УДК681.51

Д.И. СУРЖИК, Р.В. РОМАНОВ, Г.С. ВАСИЛЬЕВ

D.I. SURZHIK, R.V.ROMANOV, G.S. VASILIEV

**АЛГОРИТМЫ АНАЛИЗА УСТОЙЧИВОСТИ АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ ГЕОТЕХНИЧЕСКОГО КОНТРОЛЯ**

**ALGORITHMSOFTHEANALYSISOFTHESTABILITY OF THE AUTOMATED SYSTEM OF GEOTECHNICAL CONTROL**

*В статье рассмотрены алгоритмы анализа устойчивости линейных и нелинейных автоматизированных систем геотехнического мониторинга. Их основными этапами является ввод коэффициентов частотно-зависимой части передаточной функции системы; определение условия устойчивости, его линеаризация с помощью аппроксимации на основе непрерывных кусочных функций и решение; исключение из решения "ложных" корней; выделение граничных значений искомого частотно-независимого коэффициента и формирование области устойчивости. Предложенные алгоритмы анализапараметрической устойчивости обладают простотой получаемых аналитических выражений, наглядностью и высокой степенью точности описания аппроксимируемых характеристик.*

*Ключевые слова: геотехнический мониторинг, автоматизированные системы, устойчивость, критерий Найквиста, критерий Попова, аппроксимация на основе непрерывных кусочных функций.*

*In the article algorithms of analysis of stability of linear and nonlinear automated systems of geotechnical monitoring are considered. Their main stages are determination the input of the coefficients of the frequency-dependent part of the transfer function of the system; determination of the stability condition, its linearization by means of approximation on the basis of continuous piecewise functions, and a solution; exclusion of "false" roots from the solution; the separation of the boundary values ​​of the desired frequency-independent coefficient and the formation of the stability region. The proposed algorithms for analyzing parametric stability have the simplicity of the analytical expressions obtained, the clarity and high degree of accuracy of the description of the approximated characteristics.*

*Key words: geotechnical monitoring, automated systems, stability, Nyquist's criterion, Popov's criterion, approximation on the basis of continuous piecewise functions.*

В настоящее время для контроля технического состояния сооружений (и их грунтовых оснований) в условиях воздействий дестабилизирующих факторов различного происхождения активно применяются всевозможные методы неразрушающего контроля, реализуемые на базе автоматизированных систем геотехнического мониторинга[1-4]. Использование данных систем позволяет в режиме реального времени оценивать как динамику надежности, так и текущее состояние объектов мониторинга, своевременно выявлять дефекты и начальные стадии процессов разрушения, а также осуществлять их оперативное прогнозирование на основе накопленных априорных данных.

Аппаратные части современных автоматизированных систем геотехнического контроля реализуются на основе принципов теории автоматического управления и могут содержать одну или несколько петель обратной связи (общую и местные). В связи с этим одним из важнейших факторов, определяющих эффективность работы таких систем, является устойчивость. Данная характеристика позволяет оценить пределы допустимых отклонений параметров функциональных звеньевпроизвольной автоматизированной системы геотехнического контроля.

В общем случае произвольная автоматизированная система с обратными связями будет считаться устойчивой, если все корни характеристического полинома ее передаточной функции имеют отрицательную вещественную часть и будет считаться находящейся на границе устойчивости, если полином имеет хотя бы один чисто мнимый корень (при этом вещественные части других корней должны быть отрицательными) [5-7].

Авторами предложено два алгоритма анализа устойчивости произвольной автоматизированной системы геотехнического мониторинга - рис. 1. Первый основан на частотном критерии Найквиста и применим для анализа линейных систем, второй - на частотном критерии Попова и предназначен для анализа систем с нелинейными характеристиками функциональных звеньев. Данные алгоритмы используют передаточную функцию системы и функциональную аппроксимацию на основе непрерывных кусочных функций (НКФ).



