**2. Теоретические исследования методов расчета на устойчивость штоков цилиндров**

2.1 Обзор существующих методов расчета гидроцилиндров

Метод расчета штоков гидроцилиндров на устойчивость зависит от компоновки гидроцилиндра, от вида закрепления на концах. Худшим является случай, когда цилиндр укреплен на машине шарнирно, т. е. имеет проушины у задней головки и на штоке.

Такой гидроцилиндр может быть подвержен нагружению по следующим схемам:

1) эксцентричные продольные сжимающие нагрузки и поперечная сила;

2) только эксцентричные продольные сжимающие нагрузки;

3) центральные продольные сжимающие нагрузки и поперечная сила;

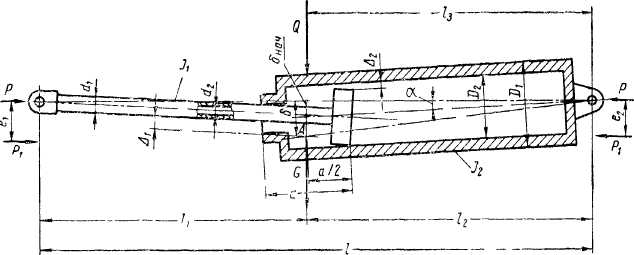


Рисунок 2.1 ‒ Схема нагружения силового гидроцилиндра

4) только центральные продольные сжимающие нагрузки. Первая схема нагружения гидроцилиндра показана на рисунке 2.1.

На практике наиболее часто встречаются схемы нагружения 2 и 4. Условные обозначения на схеме рис. 2.1:

— расстояние от головки штока гидроцилиндра до точки А в см;

— расстояние от переходной точки А до шарнира корпуса гидроцилиндра в см;

— длина гидроцилиндра в рабочем положении в см;

— расстояние о г начала передней направляющей штока до конца поршня в см;

— зазор на диаметр в направляющих инока в см (табл. 35);

- зазор на диаметр между поршнем и цилиндром в см (табл. 35);

и — моменты инерции сечения на длинах и в см4

— начальный прогиб гидроцилиндра в см;

— наибольшая рабочая продольная нагрузка в кГ;

, — эксцентриситет продольной силы относительно оси цилиндра и относительно оси штока;

— расстояние от головки штока гидроцилиндра до места наибольшего прогиба под нагрузкой в см;

— наибольший прогиб домкрата под нагрузкой в см;

— поперечная сила в кГ;

— расстояние от точки приложения поперечной силы до шарнира цилиндра в см,

— вес гидроцилиндра в кГ;

— угол между осью гидроцилиндра и горизонтальной плоскостью в радианах.

*Таблица №2.1*

Расчетные зазоры на диаметры в направляющих штока и между поршнем и цилиндром в см

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Отверстия | Валы | Номинальные диаметры в *мм* | | | | | | | | |
| 18-30 | 39-50 | 50-80 | 80-120 | 120-150 | 150-180 | 180-220 | 220-260 | 260-310 |
|  | ***С***  ***С***  **X**  **C**  ***X*** | 0,00535  0,0101  0,0176  0,0283  0,0122 | 0,00640  0,0114  0,0207  0,0344  0,0504 | 0,00720  0,0135  0,0247  0,0420  0,0602 | 0,00833  0,0158  0,0288  0,0464  0,0702 | 0,00964  0,0180  0,0340  0,0524  0,0802 | 0,00964  0,0180  0,0340  0,0524  0,0802 | 0,0108  0,0200  0,0100  0,0606  0,0904 | 0,0108  0,0200  0,0400  0,0606  0,0904 | 0,0122  0,0224  0,0460  0,0686  0,100 |
| ***A3*** | ***С***  ***С***  **X**  **C**  ***X*** | 0,0094  0,0128  0,0192  0,0294  0,0428 | 0,0106  0,0142  0,0224  0,0354  0,0510 | 0,0127  0,0170  0,0268  0,0418  0,0610 | 0,0148  0,0198  0,0313  0,0480  0,0712 | 0,0168  0,0229  0,0366  0,0544  0,0810 | 0,0168  0,0229  0,0363  0,0544  0,0816 | 0,0i00  0,0251  0,0130  0,0626  0,0916 | 0,0190  0, 0251  0,0430  0,0626  0,0916 | 0,0212  0,0282  0,0192  0,0708  0,102 |

*продолжение таблицы №2.1*

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| ***А*** | ***С***  ***С***  **X**  **C**  ***X*** | 0,0282  0,0291  0,0328  0,0396  0,0504 | 0,0346  0,0354  0,0394  0,0480  0,0604 | 0,0402  0,0414  0,0466  0,0564  0,0720 | 0,0462  0,0480  0,0538  0,0650  0,0836 | 0,0522  0,0544  0,0616  0,0734  0,0955 | 0,0522  0,0544  0,0616  0,0734  0,0955 | 0,0602  0,0626  0,0716  0,0856  0,108 | 0,0602  0,0626  0,0716  0,0856  0,108 | 0,0684  0,0708  0,0814  0,0960  0,121 |

Расчет гидроцилиндра на прочность и устойчивость включает в себя определение величины критической сжимающей силы и наибольшего напряжения от сжатия и изгиба при рабочей нагрузке

Критическая сила определяется из уравнения

|  |  |
| --- | --- |
|  | (1) |

Наибольшее напряжение от сжатия и изгиба при рабочей нагрузке

|  |  |
| --- | --- |
|  | (2) |

В расчетных формулах принято, что основные детали гидро­цилиндра изготовлены из стали (кГ/см2), имеют круглое сечение и наибольший прогиб гидроцилиндра под нагрузкой происходит на границе длин и ().

