

Планируемый эксперимент при определении характеристик полевых транзисторов

Н.Ю. Батурина, И.В. Калиенко

Донской государственный технический университет, Ростов-на-Дону

Аннотация: С помощью разработанного ранее приложения PLExp выполнена автоматизация планирования и проведения многофакторных экспериментов при исследовании характеристик полевых транзисторов. Проведен регрессионный и дисперсионный анализ экспериментальных данных, оценено качество регрессионных моделей, исследовано влияние на качество регрессионной модели количества исходных экспериментальных точек. Применение приложения повышает эффективность исследований, связанных с проведением натуральных экспериментов при определении характеристик полевых транзисторов, так как дает возможность уменьшить количество требуемых экспериментов, автоматизировать процессы хранения, извлечения и обработки информации.

Ключевые слова: планирование, фактор, эксперимент, полевой (униполярный) транзистор, приложение, регрессия, дисперсия, прогноз, аппроксимация, моделирование.

В ранее опубликованных работах [1,2] описана информационная система PLExp и показаны возможности ее применения для проведения планируемых экспериментов в областях имитационного моделирования и виброакустических измерений. В данной работе представлены результаты планируемых экспериментов при построении и аппроксимации вольт-амперных характеристик полевых транзисторов с управляющим $p-n$ переходом и с изолированным затвором, индуцированным каналом [4]. Проведены исследования возможностей представления характеристик в виде полиномов второй степени и влияния начального количества экспериментов на качество регрессионной модели.

Информационная система PLExp включает базу данных Access и надстройку VBA+Excel. Надстройка содержит шесть блоков управления, вызываемых из начальной формы (рис. 1). Это блоки планирования, проведения эксперимента, регрессионного и дисперсионного анализа, оценки погрешностей и значимости уравнения регрессии, прогнозирования и обратной задачи.

Каждому блоку соответствует определенный этап вычислительного эксперимента, представленный формой с управляющими кнопками, полями ввода, текстовыми полями, окнами списков, в которых отображаются данные, ранее внесенные в базу данных. Изначально в базу данных заносятся данные экспериментов: зависимости выходного тока стока I_c от входного напряжения затвор-исток $U_{зи}$ или от выходного напряжении сток-исток $U_{си}$.

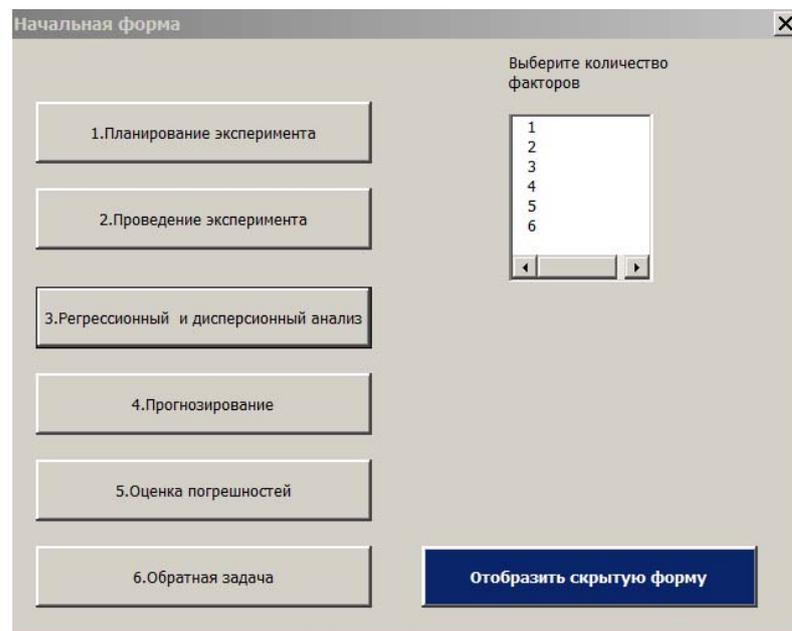


Рис. 1. – Начальная форма надстройки

При построении регрессионной модели применялся ортогональный центральный композиционный план второго порядка (ОЦКП), позволяющий создавать нелинейные регрессионные модели, учитывающие квадраты факторов [5-8]. Использование полного факторного эксперимента в этом случае приводит к неоправданному увеличению числа экспериментальных точек и не описывает имеющиеся нелинейности [9-10]. В ОЦКП при числе факторов $n=2$ для отыскания коэффициентов уравнения регрессии используются девять точек (условий эксперимента), $N=9$. Каждый из факторов варьируется на пяти уровнях $(-\alpha, -1, 0, 1, \alpha)$, где α – плечо звездных точек. Значимость уравнения

регрессии в целом оценивалось по двум критериям: критерию Фишера и критерию средней ошибки аппроксимации (COA) [2].

