ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 3

ПОЛУЧЕНИЕ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ РЭУ МЕТОДОМ ПЛАНИРОВАНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПОЛНОГО ФАКТОРНОГО ЭКСПЕРИМЕНТА

3.1. Цель работы

Цель работы: научить применять математическую теорию планирования эксперимента для получения математических моделей радиоэлектронных устройств (РЭУ) и технологических процессов.

Для достижения цели необходимо:

- изучить основы теории планирования активных факторных экспериментов;
- выполнить планирование полного факторного эксперимента (ПФЭ) применительно к получению математической модели РЭУ в виде полинома;
- используя лабораторный макет, провести опыты с исследуемым РЭУ в соответствии с разработанным планом ПФЭ;
- обработать на ПЭВМ результаты опытов и оценить пригодность для практики полученной математической модели.

3.2. Теоретические сведения

При решении многих задач проектирования РЭУ (анализ разброса выходных параметров, проведение статистического имитационного моделирования на ПЭВМ) необходимо иметь математическое выражение (модель), связывающее выходной параметр РЭУ (или технологического процесса) с первичными параметрами. В инженерной практике эти модели получают путём проведения эксперимента. Оптимальный путь получения модели указывает математическая теория планирования эксперимента [1].

Планирование эксперимента – это процедура выбора числа и условий проведения опытов, необходимых и достаточных для получения математической модели с требуемой точностью.

Для построения математических моделей широко используются активные факторные эксперименты, в которых исследователь активно вмешивается в исследуемый объект (устройство или процесс), устанавливая в опытах нужные ему согласно плану эксперимента значения факторов. В теории планирования эксперимента выходной параметр называют откликом, а первичные параметры – факторами. В активных факторных экспериментах исследователь варьирует факторы и следит за значением отклика. Термин «варьирование» означает установление исследователем нужных ему в опытах значений факторов.

Теория планирования эксперимента должна дать ответ на следующие вопросы:

- по какому плану проводить эксперимент;
- как обрабатывать результаты опытов;
- как оценивать качество опытов и пригодность построенной модели для практики.

Полный факторный эксперимент (ПФЭ)

Пусть для РЭУ или технологического процесса первичные параметры x_1, x_2, …, x_k, рассматриваемые как факторы, связаны с выходным параметром, называемым откликом, зависимостью

$$y = \varphi(x_1, \ldots, x_k), \tag{3.1}$$

где k – общее число учитываемых факторов.

При использовании ПФЭ зависимость (3.1) часто получают в виде неполной квадратичной модели (полинома):

$$y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \ldots + \beta_k x_k + \beta_{12} x_1 x_2 + \ldots\ , \tag{3.2}$$

где $\beta_0, \beta_1, \ldots, \beta_k, \beta_{12}, \ldots$ – коэффициенты полинома;

$x_1, x_2, \ldots, x_k$ – натуральные (в своей размерности) значения факторов.

Модель вида (3.2) называют уравнением регрессии, или регрессионной моделью; $\beta_0, \beta_1, \ldots, \beta_k, \beta_{12}, \ldots$ – коэффициентами регрессионной модели.

Получить полином с натуральными значениями факторов (размерный полином) вида (3.2) сразу в большинстве случаев не представляется возможным. Поэтому вначале получают полином с кодированными безразмерными значениями факторов. Такой полином будем называть безразмерным, его получают в виде

$$y = b_0 + b_1\hat{x}_1 + b_2\hat{x}_2 + \ldots + b_k\hat{x}_k + b_{12}\hat{x}_1\hat{x}_2 + \ldots\ , \tag{3.3}$$

где $\hat{x}_1,\ \hat{x}_2, \ldots,\ \hat{x}_k$ – кодированные безразмерные значения факторов;

$b_0, b_1, \ldots,\ b_{12}, \ldots$ – коэффициенты, значения которых в общем случае отличны от значений соответствующих коэффициентов модели (3.2).