**Расчет гидроцилиндра на устойчивость**

Критическая сила определяется по формуле

|  |  |
| --- | --- |
|  | (3) |

(рассчитывается цилиндр при выдвинутом штоке).

Значение определяется из графиков определения критической силы

Для значений и не вошедших в соответствующий график, следует производить интерполяцию.

|  |  |
| --- | --- |
|  | (4) |
|  | (5) |

где и — момент инерции сплошного сечения с диаметром равным соответственно наружному и внутреннему диаметру, в см4.

**Расчет штока на прочность**

Наибольшее напряжение от сжатия и изгиба определяется по формуле (2), где площадь расчетного сечения штока в см2;

— площадь круглого сплошного сечения с наружным диаметром в см2 (см. табл. 36):

— момент сопротивления сечения штока в см3;

— момент сопротивления круглого сплошного сечения в см3;

— коэффициенты ослабления сечения концентричным продольным отверстием.

Условие применимости данной методики

|  |  |
| --- | --- |
|  | (6) |

**Определение прогибов**

Полный прогиб определяется.

|  |  |
| --- | --- |
|  | (7) |

где — диаметр штока;

при

|  |  |
| --- | --- |
|  | (8) |

где — диаметр штока,

при

|  |  |
| --- | --- |
|  | (9) |

Наибольший прогиб определяется в зависимости от схемы нагружения.

Схема 1:

|  |  |
| --- | --- |
|  | (10) |

Схема 2.

|  |  |
| --- | --- |
|  | (11) |

Схема 3:

|  |  |
| --- | --- |
|  | (12) |

Схема 4:

|  |  |
| --- | --- |
|  | (13) |

(основные условные обозначения даны к схеме рис. 102).

|  |  |
| --- | --- |
|  | (14) |
|  | (15) |
|  | (16) |
|  | (17) |

После определения наибольшего напряжения от сжатия и изгиба по формуле (24) определяется запас прочности по пределу текучести

|  |  |
| --- | --- |
|  | (18) |

Условие применимости вышеизложенной методики расчета на прочность и устойчивость

|  |  |
| --- | --- |
|  | (19) |

Согласно рекомендуемому ряду максимальный ход

|  |  |
| --- | --- |
|  | (20) |

Если гидроцилиндры выбраны с максимальным ходом, то дан­ная методика может оказаться неприменимой. В этом случае рекомендуется рассчитывать шток на продольный изгиб.

Рассматриваем шток как гибкий стержень, нагруженный про­дольной сжимающей нагрузкой. Если цилиндр и шток снабжен проушинами, то нагрузка действует по продольной оси штока.

Критическая сила выражается формулой Эйлера:

|  |  |
| --- | --- |
|  | (21) |

где — коэффициент устойчивости;

— коэффициент приведенной длины.

|  |  |
| --- | --- |
|  | (22) |

Условие применимости формулы Эйлера:

|  |  |
| --- | --- |
|  | (23) |

где — предел пропорциональности для материала стержня;

|  |  |
| --- | --- |
|  | (24) |
|  | (25) |

Если для выбранного гидроцилиндра формула Эйлера не при­менима, расчет ведем по формуле Ясинского:

|  |  |
| --- | --- |
|  | (26) |

где а и b — коэффициенты (см. табл. 2.2).

*Таблица №2.2*

Предельные гибкости и параметры a, b и c в зависимости от критического напряжения от гибкости для различных материалов

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Материал | a | b | c |  |  |
| Сталь Ст.3 | 3100 | 11,4 | 0,00 | 105 | 61 |
| Сталь Ст.6 | 4610 | 36,17 | 0,00 | 100 | 60 |
| Чугун | 7700 | 120 | 0,53 | 80 | - |

|  |  |
| --- | --- |
|  | (27) |

При расчете сжатых стержней условие прочности и условие устойчивости объединяются одним расчетным уравнением

|  |  |
| --- | --- |
|  | (28) |

где — коэффициент понижения допускаемого напряжения, который зависит от гибкости и от материала стержня

Данный метод расчета включает в себя применение графиков корня отношения критической силы к моменту инерции штока. Данные графики были произведены в середине прошлого века НИИ ГИПРОМАШ. Образцы графиков, полученные мной, были в плохом состоянии. Что способствует зрительной ошибке. Также графики не очень удобны при расчетах конструкций гидроцилиндров с применением компьютерных вычислительных комплексов.

Мною было принято решение модернизировать этап нахождения критической силы потери на устойчивость. Для этого нужно снять данные с графиков, аппроксимировать и привести к аналитическому виду. Данная задача является возможной с применяем современного программного обеспечения для обработки данных.

2. Приведение к аналитическому виду и анализ результата

Для получения значения критической силы в настоящее время необходимо, снимать данные с графиков по значениям и [11]. Это не является удобным в эру облачных вычислений больших данных. Мною была поставлена задача снять данные с графиков определения критической силы для различных отношений и и вывести зависимость. Для этого я использовал компьютерные средства.