а) б)

Рисунок 1 - Алгоритмы анализа устойчивости произвольной линейной (а) и нелинейной (б) автоматизированной системы геотехнического мониторинга

Алгоритм анализа устойчивости произвольной замкнутой линейной автоматизированной системы геотехнического мониторинга (рис. 1а) основан на анализе характеристических полиномов знаменателей ее передаточной функции, которые в случае наличия отрицательной обратной связи в операторной форме определяются в соответствии с выражением

, (1)

где *N*– частотно-независимый коэффициент передачи разомкнутой петли обратной связи, *М*(*р*) – частотно-зависимаячасть коэффициента передачи разомкнутой петли обратной связи, *р*=*d*/*dt* – оператор Лапласа.

При произвольной конфигурации и порядке частотно-зависимой части (1), комплексный коэффициент передачи *М*(*р*)в частотной области можно представить как

, (2)

где *I* – порядок *М*(*р*), *αi*, *βi* – коэффициенты (вводятся на первом шаге алгоритма).

Из (1) следует, что система будет устойчива, если мнимая часть (2) на критических частотах *ωk*будет равна нулю, т.е.

, (3)

где *k* – номер корня.

Подстановкамнимой составляющей комплексной передаточной функции (2) в условие устойчивости (3), позволяет получить общее выражение характеристического полинома, принимающего различные значения в зависимости от вводимых коэффициентов *αi* и*βi*(шаг 2 алгоритма)

 (4)

Для нахождения корней данного полинома, общее решение которого отсутствует, произведено обозначение его левой части как функции частоты и последующая аппроксимация на основе переключающих НКФ[8-10]. При этом результирующие корни определяются как точки пересечения аппроксимирующих прямых с осью абсцисс (шаг 3 алгоритма). Для выделения из множества значений получаемых критических частот *ωk* "истинных" на четвертом этапе алгоритма осуществляется фильтрация "ложных" корней умножением каждого корня (4) на включающую НКФ [8].

Согласно выражению (1), очевидно, что "истинным" значениям частотно-независимого коэффициента передаточной функции автоматизированной системы геотехнического мониторинга для каждого "истинного" корня соответствуют значения (шаг 5 алгоритма)

. (5)

Выбор одного отрицательного и одно положительного значения (5), ближайших к нулю (соответствует случаю системы без обратных связей), позволяет определить граничные значения частотно-независимого коэффициента системы (шаг 6 алгоритма), ограничивающих область допустимых значений, при установке которых данная линейная система находится в устойчивом состоянии (шаг 7 алгоритма).

Далее рассмотрим алгоритм анализа устойчивости произвольной замкнутой нелинейной автоматизированной системы геотехнического мониторинга (рис. 1б).Согласно критерию Попова для абсолютной устойчивости положения равновесия нелинейной системы с устойчивой линейной частью достаточно существования действительного коэффициента *g*, для которого выполняется условие

, (6)

где *z* – угол абсолютной устойчивости, наибольшее и наименьшее значения которого определяют граничные значения области устойчивой нелинейной системы.

Выделивв комплексной передаточнойфункциичастотно-зависимой части передаточной функции системы действительную и мнимую части  (шаг 2 алгоритма) и введя модифицированную комплексную передаточную функцию (где ) получено достаточное условие абсолютной устойчивости, которое для граничных значений частотно-независимого коэффициента системы принимает вид уравнения прямой Попова

. (7)

Для устранения нелинейности левой части (7) при наличии двух неизвестных параметровиспользуется аппроксимация частотно-зависимых составляющих (7) на основе НКФ [8] - шаг 3 алгоритма.

На четвертом этапе алгоритма получается множество коэффициентов (по аналогии с предыдущим алгоритмом), устранение "ложных" из которых также осуществляется применением аппроксимации на основе включающих НКФ (шаг 5 алгоритма)

Выбор одного отрицательного и одного положительного значений "истинных" коэффициентов (7), ближайших к нулю, позволяет определить граничные значения угла абсолютной устойчивости*z*(шаг 6 алгоритма) и, следовательно, область устойчивости (шаг 7 алгоритма).