Кодированные значения факторов определяются отношением

$$\hat{x}_j = \frac{x_j - x_{j\text{о}}}{\lambda_j}\ , \tag{3.4}$$

где x_j – натуральное текущее значение j-го фактора;

$x_{j\text{о}}$ – натуральное значение нулевого уровня j-го фактора;

λ_j – интервал варьирования j-м фактором, натуральное значение;

j – номер фактора ($j = 1, \ldots, k$).

На практике вначале получают полином вида (3.3), а затем, используя выражения (3.4), делают переход к размерному полиному (3.2), в который факторы подставляются в своей размерности. Отметим, что отклик y как в размерном (3.2), так и в безразмерном (3.3) полиномах выражается в своей размерности.

Для получения модели вида (3.3) или ее линейной части каждый фактор достаточно варьировать в эксперименте на двух уровнях. Уровень j-го фактора, соответствующий его большему значению $x_{j\text{в}}$, называют верхним уровнем, а соответствующий меньшему значению $x_{j\text{н}}$ – нижним. Посередине между верхним $x_{j\text{в}}$ и нижним $x_{j\text{н}}$ уровнями размещен нулевой (иначе – основной или базовый) уровень $x_{j\text{о}}$ (рис.3.1).

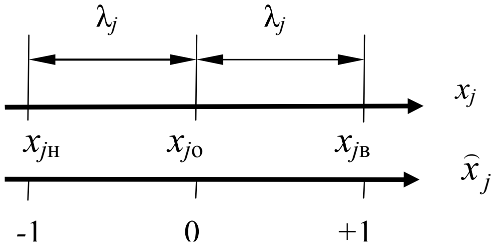

Рис. 3.1. Уровни варьирования фактора x_j

При кодированном задании уровней факторов с использованием выражения (3.4) план эксперимента не зависит от физики процесса.

На практике стремятся уровни варьирования выбрать так, чтобы получить $\hat{x}_j = \pm 1$. Это упрощает эксперимент и обработку его результатов. Значение $\hat{x}_j = -1$ соответствует нижнему уровню, а значение $\hat{x}_j = +1$ – верхнему уровню варьирования. В этом случае число сочетаний уровней факторов или, что то же самое, число опытов N эксперимента определяется выражением

$$N=2^k. \tag{3.5}$$

Эксперимент, в котором реализуются все возможные сочетания уровней факторов, называют полным факторным экспериментом – ПФЭ. При варьировании факторов лишь на двух уровнях число опытов ПФЭ составляет 2^k, поэтому такой эксперимент называют экспериментом типа «2^k».

Условия эксперимента представляют в виде таблицы, называемой **матрицей планирования** или **планом эксперимента**. Для простоты записи в матрице символ “1” обычно опускают, оставляя лишь знаки “плюс” или “минус”. В табл. 3.1 в качестве примера приведен план ПФЭ типа «2^k» при $k = 2$.

Таблица 3.1

Номер опыта	$\hat{x}_1$	$\hat{x}_2$
1	-	-
2	-	+
3	+	-
4	+	+

В матрице (см. табл. 3.1) столбцы $\hat{x}_1$ и $\hat{x}_2$ задают планирование, то есть в соответствии со знаками этих столбцов должны устанавливаться уровни варьирования факторов при проведении опытов.

Важнейшими свойствами матрицы плана ПФЭ являются симметричность, нормировка и ортогональность. Эти свойства описываются соответственно выражениями

$$\sum_{i=1}^{N}(\hat{x}_j)_i = 0; \qquad \sum_{i=1}^{N}\left[(\hat{x}_j)_i\right]^2 = N; \quad \sum_{i=1}^{N}(\hat{x}_j)_i(\hat{x}_l)_i = 0; \; j, l = 1,\ldots, k; \; j \neq l, \tag{3.6}$$

где j, l – номера факторов; $j, l = 1,\ldots, k$; $j \neq l$;

i – номер опыта; $i = 1, 2,\ldots, N$.

Если хотя бы одно из условий (3.6) не выполняется, это означает, что матрица планирования составлена неверно. Линейная часть модели (3.3) может оказаться непригодной для практики. ПФЭ позволяет количественно оценить взаимодействие (иначе – произведение) факторов.