Так как снятие данных вручную заняло бы приличное количество времени и точность данных была бы подтверждена зрительной ошибке. Мною было разработано программное обеспечение для снятия данных с графика [13]

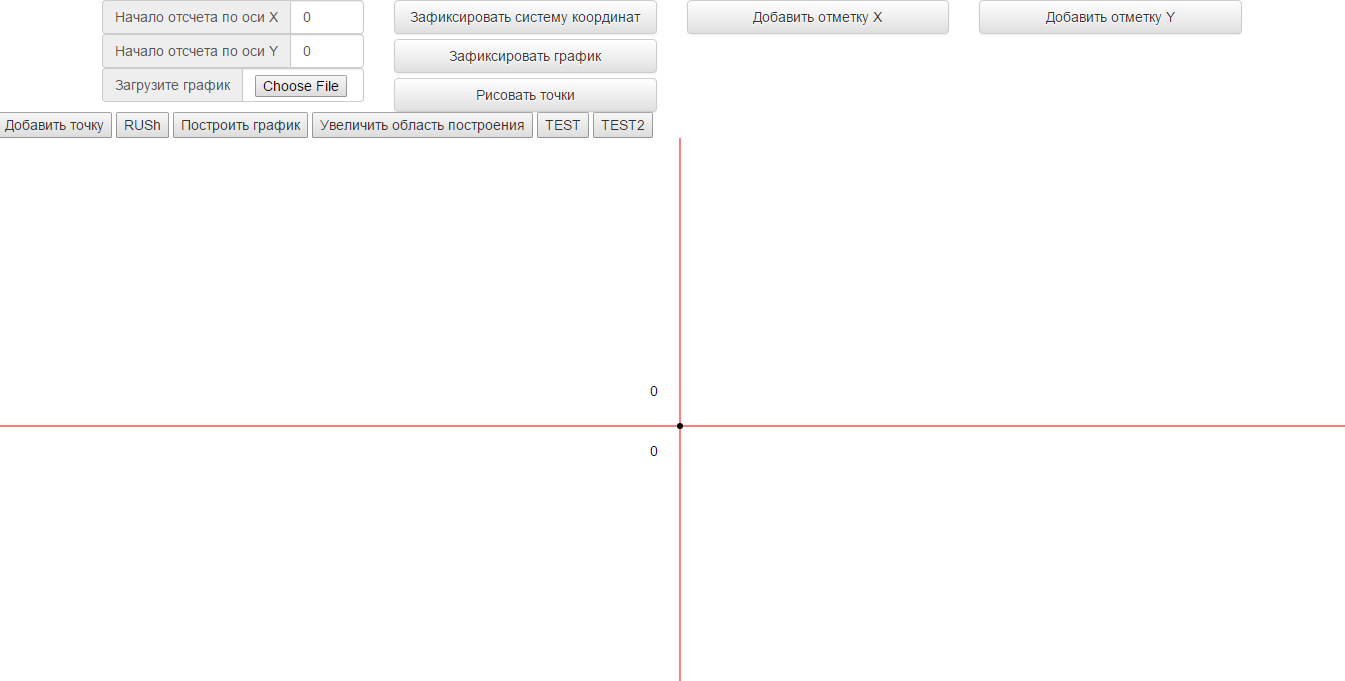
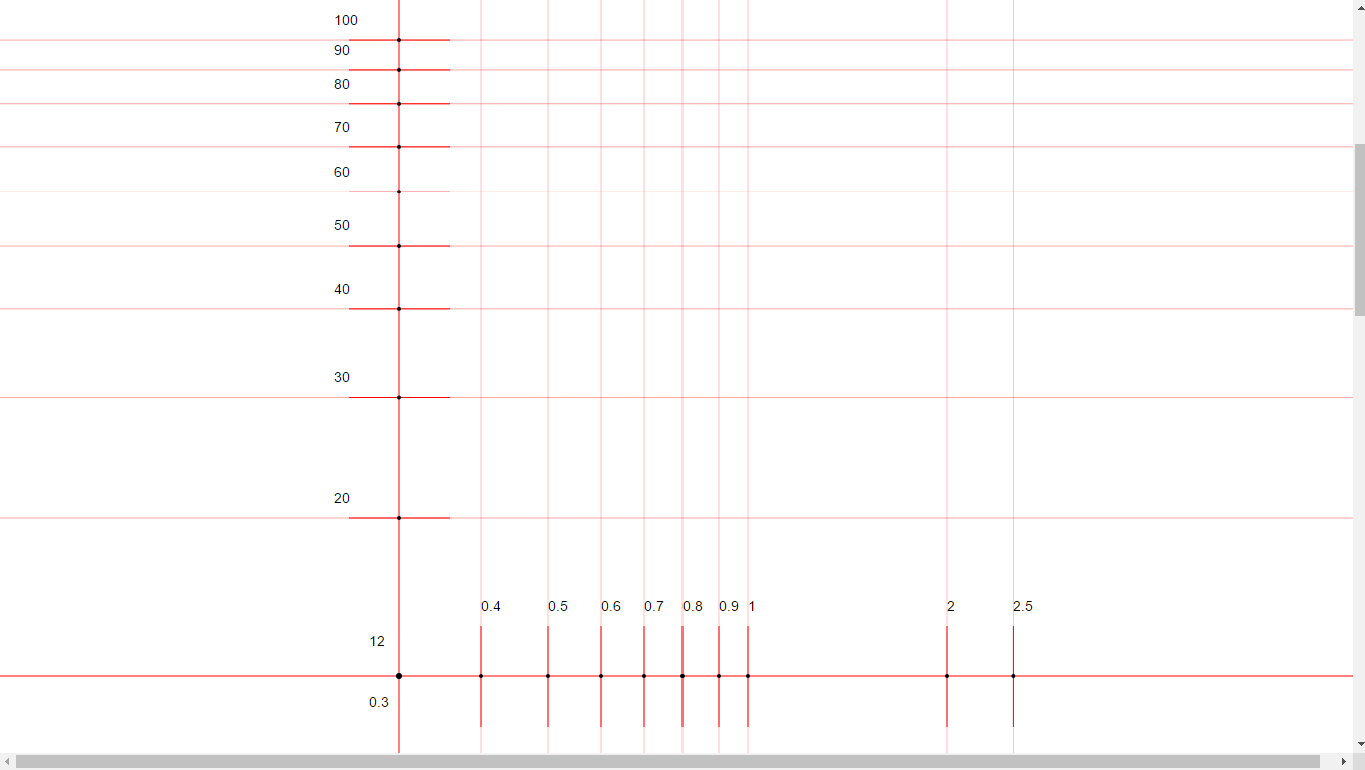


