

ПРИМЕНЕНИЕ ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ДЛЯ СРАВНИТЕЛЬНОГО АНАЛИЗА ВАРИАНТОВ ПОСТРОЕНИЯ МНОГОЭЛЕМЕНТНЫХ ПЬЕЗОРЕЗОНАНСНЫХ ДАТЧИКОВ

В.Н. Седалищев, М.Ю. Ларионов

Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова
г. Барнаул

Представлены результаты имитационного моделирования различных вариантов схем включения многоэлементных измерительных преобразователей, основанных на использовании связанных колебаний пьезорезонаторов.

Ключевые слова: многоэлементные измерительные преобразователи, связанные колебания пьезорезонаторов.

Необходимость в разработке многоэлементных измерительных преобразователей резонансного типа, в частности, пьезорезонансных датчиков, основанных на модуляции связанных колебаний в системах с конечным числом степеней свободы (МЭ МСК ПРД), обусловлена противоречивостью требований, предъявляемых к средствам измерений, применяемых в тяжелых условиях эксплуатации. Это – необходимость в повышении чувствительности к измеряемым параметрам и снижении чувствительности к дестабилизирующим воздействиям. Этого едва ли можно достигнуть без усложнения конструкций чувствительных элементов датчиков, их электронных схем, потребуется также разработка и использование соответствующего программного обеспечения для микропроцессорной обработки первичной измерительной информации.

В частности решению данной проблемы может послужить рациональное использование нелинейных процессов в сложных динамических системах многоэлементных датчиков резонансного типа. Например, как было показано [1, 2], рациональное использование в конструкциях многоэлементных ПРД режимов сильно и слабо связанных колебаний позволяет существенно повысить чувствительность к измеряемым физическим величинам и, в тоже время, снизить чувствительность к дестабилизирующим воздействиям.

МЭ МСК ПРД могут быть достаточно сложной конструкции. Для решения конкретных задач требуется оптимизация конструкций чувствительных элементов, схем включения и режимов связанных колебаний пьезорезонаторов. В качестве критерия оптимизации предлагается использовать коэффици-

ент эффективности измерительного преобразования (K_z), определяемый как отношение коэффициентов относительной чувствительности (КОЧ) устройств к измеряемым параметрам (K_x) и дестабилизирующим воздействиям (K_t). При этом чувствительность устройства к различным параметрам может быть оценена с использованием известных аналитических зависимостей, экспериментально, путем имитационного моделирования, по справочным данным и т.п. Таким образом, данный критерий позволяет осуществлять сравнительную оценку эффективности принципов построения измерительных устройств и определить пути повышения их метрологических характеристик.

Коэффициенты относительной чувствительности и эффективности характеризует степень нелинейности функции первичного измерительного преобразования $y=f(x;t)$ [1]:

$$K_x = \frac{\frac{\partial y}{\partial x}}{\frac{y}{x}} = \frac{\frac{\partial y}{\partial x}}{\frac{y}{x}} \cdot \frac{y}{x}, \quad K_t = \frac{\frac{\partial y}{\partial t}}{\frac{y}{t}} = \frac{\frac{\partial y}{\partial t}}{\frac{y}{t}} \cdot \frac{y}{t},$$

$$K_z = \frac{K_x}{K_t} \approx \frac{\left(\frac{\frac{\partial y}{\partial x}}{\frac{y}{x}} \right)_t}{\left(\frac{\frac{\partial y}{\partial t}}{\frac{y}{t}} \right)_x} \approx \frac{\left(\frac{S_H}{S_L} \right)_t}{\left(\frac{S_H}{S_L} \right)_x}.$$

Коэффициент эффективности процесса измерительного преобразования позволяет оценить потенциальные возможности измерительного устройства, получить количественную оценку, с помощью которой можно производить сравнение измерительных устройств самых разных типов, построенных с использованием различных физических явлений, с амплитудным и частотным выходом и т.п. Предлагаемый обобщенный показатель позволяет также производить сравнение по

метрологическим характеристикам различных вариантов конструктивного и схемного исполнения датчиков, режимов работы первичных измерительных преобразователей.

