

## УСТОЙЧИВОСТЬ ИНЖЕНЕРНЫХ КОММУНИКАЦИЙ

*С.Т. Иманбеков, А.А. Землянский*

---

Предложен классический качественный метод расчета уровня устойчивости инженерных коммуникаций в виде двумерной динамической системы, позволяющий прогнозировать поведение трубопроводов.

*Ключевые слова:* инженерные коммуникации; устойчивость; динамические системы.

В статье предлагается классический качественный метод расчета уровня устойчивости инженерных коммуникаций в виде двумерной цифровой, динамической системы, которая позволяет описывать и прогнозировать поведение трубопроводов. Используются критерии соответствия типа “особых” точек, зависящих традиционно от внешнего воздействия и конструктив-

ных особенностей исследуемого трубопровода. Уровень устойчивости коммуникации отражает воздействие скоростных режимов воды (рабочее тело), проходящей через трубопровод. Каждый фрагмент коммуникации под воздействием эксплуатационных, сейсмических и техногенных видов нагрузки совершает колебания, которым соответствует свой уровень устойчивости, мате-

матически отражающийся видом “особой” точки фазового портрета.

При различных гидравлических режимах эксплуатации и базировки фрагменты таких коммуникаций имеют соответствующую частоту колебаний. Вследствие этого фрагменты трубопровода разрушаются.

Проведем некоторую классификацию разрушений фрагментов трубопровода в зависимости от режимов эксплуатации и места разрушений. Для прокладки водоотводящих коммуникаций используются стальные, чугунные, керамические, асбестоцементные, бетонные, железобетонные и пластмассовые трубы.

Вероятная возможность разрушения труб: в стыках, изгибах, вертикальной и горизонтальной плоскостях, с перепадом высот и в местах креплений (в опорных зонах). Причинами, вызывающими разрушения трубопровода различных диаметров в стыках, могут являться разные частоты и перемещения стыкующихся труб, наполненность просвета трубы при движении рабочего тела, скорости движения рабочего тела, чистота внутренней поверхности трубопровода, возникновение затворов, снижение чистоты поверхности на стыках.

Водоотводящие трубопроводы могут располагаться над поверхностью земли, на земле и под землей. Колебания трубопроводов на поверхности земли снижают напряжения, возникающие при движении рабочего тела, за счет колебаний самого трубопровода. Коммуникации, проходящие в грунте, воспринимаются непосредственно внутренней поверхностью и телом трубы, вследствие чего происходит потеря устойчивости, возникают остаточные деформации и локальные разрушения трубопровода. Поэтому велика потребность в методиках и моделях, позволяющих контролировать уровень устойчивости фрагментов нагружаемого трубопровода.

В данном случае предлагается использовать классический качественный метод расчета уровня устойчивости коммуникаций как строительных сооружений. Представление напряженно-деформируемого состояния фрагментов трубопровода в виде цифровой динамической системы позволяет описывать и прогнозировать поведение этих сооружений.

При различных скоростных режимах рабочего тела, которые оказывают непосредственное влияние на трубопровод, происходит изменение его состояния. Качественный метод решения дифференциальных уравнений динамической

системы в виде особых точек фазового портрета позволяет довольно точно фиксировать уровень устойчивости и переходные процессы исследуемой коммуникации [1–8]. Ниже рассматривается пример исследования равновесных состояний фрагментов водоотводящего трубопровода, базированного (т.е. закрепленного на подвесных опорах) на потолке перекрытия подвального помещения.

При помощи цифровой видеокамеры был снят фрагмент водоотводящего трубопровода (рис. 1), помеченный маркером, при движении по нему рабочего тела (жидкости).



Рис. 1

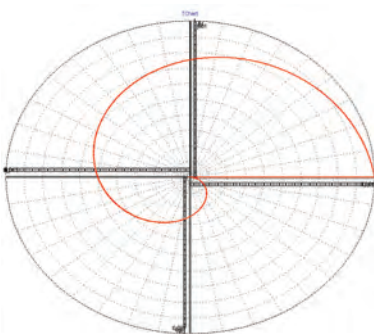
С помощью разработанного авторами программного обеспечения проведено распознавание ортогональных перемещений маркера вместе с телом трубопровода. Полученные перемещения являются изменяющимися в реальном времени коэффициентами слагаемых дифференциальных уравнений динамических систем. Качественные решения динамической системы, отражающие во времени поведение фрагмента трубопровода в виде особых точек фазового портрета, однозначно определяют уровень устойчивости исследуемого объекта и переходные процессы, происходящие в нем.

