

Опуская промежуточные вычисления, имеем:

$$D_{11} = \sigma^2 \left[ 1 - \frac{\Omega - \alpha}{v^2} (\Omega + \alpha \cos 2vh) e^{-2ah} \right],$$

$$D_{12} = -2\alpha\sigma^2 \frac{\Omega - \alpha}{v^2 \Omega^2} [\Omega^3 + \alpha^3 - e^{-2ah} (\Omega^3 + \alpha^3 \cos 2vh + v^3 \sin 2vh)],$$

$$D_{22} = \alpha\sigma^2 \frac{\Omega - \alpha}{v^2} \left\{ \alpha^2 - v^2 + \Omega^3 / \alpha - e^{-2ah} \left[ \Omega^3 / \alpha + (\alpha^2 - v^2) \cos 2vh + 2\alpha v \sin 2vh \right] \right\}$$

Таким образом, моделирование рассматриваемого процесса вновь осуществляется с помощью системы (12) с использованием соотношений (11).

### Список литературы

1. Диментберг М.Ф. Нелинейные стохастические задачи механических колебаний. — М.: Наука, 1980. — 368 с.
2. Фурунджиев Р.И. Вычислительная техника и ее применение. — Минск: Вицэйш. шк., 1984. — 461 с.

УДК 622.23.05:622.235

Б.М.Кенжин

Карагандинский государственный технический университет

### ТЕХНИЧЕСКАЯ УСТОЙЧИВОСТЬ ГИДРАВЛИЧЕСКИХ ВИБРАЦИОННО-СЕЙСМИЧЕСКИХ УСТРОЙСТВ

*Мақала дiрiлдi-сейсмикалық құрылғының техникалық орнықтылығын талдау әдiсiн әзiрлеуге арналған. Механикалық жүйелердiң орнықтылығының классикалық теориясының негiзгi қағидаларына талдау жасау негiзiнде «техникалық орнықтылық» ұғымы қалыптасты, зерттеудiң негiзгi кезеңдерi және алдыңғы нәтижелерi анықталды.*

*Paper is devoted elaboration of a method of the analysis of technical stability of vibration seismic devices. On the basis of the analysis of basic theses of classical theories of mechanical systems stability the concept «technical stability» is formulated, the basic investigation phases are developed and preliminary results are received.*

Сопоставление расчетных и истинных значений выходных показателей виброисточников, а также корреляционный анализ экспериментальных результатов свидетельствует, что их значения определяются не только ожидаемыми значениями параметров систем, но и их отклонениями от этих значений. Под «ожидаемыми» значениями в дальнейшем будем понимать значения, которые задаются при настройке параметров механической системы. Отклонения от ожидаемых параметров приводят к отклонению показателей источника, что отрицательно сказывается на устойчивости движения. Оценка отклонения выходных показателей может быть проведена с использованием основных положений устойчивости механических систем.

В настоящее время имеется достаточно исследований устойчивости механических систем [1]. Достоинствами алгебраических критериев устойчивости Рауса-Гурвица [2] и частотных критериев Найквиста, Михайлова и других [3] является то, что они позволяют исследовать устойчивость анализируемой системы без трудоемких приемов интегрирования. Однако при этом обнаруживается ряд недостатков:

- необходимость выполнения дополнительных расчетов, не относящихся непосредственно к получению информации о рабочих характеристиках изучаемых систем;
- малая физическая наглядность и сложность, как самих критериев, так и путей их использования при исследовании;
- необходимость привлечения дополнительных методов для выявления областей устойчивости.

Наиболее приемлемым к исследованию устойчивости механических систем, на наш взгляд, является комплексный метод, сформулированный в [1]. Для исследования устойчивости какого-либо режима движения предполагается, что он каким-либо образом нарушен, и движение описывается функ-

цией  $q + \delta q$ , близкой к функции  $q = q(t)$ , описывающей невозмущенный режим движения. Если отклонение  $\delta q(t)$  с течением времени возрастает, то исследуемый режим неустойчив, в случае постепенного затухания функции  $\delta q(t)$  — режим устойчив. Такой подход к исследованию устойчивости соединяет физическую наглядность с достаточной легкостью решения.