В частности, с помощью коэффициента эффективности можно оценить соотношение чувствительности измерительного преобразователя МЭ МСК ПРД к измеряемым изменениям параметров его эквивалентной электрической схемы замещения (ЭЭСЗ) и чувст-

вительности ИП к изменениям параметров элементов ЭЭСЗ, обусловленных влиянием дестабилизирующих факторов. Это позволяет произвести оптимизацию режимов работы таких многоэлементных ПРД.

На рисунке 1 приведены для примера упрощенные ЭЭСЗ ИП с двумя и тремя степенями свободы, с емкостной и индуктивной связями между контурами.

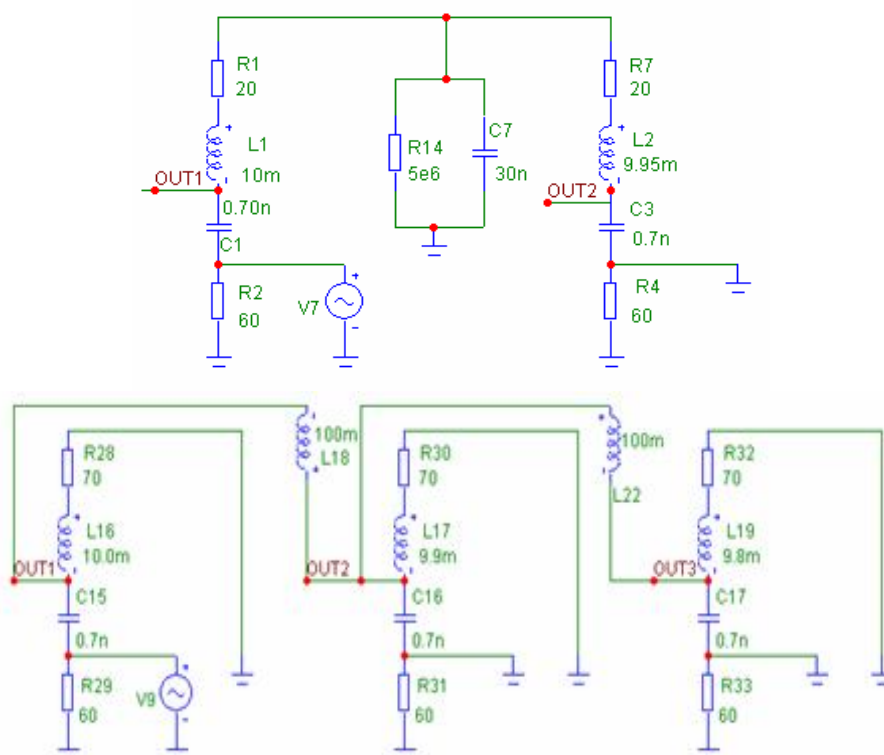


Рисунок 1 – Упрощенные ЭЭСЗ ИП с двумя и тремя степенями свободы

С помощью имитационного моделирования был выполнен анализ режимов работы одного из вариантов датчика, представляющего собой колебательную систему с двумя степенями свободы. При этом полезным изменением параметров ЭЭСЗ ИП являлось изменение емкости осцилляторов, а дестабилизирующим – изменение активных сопротивлений. При выполнении моделирования относительное изменение активного сопротивления составляло - 10%, а емкости - 1%.

Таким образом, можно, например, произвести оценку эффективности МСК датчика усилий, реализующего зависимость контактной жесткости вибратора с силовыми передающими элементами от величины измеряемого усилия. Дестабилизирующими факторами при этом являются акустические потери вибрато-

ра в силовых передающих элементах конструкции датчика и изменение температуры окружающей среды. В качестве выходного сигнала датчика используется отношение выходных напряжений, снимаемых с дополнительных обкладок пьезоэлементов, возбуждаемых в режиме автоколебаний и акустически связанных с чувствительным элементом датчика - вибратором.

На рисунках 2 и 3 представлены зависимости КОЧ (по амплитуде колебаний осцилляторов) и K_z от величины коэффициента связности для первого (ряды - 1, 3) и второго (ряды - 2, 4) осцилляторов для первой и второй нормальных частот синхронизации системы (НЧС).