В результате, в соответствии с [1, 2, 4], за период наблюдения нами было получено поле устойчивых и неустойчивых областей, определяющих различные равновесные состояния, в которых находился исследуемый фрагмент трубопровода (см. таблицу). Так как фрагмент трубопровода закреплен к потолку помещения, то основная нагрузка легла на опоры. Сам трубопровод деформаций и разрушений не получал, а только переходил в различные равновесные состояния, что подтверждает поле особых точек фазового портрета.

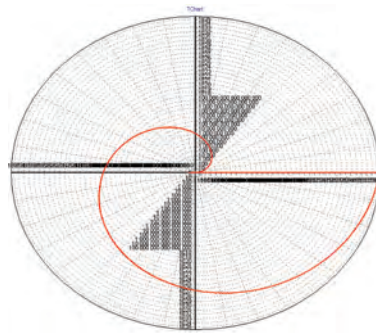
Особые точки фазового портрета приведены на рис. 2а–2е.

Исходные данные	Результат	График распределения точек	График U(t) и V(t)	График выбранной точки	График Sqrt(Sqr(U)+Sqr(V))
№ точки	W1	W2	B	C	Тип особой точки
1	0,999936	0,000357	-1,000293	0,000357	Неустойчивый Узел
2	-0,499252+1,322594i	-0,499252-1,322594i	0,998504	1,998509	Устойчивый Фокус
3	0,978242	0,213254	-1,191496	0,208614	Неустойчивый Узел
4	0,975328	0,842854	-1,818182	0,822059	Неустойчивый Узел
5	0,997914	0,496945	-1,494859	0,495908	Неустойчивый Узел
6	0,026801+0,215737i	0,026801-0,215737i	-0,053601	0,047261	Неустойчивый Фокус
7	0,599307	-0,559450	-0,039858	-0,335282	Седло
8	0,571950	-0,498339	-0,078112	-0,282451	Седло
9	0,029923+0,462128i	0,029923-0,462128i	-0,059845	0,214458	Неустойчивый Фокус
10	1,181768	0,247621	-1,429389	0,292631	Неустойчивый Узел
11	0,035049+0,295963i	0,035049-0,295963i	-0,070099	0,088823	Неустойчивый Фокус
12	0,073331+0,374058i	0,073331-0,374058i	-0,146662	0,145297	Неустойчивый Фокус
13	0,053319+0,571070i	0,053319-0,571070i	-0,106638	0,328964	Неустойчивый Фокус
14	0,036411+0,365345i	0,036411-0,365345i	-0,072823	0,134803	Неустойчивый Фокус
15	-0,150847+1,141746i	-0,150847-1,141746i	0,301693	1,326339	Устойчивый Фокус
16	1,007001	-2,379194	1,372193	-2,395852	Седло
17	0,999367	0,012061	-1,011428	0,012053	Неустойчивый Узел
18	-0,499869+1,322832i	-0,499869-1,322832i	0,999738	1,999755	Устойчивый Фокус
19	0,041590+0,917156i	0,041590-0,917156i	-0,083180	0,842906	Неустойчивый Фокус
20	0,980802+0,474021i	0,980802-0,474021i	-1,961604	1,186669	Неустойчивый Фокус
21	-0,409437+1,284981i	-0,409437-1,284981i	0,818873	1,818814	Устойчивый Фокус
22	-0,499992+1,322873i	-0,499992-1,322873i	0,999985	1,999985	Устойчивый Фокус
23	-0,498844+1,323021i	-0,498844-1,323021i	0,997687	1,999229	Устойчивый Фокус
24	-0,470030+1,316729i	-0,470030-1,316729i	0,940059	1,954703	Устойчивый Фокус
25	-0,153924+1,203347i	-0,153924-1,203347i	0,307848	1,471738	Устойчивый Фокус
26	1,005982	0,024044	-1,030026	0,024188	Неустойчивый Узел
27	0,917552	0,562595	-1,480147	0,516210	Неустойчивый Узел
28	-0,467621+1,317177i	-0,467621-1,317177i	0,935242	1,953624	Устойчивый Фокус
29	-0,498397+1,322269i	-0,498397-1,322269i	0,996794	1,996796	Устойчивый Фокус
30	0,999984	0,001817	-1,001801	0,001817	Неустойчивый Узел
31	1,000000	0,000302	-1,000302	0,000302	Неустойчивый Узел