Беря за основу выделенный принцип, сформулируем понятие устойчивости для гидравлических вибрационных и ударных устройств. Интуитивно инженер обычно представляет смысл «устойчивого режима движения механизма». Однако такого интуитивного представления недостаточно, и необходимы строгие понятия, которыми можно пользоваться в дальнейшем.

Под устойчивым движением устройства понимается движение, при котором для всякой как угодно малой области изменения начального параметра системы  $P_k$  в его окрестности  $\varepsilon_p$  ( $|\Delta P_k| < \varepsilon_p$ ) выходные показатели устройства  $C_i$  при его последующем движении ограничены заданной окрестностью  $\varepsilon_c$  ( $|\Delta P_k| < \varepsilon_c$ ). Окрестности начальных параметров (или их отклонения от ожидаемых), как и окрестности выходных показателей, определяются особенностью эксплуатации источника или технико-эксплуатационными требованиями.

Исходя из формулировки устойчивости движения в процессе исследования источника могут быть решены две задачи: прямая и обратная.

Прямая задача: при заданных ожиданиях и окрестностях параметров системы определить ожидания и окрестности выходных показателей. При решении этой задачи в качестве исходных данных используются отклонения параметров всех составных частей источника от их номинальных значений. Оценка устойчивости производится сопоставлением полученных отклонений показателей от их номинальных значений:  $\varepsilon_c \leq [\varepsilon_c]$ .

Обратная задача: при заданных значениях ожидания и окрестностям выходных показателей системы определить ожидания и окрестности параметров. Эта задача использует в качестве исходных данных допустимое отклонение выходных показателей от их номинального значения. Оценка устойчивости производится сопоставлением полученных отклонений параметров от их номинальных значений ( $\varepsilon_p \leq [\varepsilon_p]$ ) и соответствующим подбором этих значений.

Для сейсмического источника, основным требованием к которому является строгое регламентирование отклонения выходных показателей от ожидаемых, первоочередной интерес представляет решение обратной задачи.

Очевидно, что ожидания и окрестности параметров, соответствующие ожиданию показателей системы и их окрестностям, будут зависеть от размеров окрестностей показателей. На данном этапе исследований эти размеры установлены быть не могут. Основываясь на опыте создания вибрационных и ударных механизмов, можно ограничиться размерами зон окрестности в пределах  $\pm 5\%$ .

Исходными величинами при исследовании устойчивости являются определенные ранее величины параметров и показателей (в дальнейшем будем называть их «ожиданиями»). Подлежат определению границы изменения параметров  $C_H$  и  $P_0$ .

Анализ полученных отклонений произведен численным методом. Счет производится от внутреннего цикла к внешнему в следующем порядке. Устанавливается значение коэффициента жесткости  $C_H$  и возмущающей силы  $P_0$  и определяются выходные показатели для всех значений частоты  $\omega$ . Затем изменяется величина  $P_0$  с заданным шагом при неизменном значении  $C_H$ , и повторяется изменение  $\omega$ . После того, как  $P_0$  пройдет всю область изменения, коэффициент  $C_H$  меняет свое значение во всей области изменения с заданным шагом.

Для удобства анализа результаты счета представлены в виде графических зависимостей. Каждый из графиков построен следующим образом. Для ранее исследованных интервалов:  $P_0 = 10^7$  Н;  $4 \cdot 10^7$  Н;  $7 \cdot 10^7$  Н;  $10^8$  Н и  $C_H = 0,3 \cdot 10^{14}$  Н/м;  $0,5 \cdot 10^{14}$  Н/м;  $0,7 \cdot 10^{14}$  Н/м определялись пределы изменения, границы которых лежат в  $\pm 5\%$ . Изменение каждого из показателей, а именно перемещение подвижных частей  $x_1$  скорости их в конце обратного хода  $v_2$  генерируемой энергии  $EV$  и КПД с изменением каждого из параметров в заданных пределах изображено соответствующей ломаной линией. На этом же графике изображены ожидаемый параметр и ожидаемый показатель с соответствующими  $\pm 5\%$ -ными пределами их изменения зоны устойчивости. Нахождение каждой из ломаных линий в границах зоны устойчивости говорит об устойчивости движения устройства при соответствующих параметрах.

