

## ЗАСТОСУВАННЯ ПРОГНОСТИЧНОГО РЕГУЛЮВАННЯ РЕЖИМІВ ЕНЕРГОСИСТЕМ З РОЗПОДІЛЕНОЮ ГЕНЕРАЦІЄЮ

Нестерко А.Б., к.т.н., Чекотун В.Г., магістрант

КПІ ім. Ігоря Сікорського, кафедра автоматизації енергосистем

**Вступ.** Ефективна і оптимальна робота установок розподіленої генерації(РГ) є неможливою без використання розвинених систем автоматичного управління [1]. Навантаження споживачів визначаються режимом їх роботи та можуть суттєво змінюватися. Виходячи з цього, для забезпечення необхідних показників якості електроенергії використовуються автоматичні регулятори, що забезпечують стабільність напруги та частоти на затискачах генераторів РГ та стійкість паралельної роботи генераторів з електроенергетичною системою.

**Мета роботи.** Метою роботи є огляд принципів роботи прогностичних алгоритмів та їх застосування для регулювання установок РГ, аналіз роботи прогностичних регуляторів за допомогою моделювання та порівняння прогностичних ПД-регуляторів швидкості та збудження зі стандартними ПД-регуляторами.

**Матеріали і результати досліджень.** Схема застосування регуляторів установок РГ, реалізованих на основі часто використовуваних паро-, гідро-, газо- турбін, показана на рис. 1

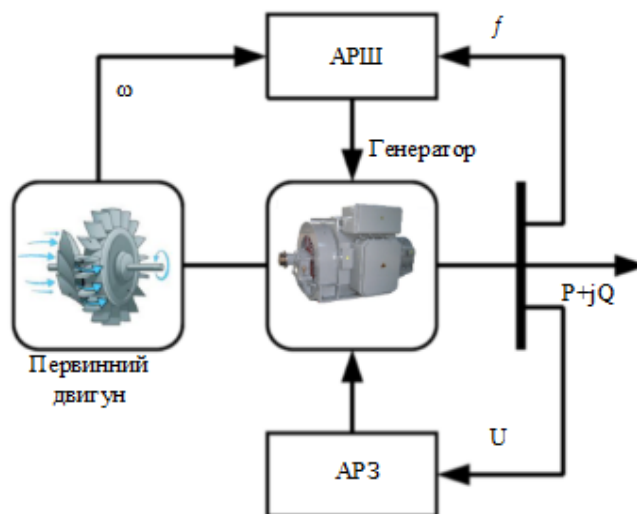


Рисунок 1 – Схема установки РГ з автоматичними регуляторами

Для підтримки напруги та частоти електроенергії використовуються автоматичні регулятори збудження і швидкості. Дані регулятори можуть бути побудовані на різних принципах [2]. Схема на рис. 1 відповідає локальному принципу управління, що забезпечує стабілізацію в заданих межах вихідних режимних параметрів конкретної установки. Рішення системних питань, пов'язаних з забезпеченням стійкості чи мінімізації втрат електроенергії в мережі в такому разі є обмеженими і потребують переналаштування регуляторів при суттєвих змінах структури і режиму електроенергетичної

системи(ЕЕС). Інший шлях вирішення проблеми може бути заснованим на використанні прогностичних принципів.

Прогностичні алгоритми використовуються в напіваавтоматичних системах, в яких оператор вводить додаткову складову в керуючий вплив з урахуванням випередження. В системах автоматичного управління принцип прогнозуючого управління реалізується на основі моделей.

При введенні установок РГ, що працюють на базі синхронних генераторів, в ЕС виникають потреби в визначенні оптимальних налаштувань АРЗ та АРШ. Для визначення параметрів необхідно мати повні моделі ЕЕС та проводити трудомісткі розрахунки сукупності параметрів САУ. В разі необхідності прискореного вводу в експлуатацію установок РГ необхідний інший підхід, пов'язаний з можливістю управління регуляторів за допомогою одного параметра. Для цього пропонується перейти від регулювання по теперішньому значенню помилки  $\epsilon(t)$ , до управління, що допускає обрахунок значення прогнозу  $\epsilon(t + \tau_{for})$ . При цьому реалізується випереджаючий керуючий вплив та вдається частково компенсувати інерційність об'єкту.

