

УДК 621.3.088.3.001.8

МЕТОД СОКРАЩЕНИЯ СРОКОВ РАЗРАБОТКИ ПЕРЕДАЮЩИХ КОМПЛЕКСОВ РЛС ДО НА ОСНОВЕ СТАТИСТИЧЕСКОГО АНАЛИЗА РЕЗУЛЬТАТОВ ИЗМЕРЕНИЙ

С. Ф. Боев¹, А. А. Мурашов², А. Ю. Перлов³

¹АО «РТИ», 127083, Москва, ул. 8 марта, 10

²Ярославское высшее военное училище противовоздушной обороны, 150001, Ярославль, Московский проспект, 28

³АО «Радиотехнический институт имени академика А.Л. Минца», 127083, Москва, ул. 8 марта, 10, стр. 1

Статья поступила в редакцию 3 мая 2018 г.

Аннотация. В работе рассматривается метод сокращения сроков разработки новых образцов передающих радиоэлектронных комплексов (РЭК) РЛС ДО. Основой данного метода является применение статистического анализа к результатам измерений электрических характеристик РЭК, полученных во время проведения пуско-наладочных работ (ПНР) на стенде главного конструктора (СГК). Разработанный метод, по сравнению с традиционными подходами к отработке РЭК приводит к уменьшению объема измерений на этапе ПНР, что позволяет значительно сократить сроки разработки новых образцов передающих комплексов.

Ключевые слова: статистический анализ, радиоэлектронный комплекс, измерительные приборы, линия задержки, стенд главного конструктора.

Abstract. The paper considers a method for reducing the time for the development of new models of transmitting radioelectronic complexes (REC) of Radars. The basis of this method is the application of statistical analysis to the results of measurements of electrical characteristics of REC. These measurements were obtained during the testing phase at the stand of the chief designer.

The existing methods of carrying out the stage of test of a new generation REC require the measurement of a large volume of electrical characteristics on all channels of REC. These methods are based on the each channel verification of electrical characteristics of the REC using the measuring devices.

Since the number of output channels in the new transmission complexes reaches thousands, the time spent on carrying out the stage of test in traditional ways, do not allow to provide the required time for the creation of the REC.

The developed method, in comparison with the traditional approach to the development of the REC, leads to a significant reduction in the volume of measurements at the testing phase.

A mathematical task of the method is solved to reach the minimum number of measured REC channels due to the static stability of the electrical parameters of the complex with an increase in the number of measured channels, as well as the minimum list of checked parameters due to the correlation between the measured characteristics. The result of solving the problem makes it possible to shorten the time for the development of new samples of transmitting REC by more than 30%.

Key words: statistical analysis, radio electronic complex, measuring instruments, delay line, stand of the chief designer.

1. Введение

Повышение тактико-технических требований к новому поколению РЛС дальнего обнаружения (ДО) обуславливает необходимость применения новых технических решений и технологий, которые в свою очередь приводят к возрастанию временных затрат на их отработку и испытания [1].

Как показывает опыт создания РЛС с разнесенными передающими и приемными радиоэлектронными комплексами (РЭК), наиболее трудоемкими в части проведения пуско-наладочных работ (ПНР) являются передающие РЭК. В жизненном цикле разработки новых образцов передающих РЭК этап выполнения ПНР может достигать до 50% времени [2].

Существующие методы [2, 3] проведения ПНР передающих РЭК нового поколения требуют выполнения измерений большого объема электрических характеристик на всех каналах РЭК. Данные методы основаны на поканальной проверке электрических характеристик РЭК с помощью стенда Главного конструктора (СГК), на измерительных приборах при излучении остальных

каналов на согласованные нагрузки. СТК представляет собой испытательный комплекс для проведения ПНР на предприятии изготовителе РЛС, состоящий из минимального комплекта штатного оборудования РЛС.

Так как число выходных каналов в новых передающих комплексах достигает тысячи, то временные затраты на проведение ПНР традиционными способами, не позволяют обеспечить требуемые сроки создания РЭК.

Указанные особенности обуславливают необходимость совершенствования существующего методического аппарата проведения ПНР передающих комплексов РЛС ДО для повышения эффективности разработки новых образцов передающих РЭК.

