

С. М. Балюта, д. т. н., проф.; Ю. В. Куєвда

## РОБАСТНІ СИСТЕМИ ВЗАЄМОЗВ'ЯЗАНОГО КЕРУВАННЯ ТУРБОГЕНЕРАТОРАМИ В УМОВАХ НЕВИЗНАЧЕНОСТІ

*Запропоновано метод синтезу робастного відносно параметрів робочого режиму регулятора для одномашинної електричної системи з турбогенератором. Синтезований регулятор виконує функції системного стабілізатора зі зменшення низькочастотних коливань, одночасно координуючи роботу автоматичних регуляторів збудження турбогенератора та частоти обертання турбіни.*

**Ключові слова:** турбогенератор, робастне керування, системний стабілізатор.

### Вступ

Під час роботи турбогенераторів в електроенергетичній системі виникають низькочастотні коливання валопроводів турбоагрегатів, зумовлені зміною навантаження, комутаціями в системі, несинхронними увімкненнями, короткими замиканнями тощо. Для забезпечення статичної та динамічної стійкості турбогенераторів застосовують автоматичні регулятори збудження (АРЗ) турбогенераторів та автоматичні регулятори частоти обертання турбіни (АРЧО) [2]. Завдання зменшення низькочастотних електромеханічних коливань турбогенератора бере на себе канал АРЗ за частотою напруги мережі або за частотою обертання ротора генератора. У зарубіжних АРЗ канал стабілізації частоти обертання ротора виносять в окремий логічний блок та називають системним стабілізатором (Power System Stabilizer – PSS). На практиці розповсюджене формування PSS як корекційної інтегродиференціальної ланки (lead-lag compensator) [6].

Загальна практика полягає в незалежності синтезу АРЗ та АРЧО. Проте у цих регуляторів є однакові канали регулювання, такі як частота обертання валопроводу турбоагрегата, тому незалежність у синтезі може негативно вплинути на їх сумісну роботу [1, 4]. Отже, постає завдання синтезу системи взаємозв'язаного керування турбоагрегатом, що одночасно коректує роботу АРЗ та АРЧО, основною метою якої буде виконання функцій системного стабілізатора.

Синтез системи керування збудженням і частотою обертання проводять на основі лінеаризованої моделі для обраних робочих точок. Синтезований таким чином регулятор може не забезпечувати достатньої якості керування та стійкості для всіх режимів. Крім того, існують інші джерела невизначеності моделі: неточні електромагнітні та механічні параметри турбогенераторів і турбін, нелінійна залежність параметрів від режимів унаслідок насичення або зміни активних опорів від температури тощо. Тому постає завдання перевірки робастності сучасних регуляторів і синтезу регуляторів із покращеними властивостями щодо робастності. Під робастністю в сучасній теорії управління розуміють властивість регулятора зберігати стійкість і якість управління за невизначеності параметрів об'єкта керування в деяких межах.

**Метою роботи** є розроблення методу синтезу робастного відносно параметрів режиму взаємозв'язаного в сенсі координації роботи АРЗ або АРЧО системного стабілізатора турбогенератора в електричній системі.

### Результати дослідження

Для дослідження застосовували спрощену математичну модель генератора, що підключений до електричної системи нескінченної потужності через зовнішній опір. Він моделює трансформатор та лінію електропередач. У моделі врахований АРЗ, що містить тільки канал регулювання за напругою. У схему на рис. 1 уведено лінеаризацію спрощеної моделі у фіксованому робочому режимі. Константи К1-К6, які отримують у процесі лінеаризації моделі турбогенератора з АРЗ, залежать як від параметрів турбогенератора та

електричної системи, так і від параметрів режиму. Явні вирази для цих констант наведено у [6].