Після вводу в експлуатацію установки РГ налаштування АРЗ та АРШ можливо оптимізувати з використанням експериментальних даних [3]. Такий підхід особливо перспективний для реальних об'єктів, що мають особливості режимів роботи, пов'язані з різко змінним характером навантажень, наявністю несиметрії та гармонічних спотворень.

Визначення оптимальних налаштувань САУ потребує рішення таких задач як: ідентифікація динамічного об'єкту та розрахунок взаємопов'язаних параметрів налаштування, що забезпечують заданий критерій оптимальності об'єкту. При цьому отримане налаштування САУ з типовими лінійними законами управління (ПІ, ПІД і т.п.), що широко використовуються на практиці, може бути неоптимальним в результаті зміни режиму роботи об'єкту. В зв'язку з цим необхідно визначати оптимальні налаштування САУ для всіх можливих режимів роботи динамічного об'єкту, що пов'язано зі складністю розрахунків великої кількості взаємопов'язаних параметрів.

В той же час, використання алгоритму прогнозування в складі типових регуляторів дозволяє виконувати налаштування САУ за допомогою одного параметра – часу прогнозу [4]. Це дозволяє відмовитись від складної процедури ідентифікації динамічних характеристик об'єкта та розрахунку оптимальних параметрів елементів систем регулювання. На рис. 2 зображено схему САУ з використанням прогностичного регулятора

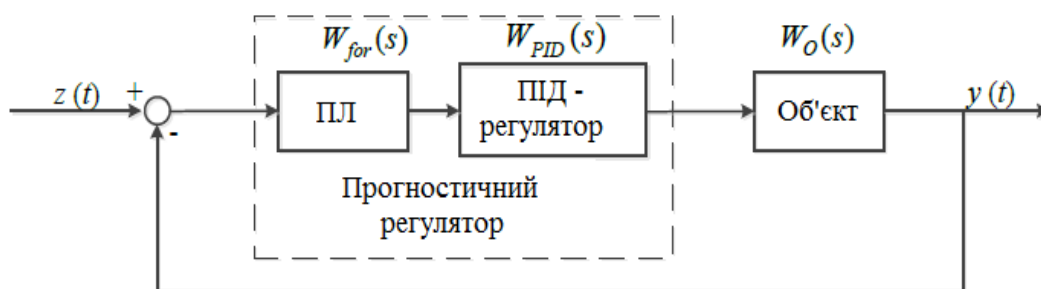


Рисунок 2 – Схема замкнутої САУ з прогностичним регулятором

Даний регулятор включає в своєму складі два сегменти[5]:

- елемент прогнозування з передатною функцією  $W_{for}(s)$
- елемент з ПД законом регулювання й передатною функцією  $W_{PID}(s)$

Найпростіший прогноз являється лінійним, та реалізується по двом значення регульованої величини – теперішньому  $y(t)$  та попередньому  $y(t-\Delta t)$ . Передавальна функція лінійної прогнозуючої ланки визначається так:

$W_{for}(s) = T_p s + 1$ , де  $T_p$ - постійна часу лінійної прогнозуючої ланки.  $s$  – оператор Лапласа.

Прогностичні алгоритми можуть бути реалізовані на базі програмованої мікропроцесорної техніки й використані в АРЗ та АРШ генераторів установок РГ. В поєднанні з методикою узгодженого налаштування це дозволить створити адаптивну САУ напругою та швидкістю обертання ротора генератора, що не потребує оперативного визначення оптимальних узгоджених налаштувань АРЗ та АРШ для всіх можливих режимів роботи установки РГ. Ці налаштування можуть бути виконані в процесі експлуатації установок, коли агрегатом керують прогностичні АРЗ та АРШ [5-7].

Для аналізу систем автоматичного регулювання збудження та швидкості була створена модель в програмному комплексі MATLAB/Simulink. Модель зображена на рис. 3 моделює роботу ізольованого синхронного генератора на місцеве навантаження. В якості збурення наявне навантаження під'єднане за допомогою блоку Breaker.

