МРНТИ 50.47.31
УДК 62-50 **DOI 10.70239/arsu.2025.t79.n1.05**

ИССЛЕДОВАНИЕ УСТОЙЧИВОСТИ СИСТЕМ ТРАНСПОРТИРОВКИ НЕФТИ И ГАЗА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ КРИТЕРИЯ МИХАЙЛОВА

КАЛИЕВА А.А.*, НАУРЫЗОВА К.Ш., ТОКСАНБАЕВА Б.А., ОРАЗБЕК А.А.

***Калиева Айман Акниеткызы** - магистр технических наук, старший преподаватель, Актюбинский региональный университет имени К. Жубанова, г. Актобе, Казахстан
E-mail: akaliyeva@zhubanov.edu.kz, https://orcid.org/0009-0009-2391-4220
Наурызова Кулжамал Шариповна - кандидат технических наук, доцент, Актюбинский региональный университет им. К. Жубанова, г. Актобе, Казахстан
E-mail: nauryzova61@mail.ru, https://orcid.org/0009-0008-0146-5287
Токсанбаева Бакытгул Айтбаевна - магистр технических наук, старший преподаватель, Актюбинский региональный университет имени К. Жубанова, г. Актобе, Казахстан
E-mail: Bakit-toksan@mail.ru, https://orcid.org/0009-0002-7599-6351
Оразбек Аян Абзалбекулы - магистр технических наук, старший преподаватель, Актюбинский региональный университет имени К. Жубанова, г. Актобе, Казахстан
E-mail: a.orazbek687@mail.ru, https://orcid.org/0009-0008-3928-6372

Аннотация. Статья посвящена исследованию устойчивости систем транспортировки нефти и газа с использованием критерия Михайлова. В условиях современного энергетического рынка, обеспечивающего безопасность и эффективность транспортировки углеводородов, устойчивость систем играет ключевую роль. Анализ устойчивости является важной частью проектирования и эксплуатации трубопроводных и насосных станций, систем регулирования давления и других элементов инфраструктуры. Критерий Михайлова, основанный на теории линейных динамических систем, предоставляет мощный инструмент для оценки устойчивости таких систем, позволяя выявить потенциальные риски и обеспечить надежную эксплуатацию. В статье рассматриваются теоретические основы критерия, его применение для анализа передаточных функций в системах транспортировки нефти и газа, а также его роль в предотвращении аварий и повышении эффективности работы. Применение этого критерия в контексте транспортировки нефти и газа помогает выявить потенциальные угрозы на ранних стадиях эксплуатации, что позволяет своевременно принимать меры для предотвращения аварийных ситуаций и повышения эффективности работы трубопроводных систем. В результате исследования можно оптимизировать параметры системы и повысить её устойчивость к возможным отклонениям и внешним возмущениям. Описаны примеры практического применения метода для оценки устойчивости в реальных условиях эксплуатации, а также рассмотрены вызовы и перспективы дальнейших исследований в данной области. Статья направлена на развитие методов оценки устойчивости, которые способствуют повышению надежности и безопасности транспортировки углеводородов.

Ключевые слова: полином, амплитуда, частота, стабильность, корни, фаза, спектр, насосная станция, транспортировка нефти и газа.

Введение. В области теории управления и анализа динамических систем устойчивость является одной из важных характеристик, определяющих способность системы работать при различных внешних воздействиях и изменениях внутренних параметров. Проблема устойчивости систем возникает во многих областях техники, таких как автоматизированное управление, робототехника, электроника, авиация и космонавтика, где необходимо гарантировать стабильное и безопасное поведение систем в процессе их эксплуатации.

Надежные системы обеспечивают надежную и предсказуемую работу даже в условиях внешних возмущений или изменений внутренних параметров. И наоборот, нестабильные системы могут привести к неприятным или опасным последствиям, таким как вибрация, разрушение конструкции или отказ устройства управления. Поэтому важно определить устойчивость системы на этапе проектирования и анализа, а также предложить методы улучшения этой характеристики.