Из ПФЭ нельзя извлечь информацию о квадратичных членах. Нетрудно убедится, что вектор-столбцы для квадратичных членов $(\hat{x}_j)^2$ в любом опыте плана (см. табл. 3.1) всегда будут иметь значения +1 и совпадать между собой. Поэтому оценка коэффициента b_0 оказывается смешанной и справедлива запись $b_0 \rightarrow \beta_0 + \beta_{11} + \ldots \beta_{kk}$, означающая, что b_0 содержит эффекты, обусловленные как свободным членом β_0, так и квадратичными членами $\beta_{jj} x_j^2$ ($j = 1, \ldots, k$).

Для оценок других коэффициентов справедливы записи

$$b_1 \to \beta_1,\ b_2 \to \beta_2,\ \ldots,\ b_k \to \beta_k\ .$$

Планирование ПФЭ и его выполнение

Планирование ПФЭ с любым числом факторов k сводится к записи в таблицу (матрицу) всех неповторяющихся сочетаний уровней этих факторов. С примером планирования ПФЭ можно ознакомиться в [1, пример 3.3, с. 72 – 73].

Нулевые уровни факторов x_{j0} выбирают обычно равными средним (номинальным) значениям первичных параметров, а интервалы варьирования λ_j – равными половине поля допуска соответствующих первичных параметров x_j .

Для первичных параметров (факторов) РЭУ и технологических процессов обычно имеют место условия $\Delta x_j << x_j$, где Δx_j – отклонение (допуск) j-го первичного параметра от его среднего значения x_{j0}. Поэтому в большинстве практических случаев даже линейная часть модели вида (3.3) оказывается пригодной для дальнейшего инженерного анализа объектов исследования. Если линейная модель (линейная часть модели) оказывается непригодной, то ее дополняют квадратичными членами вида $b_{jl}\hat{x}_j\hat{x}_l\,(j,l=1,\ldots;\,j\neq l)$. Причем в модель включают наиболее значимые (весомые) эффекты и проверяют пригодность новой модели.

Любой эксперимент сопровождается погрешностями – ошибками воспроизводимости. Для оценки ошибок воспроизводимости каждый i-й опыт матрицы планирования выполняют в конечном итоге несколько раз, организуя серии параллельных опытов. Каждая серия должна включать все N неповторяющихся опытов матрицы планирования. Число серий параллельных опытов n рекомендуется выбирать из условия $n \geq 2\ldots5$. Оценка воспроизводимости опытов по сути сводится к расчету так называемой дисперсии воспроизводимости опытов. Если эта дисперсия известна априорно или каким-либо способом может быть оценена до выполнения эксперимента, то параллельные опыты необязательны.

С целью **исключения систематических ошибок** (влияния оператора, места и т. п.) при реализации плана ПФЭ проводят так называемую рандомизацию опытов, т.е. опыты каждой серии выполняют не по порядку, как они записаны в матрице планирования, а в случайной очерёдности. Очерёдность опытов в каждой серии должна определяться по таблицам случайных чисел (табл. П.3.1 приложения). Делается это следующим образом. Выбирается произвольный фрагмент (участок) таблицы случайных чисел и последовательно просматриваются строки или столбцы этого участка таблицы с любого места. Очередность проведения опытов назначается в соответствии с появлением чисел при просмотре участка таблицы. Числа, большие по значению, чем номера опытов, пропускаются. Повторяющиеся числа учитываются лишь первый раз, а далее так же пропускаются.

Пример. Для исследования влияния на выходной параметр РЭУ двух факторов (x_1 и x_2) используется ПФЭ типа «2^k» (см. табл. 3.1). Принято решение провести 3 серии параллельных опытов (так как опыты трудоемки). Необходимо рандомизировать опыты каждой серии.

Решение. В таблице случайных чисел (см. табл. П.3.1 приложения) просмотрим однозначные случайные числа, принимая во внимание значения от 1 до 4 (так как в матрице всего 4 опыта). Просмотр начнем, например с начала третьей строки таблицы, и будем двигаться по строкам. Нетрудно убедиться, что в первой серии опыт под номером 1 в матрице ПФЭ должен выполняться третьим. Аналогичным образом определяют очерёдность остальных опытов первой серии. Затем переходят к рандомизации опытов второй серии. Для неё просмотр можно начать с иной строки таблицы, например с пятой. Для третьей серии просмотр начат с седьмой строки. Полученная очерёдность опытов каждой серии с учетом рандомизации указана в табл. 3.2.

