

П. М. Баран<sup>1</sup>  
В. Г. Гапанович<sup>1</sup>  
В. П. Кідиба<sup>1</sup>  
Я. Д. Пришляк<sup>1</sup>

## МОДЕЛЮВАННЯ ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНИХ ПРОЦЕСІВ ВЛАСНИХ ПОТРЕБ ЕЛЕКТРИЧНИХ СТАНЦІЙ В РЕАЛЬНОМУ ЧАСІ

<sup>1</sup>Національний університет «Львівська політехніка»

*Розроблено математичну модель підсистеми електричної частини власних потреб енергоблока теплової електричної станції для автоматизованої системи навчання оперативного персоналу та здійснено її цифрову реалізацію.*

**Ключові слова:** теплова електрична станція, власні потреби, оперативний персонал, навчальна система, асинхронний двигун, математична модель, цифрова модель.

### Вступ

За статистикою значна кількість аварій на теплових та атомних електростанціях (відповідно, ТЕС та АЕС) виникає з вини оперативного персоналу. Тому питанням підготовки та перепідготовки оперативного персоналу на електричних станціях приділяють особливу увагу. Для цього створюють різноманітні системи навчання, які забезпечують високу якість підготовки спеціалістів з оперативного керування енергоблоками електростанцій [1, 2]. Для ефективного навчання оперативного персоналу необхідно створювати математичні моделі технологічного обладнання енергоблока, які відтворюють координати режиму обладнання із заданою точністю на довготривалих часових інтервалах.

Для навчання оперативного персоналу електричних станцій застосовують спеціалізовані навчальні системи, які реалізовані із застосуванням сучасної обчислювальної техніки [1]. Основою функціонування таких систем є моделі, що відтворюють процеси в технологічному обладнанні енергоблоків електричних станцій. До цих моделей висувають певні вимоги, основними з яких є: розрахунок координат режиму із заданою точністю (відхилення до 2 % від дійсних координат обладнання енергоблока), відтворення процесів в реальному часі протягом значних часових інтервалів (до кількох годин), адекватна реакція на режимні перемикання в схемах електричної частини енергоблоків [2].

В навчальних системах моделювання електромеханічних процесів в електричній частині власних потреб (ВП) здійснювалося на імітаційному принципі, що не давало змоги адекватно відобразити ці процеси.

За допомогою математичної моделі електричної частини ВП енергоблока та створення на її основі цифрової моделі реалізована можливість відтворення електромеханічних процесів в електричній частині ВП енергоблока ТЕС в реальному часі на значних часових інтервалах за різного виду збурень в системі.

### Результати досліджень

До електричної частини енергоблока відноситься система електропостачання ВП ТЕС. На ТЕС для підвищення надійності функціонування застосовують двосекційні схеми електропостачання ВП. На рис. 1 показана електрична схема електропостачання ВП блоку ТЕС потужністю 300 МВт. Деякі механізми ВП дубльовані та живляться від різних секцій шин, і в аварійних режимах вмикаються через систему АВР.

Основними елементами електричної частини ВП є потужні асинхронні двигуни (АД).

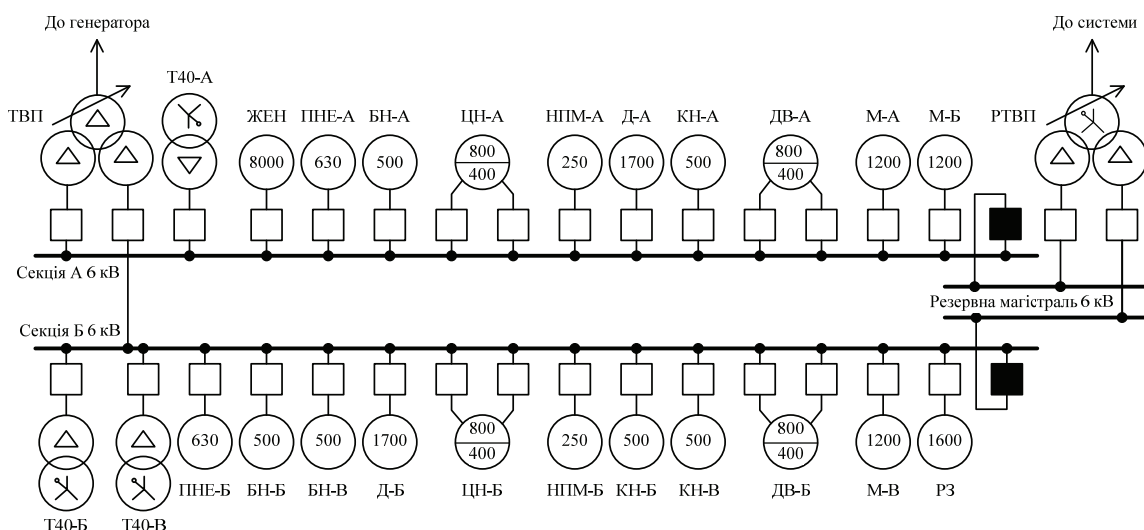


Рис. 1. Схема електропостачання ВП ТЕС:

ЖЕН — живильний насос з електроприводом; ПНЕ — підйомний насос ежекторів; БН — бустерний насос; ДВ — дугтевий вентилятор; ЦН — циркуляційний насос; Д — димосос; КН — конденсатний насос; ЗН — зливний насос; РЗ — резервний збудник; НПМ — насос подачі мазуту; М — млин; ТВП, РТВП — робочий та резервний трансформатори ВП

### Математична модель асинхронного двигуна

Електромеханічний рух ротора  $i$ -го АД ВП описується рівнянням

$$F(s_i, t) = T_{ji} \cdot \frac{ds_i}{dt} - M_{EMi} + M_{Ci} = 0, \quad (1)$$

де  $T_{ji}$  — механічна постійна часу  $i$ -го АД та механізму (агрегату), що приводиться ним в рух;  $M_{Ci}$  — момент опору цього механізму;  $M_{EMi}$  — електромагнітний момент на валу двигуна;  $s_i$  — ковзання ротора  $i$ -го АД.

Модель (1) відтворює відносний рух ротора АД. Тому цю модель необхідно доповнити моделлю обмеження ковзання

$$0 < s_i \leq 1. \quad (2)$$

В загальному випадку момент опору агрегату є нелінійною величиною і залежить від характеру приводу АД [3]. Так, характеристика лопатевих насосів та вентиляторів залежить від статичного напору газу та рідини, їх витрат, частоти обертання. Загалом це сімейство характеристик. Лише за відсутності статичного напору, невеликих змін частоти обертання, механічну характеристику для лопатевих насосів та вентиляторів можна вважати параболічною.

Багато механізмів ВП (млини, шнеки, транспортери тощо) мають характеристики, що не залежать від швидкості обертання [3].

В моделі (1) значення механічного моменту визначається характеристикою, яка враховує основні особливості механізмів ВП

$$M_{Ci} = k_{zi} \left( M_{Cni} + (1 - M_{CTi}) \left( \frac{1 - s_i}{1 - s_{nomi}} \right)^{n_i} \right), \quad (3)$$

де  $k_{zi}$  — коефіцієнт, що враховує ступінь завантаження механізму;  $M_{CTi}$  — початковий момент опору (за частоти ковзання  $s_i = 1$ );  $s_{nomi}$  — номінальне ковзання АД;  $n_i$  — показник степеня, значення якого залежить від типу механізму. Для механізмів, що мають незалежну від ковзання механічну характеристику  $n_i = 0$ , для вентиляторів  $n_i = 2$ , для насосів в залежності від їх типів, умов роботи, наявності зворотного клапана значення  $n_i$  змінюється в межах 2—4.

Як показав досвід, визначення моменту опору за (3) відповідає вимогам щодо моделювання електромеханічних процесів в електричній частині ВП енергоблока для випадку автономного використання моделі електричної частини енергоблока в системі навчання оперативного персоналу.

Для визначення електромагнітного моменту на валу АД  $M_{EMi}$  використовується його багатоконтурна розрахункова електрична схема, яка дозволяє враховувати витіснення струму в роторі [4].

В класичній розрахунковій електричній схемі АД параметри ротора є нелінійними величинами і залежать від ковзання ротора:  $r(s)/s, x(s)$ . В розрахунковій багатоконтурній електричній схемі АД цих нелінійних величин немає і їх параметри визначаються шляхом апроксимації частотних характеристик. На основі проведених досліджень виявлено, що застосування розрахункової двоконтурної електричної схеми ротора АД дає невелике середньоквадратичне відхилення розрахункових роторних параметрів від вихідних [4].

Для основних АД ВП електричних станцій на основі їх частотних характеристик здійснено розрахунки параметрів розрахункових двоконтурних електричних схем, які використані в розробленій моделі електричної частини ВП ТЕС.