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ДЛЯ СРАВНИТЕЛЬНОГО АНАЛИЗА МЕТРОЛОГИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ВАРИАНТОВ ПОСТРОЕНИЯ МНОГОЭЛЕМЕНТНЫХ ПЬЕЗОРЕЗОНАНСНЫХ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ

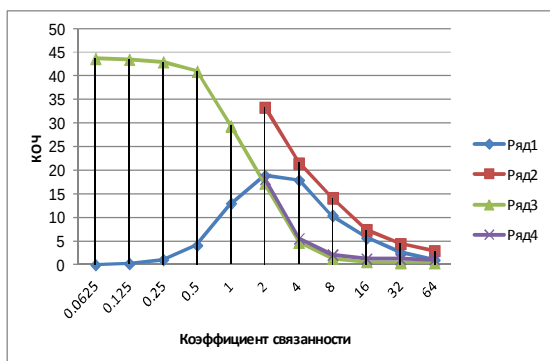


Рисунок 2 – Зависимость КОЧ и Кэ для первой НЧС

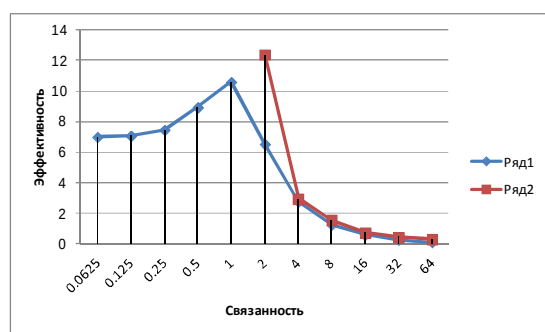


Рисунок 3 – Зависимость КОЧ и Кэ для второй НЧС

Как следует из приведенных графиков, максимальное значение КОЧ для данной системы достигается при критических значениях коэффициентов связи и относительной расстройки их собственных частот. Численные значения этих параметров обратно пропорциональны добротности колебательной системы ИП. Отношение коэффициентов связи и относительной расстройки частот осцилляторов определяет уровень связанности системы [1].

В рассмотренном примере возбуждение колебаний в системе осуществлялось по одноконтурной схеме со стороны низкочастотного осциллятора. При возбуждении колебаний в системе со стороны высокочастотного осциллятора, при использовании двухконтурной схемы выходные характеристики измерительного устройства будут отличаться.

В таблице 1 приведены результаты имитационного моделирования различных вариантов построения МСК ИП с двумя степенями свободы для простого амплитудного и дифференциального принципов построения измерительных схем датчика.

Таблица 1 – Результаты имитационного моделирования

	ГВ*			
	1НЧС		2НЧС	
	U1	U2	U1	U2
K(Rr)	0,7	0,8	0,2	0,3
K(Rb)	0,2	0,3	0,3	0,7
K(Cв)	13	9	24	13
Kэ(R)	0,2	0,4	1,3	2,2
Kэ(C)	18	12	98	41

	ГВ*			
	1НЧС		2НЧС	
	U1/U2		U1/U2	
K(Rr)	0,04		0,08	
K(Rb)	0,09		0,7	
K(Cв)	23		11	
Kэ(R)	2,5		8,8	
Kэ(C)	616		149	

	В*Г			
	1НЧС		2НЧС	
	U1	U2	U1	U2
K(Rr)	0,3	0,3	0,4	0,9
K(Rb)	0,7	0,3	0,3	0,2
K(Cв)	13	23	14	15
Kэ(R)	2,6	0,8	0,4	0,2
Kэ(C)	47	72	18	17

	В*Г			
	1НЧС		2НЧС	
	U1/U2		U1/U2	
K(Rr)	0,05		0,14	
K(Rb)	0,04		0,09	
K(Cв)	12		27	
Kэ(R)	8,8		0,7	
Kэ(C)	236		190	

	Г*Г		Г*Г	
	1НЧС		1НЧС	
	U1	U2	U1	U2
K(Rr)	0,8	0,7	0,3	0,3
K(Rb)	0,2	0,3	0,8	0,7
K(Cв)	1,9	23	4,9	19,5
Kэ(R)	0,3	0,5	2,4	2,2
Kэ(C)	2,5	35	16	65

	Г*Г		Г*Г	
	1НЧС		2НЧС	
	U1/U2		U1/U2	
K(Rr)	0,1		0,04	
K(Rb)	0,04		0,1	
K(Cв)	22		27	
Kэ(R)	0,5		22	
Kэ(C)	222		600	

Примечание: * обозначен осциллятор с изменяющимися параметрами. Г – осциллятор подключается к возбуждающему генератору, В – не возбуждаемый осциллятор (вибратор).