Таблица 3.2

Номер опыта	$\hat{x}_1$	$\hat{x}_2$	Очередность выполнения опытов		
			серия 1	серия 2	серия 3
1	–	–	3	2	1
2	–	+	2	4	2
3	+	–	4	3	4
4	+	+	1	1	3

Выполнение ПФЭ состоит в проведении последовательно опытов каждой серии. В пределах каждой серии опыты выполняются в очерёдности, полученной при рандомизации. Для проведения каждого опыта исследователь должен для всех факторов принудительно установить такие их натуральные (в своей размерности) значения, которые соответствуют кодированным уровням этих факторов, указанным в матрице планирования для выполняемого опыта. После этого нужно измерить значение отклика и записать результат **в строку с условиями проведения данного опыта.**

Статистическая обработка результатов ПФЭ

Общий вид матрицы планирования и результатов опытов, которыми должен располагать экспериментатор, приведен в табл. 3.3.

Таблица 3.3

Номер опыта	$\hat{x}_1$	…	$\hat{x}_k$	Значение отклика y_i в параллельных опытах		
				1-я серия	….	n-я серия
1	–		–	$(y_1)_1$		$(y_1)_n$
2	–		+	$(y_2)_1$		$(y_2)_n$
…				…		
N	+		+	$(y_N)_1$		$(y_N)_n$

Последовательность выполнения статистической обработки.

1. Определяются среднее значение и дисперсия отклика в i-м опыте (строке) по формулам

$$M(y_i) = \frac{\sum_{u=1}^{n} (y_i)_u}{n}; \qquad D(y_i) = \frac{\sum_{u=1}^{n} \left[(y_i)_u - M(y_i) \right]^2}{n-1}, \tag{3.7}$$

где $(y_i)_u$ – отклик в i-м опыте (строке) u-й серии; $i = 1, 2, \ldots, N$; $u = 1, 2, \ldots, n$ (см. табл.3.3);
n – количество параллельных опытов (серий опытов).

2. Выполняется проверка однородности дисперсий вида $D(y_i)$. Для этого определяется расчетное значение критерия Кохрена по формуле

$$G_{\text{расч}} = D(y_i)_{\max} \Big/ \sum_{i=1}^{N} D(y_i). \tag{3.8}$$

Проверяется условие

$$G_{\text{расч}} < G_{\text{кр}}, \tag{3.9}$$

где $G_{\text{кр}}$ – критическое (табличное) значения критерия Кохрена, найденное для заданной доверительной вероятности γ (обычно 0,95) при числе степеней свободы $f_1 = n - 1$ и $f_2 = N$ (табл. П.3.2 приложения).

Если условие (3.9) выполняется, то дисперсии $D(y_i)$ однородны и статистическая обработка продолжается. Если оно не выполняется, то дисперсии неоднородны. В этом случае требуются дополнительные параллельные опыты или уточнение результатов опытов, для которых $D(y_i)$ имеют наибольшие значения.

3. Определяется дисперсия воспроизводимости опытов (отклика) по выражению

$$D(y) = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N} D(y_i)\,. \tag{3.10}$$

4.Подсчитываются оценки коэффициентов b_0, b_j и b_{jl} по формулам

$$b_0 = \frac{\sum\limits_{i=1}^{N} M(y_i)}{N}; \quad b_j = \frac{\sum\limits_{i=1}^{N} (\widehat{x}_j)_i M(y_i)}{N}; \quad b_{jl} = \frac{\sum\limits_{i=1}^{N} (\widehat{x}_j)_i (\widehat{x}_l)_i M(y_i)}{N}, \tag{3.11}$$

$$j,\, l = 1,\ldots, k;\ j \neq l,$$

где $(\widehat{x}_j)_i, (\widehat{x}_l)_i$ – кодированные значения соответственно j-го и l-го факторов в i-м опыте (строке) матрицы планирования.