Существует множество методов анализа устойчивости динамических систем. Одним из наиболее распространенных и эффективных является критерий Михайлова, позволяющий исследовать устойчивость линейных систем с постоянными коэффициентами. Этот критерий был назван в честь советского учёного Ю.С. Михайлова, который в середине 20 века предложил его как метод исследования устойчивости систем, основанный на расположении корней их характеристических уравнений в комплексе. самолет. Основное преимущество критерия Михайлова состоит в том, что он не требует решения характеристического уравнения, что делает его удобным и простым инструментом системного анализа. [1, 32]

Основная задача критерия Михайлова — проверка устойчивости системы, т. е. определение того, стремятся ли ее решения, полученные на основе дифференциальных уравнений, к нулю или к какому-то устойчивому состоянию с течением времени. Для этого используется специальный метод анализа, позволяющий оценить, где расположены корни характеристического уравнения системы, и определить, находятся ли эти корни в левой или правой полуплоскости комплексной плоскости. Если все корни лежат в левой полуплоскости, система считается устойчивой; если хотя бы один корень находится в правой полуплоскости, система неустойчива [2, 102].

Критерий Михайлова позволяет не только эффективно оценивать устойчивость системы, но и быстро проводить анализ в реальном времени, что делает его особенно полезным при проектировании систем автоматического управления, а также в быстро меняющихся задачах.

Необходимо оценить устойчивость, например, в авиации или космонавтике. Его использование особенно важно для таких типов систем, как системы с задержками, системы с обратной связью и системы с нелинейными элементами, которые очень сложно анализировать традиционными методами. [3, 167]

Одним из важных аспектов применения критерия Михайлова является то, что он позволяет получить информацию о типе устойчивости системы - например, о ее асимптотической или строгой устойчивости. Это может быть полезно в различных областях техники, где важно не только знать, устойчива ли система, но и знать, как быстро она возвращается в устойчивое состояние после воздействия внешнего воздействия.

Критерий Михайлова — один из важнейших методов исследования устойчивости динамических систем. Этот критерий оценивает устойчивость системы с линейными и постоянными параметрами на основе характеристического уравнения системы.

Чтобы убедиться, что все работает вместе, мы сначала находим специальное уравнение, которое поможет нам понять систему. Это конкретное уравнение имеет ответы, которые показывают, насколько стабильны вещи [4,58].

Амплитудно-фазовая диаграмма Михайлова помогает нам определить, где находятся определенные критические точки, без необходимости выполнять сложные математические вычисления, чтобы их найти. Вместо того, чтобы искать ответы напрямую, мы можем использовать особый способ размышления о проблеме, связанной с буквой «j» и буквой «ω». Это поможет вам понять, как работает система!

Теперь буква j — специальный помощник для наших блоков, и она делает кое-что забавное: когда мы возводим ее в квадрат (умножаем на себя), она дает нам -1, как по волшебству! Представьте, что вы строите огромную башню из блоков. Каждый блок имеет специальный номер, указывающий высоту этой части башни. P представляет всю башню, а a_0, a_1 и т. д. небольшие числа, такие как высота каждого блока, который вы используете для его построения. Итак, когда мы сложим все это вместе, мы получим отличную формулу, которая говорит нам, что высота нашей башни равна высоте каждого блока и скорости их движения! Буква ω указывает, насколько быстро движутся блоки или как часто они поднимаются и опускаются, как будто прыгают на батуте.

Когда мы меняем ω с 0 на очень-очень большое (например, переход от 0 до бесконечности),

мы создаём особую картину, называемую диаграммой Михайлова. Это изображение создается на так называемой комплексной плоскости, которая похожа на большую карту чисел как по размеру, так и по направлению.

Чтобы все работало хорошо и не вышло из-под контроля, мы должны следовать специальному правилу с картинкой, которая называется диаграммой Михайлова. Для поддержания стабильности необходимо соблюдать определенные требования.

Кроме того, нам разрешено поворачивать только в одном направлении, как на велосипеде. В этом случае мы можем поворачивать только по часовой стрелке. Теперь, начиная с этой точки, мы можем идти по кругу. Когда мы говорим «кривая ω → ∞ от действительной оси», мы имеем в виду, что если мы зайдем достаточно далеко, мы сделаем много петель в этом круге. Количество раз, когда мы обходим вокруг, зависит от чего-то, называемого «n», что похоже на подсчет того, сколько раз мы обходим вокруг, на основе специального правила. Представьте, что у вас есть линия, которую вы считаете путем. Когда мы говорим «Начальная точка кривой (ω = 0) находится на прямой (P(0))», мы имеем в виду, что мы начинаем с определенной точки на прямой. Это все равно, что начать с одной точки дороги, ходить по кругу, поворачивая только в одном направлении, и использовать собственное изображение, чтобы увидеть, где мы окажемся!