Общие правила для выбора оптимального варианта схемы датчика:

- в качестве взаимодействующих осцилляторов удобно использовать составные пьезоэлектрические трансформаторы (ПЭТ);
- при нормальных условиях эксплуатации можно использовать варианты схем датчиков, обеспечивающих высокое значение КОЧ, а для тяжелых условий рекомендуется ис-

пользовать варианты схем включения МСК ИП, обеспечивающие высокие значения коэффициента эффективности.

По результатам имитационного моделирования МСК ИП с двумя степенями свободы используя приведенные рекомендации можно сделать следующие выводы.

- Для повышения эффективности датчиков акусточувствительного типа, принцип работы которых основан на модуляции добротности осцилляторов, нужно использовать схемы с одним выходом, а в качестве чувствительного элемента использовать осцилляторы с наименьшими собственными частотами.
- Максимальную эффективность МСК датчика емкостного типа обеспечивает схема ГВ*, и возбуждаемая на частоте противофазных колебаний в системе. Выходным сигналом датчика при этом может являться напряжение, снимаемое с дополнительной обкладки пьезорезонатора (ПЭТ).
- Наименьшую эффективность измерения обеспечивает схема Г*Г, возбуждаемая на 1НЧС, с использованием в качестве выходного сигнала амплитуду колебаний низкочастотного осциллятора.
- Эффективность МСК датчиков с дифференциальным выходом намного выше, чем у датчиков с одним выходным сигналом (для некоторых схем МСК датчиков в десятки раз).
- Наиболее предпочтительными схемами построения МСК датчиков дифференциального типа с модуляцией емкости одного из осцилляторов являются варианты ГВ* с возбуждением на частоте синфазных колебаний (1НЧС) и ГГ* с возбуждением на частоте противофазных колебаний.
- Наименьшую эффективность дифференциального принципа формирования выходного сигнала обеспечивает датчик типа ГВ*, возбуждаемый на частоте противофазных колебаний (2НЧС).

С целью повышения точности измерений можно использовать МСК ИП дифференциального типа с тремя степенями свободы. При этом существенно возрастает количество возможных вариантов схем включения датчика. Рациональный выбор схемы включения такого датчика позволит обеспечить эффективность его работы. В таблицах 2 и 3 приведены результаты анализа чувствительности датчиков с тремя степенями свободы, дана оценка их эффективности. Полезным фактором при этом является изменение емкости в одном из взаимодействующих осцилляторов, а дестабилизирующим - изменение активного его сопротивления.

Таблица 2 – Чувствительность и эффективность ИП с тремя степенями свободы с амплитудным выходом