Результуючий опір, еквівалентний активний опір ротора та електромагнітний момент для розрахункової двоконтурної електричної схеми АД визначаються як

$$z_{AD} = r_a + jx_{\sigma a} + \frac{jx_{\mu}(r_{22}/s + jx_{22})(r_{21}/s + jx_{21})}{jx_{\mu}(r_{22}/s + jx_{22} + r_{21}/s + jx_{21}) + (r_{22}/s + jx_{22})(r_{21}/s + jx_{21})}; \quad (4)$$

$$r_{r.ekv} = \operatorname{Re} \left( \frac{jx_{\mu}(r_{22}/s + jx_{22})(r_{21}/s + jx_{21})}{jx_{\mu}(r_{22}/s + jx_{22} + r_{21}/s + jx_{21}) + (r_{22}/s + jx_{22})(r_{21}/s + jx_{21})} \right); \quad (5)$$

$$M_{EMi} = 3 \cdot r_{r.ekvi} \cdot I_{ADi}^2, \quad (6)$$

де  $r_a, x_{\sigma a}, x_{\mu}, r_{22}, x_{22}, r_{21}, x_{21}, r_{r.ekvi}$  — параметри двоконтурної електричної схеми АД;  $s$  — ковзання АД;  $I_{ADi}$  — струм статора двигуна.

Для розв'язування диференціальних рівнянь відносного руху ротора АД застосовано неявний метод Ейлера, який є стійким для моделювання процесів за значних збурень в системі (увімкнення двигуна, його самозапуск тощо) та за інтегрування рівнянь на довготривалих часових інтервалах — до кількох годин [1].

Для розв'язання рівняння (1) в неявному методі Ейлера застосовано метод Ньютона, ітераційна формула якого має такий вигляд:

$$W \left( F \left( s_{i(k+1)}^{(l)} \right) \right) \Delta s_{i(k+1)}^{(l)} = T_{ji} \left( s_{i(k+1)}^{(l)} - s_{i(k)} \right) / h - M_{EMi} \left( s_{i(k+1)}^{(l)} \right) + M_{Ci} \left( s_{i(k+1)}^{(l)} \right);$$

$$s_{i(k+1)}^{(l+1)} = s_{i(k+1)}^{(l)} - \Delta s_{i(k+1)}^{(l)}, \quad (7)$$

де  $s_{i(k+1)}^{(l)}, s_{i(k+1)}^{(l+1)}$  — значення ковзання ротора  $i$ -го АД для  $l$ -ї та  $(l+1)$ -ї ітерації на  $(k+1)$  кроці інтегрування;  $W \left( F \left( s_{i(k+1)}^{(l)} \right) \right)$  — коефіцієнт Якобі;  $\Delta s_{i(k+1)}^{(l)}$  — нев'язка ковзання ротора  $i$ -го АД;  $s_{i(k)}$  — значення ковзання ротора  $i$ -го АД на попередньому  $k$  кроці інтегрування;  $h$  — крок інтегрування.

В загальному випадку коефіцієнт Якобі визначається як часткова похідна рівняння (1) за ковзанням для значення ковзання  $s = s_{i(k+1)}^{(l)}$

$$W \left( F \left( s_{i(k+1)}^{(l)} \right) \right) = \partial F(s) / \partial s. \quad (8)$$

Враховуючи складність рівнянь (1)—(6), отримати аналітичний вираз коефіцієнта Якобі досить важко. Тому застосовано чисельний метод наближеного обчислення коефіцієнта Якобі.

Алгоритм обчислення значення коефіцієнта Якобі полягає в такому.

Замінивши похідну на співвідношення скінченних величин, рівняння визначення коефіцієнта Якобі (8) в наближенні можна записати у вигляді

$$W \left( F \left( s_{i(k+1)}^{(l)} \right) \right) \approx F(s) / \Delta s. \quad (9)$$

Задаючи значення ковзання АД  $s_{i(k+1)}^{(l)} = s_{i(k)}$ , обчислюється значення виразу (1). Отримується

значення  $F(s_{i(k+1)}^{(1)})$ . Задається нове значення ковзання як  $s_{i(k+1)}^{(2)} = s_{i(k)}^{(1)} + \Delta s$  та знову обчислюється значення  $F(s_{i(k+1)}^{(2)})$ . Використовуючи отримані результати, обчислюється наближене значення коефіцієнта Якобі

$$W\left(F\left(s_{i(k+1)}^{(l)}\right)\right) \approx \left(F\left(s_{i(k+1)}^{(2)}\right) - F\left(s_{i(k+1)}^{(1)}\right)\right) / \Delta s. \quad (10)$$