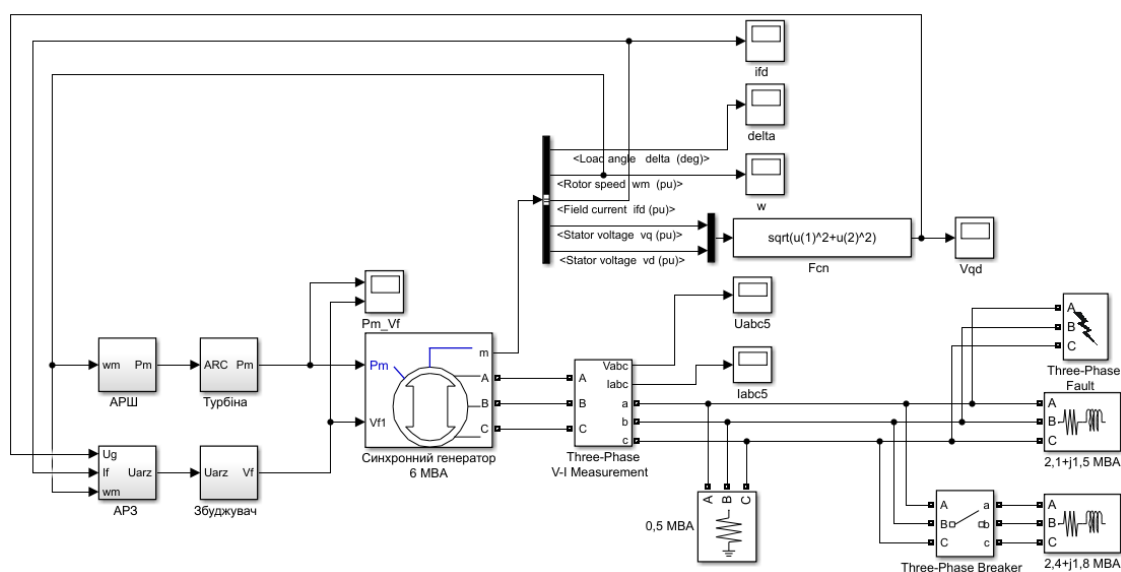


Рисунок 3 – Структурна схема ізольованого СГ з АРЗ/АРШ в Matlab

Синхронний генератор моделювався за допомогою блоку Synchronous Machine pu Fundamental. Присутній блок моделювання короткого замикання, що відповідає блоку Three-Phase Fault. Блок Three-Phase Series RLC Load моделював місцеве навантаження.

В даній моделі ізольований синхронний генератор потужністю 6 МВА живить споживача, що споживає активно-індуктивну потужність  $2.6 + j1.5$  МВА.

Дане навантаження становить приблизно 50% номінальної повної потужності генератора.

Налаштування коефіцієнтів АРЗ та АРШ в досліджуваній моделі виконувалось для навантаження 50% виконувалось із практичних міркувань. Дані налаштування наведені в табл. 1.

Таблиця 1 – Значення параметрів налаштування регуляторів

| Параметр | $K_p$ | $K_i$ | $K_d$ | $K_{ou}$ | $K_{ow}$ | $K_{1lf}$ | $K_{1w}$ |
|----------|-------|-------|-------|----------|----------|-----------|----------|
| Значення | 1000  | 10    | -5    | 100      | 1        | 1         | -10      |

Модель тиристорної системи збудження, що зображена на рис. 4 була створена на основі диференціальних рівнянь, що описують тиристорний перетворювач та вхідний підсилювач з коефіцієнтом підсилення  $K_a$ , та постійної часу  $T_a$ . Вхідний підсилювач може бути реалізовано на електромашинних, магнітних чи електронних компонентах. Для цих елементів можна прийняти припущення про лінійність характеристики. Модель тиристорного збудника представлена у вигляді аперіодичної ланки першого порядку, що характеризується коефіцієнтом  $k_e$  та постійною часу  $T_e$  а також блоком обмеження напруги. Постійна часу  $T_e$  для тиристорних збудників становить 0.02-0.04с