Исследования проводятся в пределах выбранных и обоснованных ранее интервалов изменения жесткости гидросистемы и возмущающей силы [4].

Рассмотрим режим работы  $P_0 = 10^7$  Н,  $C_H = 0,7 \cdot 10^{14}$  Н/м при прямоугольной форме изменения управляющим импульсом. Графический анализ этого режима приведен на рисунках 1–9. На этих рисунках изображены результаты исследований предыдущего этапа (ожидаемые величины показателей при заданных величинах параметров), а также результаты счета.

Приведенные зависимости (рис. 1 а) определяют зоны устойчивого движения в заданном режиме по отношению к  $x_1$ , определяемые возмущающей силой. На рисунке 1 б показаны зоны устойчивого движения по отношению к  $x_1$ , характеризующиеся жесткостью гидропривода. Полученные зависимости дают возможность определить интервалы изменения жесткости для каждого интервала возмущающей силы, в которых движение механизма устойчиво. Сведем эти результаты в таблицу 1.

Таблица 1

Интервалы устойчивого движения по отношению к перемещению  $x_1$ 

$P_0 \cdot 10^7$ , Н	0,35	1,0	1,05	1,1
$C_H^{\max} \cdot 10^{14}$ , Н/м	0,723	0,72	0,718	0,717
$C_H^{\min} \cdot 10^{14}$ , Н/м	0,718	0,715	0,713	0,711