Предложенные алгоритмы на основе частотных критериев Найквиста и Попова позволяют исследоватьпараметрическую устойчивостьлинейных и нелинейных автоматизированных систем геотехнического мониторинга произвольного порядка. За счет применения линеаризации различных характеристик на основе переключающих и включающих НКФ они обладают простотой получаемых аналитических выражений, наглядностью и высокой степенью точности описания аппроксимируемых характеристик.

**Благодарности**

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ №18-48-310025р\_а.

**СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. S.N. Savin Modern methods of technical diagnostics of building structures of buildings and structures. SPb .: RDK-print, 2000.
2. N. Martins, E. Caetano, S. Diord, F. Magalhaes, A. Cunha Dynamic monitoring of a stadium roof. // Engineering Structures. 2014. Vol. 59 - P. 80-94.
3. Долматов Б.И. Механика грунтов, основания и фундаменты. – 2-е изд. – Л.: Стройиздат, Ленингр. отд-ние, 1988. – 415 с.
4. Болдырев, Г.Г. Геотехнический мониторинг / Г.Г. Болдырев, А.А. Живаев // Инженерные изыскания. - №8. – 2013. –С.40-45.
5. Душин, С.Е. Теория автоматического управления: Учеб.для вузов / С.Е. Душин. - М.: Высшая школа, 2003. - 567 с.
6. Бессекерский, В.А. Теория систем автоматического регулирования / В.А. Бессерский. – М.: Наука, 1975. – 768с.
7. Акимов, В.Н. Системы фазовой синхронизации / В.Н. Акимов, Л.Н. Белюстина, В.Н. Белых и др.; под ред. В.В. Шахгильдяна, Л.Н. Белюстиной. – М.: Радио и связь,1982. – 288 с.
8. Курилов, И.А. Методы анализа радиоустройств на основе функциональной аппроксимации / И.А. Курилов, В.В. Ромашов, Е.А. Жиганова, Д.Н. Романов, Г.С. Васильев, С.М. Харчук, Д.И. Суржик // Радиотехнические и телекоммуникационные системы. – 2014. – № 1. – С. 35-49.
9. Курилов, И.А. Исследование устойчивости преобразователя сигналов на основе непрерывных кусочно-линейных функций / И.А. Курилов, Г.С. Васильев, С.М. Харчук, Д.И. Суржик // Радиотехнические и телекоммуникационные системы.– №1. – 2012. – С. 4-7.
10. Курилов, И.А. Исследование параметрической устойчивости системы ФАПЧ на основе непрерывных кусочно-линейных функций /И.А. Курилов, Д.И.Суржик, Г.С.Васильев, С.М.Харчук // 2013 InternationalSiberianConferenceonControlandCommunications (SIBCON). Krasnoyarsk: Siberian Federal University. Russia, Krasnoyarsk, September 12−13. - 2013. – IEEE Catalog Number: CFP13794-CDR.

**Суржик Дмитрий Игоревич**

ФГБОУ ВО «Владимирский государственный университет имени А.Г. и Н.Г. Столетовых», г. Владимир

К.т.н., доцент кафедры «Управление и контроль в технических системах»

Тел.: +7(919) 007-48-66

E-mail: [arzerum@mail.ru](mailto:arzerum@mail.ru)

**Романов Роман Вячеславович**

ФГБОУ ВО «Владимирский государственный университет имени А.Г. и Н.Г. Столетовых», г. Владимир

К.т.н., доцент кафедры «Управление и контроль в технических системах»

Тел.: +7 (904) 592-65-42

E-mail: romanov.roman.5@yandex.ru

**Васильев Глеб Сергеевич**

НИУ «БелГУ», г. Белгород

К.т.н., лаборант-исследователь

Тел.: +7 (915) 751-66-47

E-mail: vasilievgleb@yandex.ru