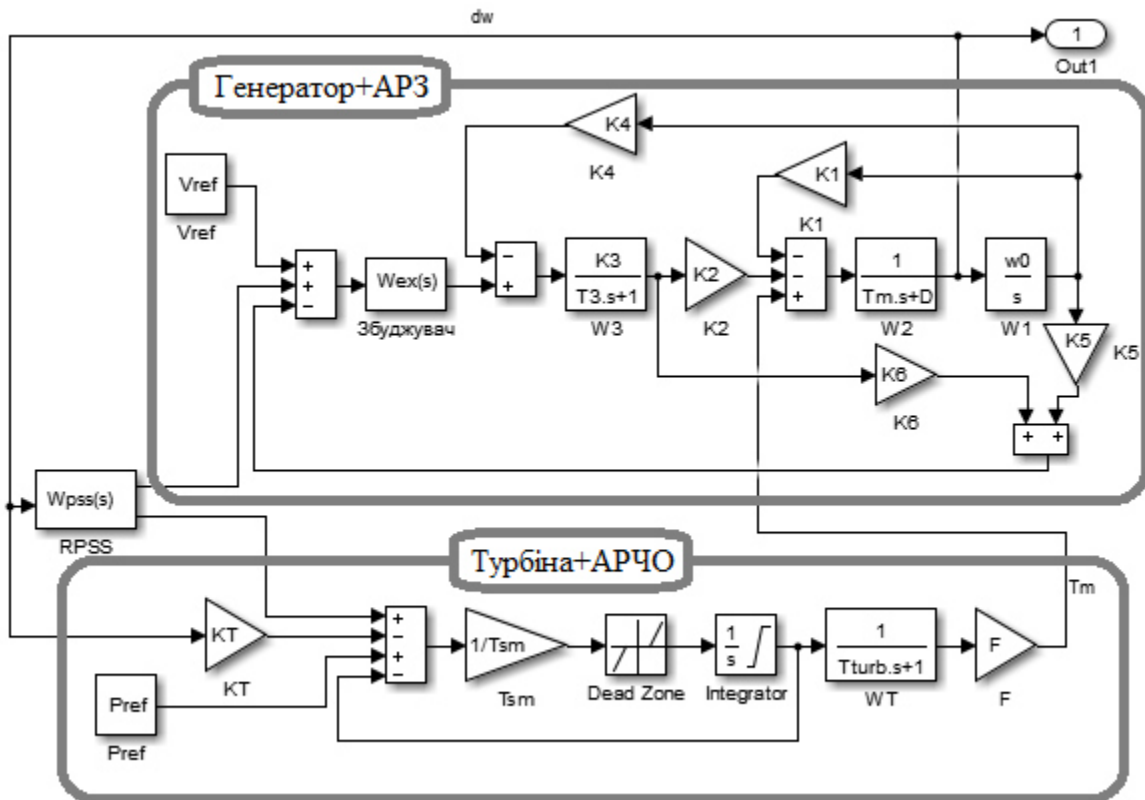


Рис. 1. Схема для синтезу системного стабілізатора

Також у нижній частині рис. 1 розміщено модель турбіни з АРЧО [2].

Блок робастного системного стабілізатора, який треба синтезувати, позначений на схемі як RPSS. Як видно з рисунка, системний стабілізатор діє одночасно і на АРЗ, і на АРЧО, координуючи генерування ними додаткового електромагнітного моменту та моменту турбіни, що протидіє електромеханічним коливанням валопроводу турбоагрегата.

За поданою на рис. 1 схемою можна представити модель об'єкта в просторі станів:

$$\begin{aligned} \dot{x} &= Ax + Bu + Gd \\ y &= Cx \end{aligned} \quad (1)$$

де  $x = (\Delta\theta \ \Delta\omega \ \Delta e'_q \ \Delta e'_f)^T$ ,  $u = (\Delta u_{ex} \ \Delta u_{turb})^T$ ,  $d = (\Delta V_{ref} \ \Delta Pref)^T$ ,  $y = (\Delta\omega)$ . Завдання – побудувати регулятор  $u=K(s)y$ , нечутливий до зміни робочої точки.

Робастний аналіз та синтез регулятора потребує вираження об'єкта регулювання у спеціальній формі моделі з невизначеностями [3]. Від адекватності цього вираження значною мірою залежить результат дослідження. Усі невизначеності залежно від форми представлення прийнято ділити на параметричні та частотні.

Серед усіх можливих невизначеностей, що виникають під час роботи турбогенератора в електричній системі, у цій роботі розглядатимемо такі, що виникають унаслідок лінеаризації моделі в одній, зазвичай номінальній, точці роботи генератора в електричній системі. Представимо такі невизначеності в параметричній формі, використовуючи наведені вище моделі генератора та турбіни з регуляторами [5].