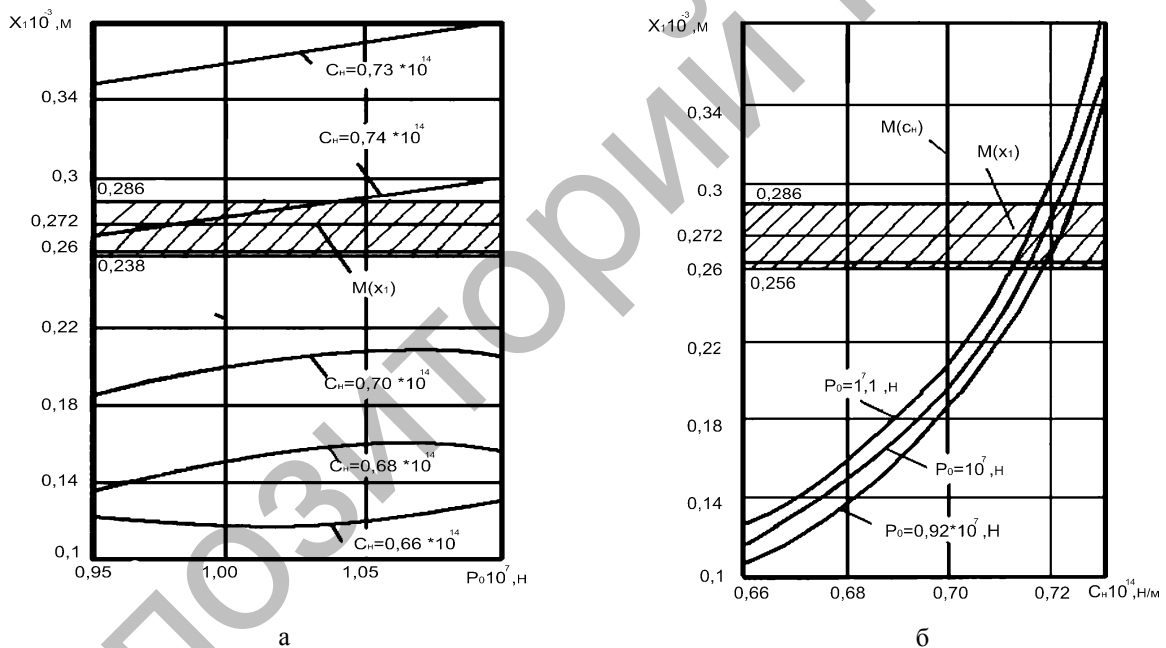


Рис. 1. Зависимости ожидаемого перемещения подвижных частей  $M(x_1)$  от ожидаемых величины возмущающей силы  $M(P_0)$  (а) и величины жесткости гидросистемы  $M(C_H)$  (б)

Рисунок 2 показывает, что зона устойчивости весьма мала и занимает незначительную часть рассматриваемой плоскости.

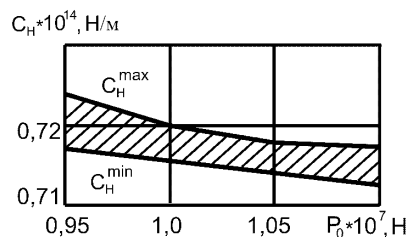


Рис. 2. Зона устойчивого движения по отношению к перемещению подвижных частей

Зоны устойчивости, определяющие изменение скорости подвижных частей в конце обратного хода  $v_2$ , приведены на рисунке 3 а. Последние зависимости определяют зоны устойчивого движения по отношению к  $v_2$ , характеризующиеся возмущающей силой. Рисунок 3 б показывает зоны устойчивости по отношению к  $v_2$ , определяемые жесткостью гидросистемы. Как видно из приведенных рисунков, область устойчивого движения для  $v_2$  незначительна, однако она есть. Определим интервалы жёсткости для этой области (табл. 2).

Т а б л и ц а 2

Интервалы устойчивого движения по отношению к скорости в конце обратного хода  $v_2$

$P_0 \cdot 10^7, \text{Н}$	0,95	1,0	1,05	1,1
$C_H^{\max} \cdot 10^{14}, \text{Н/М}$	Область отсутствует	В рассматриваемом интервале нет		
$C_H^{\min} \cdot 10^{14}, \text{Н/М}$		0,715	0,713	0,711

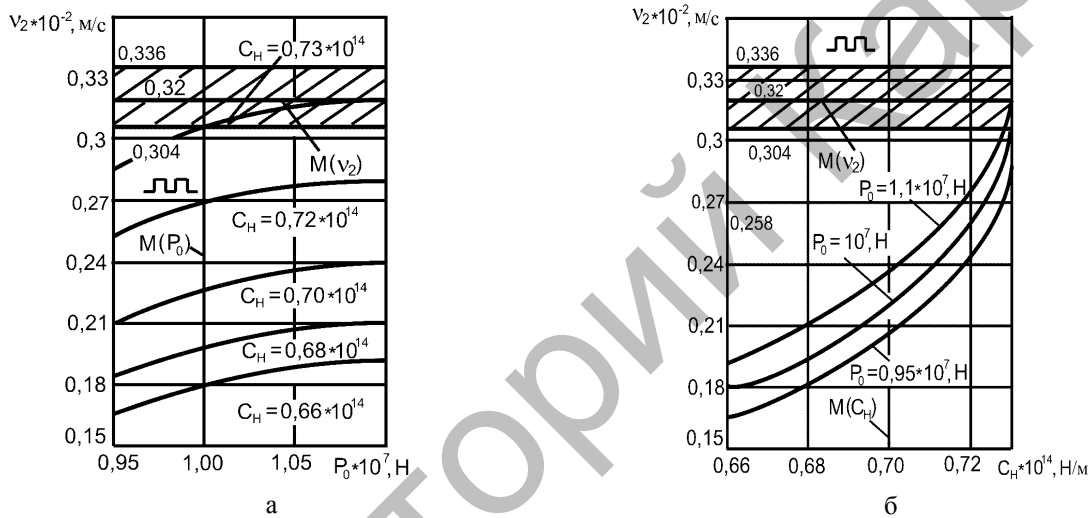


Рис. 3. Зависимости ожидаемой скорости в конце обратного хода  $M(v_2)$  от ожидаемой величины возмущающей силы  $M(P_0)$  (а) и от ожидаемой жесткости гидросистемы  $M(C_H)$  (б)