Рисунок 2.2 ‒ Интерфейс программы для снятия исходных данных с графиков

Данное приложение было написано на языке javascript и работает в среде браузера. Система представляет собой две совмещенные системы координат. Первая система координат представлена в масштабе графиков и является видимой, далее будем называть ей видимой. Вторая система координат является – координатной сеткой экрана и используется только для фонового расчета, будем называть её вспомогательной. У видимой системы координат можно настраивать начало отчета и маркеры в произвольном порядке. После нанесения маркерной сетки, производится расчет приведенного коэффициента для каждого участка графика. Для расчета первичного приведенного коэффициента необходимо, что бы каждая ось имела хотя бы один координатный график. По умолчанию начала отсчета принимаем [0:0]. Этот подход позволяет гибко масштабировать график. В графике критического напряжения, ось представлена в логарифмических координатах. Это не влияет на полученный результат. Я решил брать значения до 16 знака после запятой. Перевод в реальные координаты я решил производить в конечном расчетном комплексе, что исключает потерю точности при импорте данных.

 Рисунок 2.2 ‒ Интерфейс программы для снятия исходных данных с графиков

После загрузки графика в систему, указываем начало координат, в случае если график начинается не с нуля, сопоставляем начало координат графика с началом координат графической системы. Соотносим значения на осях график с отметками на видимой системы координат. Фиксируем систему координат и график с помощью кнопки зафиксировать «систему координат» после этого возможно построить точки. После первого клика на график система начинает автоматически расставлять точки через каждые 2 пикселя. После окончания расставления точек можно вручную поправить точки, которые создают грубую погрешность. После этого можно вычислить координаты каждой точки. Система вычисляет координаты точки в местных координатах, после этого система применяет для каждой координаты коэффициент приведения и выводит данные в формате csv (Comma-Separated Values) для координаты по оси x.

Алгоритм снятия данных представлен таблице 2.1

*Таблица №2.3*

Технология снятия координат с графиков в программе descart

|  |  |
| --- | --- |
| 1 Подготовка системы | |
| 1.1 Задаем начало координат |  |
| 1.2 Загружаем исходный график в систему |  |

*продолжение таблицы №2.3*

|  |  |
| --- | --- |
| 1.3 Добавляем метки на накладную систему координат через интерфейс |  |
| 1.4 Соотносим метки на исходном графике с накладной системой координат | C:\Users\petr\Desktop\descart\дисертация\иллюстрации\descart- график.png |

*продолжение таблицы №2.1*

|  |  |
| --- | --- |
| 1.5 Фиксируем результат |  |
| 2 Снятие данных | |
| 2.1 Кликнув на графике ведем аккуратно линию по следу графика. | C:\Users\petr\Desktop\descart\дисертация\иллюстрации\descart- график с точками.png |
| 2.2 Нажимаем на кнопку «снять результаты» и получаем результаты в формате JSON |  |

JSON (javascript object notation) это способ представления данных. Данные представляются в текстовом формате. Возможно предоставлять сложно структурированные данные Преимущества данного формате в простоте и распространенности. JSON поддерживают все языки программирования. Так как JSON является подмножеством языка javascript, взаимодействие клиентской части (снятие данных) и серверной производится по простому алгоритму.

CSV (Comma-Separated Values) представляет данные в очень простом формате. Ряды данных разделенные запятой. Данный формат очень легко импортируется в программный комплекс Microsoft Office Excel.

Для удобства будем обозначать греческой буквой омега большая Ω, а как омега маленькое ω и Θ для .

График для определения критической силы при находится в приложении.

На графике присутствует по оси у отношение критической силы к моменту инерции штока Θ. По оси х заданы отношения длины расстояние от головки штока гидроцилиндра до точки А к расстоянию от переходной точки А до шарнира корпуса гидроцилиндра. Заданное в логарифмическом масштабе.