В таблице 1 перечислены основные типы объектов, входящие в базу данных PLExp.

Таблица № 1

Тип объекта	Название	Назначение
таблица, связанная с таблицей Excel	XPLN[i]_[ID]	координаты точек i -факторного плана с заданным ID, $i = \overline{1, n}$
- -	coef[i]	таблица коэффициентов в регрессионной модели
- -	gexp[i]	таблица диапазонов изменения факторов
- -	result[i]	таблица прогнозов значений критериев
- -	Error[i]	таблица значений погрешностей
локальная таблица	YPLN[i]_[ID]	значения критериев в точках плана
- -	Критерий	вспомогательная таблица данных из таблицы Эксп
- -	Эксп[Название эксперимента]	таблица значений критериев
запрос на удаление	УдалениеЗаписиКритерий	удаление всех записей из таблицы Критерий
запрос на добавление	Добавл[НазвЭксперим]вКритерий	добавление данных из таблицы Эксп[Название эксперимента] в таблицу Критерий
запрос на обновление	ОбновлXPLN[i]на[ID]	обновление данных о координатах точек плана
запрос на выборку	ЗапросМИН [j]	нахождение ближайших точек в таблице Критерий, $j = \overline{1, N}$
запрос на выборку	Запрос[j]	нахождение значения критерия в j -й точке плана

По результатам натуральных экспериментов с диапазонами изменения $U_{зи} \in [0,3]В$, $X_2 = U_{си} \in [0,10]В$ в базе данных формируется таблица значений токов ЭкспТокиР_n_03_010, связанная с таблицей плана XPLN2_Ip_n_03_010 в Excel (рис. 2). Изначально большое количество экспериментальных точек, в нашем случае 169, выбирается для того, чтобы впо-

следствии их использовать для оценки качества регрессионной модели, построенной только по девяти точкам. С помощью запросов на выборку, обновление и добавление в базе Access определяются значения критерия (столбец Avg-y соответствует I_c) в точках плана (столбцы $X_1=U_{зи}$, $X_2=U_{си}$), представленные в рис. 3.

generalNumber	Uзи	Uси	Ic
139	2	8	1,86
140	2,25	8	1,405
141	2,5	8	0,95
142	2,75	8	0,64
143	3	8	0,33
144	0	9	7,11
145	0,25	9	6,315
146	0,5	9	5,52
147	0,75	9	4,845
148	1	9	4,17
149	1,25	9	3,555
150	1,5	9	2,94
151	1,75	9	2,425
152	2	9	1,91
153	2,25	9	1,445
154	2,5	9	0,98
155	2,75	9	0,665
156	3	9	0,35
157	0	10	7,16
158	0,25	10	6,345
159	0,5	10	5,53
160	0,75	10	4,87
161	1	10	4,21
162	1,25	10	3,6
163	1,5	10	2,99
164	1,75	10	2,46
165	2	10	1,93
166	2,25	10	1,46
167	2,5	10	0,99
168	2,75	10	0,675
169	3	10	0,36
*			

Рис. 2. – Таблица данных натуральных экспериментов

number	X1	X2	Avg-y
1	0	0	0
2	3	0	0
3	0	10	7,16
4	3	10	0,36
5	0	5	6,74
6	3	5	0,27
7	1,5	0	0
8	1,5	10	2,99
9	1,5	5	2,69

Рис. 3. – Нахождение значений критериев в точках плана

На рис. 4 показана работа блока «Оценка погрешностей». С помощью этого блока оценивается качество различных регрессионных моделей в зависимости от числа экспериментальных точек, результаты сохраняются в таблице погрешностей Error[i]. Таблица включает поля: уникальный ID, количество экспериментальных точек Npoint, значения критериев Fcalc, AvgError и оценки значимости уравнения регрессии.