Если все корни лежат в левой полуплоскости, диаграмма удовлетворяет указанному условию.

Если часть корней лежит в правой полуплоскости, диаграмма нарушает условие и система считается неустойчивой.

Преимущества критерия Михайлова: Нет необходимости вычислять точные корни характеристического уравнения, он совместим с частотным методом, позволяет визуализировать динамические системы на комплексной плоскости [5, 26].

Для примера исследования устойчивости системы транспортировки нефти и газа с использованием критерия Михайлова в MATLAB можно смоделировать систему, состоящую из простого передаточного элемента (например, насосной установки или трубопровода), и провести анализ устойчивости этой системы с помощью данного критерия.

Предположим, что у нас есть линейная система с передаточной функцией, описывающей динамику системы транспортировки (например, насос или трубопровод). Мы рассмотрим простой пример, где система задана передаточной функцией первого порядка.

Пусть передаточная функция нашей системы имеет вид:

$$G(s)=Ks+a$$

$$G(s)=s+aK \qquad (1)$$

где, K — коэффициент усиления, a — параметр, определяющий динамическое поведение системы, связанное с сопротивлением трубопровода.

Построение мнимой оси для критерия Михайлова покажем следующим образом. Сначала, мы находим передаточную функцию в MATLAB. Затем анализируем устойчивость системы с помощью критерия Михайлова, основанного на анализе полюсов и их расположения в комплексной плоскости:

```
K = 10

a = 2

s = tf('s')
```
(2)

Определяем переменную *S* для передачи функции G = K / (s + a), здесь Отображение передаточной функции disp, disp(G)Построение корней характеристического уравнения, так как характеристическое уравнениеи равно 1 + G(s) = 0, проводим поиск полюсов системы *sys_poles = pole(G), disp(sys_poles)* проверка этих утверждений производится методом критерия Михайлова.

Для этого проверим мнимую часть корней

real_parts = real(sys_poles);

imag_parts = imag(sys_poles) (3)

Проверим устойчивость системы: если все мнимые части полюсов отрицательны, система устойчива.

Если if all(imag_parts <= 0) тогда система устойчива по критерию Михайлова, если else система нестабильна по критерию Михайлова.

Код генерации частотной характеристики для анализа стабильности отображается следующим образом:

figure;

bode(G);

title (4)

В MATLAB создается передаточная функция системы с использованием переменной s для представления комплексной частоты.

Система задается передаточной функцией

$G(s)=Ks+a$G(s)= s+aK (5)

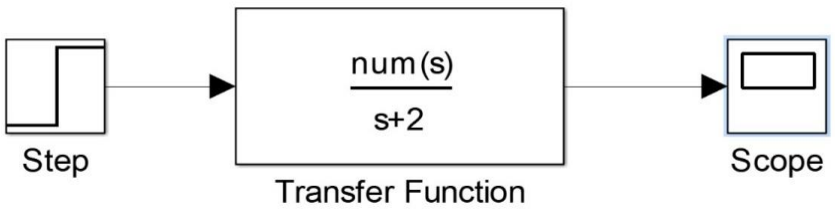

Рисунок 1. Блок схема передаточной функцией в Simulink

Для проведения анализа устойчивости вычисляются полюса системы с помощью функции pole(G).

Полюса — это корни знаменателя передаточной функции. В данном случае, полюс системы — это точка $s=-a$, s=−a.

Мы проверяем мнимые части полюсов системы. Если мнимая часть всех полюсов отрицательна или равна нулю, то система считается устойчивой по критерию Михайлова.

Частотная характеристика:

Для дополнительной визуализации устойчивости строится график частотной характеристики системы с помощью функции bode(G).