Схема	Кэф.	1НЧС		
		U1	U2	U3
ГВ*В	Кс	6,6	0,4	2,3
	Кг	0,3	0,3	0,2
	Кс/Кг	23	1	12
	Кг/Кс	0,04	0,9	0,06
ГВВ*	Кс	13,2	11,1	4,4
	Кг	0,2	0,3	0,1
	Кс/Кг	68	41	34
	Кг/Кс	0,02	0,02	0,03
В*ГВ	Кс	4,7	8,6	16,3
	Кг	0,4	0,4	0,4
	Кс/Кг	12	23	44
	Кг/Кс	0,08	0,04	0,02
ВГВ*	Кс	10,3	3,7	9,1
	Кг	0,3	0,3	0,3
	Кс/Кг	39	13	32
	Кг/Кс	0,02	0,07	0,03
В*ВГ	Кс	2,7	17,0	19,5
	Кг	0,4	0,4	0,3
	Кс/Кг	7	43	70
	Кг/Кс	0,1	0,02	0,01
ВВ*Г	Кс	5,6	2,5	3,8
	Кг	0,3	0,4	0,3
	Кс/Кг	18	7	11
	Кг/Кс	0,06	0,1	0,09
ГГВ*	Кс	12,4	7,2	5,3
	Кг	0,2	0,3	0,3
	Кс/Кг	52	27	18
	Кг/Кс	0,02	0,04	0,05
ГВ*Г	Кс	6,1	1,2	4,8
	Кг	0,3	0,3	0,3
	Кс/Кг	19	4	15
	Кг/Кс	0,05	0,3	0,07
В*ГГ	Кс	1,4	12,4	19,1
	Кг	0,2	0,9	1,3
	Кс/Кг	8	14	15
	Кг/Кс	0,1	0,07	0,07
Схема	Кэф.	2НЧС		
		U1	U2	U3
ГВ*В	Кс	1,4	1,8	0,9
	Кг	0,02	0,03	0,02
	Кс/Кг	90	64	41
	Кг/Кс	0,01	0,02	0,02
ГВВ*	Кс	9,3	13,2	0,3
	Кг	0,5	0,2	0,6
	Кс/Кг	19	60	0,5
	Кг/Кс	0,05	0,02	2,1
В*ГВ	Кс			
	Кг			
	Кс/Кг			
	Кг/Кс			
ВГВ*	Кс			
	Кг			
	Кс/Кг			
	Кг/Кс			
В*ВГ	Кс	4,5	27,1	7,2
	Кг	0,4	0,3	0,4
	Кс/Кг	10	92	18
	Кг/Кс	0,1	0,01	0,06
ВВ*Г	Кс	0,3	0,9	1,9
	Кг	0,02	0,01	0,0
	Кс/Кг	14	62	303
	Кг/Кс	0,07	0,02	0,00
ГГВ*	Кс	17,1	9,3	14,9

**ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ДЛЯ СРАВНИТЕЛЬНОГО АНАЛИЗА
МЕТРОЛОГИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ВАРИАНТОВ ПОСТРОЕНИЯ МНОГОЭЛЕМЕНТНЫХ
ПЬЕЗОРЕЗОНАНСНЫХ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ**

	Kr	0,4	0,3	0,6
	Kc/Kr	48	34	25
	Kr/Kc	0,02	0,03	0,04
ГВ*Г	Kc			
	Kr			
	Kc/Kr			
В*ГГ	Kc	20,8	31,0	14,9
	Kr	0,6	1,0	0,1
	Kc/Kr	37	32	130
Схема	Козф.	ЗНЧС		
		U1	U2	U3
ГВ*В	Kc	7,7	0,6	9,4
	Kr	0,5	0,7	0,7
	Kc/Kr	16	1	13
ГВВ*	Kr/Kc	0,06	1,09	0,08
	Kc	5,3	5,3	5,2
	Kr	0,1	0,2	0,2
В*ГВ	Kc/Kr	42	28	25
	Kr/Kc	0,02	0,04	0,04
	Kc	8,8	1,7	3,7
ВГВ*	Kr	0,2	0,1	0,1
	Kc/Kr	57	12	25
	Kr/Kc	0,02	0,08	0,04
В*ВГ	Kc	4,9	2,7	8,4
	Kr	0,2	0,2	0,2
	Kc/Kr	27	15	43
ВВ*Г	Kr/Kc	0,04	0,07	0,02
	Kc	6,8	3,8	5,5
	Kr	0,2	0,1	0,1
ГВ*Г	Kc/Kr	45	27	52
	Kr/Kc	0,02	0,04	0,02
	Kc	9,3	1,1	9,5
ГВВ*	Kr	0,7	0,7	0,6
	Kc/Kr	14	2	16
	Kr/Kc	0,07	0,6	0,06
ГВ*В	Kc	2,6	0,8	10,8
	Kr	0,1	0,2	0,2
	Kc/Kr	18	3	46
ГВ*Г	Kr/Kc	0,05	0,3	0,02
	Kc	8,5	0,9	9,3
	Kr	0,6	0,7	0,6
В*ГГ	Kc/Kr	14	1	15
	Kr/Kc	0,07	0,7	0,07
	Kc	10,9	0,2	0,6
ВГВ*	Kr	0,7	0,2	0,2
	Kc/Kr	15	1	4
	Kr/Kc	0,07	0,75	0,25

Таблица 3 – Чувствительность и эффективность ИП с тремя степенями свободы при измерении отношения амплитуд связанных колебаний осцилляторов