5. Выполняется проверка значимости коэффициентов b_0, b_j и b_{jl}. Для этого для каждого коэффициента из числа b_0, b_j и b_{jl} строится доверительный интервал I_γ, соответствующий доверительной вероятности γ (обычно 0,95):

$$I_\gamma = (b_\nu - \Delta b;\ b_\nu + \Delta b),$$

где b_ν – оценка коэффициентов, рассчитанная по формулам (3.11); $\nu = 0, j, jl$;

Δb – возможная ошибка, возникшая от замены истинного значения коэффициента его оценкой.

Ошибка Δb полагается одинаковой для всех коэффициентов:

$$\Delta b = t_\gamma \sqrt{\frac{D(y)}{N(n-1)}}, \tag{3.12}$$

где t_γ – табличное значение критерия Стьюдента при доверительной вероятности γ и числе степеней свободы $f = N(n-1)$, с которым определялась дисперсия $D(y)$, согласно табл. П.3.3 приложения.

Коэффициент (его расчетное значение) значим, если доверительный интервал I_γ не содержит точку $b_\nu = 0$. Это равносильно условию $|b_\nu| > \Delta b$.

6. Принимая во внимание только значимые коэффициенты, записывается безразмерный полином (модель) вида (3.3), выполняется проверка адекватности этой модели и делается заключение о её пригодности для практики. Для этого вначале подсчитывается дисперсия адекватности по формуле

$$D_{\text{ад}}(y) = \frac{\sum\limits_{i=1}^{N} (\Delta y_i)^2}{N-d} = \frac{\sum\limits_{i=1}^{N} \left[y_{i\,\text{расч}} - M(y_i)\right]^2}{N-d}, \tag{3.13}$$

где Δy_i – разность между рассчитанным по полученной модели и экспериментальным значениями в i-й строке (опыте);

d – число значимых коэффициентов построенной модели;

$y_{i\,\text{расч}}$ – расчётное (по построенной модели) значение отклика в i-й строке (опыте).

Затем определяется расчетное значение критерия Фишера

$$F_{\text{расч}} = \frac{D_{\text{ад}}(y)}{D(y)}. \tag{3.14}$$

Проверяется условие

$$F_{\text{расч}} < F_{\text{кр}}, \tag{3.15}$$

где $F_{\text{кр}}$ – критическое (табличное) значение критерия Фишера, найденное для заданной доверительной вероятности γ (обычно 0,95) при числе степеней свободы $f_1 = N - d$ и $f_2 = N(n-1)$, согласно табл. П.3.4 приложения.

Если условие (3.15) выполняется, то построенная модель адекватна результатам эксперимента. При невыполнении условия (3.15) модель не адекватна и пользоваться ей на практике нельзя.

7. Осуществляется переход к размерному полиному вида (3.2). Для этого необходимо в построенном полиноме вида (3.3) кодированные значения факторов $\widehat{x}_1, \widehat{x}_2, \ldots, \widehat{x}_k$ заменить выражениями (3.4) и выполнить необходимые преобразования.

Примечание. Заключение об адекватности модели (3.3), сделанное в п.6, в равной степени относится и к модели вида (3.2). Поэтому можно вначале от модели (3.3) сделать переход к модели (3.2), а затем проверить её адекватность. От этого вывод об адекватности модели не изменится.

С примером статистической обработки опытов ПФЭ можно ознакомиться в [1, пример 3.5, с. 78 – 80; 2, с. 28 – 30].

3.3. Описание лабораторного макета

Одним из объектов исследования в лабораторной работе является неинвертирующий усилитель переменного напряжения звуковой частоты, выполненный с использованием операционного усилителя (ОУ) серии К140. Электрическая схема усилителя без цепей питания показана на рис. 3.2. Номинальные значения сопротивлений резисторов указаны на передней панели лабораторного макета.