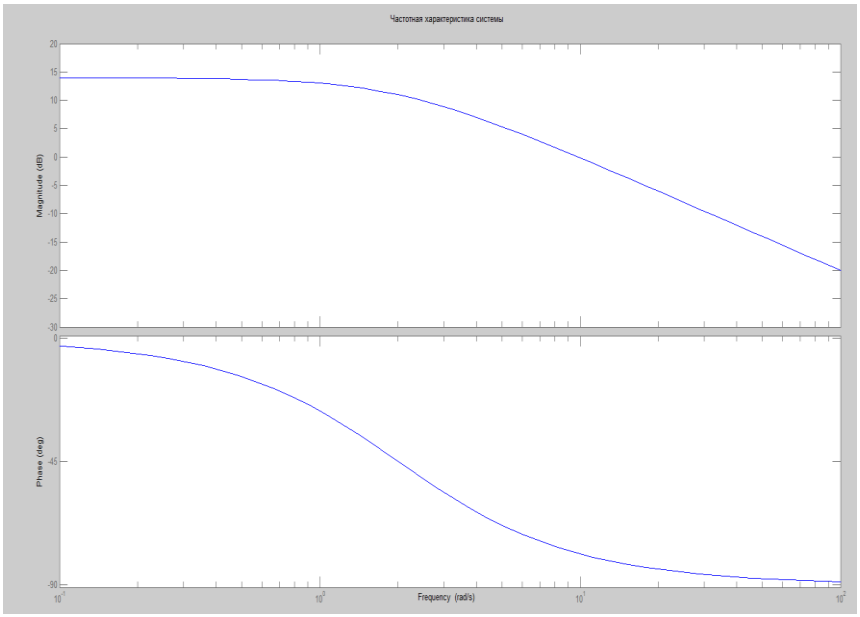

Рисунок 2. Анализ устойчивости с помощью критерия Михайлова

Если мнимая часть всех полюсов отрицательна что в нашем примере соответствует $a>0$ a>0, то система будет стабильной.

График частотной характеристики покажет, как система реагирует на изменения частоты входного сигнала, что также важно для оценки устойчивости.

Этот код можно адаптировать для более сложных систем транспортировки нефти и газа, где передаточная функция может быть более сложной (например, многополюсной), а система может включать дополнительные элементы управления.

Транспортировка нефти и газа является важным элементом нефтегазовой отрасли, обеспечивающим стабильность поставок углеводородного сырья. Устойчивость систем, участвующих в этом процессе, имеет решающее значение для обеспечения надежности и безопасности работы трубопроводов, насосных станций и других элементов инфраструктуры. Важным инструментом для анализа устойчивости таких систем является критерий Михайлова, который позволяет оценивать поведение динамических систем на основе их передаточных функций.

Критерий Михайлова является методом анализа устойчивости линейных динамических систем, основанным на исследовании характеристик системы в частотной области. Он используется для определения стабильности системы без необходимости нахождения всех полюсов или корней её характеристического уравнения [6, 44].

Система считается устойчивой, если в спектре её полюсов отсутствуют корни с положительной мнимой частью.

Это можно проверить с помощью анализа передаточной функции системы и её критических частот.

Для систем транспортировки нефти и газа передаточная функция может быть представлена как соотношение входных и выходных величин, например, давления и расхода.

Анализ устойчивости систем транспортировки нефти и газа с использованием критерия Михайлова позволяет:

— Предотвращать аварии и снизить риски неисправностей, связанных с нестабильным поведением системы.

— Оптимизировать работу насосных станций и трубопроводных систем, повышая их эффективность.

— Улучшить проектирование и эксплуатацию систем транспортировки с учетом динамических характеристик и воздействия внешних факторов.

Использование критерия Михайлова для анализа устойчивости систем транспортировки нефти и газа является эффективным методом оценки их динамических характеристик. Этот подход позволяет обеспечить надежную эксплуатацию и безопасность работы инфраструктуры нефтегазовой отрасли, выявляя потенциальные угрозы на ранних стадиях эксплуатации.

Список литературы

1. Методы классической и современной теории автоматического управления: учебник в 5-ти Т.Т.ТЗ: Синтез регуляторов систем автоматического управления /под.ред.К.А. Пупкова, Н.Д. Егупов. Издательство: МГТУ им.Н.Э. Баумана Год: 2004-784

2. Николис Г., Пригожин И. Познание сложного. Введение: Пер.с англ.-М.:Мир,1990.-344с.

3. Бейсенби М.А.Исследование робастной устойчивости систем автоматического управления методом функции А.М. Ляпунова-Астана, 2015.-204 с.