2. Новые технологии в передающих РЭК

В настоящее время к современным РЛС ДО предъявляются новые требования в части реализации режима «радиопортретирования» целей. Данные требования в передающих РЭК обеспечиваются за счет многоканального формирования и усиления до тысячи широкополосных ЛЧМ-сигналов с заданным временным распределением.

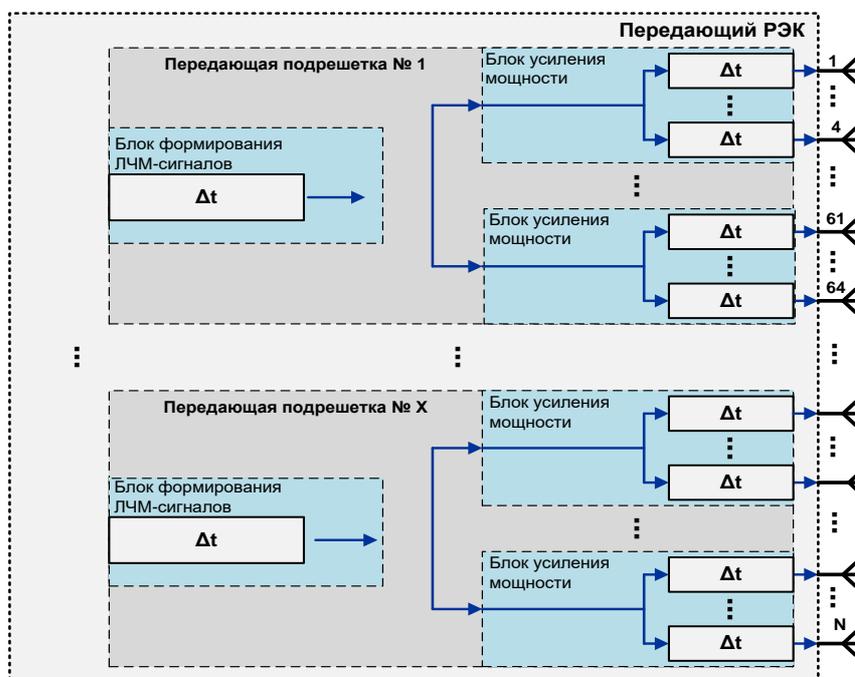


Рис. 1. Функциональная схема РЭК.

Формирование требуемой диаграммы направленности (ДН)

обеспечивается путем введения в состав передающих трактов РЭК микросхем линий задержки. Функциональная схема передающего РЭК нового поколения показана на рисунке 1.

Важным условием для обеспечения формирования ДН является высокая точность установки шага линий задержки для формируемых в РЭК широкополосных сигналов. Высокая точность обусловлена тем, что фаза выходных сигналов в каждом канале РЭК должна иметь минимальный разброс относительно других каналов [4]. Однако достижение минимального разброса фазы сигналов между каналами РЭК является трудоемкой задачей, связанной с неидентичностью электрических длин в трактах формирования широкополосных сигналов РЭК, что требует многократного измерения ФЧХ на выходе всех каналов комплекса во время проведения ПНР.

Таким образом, при создании РЛС ДО с крупноапертурной широкополосной АФАР необходимо выполнить значительный объем измерений в передающих РЭК, что, в свою очередь, ставит под угрозу невыполнения разработки РЛС в заданные Заказчиком сроки.

3. Методический аппарат сокращения сроков ПНР новых образцов передающих РЭК на СГК

Традиционно [2] под пуско-наладочными работами понимается совокупность работ на предприятии-изготовителе РЛС по настройке и испытаниям опытных образцов РЭК. Целью проведения ПНР передающих комплексов РЛС ДО является поканальная проверка электрических характеристик выходных сигналов РЭК на соответствие требованиям ТЗ. Данные проверки проводятся на высоком уровне мощности выходных сигналов с помощью измерительных приборов при излучении остальных каналов комплекса на технологические нагрузки. При этом измерения характеристик проводятся последовательно на всех каналах РЭК.

В качестве испытательного комплекса для проведения ПНР опытных образцов передающих РЭК на предприятии-изготовителе РЛС используется стенд главного конструктора (СГК) [3]. В части отработки опытного образца

передающего комплекса СГК состоит из базового функционального комплекта (БФКОМ) РЭС и оборудования, обеспечивающего проведение максимального объема ПНР без излучения зондирующих сигналов в эфир.