Елементи матриць моделі залежать від коефіцієнтів, які у свою чергу залежать від параметрів режиму. Представимо їх у вигляді параметричних обмежень

$$K_i = \overline{K_i}(1 + m_i \cdot \delta_i), i = 1, 4, \tag{2}$$

де  $\overline{K_i}$  – це значення коефіцієнтів за номінальних умов роботи турбогенератора,  $m_i$  – деякі числа, а  $\delta_i$  – невизначеності, що за модулем обмежуються одиницею  $|\delta_i| \leq 1$ . Ці обмеження можна отримати, виходячи з формул коефіцієнтів.

Щоб використати алгоритм  $\mu$ -синтезу робастного регулятора, представляємо систему в М- $\Delta$  конфігурації за відомою методикою [3], як показано на рис. 2. Ця процедура називається дробово-лінійним перетворенням та виділяє всі невизначеності в окремий блок. На схемі рис. 2 Р – це номінальний лінеаризований об’єкт, К – регулятор, що синтезується, разом вони складають блок М(Р, К), а  $\Delta$  – матрична передавальна функція обмеженої системи невизначеностей, така що  $\|\Delta\|_\infty \leq \beta$ , де  $\|\cdot\|_\infty$  називається  $H_\infty$ -нормою:

$\|W(s)\|_\infty = \sup_{\omega \in R} \|W(j\omega)\|_2$ ,  $\|\cdot\|_2$  – спектральна норма матриці, яка дорівнює найбільшому її сингулярному числу  $\overline{\sigma}$ . Матрицю невизначеностей моделі можна структурувати, тобто

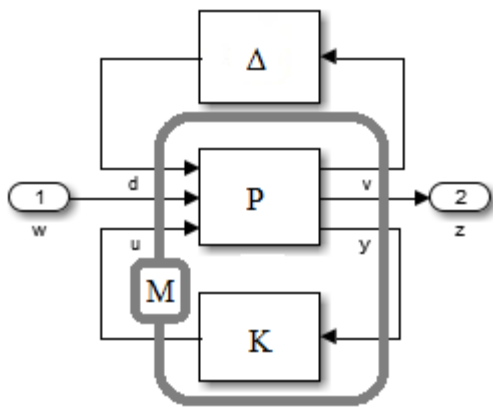


Рис. 2. Стандартна М- $\Delta$  конфігурація з регулятором К

представити у вигляді  $\Delta = \text{diag}[\delta_1 I_{r_1}, \dots, \delta_s I_{r_s}, \Delta_1, \dots, \Delta_f]$ ,  $\delta_i \in C$ ,  $\Delta_j \in C^{m_j \times m_j}$ , де перша частина відповідає за параметричні невизначеності, а друга – за частотні. У нашій моделі будуть тільки параметричні невизначеності, що відповідають параметрам К1-К6. Позначимо множину таких структурованих матриць для цієї моделі об’єкта через  $\Omega$ .

У теорії  $\mu$ -синтезу вводять поняття структурного сингулярного числа  $\mu_\Delta(M)$ :

$$\mu_\Delta(M) = \left[ \min_{\Delta \in \Omega} \{\overline{\sigma}(\Delta) : \det(I - M\Delta) = 0\} \right]^{-1},$$

відповідно  $\mu_\Delta(M(s)) = \sup_{\omega} \mu_\Delta(M(j\omega))$ . Можна довести, що система з невизначеністю  $\Delta \in \Omega$

за  $\|\Delta\|_\infty \leq \beta$  робастно стійка тоді й лише тоді, коли  $\mu_\Delta(M(s)) \leq 1/\beta$ . Виходячи з цього твердження, можна сформулювати алгоритм  $\mu$ -синтезу.

Ціллю  $\mu$ -синтезу є знаходження такого регулятора К(s), який мінімізує  $\mu_\Delta(M(s))$ . Прямого алгоритму знаходження розв’язку такої задачі не існує, але її можна переформулювати у відповідну задачу  $H_\infty$ -оптимізації, для якої існує процедура розв’язання. Цей метод називається D-К-ітераціями. Для множини константних матриць D такої ж структури, як і  $\Delta$ , можна показати, що виконується така нерівність  $\mu_\Delta(M(s)) \leq \inf_D \|DM(P, K)D^{-1}\|_\infty$ . Але для кожної фіксованої матриці D задача

$\inf_{K(s)} \|DM(P, K)D^{-1}\|_\infty$  є стандартною задачею  $H_\infty$ -оптимізації. Тому процедура D-К-ітерацій,