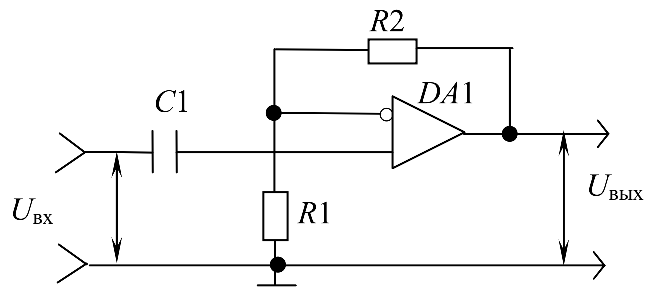

Рис. 3.2. Электрическая принципиальная схема усилителя

Входной сигнал (см. рис. 3.2) подается на неинвертирующий вход ОУ, а часть выходного напряжения через делитель $R1R2$ поступает на его инвертирующий вход. С учетом ряда допущений выражение для коэффициента передачи этого усилителя, приводимое в литературе [3], имеет вид

$$K = \frac{U_{\text{вых}}}{U_{\text{вх}}} = \frac{R1 + R2}{R1}, \tag{3.16}$$

то есть коэффициент K в основном зависит от параметров внешних цепей.

Реальный ОУ в действительности обладает достаточно большим, но конечным значением коэффициента усиления и входного сопротивления. Имеют конечные значения либо отличны от нуля и другие параметры ОУ. Поэтому построение математической модели для коэффициента передачи усилителя, выполненного с использованием ОУ, представляет практический интерес.

В лабораторном макете предусмотрена возможность варьирования параметрами резисторов $R1$ и $R2$, а также значением коэффициента усиления напряжения ОУ в пределах ± 5 % и ± 10 % относительно средних (номинальных) значений. Кроме исследуемой схемы в макете размещены вспомогательные устройства. Для удобства на передней панели макета приведена электрическая схема исследуемого усилителя, а входные и выходные гнезда усилителя установлены в соответствующих цепях схемы.

3.4. Задание на экспериментальную часть лабораторной работы

Рекомендуемая последовательность выполнения работы:

1. Выбрать нулевые уровни и интервалы варьирования факторами (первичными параметрами) исследуемого РЭУ согласно варианту, указанному преподавателем (табл.П.3.5 приложения).

2. Спланировать ПФЭ типа «2^k» (при $k = 3$).

3. Определиться с числом серий параллельных опытов и выполнить рандомизацию опытов каждой серии.

При выполнении рандомизации следует использовать случайные числа, генерируемые ПЭВМ (опция в программе ***lab*3-4**) или в крайнем случае воспользоваться табл. П.3.1 приложения.

4. Используя лабораторный макет, выполнить опыты каждой серии ПФЭ с учетом рандомизации.

При проведении эксперимента для РЭУ, описанного выше (см. рис. 3.2), следует руководствоваться структурной схемой, показанной на рис. 3.3. Допускается использование одного вольтметра ЦВ, переключаемого при необходимости с входа на выход устройства ИУ. Электронный осциллограф может отсутствовать. Сигнал, подаваемый на вход усилителя от внешнего генератора, должен иметь амплитуду 50…200 мВ. Частоту сигнала рекомендуется выбирать из диапазона 400…5000 Гц. В некоторых модификациях макета вместо внешнего генератора может использоваться внутренний. При использовании для проведения эксперимента других РЭУ необходимо пользоваться указаниями преподавателя, а также электрической схемой РЭУ, приведённой на передней панели макета.

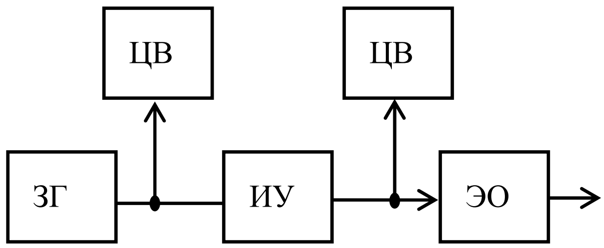

Рис. 3.3. Структурная схема лабораторного комплекса:
ИУ – исследуемое устройство (схема);
ЗГ – звуковой генератор;
ЦВ – цифровой вольтметр;
ЭО – электронный осциллограф

5. С помощью программы для ПЭВМ ***lab*3-4** (папка **ТОКТиН**) выполнить статистическую обработку результатов опытов на ПФЭ.