4. П.И. Сагитов, Т.Д. Иманбекова, М.Б. Жаркимбекова. Теория автоматического управления. Алматы: АЭжБУ, 2014. – 73 с.

5. Бекбаев А., Сулеев Д., Хисаров Б. Теория автоматического регулирования. - Алматы: Учебник, 2005.

6. Востриков А.С., Французова Г.А. Теория автоматического управления. - М.: Высшая школа, 2006.

References

1. Metody klassicheskoj i sovremennoj teorii avtomaticheskogo upravleniya: uchebnik v 5-ti T.T.TZ: Sintez regulyatorov sistem avtomaticheskogo upravleniya /pod.red.K.A. Pupkova, N.D. Egupov. Izdatel'stvo: MGTU im.N.E. Baumana God: 2004-784

2. Nikolis G., Prigozhin I. Poznanie slozhnogo. Vvedenie: Per.s angl.-M.:Mir,1990.-344s.

3. Bejsenbi M.A.Issledovanie robastnoj ustojchivosti sistem avtomaticheskogo upravleniya metodom funkcii A.M. Lyapunova-Astana,2015.-204 s.

4. P.I. Sagitov, T.D. Imanbekova, M.B. ZHarkimbekova. Teoriya avtomaticheskogo upravleniya. Almaty: AEzhBU, 2014. – 73 s.

5. Bekbaev A., Suleev D., Hisarov B. Teoriya avtomaticheskogo regulirovaniya. - Almaty: Uchebnik, 2005.

6. Vostrikov A.S., Francuzova G.A. Teoriya avtomaticheskogo upravleniya. - M.: Vysshaya shkola, 2006.

МИХАЙЛОВ КРИТЕРИЙІН ҚОЛДАНА ОТЫРЫП, МҰНАЙ МЕН ГАЗДЫ ТАСЫМАЛДАУ ЖҮЙЕЛЕРІНІҢ ТҰРАҚТЫЛЫҒЫН ЗЕРТТЕУ

ҚАЛИЕВА А.А.*, НАУРЫЗОВА К.Ш., ТОКСАНБАЕВА Б.А., ОРАЗБЕК А.А.

***Қалиева Айман Ақниетқызы-** техника ғылымдарының магистрі, Қ. Жұбанов атындағы Ақтөбе өңірлік университеті, Ақтөбе қ., Қазақстан
E-mail: akaliyeva@zhubanov.edu.kz, https://orcid.org/0009-0009-2391-4220
Наурызова Кулжамал Шариповна - Техника ғылымдарының кандидаты, доцент, Қ. Жұбанов атындағы Ақтөбе өңірлік университеті, Ақтөбе қ., Қазақстан.
E-mail: nauryzova61@mail.ru, https://orcid.org/0009-0008-0146-5287
Токсанбаева Бакытгул Айтбаевна - техника ғылымдарының магистрі, Қ. Жұбанов атындағы Ақтөбе өңірлік

университеті, Ақтөбе қ., Қазақстан
E-mail: Bakit-toksan@mail.ru, https://orcid.org/0009-0002-7599-6351
Оразбек Аян Абзалбекұлы - техника ғылымдарының магистрі, Қ. Жұбанов атындағы Ақтөбе өңірлік университеті, Ақтөбе қ., Қазақстан
E-mail: a.orazbek687@mail.ru, https://orcid.org/0009-0008-3928-6372