що розв’язує задачу  $\mu$ -синтезу, має такий вигляд:

1. Задають початкове значення D, зазвичай одиничну матрицю;
2. Фіксують D та розв’язують задачу  $\inf_{K(s)} \|DM(P, K)D^{-1}\|_\infty$   $H_\infty$ -оптимізації для К;
3. Фіксують К та знаходять  $D(j\omega)$  таку, щоб вона апроксимувала знайдений на обраній

сітці частот  $\omega_i, i = \overline{1, N}$  чисельний розв'язок задач  $\inf_{D_i} \|D_i M_i D_i^{-1}\|_2$ , де  $D_i = D(j\omega_i)$ ,  $M_i = M(j\omega_i)$ . Далі переходять до пункту 2 доти, доки не досягнуть достатньої точності.

Однак варто зазначити, що цей алгоритм не завжди збігається, а якщо збігається, то дає іноді завищену оцінку для  $\mu_A(M(s))$ .

Як правило, знайдений вигляд регулятора  $K(s)$  має високий порядок, у цьому полягає особливість  $\mu$ -синтезу. Для пониження порядку регулятора можна використати метод Шура.

У програмному середовищі MATLAB Simulink із використанням бібліотеки Robust Control Toolbox авторами розроблено програмний комплекс для реалізації запропонованого методу синтезу регулятора, дослідження його характеристик та впливу у штатних та аварійних режимах за різних конфігурацій електричної системи. Комплекс складається з модуля синтезу та аналізу робастного регулятора за спрощеною моделлю турбогенератора та електричної системи та модуля тестування перехідних процесів із використанням цього регулятора на повній моделі системи з використанням бібліотеки Simulink SimPowerSystems. У модулі тестування реалізована можливість моделювання перехідних процесів із такими опціями: одномашинна/багатомашинна система, приймальна система нескінченної потужності/обмеженої потужності, режими успішних/неуспішних симетричних/несиметричних коротких замикань з автоматичним повторним увімкненням, накиду навантаження, несинхронного увімкнення турбогенератора в систему.

#### Висновки

Запропонований підхід до синтезу регулятора, на відміну від стандартних системних стабілізаторів, дозволяє забезпечити робастність системи відносно параметрів режиму та врахувати взаємозв'язок між АРЗ та АРЧО. Застосований алгоритм  $\mu$ -синтезу дозволяє забезпечити не тільки робастну стійкість, а й найкращу в заданих умовах невизначеності робастну якість керування. Алгоритм  $\mu$ -синтезу реалізовано розробниками в пакеті MATLAB, тому для виконання процедур, що описані вище, можна застосувати функції бібліотеки Robust Control Toolbox. Ця можливість дозволяє автоматизувати перетворювання досліджуваної моделі в потрібну форму та процес синтезу робастного регулятора.

#### СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Синергетическое управление нелинейными электромеханическими системами / [Колесников А. А., Веселов Г. Е., Попов А. Н. и др.] ; – М. : Испо-Сервис, 2000. – 248 с.
2. Меркурьев Г. В. Устойчивость энергосистем. Расчеты : Монография / Г. В. Меркурьев, Ю. М. Шаргин. – СПб. : НОУ "Центр подготовки кадров энергетики", 2006. – 300 с.
3. Поляк Б. Т. Робастная устойчивость и управление / Б. Т. Поляк. – М. : Наука, 2002. – 303 с.
4. Электрические системы. Управление переходными режимами электроэнергетических систем / [под ред. В. А. Веникова]. – М. : Высшая школа, 1982. – 247 с.
5. Gu Da-Wei. Robust Control Design with MATLAB® / Da-Wei Gu, Petko H. Petkov, Mihail M. Konstantinov. – London : Springer, 2013. – 491 p.
6. Kundur P. Power System Stability and Control / P. Kundur. – М. : Mc Graw-Hill, 1994. – 1176 p.

Рекомендована кафедрою електропостачання та енергоменеджменту НУХТ.

**Балюта Сергій Миколайович** – д. т. н., професор, завідувач кафедри електропостачання та енергоменеджменту, e-mail: epp2011@ukr.net;

**Кувьда Юлія Валеріївна** – асистент кафедри електропостачання та енергоменеджменту, e-mail: julia@kuevda.com.

Національний університет харчових технологій.