Схема	Выход	1НЧС			
		Kc	Kr	Kc/Kr	Kr/Kc
ГВ*В	U1/U2	7,0	0,06	117	0,01
	U1/U3	4,3	0,09	49	0,02
	U2/U3	2,6	0,15	17	0,06
ГВВ*	U1/U2	2,0	0,07	27	0,04
	U1/U3	18	0,06	291	0,003
	U2/U3	15,8	0,14	115	0,009
В*ГВ	U1/U2	12,8	0,03	423	0,002
	U1/U3	19,5	0,03	567	0,002
	U2/U3	7,1	0,004	1761	0,0006
ВГВ*	U1/U2	6,5	0,01	620	0,002
	U1/U3	20,4	0,03	770	0,001

	U2/U3	13,4	0,02	841	0,001
	U1/U2	13,2	0,02	715	0,001
	U1/U3	15,3	0,1	159	0,006
В*ВГ	U2/U3	2,3	0,1	20	0,05
	U1/U2	8,1	0,05	163	0,006
	U1/U3	1,7	0,04	41	0,02
ВВ*Г	U2/U3	6,2	0,008	806	0,001
	U1/U2	5,0	0,02	215	0,005
	U1/U3	18,1	0,04	414	0,002
ГВ*В	U2/U3	12,8	0,02	623	0,002
	U1/U2	7,3	0,007	1064	0,01
	U1/U3	1,3	0,0007	1880	0,0005
ГВ*Г	U2/U3	5,8	0,008	774	0,001
	U1/U2	12,9	0,7	19	0,05
	U1/U3	18,7	1	19	0,05
В*ГГ	U2/U3	6,1	0,3	19	0,05
	Выход	2НЧС			
		Kc	Kr	Kc/Kr	Kr/Kc
ГВ*В	U1/U2	0,4	0,04	8	0,12
	U1/U3	0,5	0,04	14	0,07
	U2/U3	0,9	0,005	162	0,006
ГВВ*	U1/U2	21,1	0,72	29	0,03
	U1/U3	9,0	0,09	98	0,01
	U2/U3	12,7	0,82	15	0,06
В*ГВ	U1/U2				
	U1/U3				
	U2/U3				
ВГВ*	U1/U2				
	U1/U3				
	U2/U3				
В*ВГ	U1/U2	36,7	0,8	48	0,02
	U1/U3	12,2	0,05	258	0,004
	U2/U3	23,0	0,7	32	0,03
ВВ*Г	U1/U2	0,6	0,005	120	0,01
	U1/U3	2,1	0,03	80	0,01
	U2/U3	2,8	0,02	133	0,01
ГВ*В	U1/U2	8,2	0,64	12,7	0,08
	U1/U3	2,3	0,24	9,9	0,1
	U2/U3	5,9	0,9	6,5	0,15
ГВ*Г	U1/U2				
	U1/U3				
	U2/U3				
В*ГГ	U1/U2	12,1	0,45	26,8	0,04
	U1/U3	6,3	0,45	14,1	0,07
	U2/U3	19,1	0,95	20,2	0,05
Схе- ма	Выход	3НЧС			
		Kc	Kr	Kc/Kr	Kr/Kc
ГВ*В	U1/U2	7,0	0,2	34	0,03
	U1/U3	1,8	0,2	8	0,12
	U2/U3	9,2	0,02	363	0,003
ГВВ*	U1/U2	0,1	0,06	1	0,9
	U1/U3	10,2	0,08	128	0,008
	U2/U3	10,3	0,02	625	0,002
В*ГВ	U1/U2	10,6	0,008	1370	0,0007
	U1/U3	12,7	0,009	1368	0,007
	U2/U3	2,0	0,001	1286	0,0008
ВГВ*	U1/U2	2,2	0,002	1250	0,0008
	U1/U3	12,7	0,01	1200	0,0008
	U2/U3	10,6	0,009	1203	0,0008
В*ВГ	U1/U2	10,8	0,008	1309	0,001
	U1/U3	12,6	0,04	281	0,003
	U2/U3	1,7	0,04	48	0,02
ВВ*Г	U1/U2	8,2	0,01	607	0,002
	U1/U3	0,2	0,06	4	0,26
	U2/U3	8,8	0,07	124	0,008
ГВ*В	U1/U2	1,9	0,09	20	0,05
	U1/U3	12,7	0,09	145	0,007
	U2/U3	11,0	0,004	2920	0,0003