После загрузки графика в программу и расставления отметок на график наносится порядка 500 точек. С каждой точки мы получаем координату по оси lg(ω) и Ω. Данные выгружаются в формате csv и пример полученных данных представлен в таблице 2.4

*Таблица №2.4*

Данные из программы descart

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| № | ω | Ω | № | ω | Ω |
| 1 | 0.29878 | 18.1783 | 16 | 0.32073 | 17.7643 |
| 2 | 0.30122 | 18.1783 | 17 | 0.32195 | 17.7643 |
| 3 | 0.30244 | 18.1783 | 18 | 0.32317 | 17.7643 |
| 4 | 0.30488 | 18.1783 | 19 | 0.32439 | 18.1783 |
| 5 | 0.3061 | 18.1783 | 20 | 0.32561 | 17.7643 |
| 6 | 0.30732 | 18.0955 | 21 | 0.32683 | 17.6815 |

*продолжение таблицы №2.1*

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 7 | 0.30854 | 18.0127 | 22 | 0.32927 | 17.6815 |
| 8 | 0.30976 | 17.9299 | 23 | 0.33049 | 17.6815 |
| 9 | 0.31098 | 17.8471 | 24 | 0.33293 | 17.5987 |
| 10 | 0.3122 | 17.8471 | 25 | 0.33415 | 17.5987 |
| 11 | 0.31341 | 17.8471 | 26 | 0.33537 | 17.5987 |
| 12 | 0.31463 | 17.8471 | 27 | 0.33659 | 17.5159 |
| 13 | 0.31585 | 17.8471 | 28 | 0.3378 | 17.5159 |
| 14 | 0.31829 | 17.7643 | 29 | 0.33902 | 17.5159 |
| 15 | 0.31951 | 17.7643 | 30 | 0.34024 | 17.5159 |

Первая колонка значения ω. Во вторую колонку система выводит ω. И ω в исходном графике были по оси x. В третьей колонке располагаются значения Ω, по оси y.

Построим график, как и в исходном графике, по значениям ω и Ω.

Рисунок 2.3 ‒ Первичный вид исходных данных на графике в логарифмических координатах по оси ω

На первый взгляд полученный график не похож на исходный график, что объясняется масштабом по осям ω и Ω. Построим график по значениям Ω и ω.

Рисунок 2.4 ‒ Первичный вид исходных данных на графике в декартовых координатах по оси ω

По графику можно судить, что функция имеет убывающий характер. Резко уменьшаясь при небольших значениях ω. Она нормализуется в дальнейшем и стремится к константному значению Ω

Для анализа зависимости будем использовать линию тренда. В пакете excel cсуществует шесть различных видов линия тренда (аппроксимация и сглаживание), которые могут быть отражены на диаграмме. Использование линии тренда того или иного вида определяется типом данных.

Точность аппроксимации. Линия тренда в наибольшей степени приближается к представленной на диаграмме зависимости, если величина достоверности аппроксимации равно или близко к 1. При аппроксимации данных с помощью линии тренда значение R-квадрат рассчитывается автоматически. Полученный результат можно вывести на диаграмме.

После построения графика мы аппроксимируем данный график

Всеми доступными в excel методами: экспоненциальным, линейным, логарифмическим, полиноминальным, степенным и методом скользящее среднее

*Линейная аппроксимация*

Линейная аппроксимация — это прямая линия, наилучшим образом описывающая набор данных. Она применяется в самых простых случаях, когда точки данных расположены близко к прямой. Говоря другими словами, линейная аппроксимация хороша для величины, которая увеличивается или убывает с постоянной скоростью.

Получаем линейное уравнение где коэффициент у переменной отрицательный, что свидетельствует о убывающем характере функции. Значение R-квадрат = 0,0505, что свидетельствует что данный вид аппроксимации нам не подходит.

Рисунок 2.5 ‒ Линия тренда, полученная путем линейной аппроксимации

Получаем формулу вида

|  |  |
| --- | --- |
|  | (29) |

*Логарифмическая аппроксимация*

Логарифмическая аппроксимация хорошо описывает величину, которая вначале быстро растет или убывает, а затем постепенно стабилизируется. Описывает как положительные, так и отрицательные величины.

Рисунок 2.6 ‒ Линия тренда, полученная путем логарифмической аппроксимации

Получаем логарифмическое уравнение где коэффициент у переменной отрицательный, что свидетельствует о убывающем характере функции. Кривая довольно хорошо описывает данные, поскольку значение R-квадрат, равное 0,9295, близко к единице.

|  |  |
| --- | --- |
|  | (30) |

*Полиномиальная аппроксимация*

Полиномиальная аппроксимация используется для описания величин, попеременно возрастающих и убывающих. Она полезна, например, для анализа большого набора данных о нестабильной величине. Степень полинома определяется количеством экстремумов (максимумов и минимумов) кривой. Полином второй степени может описать только один максимум или минимум. Полином третьей степени имеет один или два экстремума. Полином четвертой степени может иметь не более трех экстремумов.

Рисунок 2.7 ‒ Линия тренда, полученная путем полиноминальной аппроксимации 2 степени

Получаем формулу вида

|  |  |
| --- | --- |
|  | (31) |

После увеличения степени полинома, значение R-квадрат также увеличивается, увеличивая точность. Но визуально наблюдаются волны, что говорит о неприменимости данного метода. Пакет excel позволяет применять полином до 6 степени, но мы делаем вывод, что этот метод нам не подходит.