Если при выполнении статистической обработки дисперсии опытов окажутся **неоднородными**, то это свидетельствует о том, что была **велика погрешность установки уровней факторов либо допущена ошибка при записи результатов опытов**: результаты опытов записаны не в те строки. В таких случаях требуется либо точнее выполнить опыты, имеющие большую дисперсию, либо проверить правильность записи результатов, скорректировать вводимые в ПЭВМ результаты опытов и продолжить статистическую обработку. **Рекомендуется** перед вводом результатов опытов сделать их анализ. Значения отклика в разных сериях, но для одного и того же опыта должны отличаться незначительно: максимум на пять-семь процентов.

6. Выяснить значимость рассчитанных коэффициентов модели вида (3.3), сформировать конечный вид безразмерного полинома и, используя программу ***lab*3-4**, проверить адекватность построенного полинома результатам опытов.

7. Сделать переход к размерному полиному – модели вида (3.2).

8. Написать отчёт по лабораторной работе.

3.5. Содержание отчета

1. Цель работы.
2. Электрическая схема исследуемого РЭУ (каскада).
3. Таблица с указанием, какой выходной параметр РЭУ рассматривается в качестве выходного и какому первичному параметру соответствует тот или иной номер фактора, нулевых уровней и интервалов варьирования факторами.
4. План ПФЭ (матрица планирования).
5. Результаты опытов ПФЭ с учётом параллельных опытов и рандомизации опытов каждой серии.
6. Основные формулы алгоритма статистической обработки результатов ПФЭ (приводятся только в случае указания преподавателем).
7. Рассчитанные на ПЭВМ значения величин $M(y_i)$, $D(y_i)$ и $D(y)$, (i = 1, 2,…, N). Ответы на пп. 4, 5 и 7 дать одной таблицей (табл. 3.4).

Таблица 3.4

Номер опыта	$\widehat{x}_1$	$\widehat{x}_2$	$\widehat{x}_3$	Номер серии (параллельные опыты)					$M(y_i)$	$D(y_i)$	$D(y)$
				1-я серия		…	n-я серия				
				Очерёдность опыта	Значение y_i		Очерёдность опыта	Значение y_i			
1	–	–	–			…					
2	–	–	+			…					
…	…	…	…			…					
8	+	+	+			…					

8. Рассчитанные на ЭВМ значения коэффициентов b_j (при необходимости и вида b_{jl}), ошибки Δb и заключение о значимости полученных коэффициентов с указанием значения доверительных интервалов и доверительной вероятности γ; $j,l = 1,\ldots, k$; $j \neq l$. Ответ на этот пункт дать в виде табл. 3.5.

Таблица 3.5

Коэффициент модели	Оценка	Табличное значение t_γ	Значение Δb	Доверительный интервал при $\gamma = \ldots$	Решение о значимости
b_0					
b_1					
b_2					
b_3					
b_{12}					
…					

9. Математический вид построенного безразмерного полинома и аргументированное заключение об адекватности этой модели.

10. Результаты сопоставления полученного размерного полинома с выражением (3.16). Эти результаты представить в виде табл. 3.6.

Таблица 3.6

Номер опыта	Экспериментальное значение y_i – значение $M(y_{\text{i}})$	Расчётное значение y_i	
		по построенной математической модели	по литературной формуле
1 … 8			

Для сопоставления построенной модели с выражением (3.16) необходимо в обоих случаях выполнить расчет значений коэффициента передачи для всех опытов матрицы ПФЭ, а затем полученные результаты сравнить со значениями, полученными экспериментально, – со значениями $M(y_{\text{i}})$.

11. Выводы.

ЛИТЕРАТУРА

1. Боровиков С.М. Теоретические основы конструирования, технологии и надежности: Учеб. для студ. инж.-техн. спец. вузов. – Мн.: Дизайн ПРО, 1998. – 336 с.

2. Боровиков С.М., Погребняков А.В. Теоретические основы конструирования, технологии и надежности. Сборник задач: Учеб. пособие для вузов. – Мн.: БГУИР, 2001. – 124 с.