ГВ*Г	U1/U2	7,6	0,06	137	0,007
	U1/U3	0,9	0,001	893	0,001
	U2/U3	8,8	0,05	161	0,006
В*ГГ	U1/U2	10,7	0,53	20	0,05
	U1/U3	11,6	0,55	21	0,05
	U2/U3	0,8	0,01	63	0,02

По результатам имитационного моделирования систем с тремя степенями свободы можно сделать следующие выводы.

- Максимальные показатели по КОЧ обеспечивают варианты: ГВВ* (выходные сигналы снимаются с первого и второго ПР); В*ГГ (выходные сигналы со второго и третьего ПР), возбуждаемых на 1НЧС; ВГВ* и В*ГВ с выходом с первого и второго ПР, возбуждаемых на первой НЧС.

- Для тяжелых условий эксплуатации (условие максимума Кэ) рекомендуется использовать варианты: ГВВ* (возбуждение на 1НЧС); В*ГГ (возбуждение на 2НЧС); ВГВ* и ГВВ* с выходом с первого и второго ПР при возбуждении колебаний на 1НЧС.

- При необходимости использования в качестве выходного сигнала датчика суммы выходных напряжений ПЭТ по условию обеспечения максимально возможной чувствительности можно рекомендовать варианты: В*ГГ (на 2НЧС), В*ВГ (на 1НЧС), ГВВ* (на 2НЧС), ГВВ*и В*ВГ (на 1НЧС). Достижимая при этом чувствительность намного меньше, чем при использовании разностного сигнала. Поэтому для тяжелых условий эксплуатации рекомендуется использовать схемы ГВ*В (на 2НЧС), ВВ*Г (на 2НЧС), В*ГГ (на 2НЧС).

- При использовании в качестве выходного сигнала датчика амплитуды одного из осцилляторов: для нормальных условий эксплуатации – схему В*ГГ с выходом U3 на 1НЧС или схему ГВ*В с выходом U3 на 1НЧС; для тяжелых условий эксплуатации - вариант В*ГГ с выходом U2 на 3НЧС.

- При использовании в качестве выходного сигнала датчика отношения выходных напряжений двух ПЭТ высокое значение КОЧ по R обеспечивается на 2НЧС схемами: ГВВ* (отношение амплитуд колебаний первого и второго осцилляторов), В*ВГ, ГВВ*. При этом максимальную эффективность процесса измерительного преобразования обеспечивают схемы ГВВ* на 3НЧС и ГВ*В на 1НЧС.

- Если в качестве выходного сигнала использовать разность напряжений двух ПЭТ, то для повышения чувствительности датчика нужно использовать варианты: В*ВГ, ГВ*В и В*ГГ (на 1НЧС). Для обеспечения максимальной эффективности – схемы ГВ*В и В*ГВ (на 3НЧС).

При измерении суммы напряжений с целью обеспечения условия максимальной чувствительности датчика рекомендуется использовать варианты: В*ГГ (на 1НЧС), ГВ*Г, ГВ*В и ВВ*Г (на 3НЧС), а для повышения эффективности - схемы В*ГГ (на 3НЧС), ГВ*В (на 3НЧС).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Андронов А.А. Теория колебаний/ А.А. Андронов, С.Э. Хайкин, А.А. Витт. – М.: Наука, 1981. 563 С.
2. Седалищев В. Н., Хомутов О. И. Высокочувствительные пьезорезонансные датчики с использованием связанных колебаний для экстремальных условий эксплуатации. – Барнаул: АлтГТУ, 2006. 184 с.
3. Седалищев В. Н. Измерительные устройства, основанные на реализации связанных колебаний в пьезорезонансных датчиковых структурах. // Ползуновский вестник. 2006. №2. – С. 264-270.

Седалищев Виктор Николаевич – д.т.н., профессор тел.: (3852) 29-09-13, e-mail: Sedalischew@mail.ru; **Ларионов Максим Юрьевич** – аспирант.