

УДК 621.317

К. Л. ШЕВЧЕНКО, Б. А. ТАНЮК, М. А. ПРИСЕНКО

**МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ
КОАКСИАЛЬНОГО РЕЗОНАНСНОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ
ВЛАЖНОСТИ С ИССЛЕДУЕМЫМ МАТЕРИАЛОМ**

Известно, что при контроле влажности листовых и рулонных материалов весьма перспективно применение коаксиальных резонансных преобразователей, работающих в диапазоне дециметровых волн [1]. Характерными их особенностями являются возможность одностороннего расположения датчика и высокая чувствительность к информативному параметру, что позволяет использовать резонансные датчики при контроле малых влажностей тонких материалов в труднодоступных местах. В качестве выходного информативного параметра резонансных преобразователей в большинстве случаев используется изменение резонансной частоты, вызванное взаимодействием с исследуемым материалом. Это позволяет значительно снизить составляющие погрешности, обусловленные влиянием нестабильности выходной мощности СВЧ генератора и параметров СВЧ тракта. Имеется, однако, целый ряд неинформативных параметров, изменение

уровней которых приводит к искажению передаточной характеристики резонансного преобразователя и повышению погрешности контроля. К таким параметрам следует отнести изменение толщины и поверхностной плотности материала, колебания температуры окружающей среды, нестабильность химического состава влаги в материале. Кроме того, на результат преобразования оказывают влияние конструктивные параметры резонансного датчика, оптимальным выбором которых можно обеспечить минимизацию чувствительности к наиболее влияющим неинформативным параметрам. В случае использования коаксиальных датчиков к таким параметрам можно отнести диаметр торца центрального и наружного проводников, толщину торцевой диэлектрической крышки резонатора.

Существующие аналитические описания [2] зависимости выходного параметра резонансных коаксиальных датчиков от перечисленных факторов не позволяют с достаточной точностью оценить влияние изменения неинформативных параметров на результат контроля. Таким образом, важной задачей исследования взаимодействия коаксиальных преобразователей с влагодержащими материалами является отыскание адекватного математического описания функции отклика в заданной части факторного пространства, иными словами, получение выражения, связывающего выходной параметр резонансного датчика с влияющими факторами в возможном диапазоне их изменения. Взаимодействие коаксиального резонансного датчика со всеми листовыми и рулонными материалами не может быть описано одной обобщенной моделью, так как диапазон изменения физико-химических характеристик различных материалов чрезвычайно широк. Для одного из подклассов таких материалов в качестве реального объекта контроля можно использовать белковую оболочку, используемую в качестве упаковки пищевых продуктов, при контроле которой таких параметров, как влажность, поверхностная плотность, температура, химический состав влаги и др., совпадает с диапазонами изменения параметров при контроле бумаги, некоторых видов тканей, кож и др. С учетом характера зависимостей выходного параметра от каждого из влияющих факторов, желательно получить модель, учитывающую эффекты третьего порядка от влияния влажности, как основного контролируемого параметра, квадратичные эффекты от поверхностной плотности и температуры. Для остальных факторов в пределах возможных диапазонов из изменения целесообразно ограничиться линейными эффектами. С учетом этого, при проведении эксперимента по построению модели необходимо обеспечить четыре уровня варьирования влажности, три — поверхностной плотности и температуры, два — остальных факторов. Учитывая конструктивные параметры резонатора и диапазона изменения влияющих факторов, запишем влияющие факторы и уровни их варьирования в натуральном X_i и кодовом F_i масштабах (табл. 1). Полный

факторный эксперимент, реализующий все возможные комбинации взаимодействия факторов включает 576 опытов. В целях сокращения экспериментальной работы целесообразно на первом этапе построить модель главных эффектов, не учитывающую перекрестных взаимодействий факторов:

$$Y = b_0 + \sum_{i=1}^2 b_i X_i^2 + \sum_{i=1}^3 b_{ii} X_i^2 + b_{111} X_1^3, \quad (1)$$

где b_0 — свободный коэффициент; b_i , b_{ii} , b_{111} — коэффициенты при факторах соответствующих порядков.