Особая точка 14.  
Неустойчивый фокус



Особая точка 15.  
Устойчивый фокус



Особая точка 16. Седло

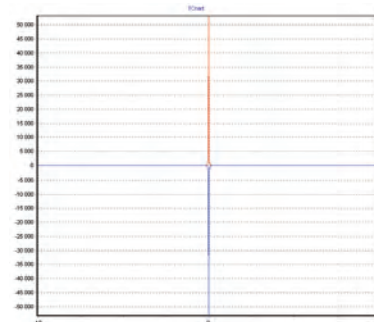
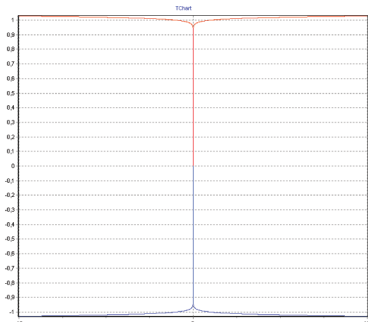
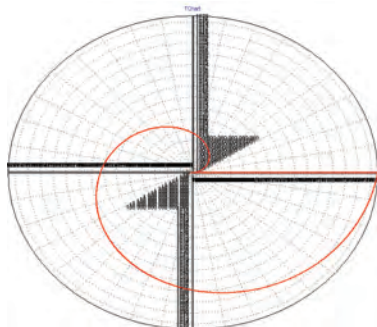


Рис. 2а

Особая точка 17.  
Неустойчивый узел



Особая точка 18.  
Устойчивый фокус



Особая точка 19.  
Неустойчивый фокус

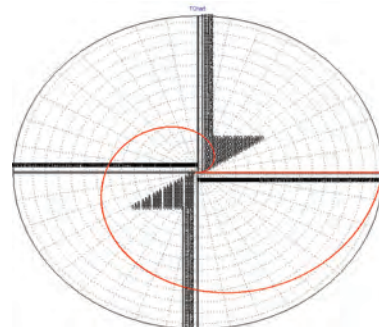
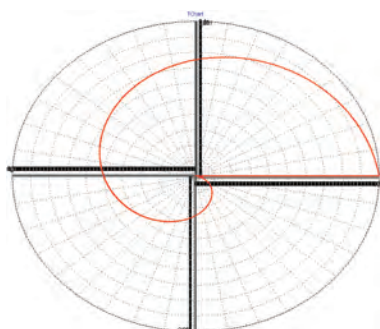
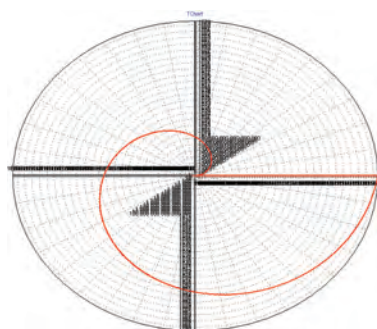


Рис. 2б

Особая точка 20.  
Неустойчивый фокус



Особая точка 21.  
Устойчивый фокус



Особая точка 22.  
Устойчивый фокус

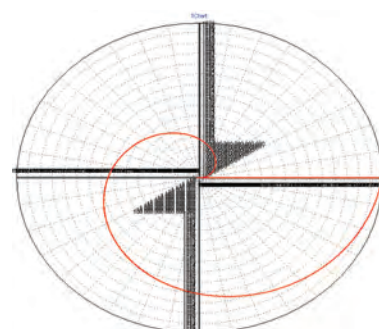
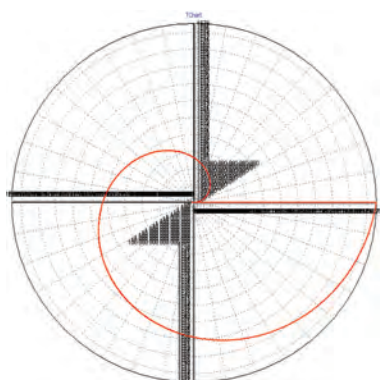
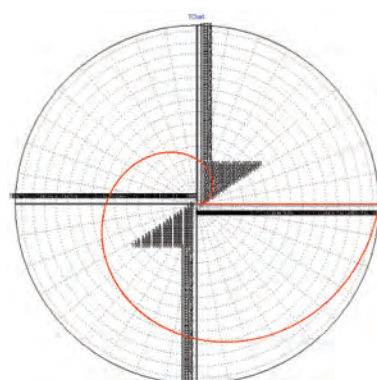


Рис. 2в

Особая точка 23.  
Устойчивый фокус



Особая точка 24.  
Устойчивый фокус



Особая точка 25.  
Устойчивый фокус

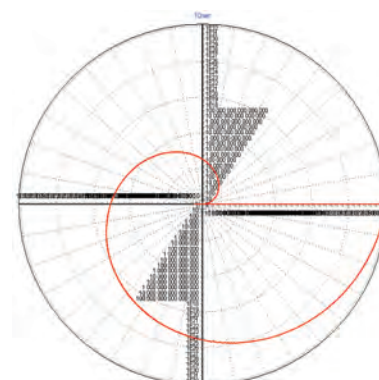
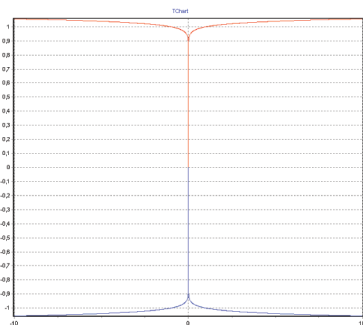
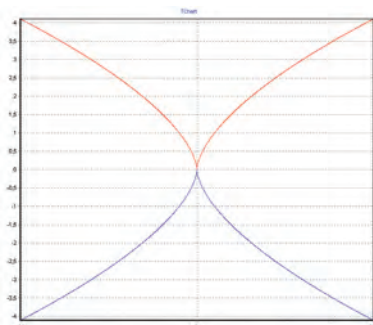