Рисунок 2.9 ‒ Линия тренда, полученная путем полиноминальной аппроксимации 3 степени

Степенное приближение дает хорошие результаты, если зависимость, которая содержится в данных, характеризуется постоянной скоростью роста. Примером такой зависимости может служить график ускорения автомобиля. Если в данных имеются нулевые или отрицательные значения, использование степенного приближения невозможно.

Рисунок 2.10 ‒ Линия тренда, полученная путем степенной аппроксимации

Получаем формулу вида

|  |  |
| --- | --- |
|  | (32) |

*Экспоненциальная аппроксимация*

Экспоненциальное приближение следует использовать в том случае, если скорость изменения данных непрерывно возрастает. Однако для данных, которые содержат нулевые или отрицательные значения, этот вид приближения неприменим.

Рисунок 2.11 ‒ Линия тренда, полученная путем экспоненциальной аппроксимации

Получаем формулу вида

|  |  |
| --- | --- |
|  | (33) |

Сведем значения для R квадрат для всех методов в сводную таблицу.

*Таблица №2.5*

|  |  |
| --- | --- |
| Метод аппроксимации | R2 |
| линейная | 0.5053 |
| логарифмическая | 0.9295 |
| полиноминальная 2 степени | 0.7138 |
| полиноминальная 3 степени | 0.8048 |
| степенная | 0.976 |
| экспоненциальная | 0.6013 |

Наилучший результат выдает степенной метод. Делаем вывод о степенном характере функции. Применяем этот метод для оставшихся зависимостей на всех графиках.

Из полученных данных возможно проверить показатель степени и коэффициент на зависимости. Первым проверим коэффициент.

Сделаем выборку из 5 зависимостей. Заносим все данные в таблицу коэффициенты относительно Ω и

*Таблица № 2.6*

Значения аппроксимированного коэффициента в зависимости от Θ и Ω

|  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Ω Θ | 1.1 | 1.3 | 1.6 | 2 | 2.5 | 3 | 4 |
| 2000 | 20,068 | 20,361 | 19,776 | 19,074 | 19,218 | 19,010 | 17,726 |
| 1000 | 36,344 | 37,368 | 37,506 | 37,436 | 36,376 | 36,554 | 35,693 |
| 600 | 63,145 | 63,952 | 63,255 | 62,077 | 61,123 | 60,617 | 61,280 |
| 400 | 95,101 | 93,359 | 94,875 | 91,140 | 90,347 | 89,303 | 89,529 |
| 200 | 189,237 | 194,381 | 184,747 | 182,753 | 184,190 | 177,979 | 173,561 |

С увеличением Ω прослеживается очень слабая зависимость с большой погрешностью

При этом чем больше Θ тем явнее она видна(погрешность)

*Таблица № 2.7*

Динамика изменений аппроксимированного коэффициента от Θ и Ω

|  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Ω  Θ | 1.1 | 1.3 | 1.6 | 2 | 2.5 | 3 | 4 |
| 2000 |  | -0.2930 | 0.5850 | 0.7020 | -0.1440 | 0.2080 | 1.2840 |
| 1000 |  | -1.0240 | -0.1380 | 0.0700 | 1.0600 | -0.1780 | 0.8610 |
| 600 |  | -0.8070 | 0.6970 | 1.1780 | 0.9540 | 0.5060 | -0.6630 |
| 400 |  | 1.7420 | -1.5160 | 3.7350 | 0.7930 | 1.0440 | -0.2260 |
| 200 |  | -5.1440 | 9.6340 | 1.9940 | -1.4370 | 6.2110 | 4.4180 |

Проверяем динамику увеличения

Рисунок 2.12 ‒ Динамика изменений аппроксимированного коэффициента

Разница положительная делаем вывод, о том, что зависимость все же есть

Прослеживается зависимость при увеличении Ω. Причем чем меньше тем больше она прослеживается. Но из-за наличия грубой погрешности дальнейшее исследование невозможно. Также делаем выводы, что из-за незначительности влияния (около 1-2% на конечные результат) этой зависимостью можно пренебречь.

Для получения более точных результатов я принял решение написать программу для автоматической аппроксимации по нужному мне алгоритму. Я выбрал язык программирования go. go системный строго типизированный язык с нативной поддержкой конкурентности. Выбором послужил факт, что я его хорошо знаю и легкий с-подобный синтаксис.

Рисунок 2.12 ‒ Результат аппроксимированного коэффициента в полностью автоматическом режиме

Даже в полностью автоматическом режиме погрешности не дают точно определить есть ли зависимость. Результат имеет большую амплитуду чем результат который я получил вручную, вводя данные в excel. Функция похожа на возрастающую гармонику с локальными минимумами и максимами.

Делаю вывод, что для определения таких зависимостей нужно проводить испытания на стенде.