Результаты измерений электрических характеристик РЭС, полученные при проведении ПНР на СГК имеют различные отклонения от требуемых величин, заданных в ТЗ на РЭС. Анализ значений данных характеристик позволяет применить методы статистического анализа, которые обладают возможностью минимизировать объем измерений за счёт выявления наличия взаимосвязей между измеренными электрическими характеристиками РЭС. Для достижения цели сокращения сроков разработки передающих РЭС необходимо решить математическую задачу по обоснованию минимального числа измеряемых каналов и характеристик комплекса.

Таким образом получаем две взаимосвязанные задачи:

1. Обосновать минимальное количество каналов, достаточное для проверки основных характеристик РЭС.
2. Обосновать минимальный перечень проверяемых основных характеристик РЭС.

Суть описываемого метода заключается в проведении статистического анализа результатов измерений основных электрических характеристик выходных сигналов РЭС, полученных на СГК с целью уменьшения объема измерений на этапе ПНР новых образцов передающих РЭС, что приведет к сокращению сроков разработки данных комплексов.



Рис. 2. Блок-схема метода сокращения сроков разработки передающих РЭС.

4. Минимизация количества измеряемых каналов РЭК

Минимизация количества измеряемых каналов РЭК основана на научных принципах статистического выборочного метода [5]. Основная суть этого метода состоит в том, что нет необходимости сплошного изучения всех элементов статистической совокупности. С высокой степенью надежности выборочный метод позволяет определить характеристики статистической совокупности при ограниченном исследовании элементов (выборки). При этом следует отметить, что выборочный метод дает хорошие результаты преимущественно для тех случайных характеристик, распределение которых подчиняется нормальному закону [5].

Для определения минимально необходимого объема выборки (количество измеряемых каналов РЭК) проводился статистический анализ измеренных на СГК значений основных характеристик выходных сигналов передающего РЭК: импульсной мощности ($P_{\text{вых}}$) и фазы сигналов (Φ_{κ}).

На первом этапе статистического исследования строились распределения измеренных значений $P_{\text{вых}}$ и Φ_{κ} , после чего проверялось с заданной надежностью $\gamma = 0,95$ по критерию хи-квадрат их не противоречие с нормальным законом [5].

На рис. 3, 4 представлены гистограммы распределения значений $P_{\text{вых}}$ и Φ_{κ} и соответствующих графиков нормального распределения.

Результаты исследований позволяют сделать вывод о том, что с надежностью $\gamma = 0,95$ распределения значений выходной импульсной мощности и фазы сигнала не противоречат нормальному закону.

Минимально необходимый объем выборки определяется из условия достижения статистической устойчивости средних значений $P_{\text{вых}}$ и Φ_{κ} [5]. Устойчивость измеряемых параметров означает, что при заданной надежности средние значения параметров должны попасть в заданные пределы доверительного интервала (ошибка определения не превышает 5%), т.е. фактически достигать некоторого постоянного значения.