Таблица 1

№ п-п	Фактор	X_i	F_i
1	Влажность, %	10	0
		15	1
		20	2
		25	3
2	Поверхностная плотность, г/м ²	64	0
		68	1
		72	2
		24	0
3	Температура, °С	32	1
		40	2
		4,2	0
		5,2	1
5	Толщина диэлектрической крышки, мм	0,5	0
		1,5	1
6	Диаметр центрального проводника, мм	9	0
		15	1
		0,1	0
7	Осевой зазор, мм	0,6	1

Поскольку модель вида (1) содержит 12 членов, число опытов для получения значений ее коэффициентов не может быть меньше 12. Кроме того, для получения возможности проверки адекватности модели желательно иметь несколько дополнительных точек. При том, что один из факторов варьируется на четырех уровнях, в качестве базового плана эксперимента целесообразно использовать план вида $4^5//16$ из таблицы оптимальных планов [3], удовлетворяющий также требованию некоторой избыточности опытов.

План $4^5//16$ может быть несколькими вариантами преобразован к виду $2^4 \times 3^2 \times 4//16$, который соответствует количеству и уровням варьирования факторов в данной задаче. Наиболее рациональное преобразование, обеспечивающее получение плана эксперимента, близкого к Q -оптимальному [3], следующее: первый четырехуровневый фактор остается неизменным, второй и третий преобразуются в трехуровневые с помощью преобразования 3б из таблицы оптимальных преобразований [3], чет-

Таблица 2

Номер опыта	F_1		F_2		F_3		F_4		F_5		F_6		F_7	
	X_1		X_2		X_3		X_4		X_5		X_6		X_7	
1	0	10	0	64	0	24	0	4,2	1	1,5	0	9	1	0,6
2	2	20	0	64	1	32	1	5,2	0	0,5	0	9	0	0,1
3	3	25	0	64	2	40	0	4,2	0	0,5	1	15	0	0,1
4	1	15	0	64	0	24	1	5,2	1	1,5	1	15	1	0,6
5	0	10	1	68	1	32	0	4,2	0	0,5	1	15	1	0,6
6	2	20	1	68	0	24	1	5,2	1	1,5	1	15	0	0,1
7	3	25	1	68	0	24	0	4,2	1	1,5	0	9	0	0,1
8	1	15	1	68	2	40	1	5,2	0	0,5	0	9	1	0,6
9	0	10	2	72	2	40	1	5,2	1	1,5	0	9	0	0,1
10	2	20	2	72	0	24	0	4,2	0	0,5	0	9	1	0,6
11	3	25	2	72	0	24	1	5,2	0	0,5	1	15	1	0,6
12	1	15	2	72	1	32	0	4,2	1	1,5	1	15	0	0,1
13	0	10	0	64	0	24	1	5,2	0	0,5	1	15	0	0,1
14	2	20	0	64	2	40	0	4,2	1	1,5	1	15	1	0,6
15	3	26	0	64	1	32	1	5,2	1	1,5	0	9	1	0,6
16	1	15	0	64	0	24	0	4,2	0	0,5	0	9	0	0,1

зертый и пятый преобразуются в два двухуровневых каждый при помощи преобразования 2б. Матрица плана $2^4 \times 3^2 \times 4 // 16$ в натуральном и кодовом масштабах с учетом проделанных преобразований представлена в табл. 2.

Реализация плана эксперимента предполагает выполнение некоторых требований, основными среди которых являются проведение эксперимента рандомизировано во времени и получение оценки дисперсии опытов для определения их воспроизводимости. В соответствии с этими требованиями осуществлены три серии экспериментов, в каждой из которых последовательность проведения опытов определялась по случайному закону. В табл. 3 приведены результаты реализации плана экспериментов. Все опыты воспроизводимы.