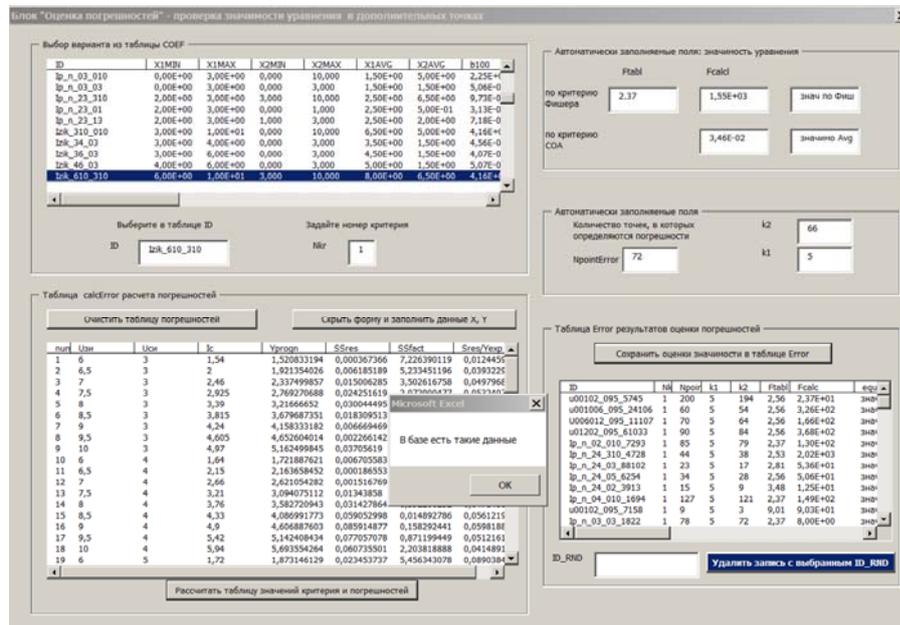


Рис. 4 – Форма «Оценка погрешностей»

В результате проведенных исследований установлено, что полиномиальная регрессионная модель во всем диапазоне изменения факторов $[0,3] \times [0,10]$ не удовлетворяет требованиям точности. С помощью серии

вычислительных экспериментов в автоматическом режиме были найдены суженные диапазоны изменения факторов, обеспечивающие приемлемую точность (погрешность по СОА по этим моделям колеблется в диапазоне от 1,7 % до 5,5%):

$$(X_1, X_2) \in \Omega_{02,03} = [0,2] \times [0,3], \quad (X_1, X_2) \in \Omega_{02,310} = [0,2] \times [3,10],$$

$$(X_1, X_2) \in \Omega_{23,01} = [2,3] \times [0,1], \quad (X_1, X_2) \in \Omega_{23,13} = [2,3] \times [1,3],$$

$$(X_1, X_2) \in \Omega_{23,310} = [2,3] \times [3,10].$$

Коэффициенты полиномов приведены на рис. 5. Здесь верхняя строчка – коэффициенты при кодированных переменных; нижняя строчка – коэффициенты при натуральных переменных регрессионных уравнений.

ID	X1MIN	X1MAX	X2MIN	X2MAX	X1AVG	X2AVG	b100	b101	b102	b103	b104	b105
lp_n_02_03	0	2	0	3	1	1,5	2,1	-1,20333	1,835	-1,1075	0,11	-0,795
							0,134783	-0,31583	3,021667	-0,73833	0,11	-0,35333
lp_n_02_310	0	2	3	10	1	6,5	4,12037	-2,47167	0,386667	-0,2025	0,302222	-0,22111
							4,98314	-2,70004	0,402982	-0,05786	0,302222	-0,01805
lp_n_23_01	2	3	0	1	2,5	0,5	0,313333	-0,23333	0,285	-0,2175	0,02	-0,085
							0,56605	-0,43167	3,085	-0,87	0,08	-0,34
lp_n_23_13	2	3	1	3	2,5	2	0,717778	-0,565	0,131667	-0,1125	0,101667	-0,04833
							4,467044	-2,71333	0,8875	-0,225	0,406667	-0,04833
lp_n_23_310	2	3	3	10	2,5	6,5	0,973333	-0,73167	0,13	-0,0625	0,145	-0,03
							7,254362	-4,13119	0,158265	-0,03571	0,58	-0,00245

Рис. 5. – Значения коэффициентов регрессионных моделей

Исследование зависимости качества регрессионной модели от количества начальных данных эксперимента N_{point} показало, что что снижение количества экспериментальных точек в три раза приводит к ухудшению качества регрессионной модели по СОА всего на 1-3 %, что связано с большей погрешностью определения I_c в точках плана в ходе натуральных экспериментов. Оценка точности построения модели в зависимости от количества используемых измеренных экспериментальных точек важна при планировании эксперимента с большим объемом измерений.