Изобразим графически полученные результаты и ограничим область устойчивости на плоскости  $v_2$  (рис. 4).

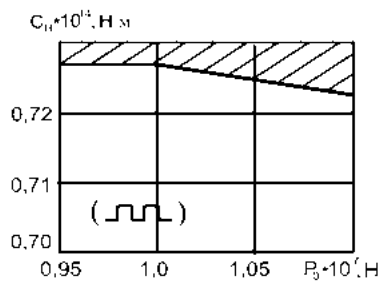


Рис. 4. Зона устойчивого движения по отношению к скорости в конце обратного хода  $v_2$

Зона устойчивости для скорости еще меньше, чем для перемещения. Следует отметить также, что найденные две зоны не имеют общих точек на плоскости.

Рисунок 5 а определяет зону устойчивого движения по отношению к  $EV$ , определяемую возмущающей силой.

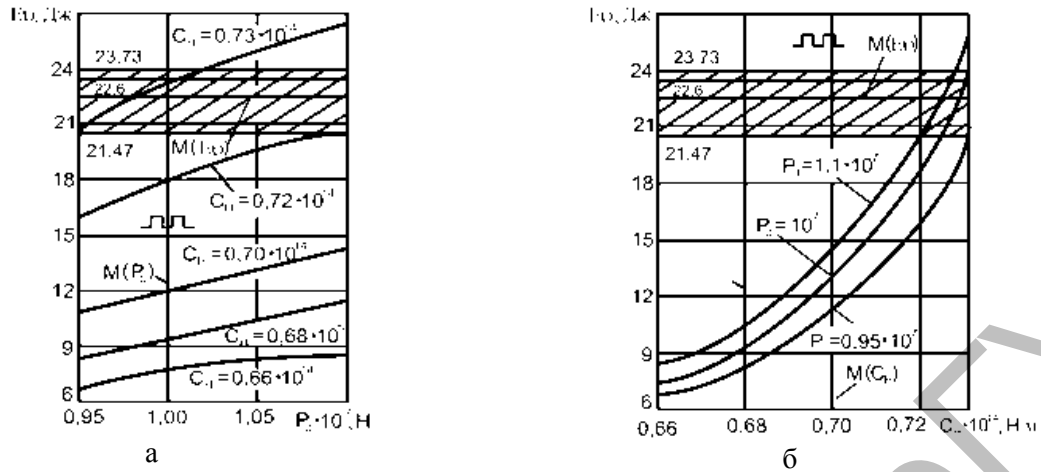


Рис. 5. Зависимости ожидаемой генерируемой энергии  $M(EV)$  от ожидаемой величины возмущающей силы  $M(P_0)$  (а) и от ожидаемой величины жесткости гидросистемы  $M(C_H)$  (б)

На рисунке 5 б приведена зона устойчивого движения по отношению к  $EV$ , характеризующая жесткостью гидросистемы.

Эти зависимости показывают, что зона устойчивости увеличивается таким образом, что в ней оказываются уже части каждой из кривых. Установим величины жесткости, соответствующие устойчивому движению (табл. 3). Исследование изменения генерируемой энергии приведено на рисунке 5 (а, б).

Т а б л и ц а 3

**Интервалы устойчивого движения по отношению к генерируемой энергии  $EV$**

$P_0 \cdot 10^7, \text{Н}$	0,95	1,0	1,05	1,1
$C_H^{\max} \cdot 10^{14}, \text{Н/м}$	В рассматриваемом интервале нет		0,73	0,725
$C_H^{\min} \cdot 10^{14}, \text{Н/м}$	0,729	0,723	0,721	0,717

Изобразим зону устойчивости на плоскости (рис. 6).