Для оптимального керування енергоблоком оперативний персонал повинен стежити за рівнем напруги на секціях шин ВП А та Б (рис. 1). В навчальній системі контроль здійснюється за відповідними вольтметрами, розміщеними на відображеннях панелі ВП БЩУ. У випадку відхилення напруги від номінальної оператор повинен діяти на пристрій РПН трансформатора. Тому модель (1)—(10) необхідно доповнити рівняннями, які враховують положення РПН трансформатора ВП

$$\begin{aligned} \dot{I}_A &= \sum_{i=1}^{N_{AD,A}} \dot{I}_{ADi} + \dot{I}_{Aconst}; \quad \dot{U}_A = \dot{U} - j x_T \dot{I}_A; \\ \dot{I}_B &= \sum_{i=1}^{N_{AD,B}} \dot{I}_{ADi} + \dot{I}_{Bconst}; \quad \dot{U}_B = \dot{U} - j x_T \dot{I}_B; \\ x_T &= U_k U^2 (1 \pm N \cdot \Delta U_{RPN})^2 / (100 \cdot S_{Tnom}); \\ U_k &\approx (U_{k,max} - U_{k,min}) / (N_{max.RPN} - 1)(N - 1) + U_{k,min}, \end{aligned} \quad (11)$$

де  $\dot{U}_A, \dot{U}_B, \dot{I}_A, \dot{I}_B$  — напруги та струми секцій А та Б ВП, відповідно;  $\dot{I}_{Aconst}, \dot{I}_{Bconst}$  — постійні навантаження секції А та Б (незалежні від навантаження АД);  $x_T, U_k$  — опір та напруга досліджу короткого замикання трансформатора ВП (робочого або резервного ТВП, в залежності від якого з цих трансформаторів в даний момент живляться ВП блоку), значення цих величин залежать від положення РПН;  $U_{k,max}, U_{k,min}$  — напруга досліджу короткого замикання трансформатора ВП, яка відповідає максимальному та мінімальному положенню пристрою РПН;  $U$  — напруга на високій стороні трансформатора (приведена до сторони низької напруги);  $S_{Tnom}$  — номінальна потужність трансформатора ВП;  $N$  — положення анцапфи пристрою РПН;  $N_{max.RPN}$  — максимальне положення анцапфи пристрою РПН;  $\Delta U_{RPN}$  — відносне значення одного ступеня регулювання напруги трансформатора пристроєм РПН;  $N_{AD,A}, N_{AD,B}$  — кількість АД, приєднаних та увімкнених на момент розрахунку до шин секцій А та Б, відповідно.

На основі математичної моделі ВП ТЕС (1)—(11) сформована цифрова модель з використанням об'єктно-орієнтованого програмування. Програмна реалізація цифрової моделі здійснена в середовищі DELPHI.

Цифрова модель пройшла випробування за різного виду збурень в системі електропостачання ВП ТЕС. Для прикладу, на рис. 2 показані координати режиму почергового запуску трьох двигунів ВП та їх самозапуску після короточасної втрати живлення секцій 6 кВ за вимкнення живлення від робочого трансформатора ВП та відновлення живлення секцій 6 кВ ВП від резервного джерела живлення після спрацювання пристрою АВР.

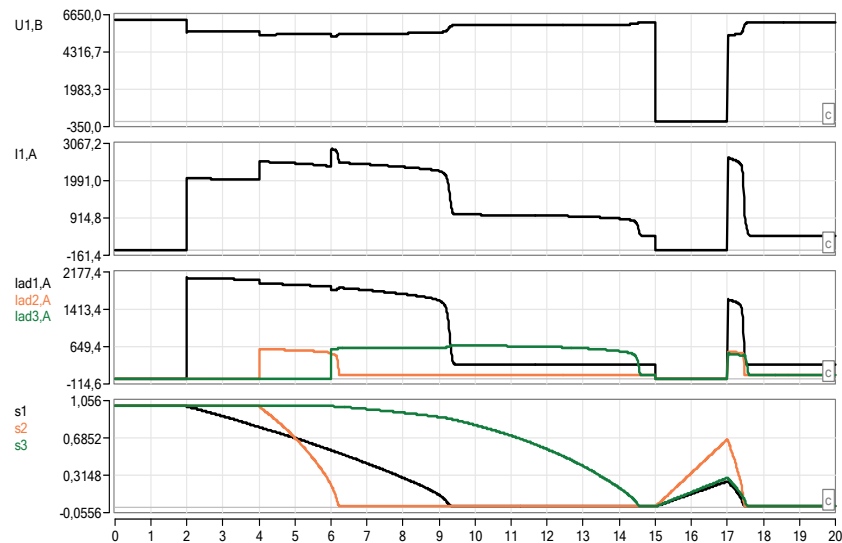


Рис. 2. Запуск та самозапуск АД після спрацювання пристрою АВР

## Висновки

1. Розроблено математичну модель електричної частини власних потреб енергоблока ТЕС та здійснено її цифрову реалізацію, що дає змогу моделювати електромеханічні процеси в електричній частині ВП енергоблока ТЕС в реальному часі та з необхідною точністю.