Рисунок 4 – Структурна схема збудника в Matlab

Для моделювання використовувались наступні значення коефіцієнтів:

$$T_a = 0,001 \text{ с}, K_a = 1, T_e = 0,03 \text{ с}, k_e = 1.$$

Модель турбіни виконана у вигляді аперіодичної ланки першого порядку з передатною функцією  $W(s)$  та блоком обмеження, та зображена на рис. 5

Передатня функція  $W(s)$  має вигляд:

$$W(s) = \frac{P_m}{\mu} = \frac{1}{(sT_t + 1)}$$

де  $P_m$  – потужність турбіни,  $\mu$  – відкриття регулюючого органу,  $T_t$  – постійна часу турбіни, що задається відставанням в перетворенні енергії пару в механічну енергію (в середньому  $T_t = 0.2\text{с}$ )

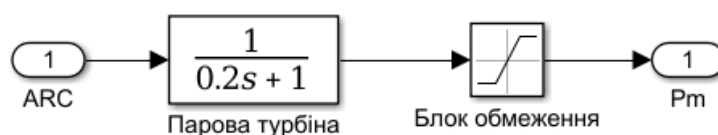


Рисунок 5 – Структурна схема блоку турбіни в Matlab

Моделі АРШ та АРЗ зображені на рис. 6 та рис. 7 відповідно.

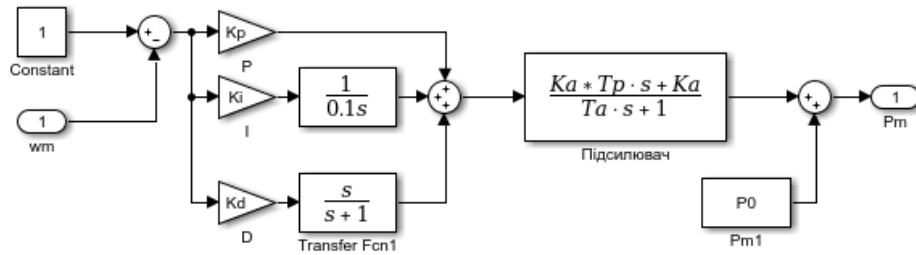


Рисунок 6 – Структурна схема прогностичного АРШ в Matlab

Для блоку АРШ необхідно задати наступні параметри:

- постійні часу інтегруючого, диференціюючого елементів.
- коефіцієнти налаштування ПІД-регулятора  $K_p$ ,  $K_i$  и  $K_d$
- коефіцієнт підсилення підсилювача  $K_a$ ;
- постійна часу підсилювача  $T_a$  та час прогнозування  $T_p$ .

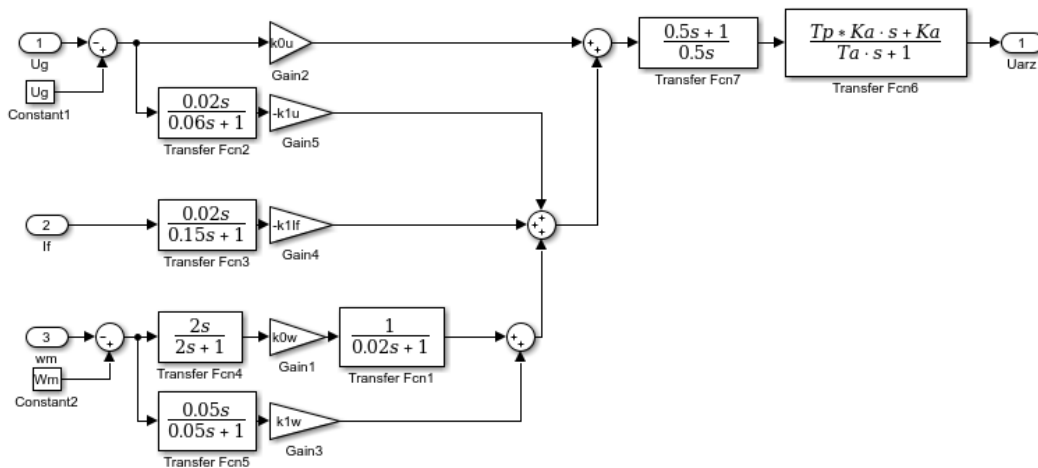


Рисунок 7 – Структурна схема моделі прогностичного АРЗ в Matlab

На вхід подавались наступні сигнали:

- напруга генератора  $U_g$
- струм збудження  $I_f$
- частота обертання ротора генератора  $W_m$

Канал регулювання напруги базується на ПІД-законі регулювання і включає наступні сегменти:

- блок, визначаючий відхилення напруги  $U_g$  від заданої уставки,
- диференціатор з передатною функцією:

$$\frac{0.02s}{0.06s + 1}$$

- підсилювачі з коефіцієнтами підсилення по відхиленню та першої похідної зміни напруги ( $k_{0u}, k_{1u}$ ).
- постійна часу підсилювача  $T_a$  та час прогнозування  $T_p$ .

В досліджуваній моделі ізольований синхронний генератор потужністю 6 МВА живить споживача, що споживає активно-індуктивну потужність  $2.6+1.5j$  МВА. Дане навантаження становить близько 50% номінальної повної потужності генератора.

Для моделювання впливу АРШ та АРЗ на якість управління генератором в ізольованій системі електропостачання моделювались наступні ситуації:

- виникнення аварійного режиму у вигляді трьохфазного КЗ і його наступне відключення за допомогою РЗ через 0.2с
- додавання активно-індуктивного навантаження на величину  $2.4+1.8j$ (МВА). Результати моделювання нанесені на рис.8, рис.9.

Досліди велись для наступних видів регуляторів СГ:

- ПД АРЗ/АРШ
- прогностичний АРЗ/АРШ

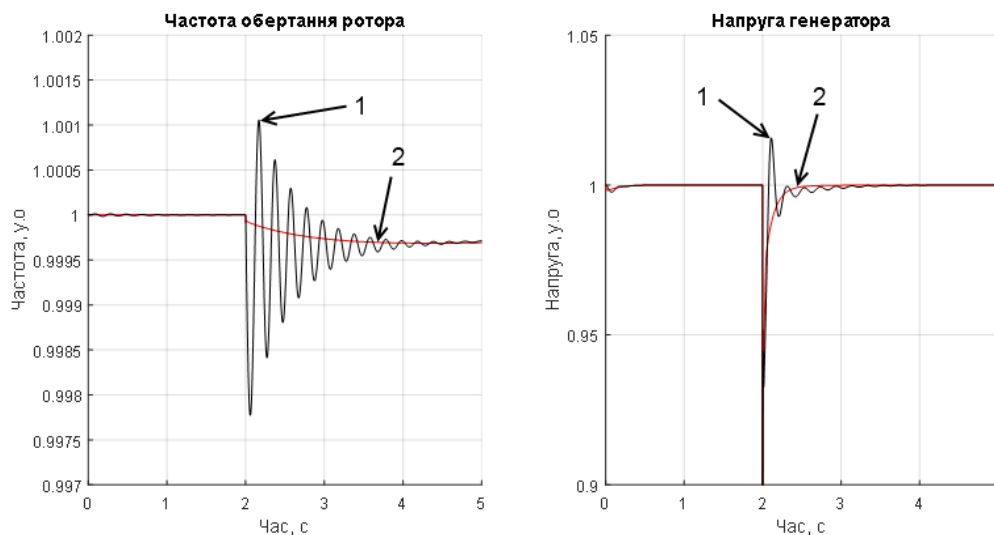


Рисунок 8 – Зміна напруги та частоти обертання ротора генератора при підвищенні навантаження (навантаження до 100% по повній потужності). 1) АРЗ та АРШ без ПЕ, 2) АРЗ і АРШ з ПЕ ( $T_p^{АРЗ}=1$ с,  $T_p^{АРШ}=0.1$ с)

З графіків на рис. 8-9 видно, що застосування прогностичного елемента, при тих самих налаштуваннях коефіцієнтів автоматичних регуляторів збудження та швидкості призводить до покращення якості та швидкості протікання перехідних процесів. Можна зробити висновок, що застосування ПЕ у складі АРЗ та АРШ підвищує якість регулювання та є придатним та ефективним для демпфування коливань та збуджень. Величина перерегулювання напруги генератора з АРЗ та АРШ без прогнозуючого елемента склало 46%, з прогнозуючим елементом зменшилось до 31%. Таким чином, використання ПЕ зменшує величину перерегулювання, що є важливим показником якості перехідного процесу.