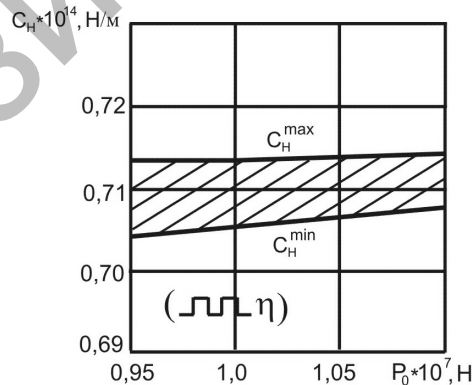


Рис. 6. Зона устойчивого движения по отношению к генерируемой энергии  $EV$

Полученная зона увеличивает свою площадь на плоскости, однако охватывает еще не все интервалы изменения параметров. Исследование изменения коэффициента передачи энергии  $\eta$  приведены на рисунке 7 (а, б). Приведенный рисунок 7 а показывает зоны устойчивого движения по отношению к коэффициенту передачи энергии, определяемые возмущающей силой. Рисунок 7 б характеризует зоны устойчивого движения, определяемые жесткостью гидросистемы.

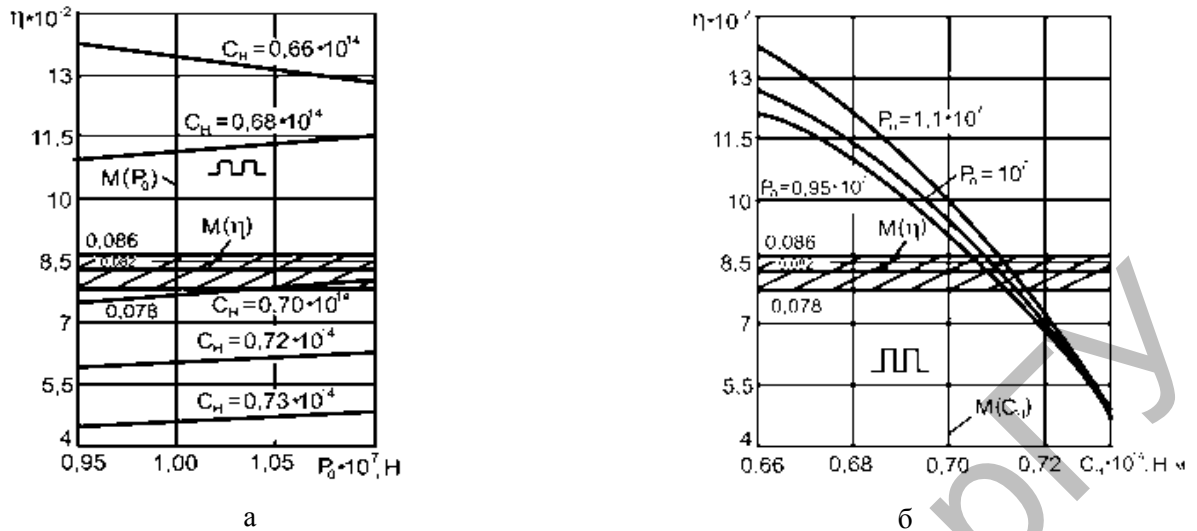


Рис. 7. Зависимость ожидаемого коэффициента передачи энергии  $M(\eta)$  от ожидаемой величины возмущающей силы  $M(P_0)$  (а) и от ожидаемой жесткости гидросистемы  $M(C_H)$  (б)

Из рисунков видно, что каждый из рассматриваемых режимов имеет зону устойчивости, лежащую в пределах выбранной плоскости. Установим границы изменения жесткости гидросистемы (табл. 4).