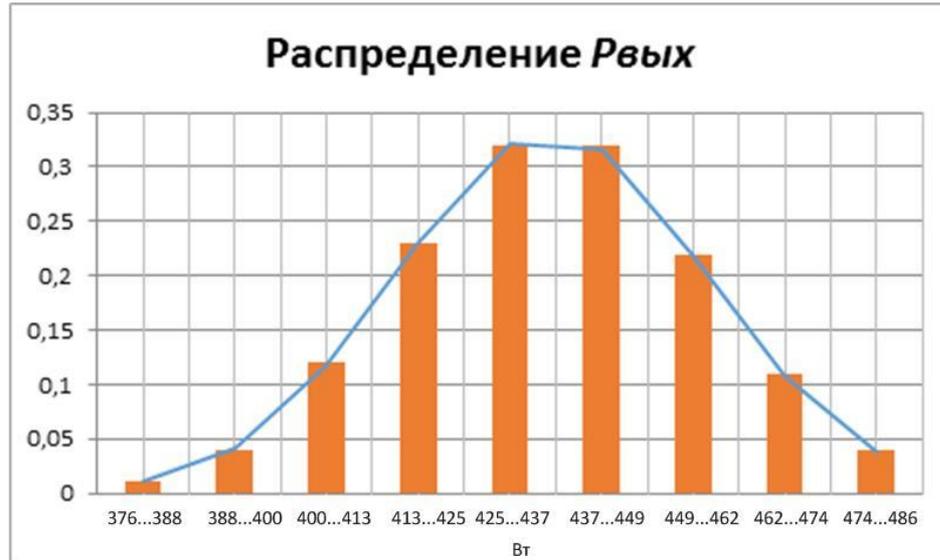


Рис. 3. График проверки распределения значений $P_{\text{вых}}$ на нормальность.



Рис. 4. График проверки распределения значений Φ_k на нормальность.

В качестве целевой функции определялись сроки ПНР РЭК $t_{\text{нпр}}$. Минимальное значение целевой функции $t_{\text{нпр}}$ определяется из условия обеспечения такого количества измеряемых каналов (объема выборки) n при котором выполняется условие:

$$\Delta x \leq 0,05x_{\text{ср}}, \quad (1)$$

где Δx - половина ширины доверительного интервала для среднего значения признака x_{cp} , которая определяется по следующей формуле:

$$\Delta x = t(\gamma, n) \frac{S}{\sqrt{n}}. \quad (2)$$

В формуле (2) $t(\gamma, n)$ - коэффициент Стьюдента [5]; γ - доверительная вероятность (надежность); S - стандартное отклонение признака x , которое определяется выражением:

$$S^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - x_{cp})^2}{n-1}. \quad (3)$$

Результаты анализа по признаку $P_{вых}$ приведены в таблице 1.

Таблица 1. Границы доверительного интервала и время ПНР

α	S , Вт	n	$t_{нпр}$, ч	Δx , Вт	$x_{cp} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n P_{выхi}$, Вт	$x_{cp} - \Delta x$, Вт	$x_{cp} + \Delta x$, Вт
0,05	9,50	2	0,1	13,17	411	397,83	424,17
	10,02	4	0,2	9,82	410	400,18	419,82
	14,63	8	0,4	10,14	407	396,86	417,14
	25,31	16	0,8	12,40	428	415,60	440,40
	22,00	32	1,6	7,62	439	431,38	446,62
	17,75	64	3,0	4,35	438	433,65	442,35
	20,89	128	6,1	3,62	437	433,38	440,62

В таблице 1 используются следующие обозначения:

1. α – уровень значимости, используемый для вычисления доверительного интервала, который связан с надежностью γ следующим выражением:

$$\alpha = 1 - \gamma; \quad (4)$$

2. n – число каналов, на которых проведены измерения.

3. $t_{нпр}$ – время, затраченное на измерение группы каналов.

4. Δx – значение доверительного интервала; $(x_{cp} - \Delta x)$ – нижняя граница доверительного интервала; $(x_{cp} + \Delta x)$ – верхняя граница доверительного интервала.

На рисунке 5 представлен график зависимости границ доверительного интервала измеренных значений мощности $P_{вых}$ от количества каналов, на которых проводились измерения.