Следующим шагом проверим влияние на коэффициент. Делаем выборку из 3 графиков, различающихся Ω

*Таблица № 2.8*

Данные полученные по коэффициентам *a*

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| Ω  Θ | 4 | 2 | 1,1 |
| 2000 | 17,72648932 | 19,07488 | 20,06815 |
| 1750 | 19,98090496 | 21,30842 | 21,75164 |
| 1500 | 23,46205808 | 25,32682 | 26,11708 |
| 1250 | 28,41923891 | 29,99536 | 30,02821 |
| 1000 | 35,69308451 | 37,43614 | 36,34499 |
| 800 | 43,85583909 | 46,41068 | 44,58457 |
| 700 | 50,92689498 | 52,74732 | 52,1713 |
| 600 | 61,28001971 | 62,0772 | 63,14517 |
| 500 | 69,1537486 | 70,14627 | 78,86518 |
| 400 | 89,52984271 | 91,14002 | 95,1014 |
| 300 | 121,272447 | 126,6885 | 128,8201 |
| 250 | 143,5497703 | 154,6614 | 151,6446 |
| 200 | 173,5614935 | 182,7535 | 189,2379 |

Рисунок 2.14 ‒ Зависимость от *a* от Θ

Функция резко убывает делаем вывод что нужно выбрать или степенную, или логарифмическую или экспоненциальную аппроксимацию. Выполним их все и сравним R² и зрительно.

Рисунок 2.16 ‒ Применение степенной аппроксимации

Имеем R² = 0.9981 и y = 36825x-0.996

Рисунок 2.17 ‒ Применение логарифмической аппроксимации

Имеем R² = 0.9056 и y = -68.79ln(x) + 520.76

Рисунок 2.18 ‒ Применение экспоненциальной аппроксимации

Имеем R² = 0.8952 и y = 156.8e-0.001x

Наилучший результат выдает степенная аппроксимация. Проводим аппроксимацию для выборки

*Таблица № 2.9*

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| Ω  l1 | 1.1 | 1.3 |
| 2000 | -0.19128 | -0.17561 |
| 1750 | -0.1818 | -0.16054 |
| 1500 | -0.18877 | -0.16094 |
| 1250 | -0.18405 | -0.16045 |
| 1000 | -0.17461 | -0.14918 |

Наблюдается явная связь с минимальной погрешностью. Приводим к общему виду

Строим график по данной функции

Рисунок 2.19 ‒ Зависимость коэффициента аппроксимированной функции от длины штока до переходной точки

Следующим шагом проанализируем зависимости показателя степени

Построим сводную таблицу

*Таблица № 2.10*

|  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Ω  p | 1.1 | 1.3 | 1.6 | 2 | 2.5 | 3 | 4 |
| 2000 | -0.19128 | -0.17561 | -0.13439 | -0.10391 | -0.09998 | -0.09448 | -0.07542 |
| 1750 | -0.1818 | -0.16054 | -0.12702 | -0.0936 | -0.09054 | -0.08702 | -0.06991 |
| 1500 | -0.18877 | -0.16094 | -0.12607 | -0.09995 | -0.09094 | -0.08607 | -0.06887 |
| 1250 | -0.18405 | -0.16045 | -0.12192 | -0.10522 | -0.10045 | -0.09192 | -0.07849 |
| 1000 | -0.17461 | -0.14918 | -0.12657 | -0.10811 | -0.09014 | -0.08706 | -0.07276 |
| 800 | -0.18227 | -0.15975 | -0.12311 | -0.10052 | -0.09975 | -0.08311 | -0.06728 |
| 700 | -0.18953 | -0.15471 | -0.12974 | -0.10155 | -0.10471 | -0.07974 | -0.07524 |
| 600 | -0.19072 | -0.1615 | -0.13324 | -0.10287 | -0.09862 | -0.09051 | -0.07592 |
| 500 | -0.18771 | -0.15248 | -0.12071 | -0.07439 | -0.10248 | -0.08071 | -0.08249 |
| 400 | -0.18012 | -0.15339 | -0.13445 | -0.09727 | -0.09729 | -0.08915 | -0.07323 |
| 300 | -0.18303 | -0.15658 | -0.12205 | -0.1168 | -0.10658 | -0.09205 | -0.06825 |
| 250 | -0.17927 | -0.15784 | -0.12807 | -0.1091 | -0.09784 | -0.08807 | -0.06654 |
| 200 | -0.17357 | -0.16248 | -0.12176 | -0.09948 | -0.09422 | -0.0749 | -0.05992 |

Проверим на зависимость от Θ

Рисунок 2.20 ‒ Коэффициент в зависимости от Θ

Значение явно постоянно, что видно из графика. На графике присутствует систематическая погрешность, что не влияет на результат.

Проверим на зависимость от Ω. Сперва округлим данные

|  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Ω | 1.1 | 1.3 | 1.6 | 2 | 2.5 | 3 | 4 |
| Среднее | -0.1836 | -0.15888 | -0.12685 | -0.10098 | -0.09797 | -0.08652 | -0.07187 |

Производим аппроксимацию

Выбираем степенную аппроксимацию

Рисунок 2.21 ‒ Применения степенной линии тренда к аппроксимированным данным

Прослеживается явная зависимость. Наблюдается грубая погрешность. Причем эта погрешность наблюдается на всех графиках при Ω = 2 Можно сделать вывод что, если Ω = при то есть если в 4 раза больше чем мы имеем переходный момент. Объяснить данное явление не получается.

Рисунок 2.21 ‒ Графики, полученные в автоматическом режиме

Подставляем Ω

Вставляем полученные данные в формулу расчета критической силы

По полученной формуле строим график в excel

Рисунок 2.22 ‒ Сравнение полученной функции к исходным данным

Так как аппроксимировать степенным методом не получается при отрицательной степени делаем вывод, что необходимо преобразовать функцию к другому виду.