Изобразим графически полученную зону устойчивости (рис. 8). Полученная зона устойчивости наиболее широко и полно (в сравнении с предыдущими) охватывает все зоны исследуемой плоскости.

Т а б л и ц а 4

**Интервалы устойчивого движения по отношению к коэффициенту передачи энергии**

$P_0 \cdot 10^7, \text{H}$	0,95	1,0	1,05	1,1
$C_H^{\max} \cdot 10^{14}, \text{H/m}$	0,704	0,705	0,706	0,707
$C_H^{\min} \cdot 10^{14}, \text{H/m}$	0,713	0,713	0,714	0,714

Приведенные рассуждения и математические операции позволили установить зоны устойчивого движения по отношению к каждому из выбранных критериев (рис. 3, 6, 9). Все точки, лежащие в заштрихованных областях этих рисунков, определяют величины жесткости и возмущающей силы, соответствующие друг другу.

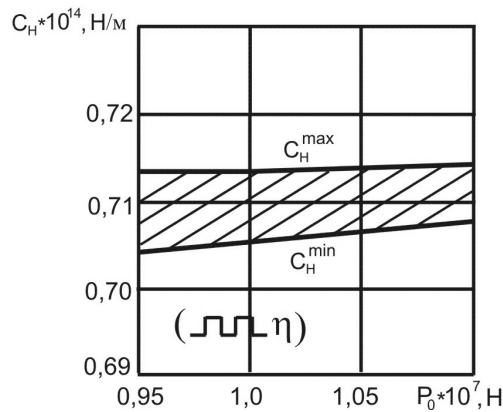


Рис. 8. Зона устойчивого движения по отношению к коэффициенту передачи энергии  $\eta$

Если при проектировании вибрационного механизма необходимо обеспечить его устойчивость по какому-либо из выбранных критериев в отдельности, нужно использовать соответствующий рисунок. Если же должны удовлетворяться все критерии, то определим совмещенную зону устойчивости. Путем наложения упомянутых рисунков получим зону, которая приведена на рисунке 9.

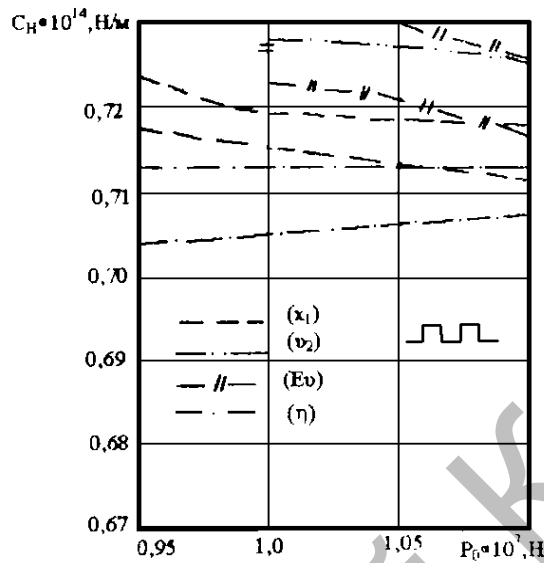


Рис. 9. Совмещенная зона устойчивого движения прямоугольного импульса

Он может быть использован при обеспечении устойчивого движения по каждому из критериев в отдельности. Сопоставив соответственно рисунки 2 и 8, а также 4 и 6, получим, что устойчивость движения может быть обеспечена одновременно либо по отношению  $x_1$  и  $\eta$ , либо по отношению  $v_2$  и  $EV$  (рис. 10).