Таблица 3

Номер опыта	Значения функции отклика Y			
	Серия 1	Серия 2	Серия 3	Y
1	9,6	8,8	73	8,6
2	16	14,7	14,5	15,1
3	30,3	30,1	30,5	30,3
4	18,3	15,3	18,2	17,3
5	14,2	14,7	14,8	14,6
6	30,4	31,3	28,9	30,3
7	13,2	12,6	12,8	12,9
8	29,6	30,9	27,8	29,4
9	16,8	17	15,4	16,4
10	20,3	18,8	19,1	19,4
11	38,2	35,8	36,2	36,7
12	32,4	29,5	28,1	30
13	12,9	13,2	13,1	13,1
14	20,4	20,5	18,8	19,9
15	22,4	20,6	19,5	20,8
16	12,1	12,4	11,8	12,1

Расчет коэффициентов модели производился по стандартной методике [4]. В результате расчета получены следующие значения коэффициентов модели по выражению (1):

$$\begin{aligned} b_0 &= 16,7; & b_1 &= 2,2; & b_2 &= 0,093; \\ b_3 &= 0,061; & b_4 &= -0,03; & b_5 &= -0,79; \\ b_6 &= 0,15; & b_7 &= 0,024; & b_{11} &= -2,8; \\ b_{22} &= 0,19; & b_{33} &= 2,9; & b_{111} &= -1,7. \end{aligned}$$

Получены значения доверительных интервалов коэффициентов, с учетом которых можно считать незначительными следующие факторы:

$$X_3, X_4, X_7, X_2^2 \text{ — при } P = 0,9;$$

$$X_3, X_4, X_7, X_2^2, X_2 \text{ — при } P = 0,95;$$

$$X_3, X_4, X_7, X_2^2, X_2, X_6 \text{ — при } P = 0,99,$$

где P — доверительное значение вероятности.

Максимальная относительная ошибка между экспериментальными и расчетными значениями составила около 9 %, что в ряде случаев не удовлетворяет требованиям высокой точности контроля. В целях обеспечения большей сходимости расчетных и экспериментальных точек решено ввести в модель перекрестное взаимодействие факторов. Обработка экспериментальных данных показала, что наибольшие значения частных корреляционных связей наблюдаются между параметрами X_2 , X_3 и X_7 , что позволяет ввести в модель слагаемое вида $b_{237}X_2X_3X_7$, где $b_{237} = 0,071$. Скорректированная таким образом модель обеспечивает получение расчетных значений выходного параметра с максимальным отклонением от экспериментальных данных не более 1,5 %. Она адекватна, множественный коэффициент корреляции близок к 0,999, его значимость составляет 124,8.

Полученная в форме уравнения регрессии модель взаимодействия коаксиального резонансного преобразователя с влагодержающими материалами позволяет при разработке и эксплуатации СВЧ резонансных влагомеров количественно оценивать влияние неинформативных параметров: поверхностной плотности, температуры, химического состава влаги, вводить коррекцию по уровню их влияния, прогнозировать изменение чувствительности резонансных преобразователей влажности к информативному и неинформативным параметрам при изменении его конструктивных параметров.

Использование построенной модели при модернизации СВЧ резонансного влагомера белковой оболочки для пищевых продуктов позволило снизить приведенную погрешность от влияния неинформативных параметров на 0,6 % в диапазоне влажности от 5 до 25 %.

Список литературы: 1. Берлинер М. А. Измерение влажности. М., 1973. 400 с. 2. Брандт А. А. Исследование диэлектриков на СВЧ. М., 1963. 403 с. 3. Новик Ф. С., Арсов Я. Б. Оптимизация процессов технологии металлов методами планирования экспериментов. М.; София, 1980. 304 с. 4. Вознесенский В. А., Ковальчук А. Ф. Статистические методы планирования эксперимента в технико-экономических исследованиях. М. 1978. 192 с.

Поступила в редколлегию 12.05.87