Рисунок 2.2 ‒ Интерфейс программы для снятия исходных данных с графиков

Получаем

При D=100мм, d=50мм, ходе цилиндра равном l=800мм

D1=114мм, l1 =921 мм, l2= 965 мм

Для получения графика зависимости критической силы от длины гильзы гидроцилиндра до исследуемой точки, принимаем что диапазон данных по оси l2 должен входить в . Для этого вычислим при каком значение расстояния шарнира корпуса до переходной точки l2 значение отношение расстояния шарнира корпуса до переходной точки к расстоянию головки штока до переходной точки и

При l2=27.63 и расстоянии шарнира корпуса до переходной точки l2=230.63 . Диапазон данных принимаем между . Берем выборку из тысячи элементов, шаг принимаем

По полученным данным строим два графика. Первый график имеет по оси х отношение l2/l1, второй l2

Рисунок 2.22 ‒ Изменение расстояния шарнира корпуса до переходной точки l2 при расстоянии головки штока до переходной точки l1= 92.1 см, диаметр штока Dштока=5см, наружный диаметр корпуса dнаружный=11.4см, внутренний диаметр корпуса dвнутренний=10см

Рисунок 2.22 ‒ Изменение расстояния шарнира корпуса до переходной точки l2 при расстоянии головки штока до переходной точки l1= 92.1 см, диаметр штока Dштока=5см, наружный диаметр корпуса dнаружный=11.4см, внутренний диаметр корпуса dвнутренний=10см

При увеличении расстояния шарнира корпуса до переходной точки l2критическая сила Pкритическая, увеличивается незначительно. Функция имеет степенной характер. При дальнейшем увеличении диаметра штока критическая сила будет стремиться к постоянному значению.

Для получения графика зависимости критической силы от длины штока до исследуемой точки, принимаем что диапазон данных по оси l1 должен входить в . Для этого вычислим при каком значение расстояния головки штока до переходной точки l1 значение отношение расстояния шарнира корпуса до переходной точки к расстоянию головки штока до переходной точки и

При расстоянии головки штока до переходной точки l1=37 отношение расстояния шарнира корпуса до переходной точки к расстоянию головки штока до переходной точки равно и l1=230.63 отношение равно . Диапазон данных принимаем между . Берем выборку из тысячи элементов, шаг принимаем

Рисунок 2.22 ‒ Изменение расстояния головки штока до переходной точки l1 при расстоянии шарнира корпуса до переходной точки l2= 96.5 см, диаметр штока Dштока=5см, наружный диаметр корпуса dнаружный=11.4см, внутренний диаметр корпуса dвнутренний=10см

Рисунок 2.22 ‒ Изменение расстояния головки штока до переходной точки l1 при расстоянии шарнира корпуса до переходной точки l2= 96.5 см, диаметр штока Dштока=5см, наружный диаметр корпуса dнаружный=11.4см, внутренний диаметр корпуса dвнутренний=10см

При увеличении расстояния головки штока до переходной точки l1критическая сила Pкритическая, резко падает, как и ожидается. Функция имеет степенной характер. При дальнейшем увеличении диаметра штока критическая сила будет стремиться к постоянному значению.

Для получения графика зависимости критической силы от диаметра штока, принимаем что диапазон данных по оси x должен входить в . Для этого вычислим при каком значение диаметра штока Dштока значение корня отношения момента инерции сечения корпуса гидроцилиндра к моменту инерции штока гидроцилиндра и

При диаметре гидроцилиндра Dштока=8.9 и отношении момента инерции сечения корпуса гидроцилиндра к моменту инерции штока гидроцилиндра и Dштока=6.1 . Диапазон данных принимаем между . Берем выборку из тысячи элементов, шаг принимаем

Рисунок 2.22 ‒ Изменение диаметра штока диаметр штока Dштока при расстоянии головки штока до переходной точки l1= 92.1 см, расстояния шарнира корпуса до переходной точки l2= 96.5 см, наружный диаметр корпуса dнаружный=11.4см, внутренний диаметр корпуса dвнутренний=10см

При уменьшении диаметра штока Dштока критическая сила Pкритическая, как и ожидается увеличивается. Функция имеет степенной характер. При дальнейшем увеличении диаметра штока критическая сила будет значительно увеличиваться.

Выводы:

1. Была обработана методика съема данных с графиков с искажением координатной сетки;
2. После предварительной обработки данных были учтены погрешности и нивелированы повторным снятием данных с более высокой точностью;
3. Первоначально данные были обработаны в пакете excel что позволило наглядно и эффективно выбрать методы аппроксимации. Вторым шагом выбранные методы были запрограммированы и все данные обработала машина без моего участия, что исключило человеческую ошибку и гарантировало точность;
4. Была выявлена зависимость отношения инерций сечения цилиндра и штока и отношения длин штока и цилиндра к критической силе;
5. Проверка математической модели показала, что зависимость ведет себя ожидаемо при изменении длины штока и корпуса гидроцилиндра, диаметра штока и толщины корпуса цилиндра. При увеличении расстояния головки штока до переходной точки критическая сила Pкритическая уменьшается. При увеличении расстояния головки штока до переходной точки критическая сила Pкритическая уменьшается. При увеличении расстояния шарнира корпуса до переходной точки критическая сила Pкритическая, увеличивается. При уменьшении диаметра штока Dштока критическая сила Pкритическая увеличивается.