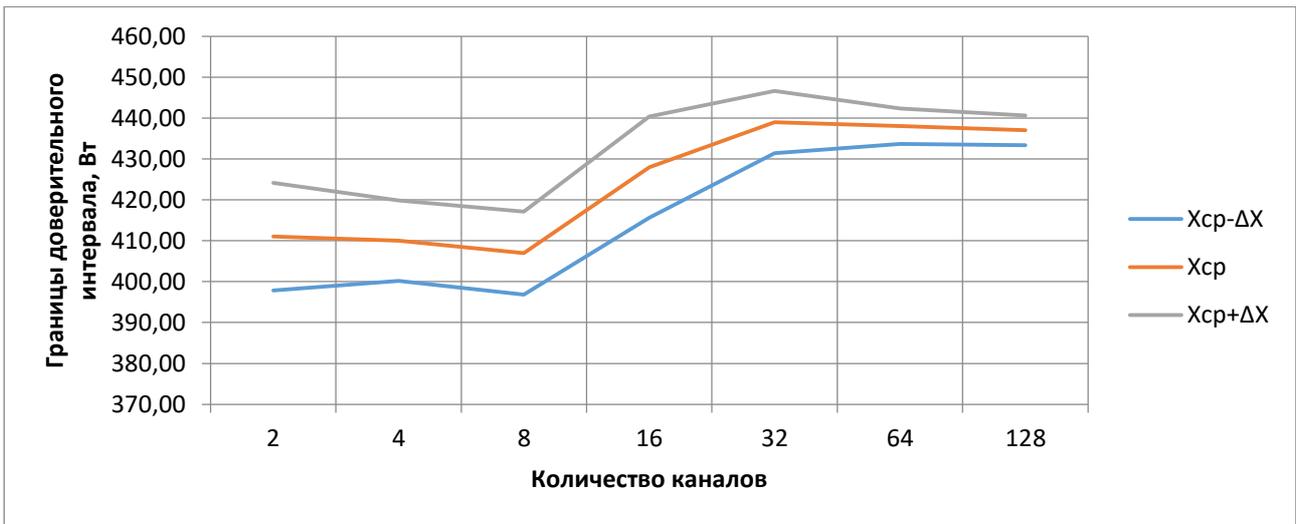


Рис. 5. Зависимость границ доверительного интервала значений мощности от числа измеряемых каналов РЭК.

Результаты анализа по признаку Φ_k приведены в таблице 2.

Таблица 2. Границы доверительного интервала и время ПНР

α	S , градусы	n	$t_{нпр}$, ч	Δx , градусы	$x_{cp} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \Phi_{ki}$, градусы	$x_{cp} - \Delta x$, градусы	$x_{cp} + \Delta x$, градусы
0,05	0,45	2	0,1	0,62	-744,65	-745,27	-744,03
	25,41	4	0,2	24,90	-719,35	-744,25	-694,45
	26,07	8	0,4	18,07	-716,44	-734,51	-698,37
	27,55	16	0,8	13,50	-720,83	-734,33	-707,33
	28,77	32	1,6	9,97	-718,54	-728,51	-708,57
	27,28	64	3,0	6,68	-716,73	-723,41	-710,05
	27,74	128	6,1	4,81	-717,03	-721,84	-712,22

На рисунке 6 представлен график зависимости границ доверительного интервала измеренных значений фазы от количества каналов, на которых проводились измерения.

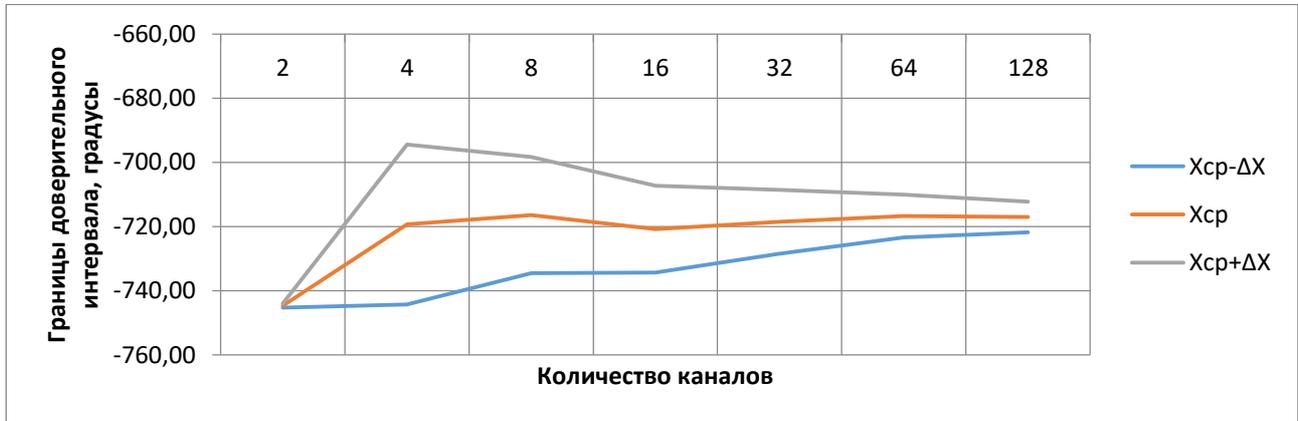


Рис. 6. Зависимость границ доверительного интервала для значений фазы от числа измеряемых каналов РЭК.