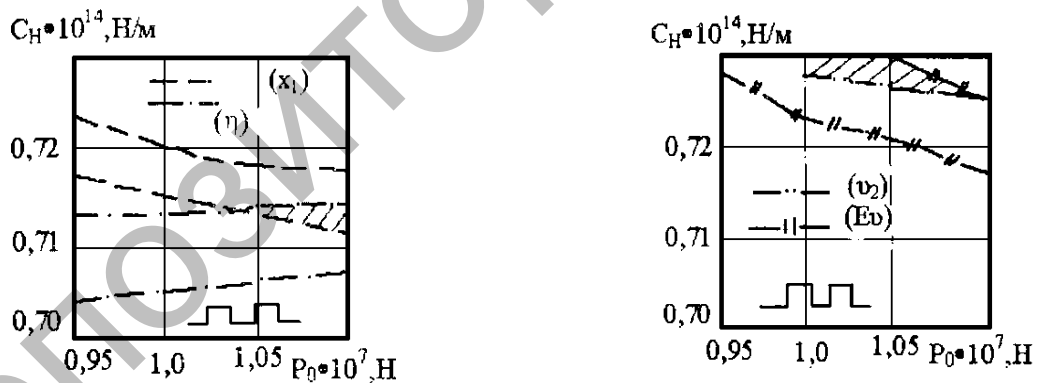





Рис. 10. Частично совмещенная зона устойчивого движения для прямоугольного импульса

Совмещенная зона устойчивого движения дает возможность также устанавливать величину возмущающей силы и жесткости гидропривода в случае, когда предъявляются требования устойчивости к генерируемой энергии и коэффициенту передачи энергии. Остальные режимы работы виброисточника, не рассмотренные в вышеприведенных исследованиях, неустойчивы в целом, т.е. не имеют общих точек ни по одному из выбранных показателей.

Таким образом, степень устойчивости гидравлического виброисточника может быть охарактеризована таблицей 5. Согласно таблице выбираются режимы движения и соответствующие показатели этих режимов исходя из эксплуатационных требований использования источника.

Характеристика степени устойчивости режимов движения вибрационных механизмов

Возмущающая сила, $P_0 \cdot 10^8$ , Н	Жёсткость гидросистемы, $C_H \cdot 10^{14}$ , Н/м	Форма импульса	Степень устойчивости движения
0,1	0,5		Частично устойчивое (2 показателя)
0,4	0,5		Устойчивое в целом
	0,5		Устойчивое в целом
0,7	0,5		Частично устойчивое (1 показатель)
0,4	0,5		Частично устойчивое (3 показателя)
0,7	0,5		Устойчивое в целом
0,4	0,5		Частично устойчивое (2 показателя)
0,7	0,5		Частично устойчивое (2 показателя)

Содержание исследований может быть сведено к следующим основным положениям.

При эксплуатации гидравлических вибросейсмических источников в технологических процессах горного производства, и в первую очередь при динамическом воздействии на углепородный массив, и в геофизике на первый по значимости план выходит проблема устойчивости движения основного исполнительного элемента. Анализ показывает, что исследование устойчивости движения может быть сведено к «технической устойчивости», т.е. к стабилизации выходных показателей источника от одного рабочего цикла к другому. Такая интерпретация приводит к большей наглядности и к значительному упрощению использования на практике основных результатов.

Построенные и исследованные зоны устойчивого движения по основным выходным показателям дают возможность получить совмещенные зоны устойчивости. При различной вариации параметров источника движение основного исполнительного элемента может быть устойчивым в целом или частично устойчивым. При соответствующем задании предельных отклонений выходных показателей по разработанной методике устанавливаются предельные зоны отклонения внутренних параметров. Установленные зоны лежат в основе подбора или проектирования элементов, входящих в состав вибросейсмических источников.

#### Список литературы

1. Четаев Н.Г. Устойчивость движения. Работы по аналитической механике. — М.: Изд-во АН СССР, 1962.
2. Красовский Н.Н. Некоторые задачи устойчивости движений. — М.: Физматгиз, 1951.
3. Моисеев Н.Н. Численные методы в теории оптимальных систем. — М.: Наука, 1971.
4. Пивень Г.Г., Смирнов Ю.М. Низкочастотные гидравлические импульсные системы (теория, опыт создания). — Караганда: Изд-во КарГТУ, 2006. — 316 с.