Рис. 2г

Особая точка 26.  
Неустойчивый узел



Особая точка 27.  
Неустойчивый узел



Особая точка 28.  
Устойчивый фокус

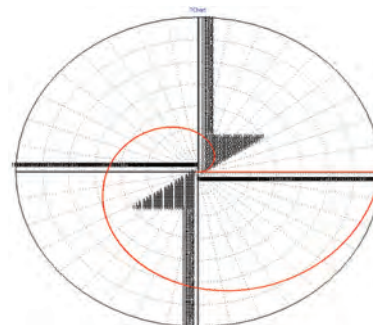
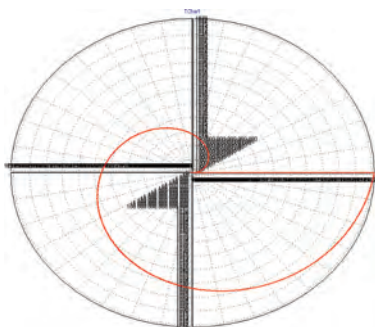
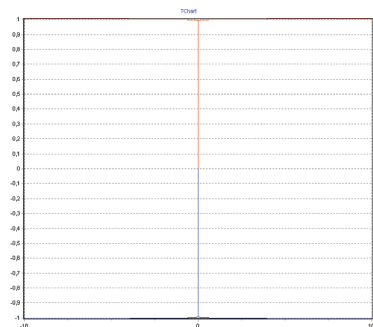


Рис. 2д

Особая точка 29.  
Устойчивый фокус



Особая точка 30.  
Неустойчивый узел



Особая точка 31.  
Неустойчивый узел

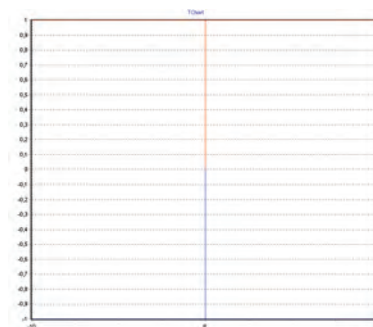


Рис. 2е

Определение управляющих параметров, меняющихся во времени и численно отражающих бифуркационный процесс в каждый момент времени двумерной динамической системы, характеризует поведение фрагментов сооружения перехода из одного устойчивого состояния в другое. При этом уровень устойчивости уже не может быть отражен бинарно, то есть “особые” точки трансформируются, переходя одна в другую, и явно не выражены. Фиксируемый переход одной особой точки в другую отражается изменением табличных данных решения системы дифференциальных уравнений динамической системы, значениями управляющих параметров и визуально-графически.

Таким образом, предложенная методика позволяет определять устойчивые состояния и моделировать поведение трубопровода, почти свободно базирующегося на точечных опорах. Ранее нами были проведены испытания и выявлены соответствия уровней устойчиво-

сти с напряженно-деформируемыми диаграммами с образцами металлических стержней и бетонных призм. Все это позволяет определять деформационную картину разрушения фрагментов трубопровода по их уровням устойчивости.

#### Литература

1. Арнольд В.И. Обыкновенные дифференциальные уравнения. М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1984. 271 с.
2. Йосс Ж., Джозеф Д. Элементарная теория устойчивости и бифуркаций. М.: Мир, 1983. 300 с.
3. Матвеев Н.М. Методы интегрирования обыкновенных дифференциальных уравнений. М.: Высшая школа, 1963. 546 с.
4. Немыцкий В.В., Степанов В.В. Качественная теория дифференциальных уравнений. М.; Л.: Гос. изд-во технико-теоретической лит., 1949. 550 с.

## *Строительство*

---

5. *Палис Ж., Ди Мелу В.* Геометрическая теория динамических систем. М.: Мир, 1986. 301 с.
6. *Себехей В.Дж.* Неустойчивости в динамических системах. М.: Мир, 1982. 167 с.
7. *Хартман Ф.* Обыкновенные дифференциальные уравнения. М.: Мир, 1970. 720 с.
8. *Землянский А.А.* Нелинейная динамика массивных сооружений. Бишкек: Илим, 2008. 107 с.