Таким образом, проведенный анализ изменения $P_{вых}$ и Φ_k показал, что с увеличением количества измеряемых каналов комплекса кратным 2, средние значения измеряемых параметров между 64 и 128 каналами отличались не более, чем на 3%, в то время как сроки ПНР РЭК увеличивались практически пропорционально увеличению количества проверяемых каналов. Это позволяет сделать вывод о том, что измерения электрических параметров РЭК достаточно проводить на 64-х каналах при условии, что все остальные каналы являются исправными.

5. Минимизация количества измеряемых характеристик РЭК

Сокращение количества измеряемых характеристик нового образца передающего РЭК основывается на научных принципах статистического корреляционного анализа [5]. Суть этого метода состоит в том, что состояние статистической совокупности оценивается только теми параметрами, которые с одной стороны должны быть статистически независимы, а с другой стороны должны максимально влиять на основные технические характеристики системы. При этом следует отметить, что при наличии нормального распределения значений измеренных параметров, наличие статистической

связи между ними может определяться только из анализа значений коэффициента линейной корреляции [5].

Для определения минимального количества характеристик РЭК проводился статистический анализ измеренных на СГК значений следующих характеристик выходных сигналов передающего РЭК:

1. Неравномерность АЧХ (ΔP).
2. Длительность сигнала (τ).
3. Уровень внеполосных составляющих ($S_{внеп}$).
4. Выходная импульсная мощность канала ($P_{вых}$).
5. Фаза сигнала (Φ_k).

Данные характеристики были выбраны, поскольку они многократно измерялись в передающих РЭК нового поколения, что приводило к выделению значительного временного ресурса при выполнении ПНР.

Не противоречие нормальному закону распределения двух последних параметров $P_{вых}$ и Φ_k проверялось в разделе 4. По результатам анализа измеренных значений ΔP , τ , $S_{внеп}$ по критерию хи-квадрат, полученные распределения значений с надежностью $\gamma = 0,95$ не противоречат нормальному закону.

Сокращение перечня проверяемых характеристик РЭК для выбранного минимального числа измеряемых каналов обеспечивается с помощью статистического корреляционного анализа, который является неотъемлемой частью системного (факторного) анализа [6]. Выделим характеристики РЭК: $P_{вых}$, Φ_k - функции реакции, а характеристики ΔP , τ , $S_{внеп}$ - факторы. С помощью коэффициента парной корреляции устанавливаем наличие статистической связи между параметрами. При этом исключаются факторы, у которых связь с основными параметрами практически отсутствует, или один из факторов, у которых сильная парная связь с другими факторами.

Анализ проводился для выбранного минимального числа каналов, в которых была достигнута статистическая устойчивость измеренных параметров

РЭЖ. Для вычисления коэффициентов парной корреляции используется следующая формула расчета:

$$r = \frac{\sum(x_i - x_{cp})(y_i - y_{cp})}{\sqrt{\sum(x_i - x_{cp})^2 \sum(y_i - y_{cp})^2}}. \quad (5)$$

В выражении 5 приведены следующие обозначения:

1. r – коэффициент корреляции.
2. x_i – измеренное значение фактора в каждом канале.
3. x_{cp} – среднее значение фактора по всей группе измеренных каналов.
4. y_i – измеренное значение функции в каждом канале.
5. y_{cp} – среднее значение функции по всей группе измеренных каналов.

В результате расчёта получим матрицу парных коэффициентов корреляции, приведенную в таблице 3.

Таблица 3. Матрица корреляции

r	x_1	x_2	x_3	y_1	y_2
x_1	1				
x_2	-0,057854216	1			
x_3	0,073823526	-0,944987406	1		
y_1	-0,318865137	0,006034767	0,04522861	1	
y_2	0,106233995	-0,087275105	0,143836496	-0,0278418	1

В таблице 3 x_1 , x_2 , x_3 – обозначения неравномерности АЧХ, длительности сигналов и уровня внеполосных составляющих соответственно; y_1 , y_2 – выходная импульсная мощность и фаза сигнала соответственно; r – парные коэффициенты корреляции между измеренными электрическими характеристиками выходных сигналов комплекса.

