тестовою схемою, в основі якої переріз Захід-Вінниця ОЕС України, показано, що для перевірки її стійкості «в малому» може бути недостатньо аналізу лінеаризованої моделі ЕЕС. У ремонтних режимах ОЕС України можуть виникати ситуації, коли дія АРЗ генераторів призводить до тривалих коливань параметрів режиму і небезпеки порушення стійкості ОЕС. Ефективне чисельне розв'язання задачі стійкості ЕЕС у програмному комплексі Інституту електродинаміки НАН України АВР-74, чисельно-аналітичні алгоритми якого враховують особливості ЕЕС як нелінійної системи, дає змогу аналізувати не тільки динамічну, але і статичну стійкість ЕЕС шляхом розрахунку перехідного процесу при малому скінченному збуренні. Бібл. 6, рис. 6.

**Ключові слова:** електроенергетична система, нелінійна система, аналітичний метод, чисельний метод, статична стійкість, скінченне збурення.

**V.M. Avramenko**

Institute of Electrodynamics of the National Academy of Sciences of Ukraine,

Peremohy, 56, Kyiv-57, 03057, Ukraine

**Power system as the object of nonlinear electricity**

Electric power system is a highly nonlinear dynamic system. Comparison of analytical and numerical methods of stability analysis of nonlinear systems is full execution. By calculations on the test scheme for the cross section of the West-Vinnitsa IPS of Ukraine, it is shown that to check its stability "in the small" may not be sufficient analysis of the linearized model of power system. As a small disturbance, it was decided to cut 5% of the load of the powerful substation of the Kiev energy center. The automatic regulator of excitation of a strong action which actually is installed at the station was taken into account for the generator of the block number 2 of Khmelnytsky NPP. The load was taken into account by the static characteristics of voltage and frequency. For repair conditions of IPS of Ukraine, there may be situations when the effects of automatic regulation of excitement of generators leads to oscillation mode parameters and risk of violation of stability of the ECO. Efficient numerical solution of the problem of sustainability of EES in the program of the Institute of electrodynamics of NAS of Ukraine ATS-74, numerical-analytical algorithms which take into account the features of the EPS as nonlinear systems, allows to analyze not only the dynamic stability, but static stability of the EPS by computing the transient process at small finite perturbation. Referenses 6, figures 6.

**Key words:** power system, nonlinear system, analytical method, numerical method, static stability, the ultimate indignation.

Надійшла 30.06.2017

Received 30.06.2017

УДК 621.315.2.016.2

**ДОСЛІДЖЕННЯ ФОРМ КРИВИХ ПЕРЕХІДНОГО ПРОЦЕСУ ПРИ КОМУТАЦІЯХ****В.Ю. Лободзинський**

Національний технічний університет України «КПІ ім. І. Сікорського»,

пр. Перемоги, 37, 03056, Київ, Україна

e-mail: vadim\_lv@bigmir.net

Проведено теоретичне дослідження та аналіз перенапруг перехідного процесу при комутаціях у високовольтній кабельній лінії. Теоретичне дослідження дало змогу виявити основні закономірності перенапруг при характерних комутаціях. Проведено аналіз складових перехідного процесу, який дає можливість аналізувати форму кривої перехідного процесу для визначення тривалості, амплітуди та вільних складових комутаційних перенапруг, які впливають на ізоляцію високовольтної кабельної лінії. Визначено, що максимальна напруга залежить від кута вмикання та частоти власних коливань, які визначають амплітуду вільних складових. Бібл. 7, рис. 5.

**Ключові слова:** перехідні процеси, перенапруга, комутація, амплітуда.

**Вступ.** Підвищення робочої напруги та збільшення довжини кабельних ліній (КЛ) електропередачі збільшує актуальність обмеження в них комутаційних процесів та перенап-