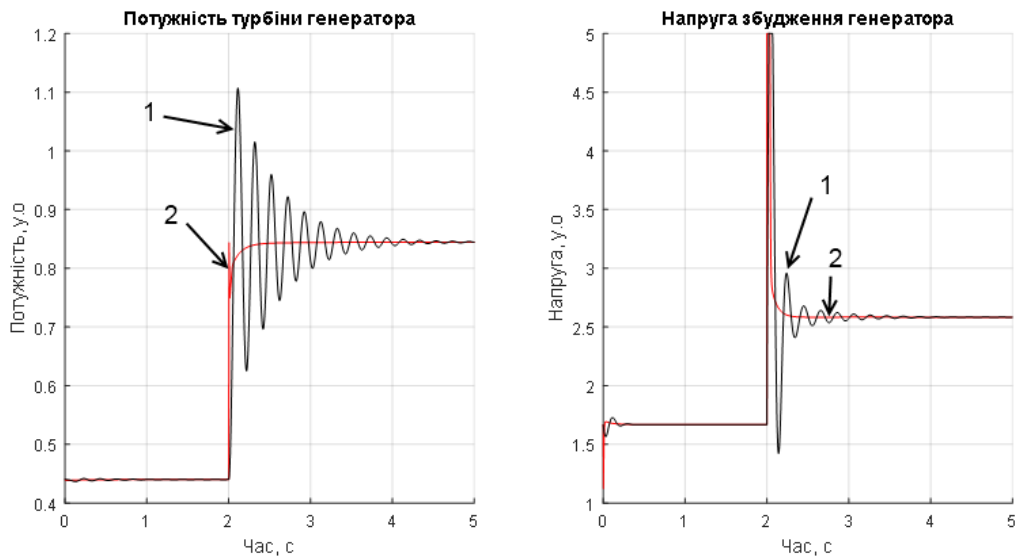


Рисунок 9 – Зміна потужності на валу та напруги збудження генератора. (навантаження до 100% по повній потужності) 1) АРЗ та АРШ без ПЕ, 2) АРЗ і АРШ з ПЕ ( $T_p^{АРЗ}=1\text{с}$ ,  $T_p^{АРШ}=0.1\text{с}$ )

На рис. 10 показано результати моделювання трьохфазного КЗ при різних значеннях часу прогнозу. Значення параметрів прогнозу відповідних кривих та чисельні характеристики перехідних процесів приведені в табл. 2.

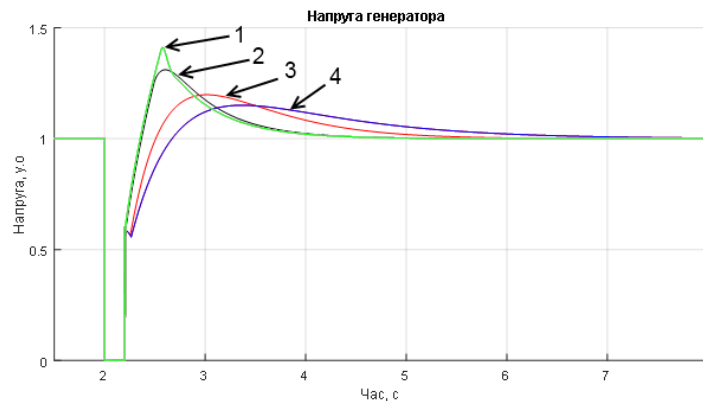


Рисунок 10 – Вплив величини часу прогнозу для АРЗ та АРШ на перехідний процес при трьохфазному КЗ.