Разработанная модель использовалась на практике для прогнозирования числа измеренных значений выходного тока при построении аппроксимированных вольтамперных характеристик полевого (униполярного) транзистора с управляющим **p-n-переходом** и с изолированным затвором индуцированным каналом, в зависимости от входного и от выходного напряжений. Полученные результаты хорошо согласуются с экспериментальными данными.

Литература

1. Батурина Н.Ю. Автоматизация планирования эксперимента // Международный научно-исследовательский журнал, 2016, № 11-4 (53). С. 14-17
URL: research-journal.org/wp-content/uploads/2011/10/11-4-53.pdf.
2. Батурина Н.Ю. Планируемый эксперимент с использованием надстройки «PLExp» // Инженерный вестник Дона, 2017, №2. URL: ivdon.ru/uploads/article/pdf/IVD_96_Baturina.pdf_17308726e3.pdf.
3. Uglova E. V., Tiraturyan A. N., Liapin A. A. Integrated approach to studying characteristics of dynamic deformation on flexible pavement surface using nondestructive testing // PNRPU Mechanics Bulletin, 2016, № 2. pp. 111-130.
4. Kalienko I.V. Cubic spline fitting to fet voltage-current characteristics // Measurement Techniques, 2001, v. 44. № 5. pp. 536-540.
5. Melas V.B., Pepelyshev A.N., Cheng R.C.H. Designs for estimating an extremal point of quadratic regression models in a hyperball // Metrika, 2003, № 58. pp. 193-208.
6. Берикашвили, В. Ш. Статистическая обработка данных, планирование эксперимента и математическое описание случайных процессов. М.: Изд-во МГОУ, 2013. 195 с.
7. Сидняев, Н. И. Теория планирования эксперимента и анализ статистических данных. М.: Юрайт, 2011. 390 с.

8. Яценко Н.Д., Спасибова В.С., Закарлюка С.Г., Гончаров И.А., Яценко А.И. Разработка составов фритгованных глазурей для керамической черепицы с применением метода математического планирования эксперимента инноваций // Инженерный вестник Дона, 2016, № 4 URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2016/3889/.

9. Нинул А.С. Оптимизация целевых функций: Аналитика. Численные методы. Планирование эксперимента. М.: Издательство Физико-математической литературы, 2009. 336 с.

10. Налимов В. Н., Чернова Н. А. Статистические методы планирования экстремальных экспериментов. М.: Наука, 1965. 340 с.

References

1. Baturina N.YU. Mezhduna-rodnyj nauchno-issledovatel'skij zhurnal, 2016, № 11-4 (53). P. 14-17 URL: research-journal.org/wp-content/uploads/2011/10/11-4-53.pdf.

2. Baturina N.YU. Inzhenernyj vestnik Dona, 2017, №2 URL: ivdon.ru/uploads/article/pdf/IVD_96_Baturina.pdf_17308726e3.pdf.

3. Uglova E. V., Tiraturyan A. N., Liapin A. A. PNRPU Mechanics Bulletin, 2016, № 2. pp. 111-130.

4. Kalienko I.V. Meas-urement Techniques, 2001, v. 44. № 5. pp. 536-540.

5. Melas V.B., Pepelyshev A.N., Cheng R.C.H. Metrika, 2003, № 58. pp. 193-208.

6. Berikashvili, V. SH. Statisticheskaya obrabotka dannyh, planirovanie ehksperimenta i matematicheskoe opisanie sluchajnyh processov [Statistical data processing, experiment planning and mathematical description of random processes]. М.: Izd-vo MGOU, 2013. 195 p.

7. Sidnyaev, N. I. Teoriya planirovaniya ehksperimenta i analiz statisticheskih dannyh [The theory of experiment planning and statistical data analysis]. М.: YU-rajt, 2011. 390 p.



8. YAcenko N.D., Spasibova V.S., Zakarlyuka S.G., Goncharov I.A., YAcenko A.I. Inzhenernyj vestnik Dona, 2016, № 4. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2016/3889/.

9. Ninul A.S. Optimizaciya celevyh funkcij: Analitika. CHislennye meto-dy. Planirovanie ehksperimenta [Optimization of target functions: Analytics. Numerical method. Design of experiment]. M.: Izdatel'stvo Fiziko-matematicheskoy literatury, 2009. 336 p.

10. Nalimov V. N., CHernova N. A. Statisticheskie metody planirovaniya ehks-tremal'nyh ehksperimentov [Statistical methods of planning extreme experiments]. M.: Nauka, 1965. 340 p.