Аңдатпа. Мақала Михайлов критерийін қолдана отырып, мұнай мен газды тасымалдау жүйелерінің тұрақтылығын зерттеуге арналған. Көмірсутектерді тасымалдаудың қауіпсіздігі мен тиімділігін қамтамасыз ететін заманауи энергетикалық нарық жағдайында жүйелердің тұрақтылығы шешуші рөл атқарады. Тұрақтылықты талдау құбырлар мен сорғы станцияларын, қысымды реттеу жүйелерін және басқа инфрақұрылым элементтерін жобалау мен пайдаланудың маңызды бөлігі болып табылады. Сызықтық динамикалық жүйелер теориясына негізделген Михайлов критерийі ықтимал тәуекелдерді анықтауға және сенімді пайдалануды қамтамасыз етуге мүмкіндік беретін осындай жүйелердің тұрақтылығын бағалаудың қуатты құралын ұсынады. Мақалада критерийдің теориялық негіздері, оның мұнай мен газды тасымалдау жүйелеріндегі беріліс функцияларын талдау үшін қолданылуы, сондай-ақ апаттардың алдын алудағы және жұмыс тиімділігін арттырудағы рөлі қарастырылады. Бұл критерийді мұнай мен газды тасымалдау контекстінде қолдану пайдаланудың бастапқы кезеңдерінде ықтимал қауіптерді анықтауға көмектеседі, бұл төтенше жағдайлардың алдын алу және құбыр жүйелерінің тиімділігін арттыру үшін уақтылы шаралар қабылдауға мүмкіндік береді. Зерттеу нәтижесінде жүйенің параметрлерін оңтайландыруға және оның ықтимал ауытқулар мен сыртқы бұзылуларға төзімділігін арттыруға болады.Нақты пайдалану жағдайында тұрақтылықты бағалау үшін әдісті практикалық қолдану мысалдары сипатталған, сонымен қатар осы саладағы әрі қарайғы зерттеулердің сын-қатерлері мен перспективалары қарастырылған. Мақала көмірсутектерді тасымалдаудың сенімділігі мен қауіпсіздігін арттыруға ықпал ететін тұрақтылықты бағалау әдістерін дамытуға бағытталған.

Түйін сөздер: көпмүшелік, амплитудасы, жиілігі, тұрақтылығы, тамырлары, фазасы, спектрі, сорғы станциясы, мұнай мен газды тасымалдау

INVESTIGATION OF THE STABILITY OF OIL AND GAS TRANSPORTATION SYSTEMS USING THE MIKHAILOV CRITERION

KALIYEVA A.A.*, NAURYZOVA K.SH., TOKSANBAYEVA B.A., ORAZBEK A.A.

***Kaliyeva Aiman Aknietkyzy** - master of technical sciences, senior lecturer, Aktobe Regional University named after K. Zhubanov, Aktobe, Kazakhstan
E-mail: akaliyeva@zhubanov.edu.kz , https://orcid.org/0009-0009-2391-4220
Nauryzova Kulzhamal Sharipovna - candidate of technical sciences, associate professor, Aktobe Regional University named after K. Zhubanov, Aktobe, Kazakhstan
E-mail: nauryzova61@mail.ru , https://orcid.org/0009-0008-0146-5287
Toksanbayeva Bakhytgul Aitbayeva - master of Technical Sciences, senior lecturer, Aktobe Regional University named after K. Zhubanov, Aktobe, Kazakhstan
E-mail: Bakit-toksan@mail.ru, https://orcid.org/0009-0002-7599-6351
Orazbek Ayan Abzalbekyly - master of technical sciences, senior lecturer, Aktobe Regional University named after K. Zhubanov, Aktobe, Kazakhstan
E-mail: a.orazbek687@mail.ru, https://orcid.org/0009-0008-3928-6372

Abstract. The article is devoted to the study of the stability of oil and gas transportation systems using the Mikhailov criterion. In the conditions of the modern energy market, which ensures the safety and efficiency of hydrocarbon transportation, the stability of systems plays a key role. Stability analysis is an important part of the design and operation of pipeline and pumping stations, pressure control systems, and other infrastructure elements. The Mikhailov criterion, based on the theory of linear dynamical systems, provides a powerful tool for assessing the stability of such systems, allowing them to identify potential risks and ensure reliable operation. The article discusses the theoretical foundations of the criterion, its application to the analysis of transfer functions in oil and gas transportation systems, as well as its role in preventing accidents and improving operational efficiency. The application of this criterion in the context of oil and gas transportation helps to identify potential threats at the early stages of operation, which allows timely measures to be taken to prevent emergencies and improve the efficiency of pipeline systems. As a result of the study, it is possible to optimize the system parameters and increase its resistance to possible deviations and external disturbances.Examples of practical application of the method for assessing stability in real-world operating conditions are described, as well as challenges and prospects for further research in

this area. The article is aimed at developing sustainability assessment methods that contribute to improving the reliability and safety of hydrocarbon transportation.

Key words: polynomial, amplitude, frequency, stability, roots, phase, spectrum, pumping station, oil and gas transportation.