

**Е. Н. Никулина**, кандидат технических наук, доцент,  
Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт»  
**В. П. Северин**, доктор технических наук, профессор,  
Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт»  
**Н. В. Коцюба**, аспирантка,  
Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт»

## ИДЕНТИФИКАЦИЯ И АНАЛИЗ УСТОЙЧИВОСТИ КОНТУРОВ АВТОМАТИЧЕСКОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ ЭНЕРГОБЛОКОВ АЭС С РЕАКТОРАМИ ВВЭР-1000

**Аннотация.** На основании результатов натурных испытаний выполнена идентификация параметров объектов регулирования энергоблоков с реакторами ВВЭР-1000. Построены математические модели систем автоматического регулирования для энергоблоков и проведено обоснование устойчивости контуров регулирования.

**Ключевые слова:** математическая модель, идентификация параметров, регулятор, система автоматического регулирования, устойчивость, энергоблок ВВЭР-1000.

**Постановка проблемы.** Автоматическое регулирование является одной из основных управляющих функций АСУ ТП энергоблоков АЭС с реакторами ВВЭР-1000, от реализации которой зависят безопасность и качество технологических процессов, а также срок службы энергетического оборудования [1]. В большинстве систем автоматического регулирования (САР) энергоблока применяются пропорционально-интегральные (ПИ) регуляторы, формирующие законы регулирования на основании ошибки управляемой переменной и ее интеграла. При внедрении и модернизации САР энергоблоков первостепенной задачей, связанной с обеспечением безопасности эксплуатации АЭС, является обоснование устойчивости всех контуров автоматического регулирования [2]. Такое обоснование возможно провести только на основании реальных характеристик оборудования энергоблоков путем идентификации параметров САР методами оптимизации [1, 3]. При этом целесообразно использовать результаты натурных испытаний контуров регулирования, полученные ООО «НПО Монолит Энерго» (г. Харьков) при наладке регуляторов энергоблоков АЭС с реакторами ВВЭР-1000. Целью данного доклада является представление результатов идентификации параметров и обоснования устойчивости контуров регулирования с ПИ регуляторами для энергоблоков АЭС с реактором ВВЭР-1000.

**Задачи исследования.** Для достижения намеченной цели поставлены следующие задачи. 1. Разработать методику идентификации параметров объектов регулирования на основании экспериментальных переходных процессов. 2. Разработать методику анализа устойчивости контуров регулирования с вычислением степени устойчивости САР и определением границ области устойчивости. 3. Построить математические модели контуров регулирования энергоблока АЭС с реактором ВВЭР-1000. 4. Выполнить идентификацию параметров объектов регулирования. 5. Провести анализ устойчивости контуров регулирования энергоблоков с реакторами ВВЭР-1000 при изменении параметров ПИ регуляторов.

**Суть исследования.** Приведены требования к устойчивости контуров регулирования энергоблоков АЭС с реакторами ВВЭР-1000, проанализированы методы анализа устойчивости САР и методы оптимизации. Для разработки и исследования методов идентификации и анализа устойчивости контуров автоматического регулирования АЭС на основе методов оптимизации построены общие математические модели контуров регулирования энергоблока АЭС с ПИ регуляторами. Задача идентификации объектов регулирования сведена к вычислению коэффициентов передаточных функций объектов путем минимизации среднеквадратического отклонения экспериментальных и теоретических переходных процессов в контурах регулирования с ПИ регуляторами. Приведены алгебраические критерии устойчивости, позволяющие судить об устойчивости линейной САР по коэффициентам ее характеристического уравнения. Рассмотрены требования к САР по ее реализации и устойчивости. Для идентификации САР определена векторная целевая функция, позволяющая учитывать все требования, предъявляемые к процессам регулирования. Модифицированы методы прямого поиска для оптимизации векторной целевой функции. На

тестовых САР исследована эффективность моделей и методов идентификации. Разработаны метод анализа степени устойчивости и метод вычисления границ области устойчивости для САР. Для различных тестовых примеров САР исследована эффективность методов анализа устойчивости.

По результатам натурных испытаний контуров регулирования энергоблоков 1 и 2 Балаковской АЭС с реакторами ВВЭР-1000, проведенных при наладке регуляторов, выполнена идентификация коэффициентов передаточных функций объектов регулирования: деаэраторов блоков 1 и 2 по сигналам наладки регуляторов уровня и давления; конденсатора по сигналам наладки регуляторов уровня; главных паровых коллекторов по сигналам наладки регуляторов давления; коллектора собственных нужд по сигналам наладки регуляторов давления; турбопитательных насосов по сигналам наладки регуляторов производительности, частоты и расхода питательной воды; подогревателей низкого давления по сигналам наладки регуляторов уровня; сепараторов пароперегревателей по сигналам наладки регуляторов уровня; подогревателей высокого давления по сигналам наладки регуляторов уровня. По математическим моделям объектов регулирования проведен анализ устойчивости контуров регулирования для следующих энергетических объектов: деаэраторов блоков 1 и 2 с регуляторами уровня и давления; конденсатора с регуляторами уровня; главных паровых коллекторов с регуляторами давления; коллектора собственных нужд с регуляторами давления; турбопитательных насосов с регуляторами производительности, частоты и расхода питательной воды; подогревателей низкого давления с регуляторами уровня; сепараторов пароперегревателей с регуляторами уровня; подогревателей высокого давления с регуляторами уровня. Таким образом, обоснована устойчивость всех рассмотренных контуров регулирования для энергоблоков с реакторами ВВЭР-1000 при изменении параметров ПИ регуляторов.

**Выводы.** По результатам натурных испытаний выполнена идентификация параметров объектов регулирования и построены математические модели контуров регулирования для двух энергоблоков Балаковской АЭС с реакторами ВВЭР-1000. Близость параметров передаточных функций объектов регулирования для деаэраторов блоков 1 и 2 показывает, что одинаковое энергетическое оборудование различных энергоблоков АЭС с реакторами ВВЭР-1000 имеет близкие значения параметров объектов регулирования, поэтому для остальных объектов регулирования проведена идентификация только для оборудования одного энергоблока. Разработанные математические модели и методы идентификации и анализа устойчивости САР атомных электростанций, а также результаты идентификации и анализа устойчивости контуров регулирования энергоблока АЭС с реактором ВВЭР-1000 рекомендуются для исследования других систем регулирования энергоблоков на Южно-Украинской, Ровенской, Хмельницкой, Запорожской АЭС.

#### Литература

1. Северин В. П., Никулина Е. Н., **Трубчанова Н. В.** Идентификация параметров системы регулирования производительностью парогенератора энергоблока АЭС. Вісник НТУ «ХПИ». 2016. № 15 (1187). С. 38–44.
2. Северин В. П., Никулина Е. Н., Чернай В. Ф. Анализ алгоритмов алгебраического критерия устойчивости систем автоматического регулирования. Вестник НТУ «ХПИ». 2004. № 4. С. 121–125.
3. Северин В. П., Чернай В. Ф., Никулина Е. Н. Компьютерная лаборатория методов оптимизации автоматизированных систем. Вестник НТУ «ХПИ». 2005. № 45. С. 270–273.