2. Параметри розрахункової електричної схеми асинхронного двигуна визначаються на основі апроксимації частотних характеристик, що суттєво спрощує цифрову реалізацію їх моделей.

3. Застосування неявного методу Ейлера та ітераційного методу Ньютона дозволяє отримати стійкий розв'язок на значних часових інтервалах (до кількох годин) за значних збурень в системі, таких як запуск та самозапуск асинхронного двигуна.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Баран П. М. Спеціалізована система навчання оперативного персоналу електричних станцій / П. М. Баран, В. П. Кідиба, Я. Д. Пришляк // Вісник Національного університету «Львівська політехніка». — 2007. — № 597. — С. 30—33. — (Електроенергетичні та електромеханічні системи).

2. Комп'ютерний симулятор управління електричною частиною енергоблока ТЕС / П. М. Баран, В. П. Кідиба, Я. Д. Пришляк, М. І. Дембіцький // Вісник Національного університету «Львівська політехніка». — 2015. — № 934. — С. 3—7. — (Електроенергетичні та електромеханічні системи).

3. Гуревич Ю. Е. Применение математических моделей электрической нагрузки в расчетах устойчивости энергосистем и надежности электроснабжения промышленных предприятий / Ю. Е. Гуревич, Л. Е. Либова. — М. : Элекс-КМ, 2008. — 248 с.

4. Сивокобыленко В. Ф. Расчетно-экспериментальное определение параметров схем замещения и характеристик асинхронных двигателей / В. Ф. Сивокобыленко, С. В. Василец // Науковий вісник НГУ. — 2014. — № 5. — С. 76—82.

Рекомендована кафедрою електричних станцій і систем ВНТУ

Стаття надійшла до редакції 5.07.2016

**Баран Петро Михайлович** — канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри електричних систем та мереж;  
**Гапанович Володимир Георгійович** — канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри електричних станцій;  
**Кідиба Віктор Павлович** — канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри електричних систем та мереж;  
**Пришляк Ярослава Дмитрівна** — канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри електричних систем та мереж, e-mail: pryshlak@gmail.com.

Національний університет «Львівська політехніка», Львів

**P. M. Baran**<sup>1</sup>  
**V. H. Hapanovych**<sup>1</sup>  
**V. P. Kidyba**<sup>1</sup>  
**Ya. D. Pryshliak**<sup>1</sup>

## Modeling of Electromechanical Processes of Own Needs of Power Plants in Real Time

<sup>1</sup>National University «Lviv Polytechnic»

*There has been developed the mathematical model of the subsystem of the electrical part of own needs of power unit of thermal power station for an automated system of training of the operating personnel and its digital implementation has been realized.*

**Keywords:** thermal power plant, own needs, operational staff, training system, induction motor, mathematical model, digital model.

**Baran Petro M.** — Cand. Sc. (Eng.), Assistant Professor, Assistant Professor of the Chair of Power Networks and Systems;

**Hapanovych Volodymyr H.** — Cand. Sc. (Eng.), Assistant Professor, Assistant Professor of the Chair of Power Plants;

**Kidyba Victor P.** — Cand. Sc. (Eng.), Assistant Professor, Assistant Professor of the Chair of Power Networks and Systems;

**Pryshliak Yaroslava D.** — Cand. Sc. (Eng.), Assistant Professor, Assistant Professor of the Chair of Power Networks and Systems, e-mail: pryshlak@gmail.com

**П. М. Баран<sup>1</sup>**  
**В. Г. Гапанович<sup>1</sup>**  
**В. П. Кидыба<sup>1</sup>**  
**Я. Д. Пришляк<sup>1</sup>**

## **Моделирование электромеханических процессов собственных нужд электрических станций в реальном времени**

<sup>1</sup>Национальный университет «Львовская политехника»

*Разработана математическая модель подсистемы электрической части собственных нужд энергоблока тепловой электрической станции для автоматизированной системы обучения оперативного персонала и осуществлена её цифровая реализация.*

Ключевые слова: тепловая электрическая станция, собственные нужды, оперативный персонал, обучающая система, асинхронный двигатель, математическая модель, цифровая модель.

**Баран Петр Михайлович** — канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры электрических систем и сетей;  
**Гапанович Владимир Георгиевич** — канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры электрических станций;  
**Кидыба Виктор Павлович** — канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры электрических систем и сетей;  
**Пришляк Ярослава Дмитриевна** — канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры электрических систем и сетей, e-mail: pryshlak@gmail.com