Таблиця 2 – Вплив часу прогнозу на характеристики перехідних процесів

| № Кривої | $T_p^{АРЗ}$ , с | $T_p^{АРШ}$ , с | Перерегулювання, % | Час регулювання, с |
|----------|-----------------|-----------------|--------------------|--------------------|
| 1        | 0.01            | 1               | 41                 | 1.55               |
| 2        | 0.1             | 1               | 31                 | 1.65               |
| 3        | 0.5             | 2               | 20                 | 2.36               |
| 4        | 1               | 2               | 11,5               | 3.07               |

З приведених даних моделювання видно, що збільшення часу прогнозу як для пристрою АРЗ так і для АРШ підвищує час регулювання перехідного процесу, в той же час зменшуючи величину перерегулювання. Таким чином

можна дійти висновку, що зміна параметру часу прогнозу впливає на показники якості перехідного процесу. Також зрозуміло, що для різних режимів роботи агрегату РГ, як нормальних так і аварійних, можливо вибрати час прогнозу, що буде найбільш оптимально задовольняти необхідні критерії якості регулювання, такі як величина перерегулювання, час регулювання, тощо [8, 9].

**Висновки.** В роботі було описано принципи роботи прогностичних регуляторів для регуляції швидкості обертання турбіни та збудження синхронного генератора установки розподіленої генерації з метою покращення регуляційних якостей.

Для перевірки ефективності прогностичного алгоритму було створено модель агрегату РГ, що працює на базі СГ з автоматичними регуляторами збудження та швидкості і має швидкодіючу тиристорну систему збудження. Було створено відповідні моделі в пакеті Simulink програмного комплексу MATLAB. Виконано моделювання роботи установки.

Використання прогностичного елемента дозволяє отримати ряд переваг:

- покращення демпфування коливань при аварійних режимах роботи агрегату, підвищення стійкості системи управління та якості керування, можливість перетворення вихідної нестійкої САУ на стійку.
- можливість керувати установкою РГ без попереднього налаштування і узгодження параметрів АРЗ та АРШ, задаючи лише постійну часу прогнозу. Налаштування можливо провести після вводу установки в експлуатацію.

Розглянуті переваги прогностичних регуляторів дозволяють стверджувати про ефективність їх використання для установок розподіленої генерації.

#### **Перелік посилань**

1. Автоматизация энергетических систем / А.Д. Дроздов, А.С. Засыпкин, А.А. Аллилуев [и др.]. М.: Энергия, 1977. 440 с.
2. Барзам А.Б. Системная автоматика.// М.: Энергоатомиздат, 1989. 446 с.
3. Игнатъев И. В., Булатов Ю. Н. Модели и методы настройки систем регулирования возбуждения генераторов на основе экспериментальных данных.// Братск, 2016. 278 с.
4. Пикина Г. А. Принцип управления по прогнозу и возможность настройки систем регулирования одним параметром // Новое в российской электроэнергетике. № 3. 2014. С. 5-13.
5. Пикина Г. А., Кузнецов М. С. Прогностические типовые алгоритмы регулирования // Теплоэнергетика. № 4, 2011. С. 61-66.
6. Булатов Ю. Н., Крюков А. В., Нгуен Ван Хуан. Согласование настроек регуляторов паротурбинной установки распределенной генерации // Электроэнергетика глазами молодежи. В 3-х тт. Т. 3. Иркутск, 2019. С. 98-101.
7. Булатов Ю. Н., Крюков А.В., Нгуен Ван Хуан. Координация настроек автоматических регуляторов паротурбинной установки распределенной генерации // Вестник Иркутского государственного технического университета. Т. 24. № 1. 2020. С. 112–122.
8. Булатов Ю. Н., Крюков А. В., Нгуен Ван Хуан. Прогностические регуляторы для установок распределенной генерации // Системы. Методы. Технологии. № 1(29). 2016. С.63-69.
9. Нгуен Ван Хуан., Крюков А. В., Применение прогностических регуляторов для управления установками распределенной генерации // Иркутский государственный технический университет.2020. С.90-102.