3. Нестеренко Б.К. Интегральные операционные усилители: Справочное пособие по применению. – М.: Энергоиздат, 1982. – 80 с.

ПРИЛОЖЕНИЕ

Таблица П.3.1

Равномерно распределенные случайные числа

2780	9463	6244	5965	1755	2291	6041	2291	6040	2285
5997	1983	3885	0409	2865	0059	0415	2908	0361	2529
7703	3927	7494	7212	0698	4889	4292	9607	7252	0770
5396	7774	4423	6731	7128	9840	8886	2202	5419	7938
6568	8978	2849	9632	7426	1985	3900	7302	1614	7804
4628	2401	6811	3764	6354	4484	1391	9740	8185	7301
1112	1778	4518	1419	9939	9577	7041	9289	5026	5185
6299	4097	8681	5374	7619	3335	3347	3433	4031	8221
7549	2844	9910	5596	9175	4230	9616	7313	1195	8369
8589	0124	0871	2721	9053	3372	3606	5246	6723	7065
9456	6194	3359	4628	2397	6785	7499	2498	7489	2425
6977	8842	1900	3119	1837	2863	0042	0294	2058	4409
0866	6068	8481	1601	1211	8483	9381	5670	9691	7838
4870	4096	8674	5072	5504	8530	9716	8016	6118	2827
9791	8537	9761	8323	8265	7858	5012	5090	5633	9434
6038	2267	5872	7775	4430	1016	7113	9793	8556	9895

Таблица П.3.2

Значения критерия Кохрена при доверительной вероятности $\gamma = 0,95$

$f_2 = N$	$f_1 = n - 1$							
	1	2	3	4	5	6	7	8
4	0,77	0,68	0,63	0,59	0,56	0,54	0,52	0,50
8	0,52	0,44	0,39	0,36	0,34	0,32	0,30	0,29
12	0,39	0,33	0,29	0,26	0,24	0,23	0,22	0,21
15	0,33	0,28	0,24	0,22	0,20	0,19	0,19	0,17
20	0,27	0,22	0,10	0,17	0,16	0,15	0,14	0,14
50	0,11	0,09	0,08	0,07	0,06	0,06	0,06	0,05

Таблица П.3.3

Значения критерия Стьюдента при доверительной вероятности $\gamma = 0{,}95$

$f = N(n–1)$	t_γ	$f = N(n–1)$	t_γ	$f = N(n–1)$	t_γ	$f = N(n–1)$	t_γ
2	4,30	10	2,23	24	2,06	60	2,00
4	2,77	12	2,18	28	2,05	120	1,98
6	2,45	16	2,12	32	2,04	250	1,97
8	2,31	20	2,09	40	2,02	∞	1,96

Таблица П.3.4

Критические значения критерия Фишера при доверительной вероятности $\gamma = 0{,}95$

$f_2 = N(n–1)$	$f_1 = N – d$							
	1	2	3	4	5	6	7	8
2	18,51	19,00	19,16	19,25	19,30	19,33	19,35	19,37
4	7,71	6,94	6,59	6,39	6,26	6,16	6,09	6,04
8	5,32	4,46	4,07	3,84	3,69	3,58	3,50	3,44
12	4,75	3,88	3,49	3,26	3,11	3,00	2,92	2,85
16	4,49	3,63	3,24	3,01	2,85	2,74	2,66	2,59
20	4,35	3,49	3,10	2,87	2,71	2,60	2,51	2,45
30	4,17	3,32	2,92	2,69	2,53	2,42	2,34	2,27

Таблица П.3.5

Варианты заданий для выполнения экспериментальной части лабораторной работы №3

Номер варианта	1	2	3	4	5	6	7	8
$\Delta R1/R1$, %	10	10	10	10	5	5	5	5
$\Delta R2/R2$, %	10	10	5	5	10	10	5	5
$\Delta K_{ОУ}/K_{ОУ}$, %	10	5	10	5	10	5	10	5

Примечание. В табл. П.3.5 знаки ± при относительных отклонениях параметров для простоты записи опущены.