На основании полученных результатов в таблице 3, можно сделать вывод о том, что функции реакции y_1 , y_2 не коррелируют друг с другом, т.е. являются независимыми. Поэтому их нельзя исключить из перечня проверяемых характеристик. Факторы x_2 , x_3 коррелируют с собой на 94%, т.е. являются сильно зависимыми. При этом из анализируемых факторов только x_1 и x_3

имеют значимую связь с функциями реакции и, следовательно, x_2 можно исключить. Таким образом, по результатам анализа измерений пяти характеристик РЭК правомерным является исключение измерения длительности сигнала (τ) во время проведения ПНР при условии, что все остальные каналы являются исправными.

В результате проведенного статистического анализа результатов измерений основных параметров нового передающего комплекса РЛС ДО сформирован минимальный перечень электрических характеристик выходных сигналов, проверяемых на минимальном числе каналов РЭК, обеспечивающих сокращение сроков разработки РЭК при сохранении достоверности результатов измерений.

6. Заключение

Использование СГК позволило применить методы статистического анализа к результатам измерений характеристик выходных сигналов передающего РЭК нового образца, которые получены во время проведения ПНР на предприятии-изготовителе РЛС. Описанный в работе метод, позволяет значительно сократить объём измерений электрических характеристик передающих РЭК в процессе выполнения ПНР при сохранении достоверности результатов измерений.

В рамках разработанного метода решена математическая задача по обоснованию минимального числа измеряемых каналов РЭК за счёт статической устойчивости значений электрических параметров комплекса с ростом числа измеряемых каналов, а также минимального перечня проверяемых параметров за счёт корреляционной связи между измеряемыми характеристиками. Результат решения задачи позволяет сократить сроки разработки новых образцов передающих РЭК более чем на 30%.

Применение данного метода, позволяет развить технологию высокой заводской готовности и поддержки жизненного цикла РЛС ДО нового поколения [7].

Литература

1. Боев С.Ф., Рахманов А.А. Метод повышения эффективности внедрения новых технологий при создании РЛС нового поколения // Известия ЮФУ. Технические науки. 2015. № 1. С. 73–81.
2. Боев С.Ф., Линкевичиус А.П., Логовский А.С., Якубовский С.В. О возможности снижения сроков и стоимости создания РЛС ДО с использованием стенда главного конструктора. // Журнал радиоэлектроники [электронный журнал]. 2017. №9. Режим доступа: <http://jre.cplire.ru/jre/sep17/10/text.pdf>
3. Боев С.Ф., Логовский А.С. Управление процессами создания РЛС ДО функционально-блочной структуры. Журнал радиоэлектроники [электронный журнал]. 2017. №7. Режим доступа: <http://jre.cplire.ru/jre/jul17/11/text.pdf>
4. Перлов А.Ю., Алташин А.Н., Ермаков А.М. Обеспечение точности установки цифровых линий задержки в РЛС с крупноапертурными ФАР // «Минцевские чтения». Всероссийская научно-техническая конференция молодых конструкторов и инженеров, Москва, 2015 г. Режим доступа http://conf58.mipt.ru/static/reports_pdf/452.pdf
5. Орлов А.И. Прикладная статистика. Учебник для вузов. – М.: Экзамен, 2006. –671 с.
6. Бююль А., Цёфель П. SPSS: искусство обработки информации. Анализ статистических данных и восстановление скрытых закономерностей: Пер. с нем. /Ахим Бююль, Петер Цёфель Спб.: ООО «ДиаСофтЮП», 2002. -608 с.
7. Боев С.Ф., Слока В.К., Рахманов А.А. Система модульно-параметрического проектирования радиолокационных станций дальнего обнаружения нового поколения ОАО «РТИ». / История отечественной радиолокации: под ред. С.В. Хохлова. М.: Столичная энциклопедия, 2015. С.407-414.

Для цитирования:

С. Ф. Боев, А. А. Мурашов, А.Ю. Перлов. Метод сокращения сроков разработки передающих комплексов РЛС ДО на основе статистического анализа результатов измерений. Журнал радиоэлектроники [электронный журнал]. 2018. № 5. Режим доступа: <http://jre.cplire.ru/jre/may18/4/text.pdf>
DOI 10.30898/1684-1719.2018.5.4