

Игра Красные бусы – модернизированный вариант.

Адлер Ю.П., Хунузиди Е.И., Шпер В.Л.

Игра "Красные Бусы" (Red Beads) была показана д-ру Э. Демингу У. Боллером из компании Hewlett-Packard (см. примечание на с.303 в книге [1]). Э. Деминг постоянно использовал эту игру на своих семинарах, и описал её в обеих последних книгах [1, 2]. Мы также играем в неё на протяжении многих лет как со студентами, так и с сотрудниками различных компаний при обучении их методам SPC. Однако наш вариант по ряду позиций отличается от того, как играл д-р Деминг, что и будет описано ниже. Мы также расскажем о том, что можно извлечь из используемого нами варианта игры в целях углубления понимания основных идей SPC.

По сути игра Красные Бусы (КБ) – это очень простая модель производственного процесса, наглядно демонстрирующая, как легко обвинить рабочих в тех проблемах, которые на самом деле вызваны системой, в которой они работают. Для игры используется коробка, содержащая 4000 бусин, из которых 3200 – белого цвета, и 800 – красного (см. фото). Бусины белого цвета представляют продукцию годного качества, красные – брак. Чтобы провести игру, нужно из числа присутствующих на занятии выбрать несколько добровольцев, которые будут играть роль добросовестных рабочих. От них требуется точное следование рабочей инструкции (см. вставку). Кроме добросовестных рабочих в игре участвуют контролеры и начальник ОТК. Задача добросовестных рабочих: опуская в коробку с тщательно перемешанными бусинами специальную лопаточку с 50 коническими углублениями, доставать из ёмкости полную лопаточку, формируя таким образом партию продукции. Затем рабочий предъявляет эту партию поочередно первому и второму контролерам и начальнику ОТК.

Задача контролеров – сосчитать и записать число красных бусин, и, не объявляя результат сразу, сообщить результат начальнику ОТК. Если результаты обоих контролеров совпадают, то он заносится в таблицу по форме, приведенной ниже (см. табл. 1, где мы опустили столбец с именами добросовестных рабочих). Если число бракованных, т.е. красных бусин у контролеров не совпадает, то начальник ОТК сам пересчитывает красные бусы в лопаточке, и его результат заносится в таблицу.

Помимо рабочих и контролеров в игре участвует ещё один доброволец, который становится нормировщиком – он засекает время, нужное для выполнения операции (т.е. время от начала движения лопаточки до момента, когда добросовестный рабочий делает первый шаг в сторону контролера ОТК).

Принятие решения происходит следующим образом: если число красных бусин меньше или равно 5, партия принимается, если число красных бусин больше 5, партия бракуется.

Рабочая инструкция по выполнению операции: изготовление партии белых бус.

1. Взять лопаточку в правую (для правой) или левую (для левой) руку, и убедиться, что все дырочки пусты.
2. Наклонить лопаточку под углом 45 град., и осторожно внести её в ёмкость с бусинами так, чтобы лопаточка могла наполниться бусинами.
3. Аккуратно потряхивая добиться того, чтобы все бусины, не попавшие в дырочки лопаточки, были удалены назад в ёмкость.
4. Если все 50 углублений заполнены, предъявить партию контролёру ОТК.
5. Если есть одна или несколько пустых дырочек, высыпать все бусины из лопаточки, и операцию повторить сначала.



В первом случае ведущий игру хвалит рабочего, призывает остальных равняться на него, обещает ему премию, и т.д. Во втором случае ведущий ругает рабочего, призывает тщательно соблюдать инструкцию, или увольняет и нанимает другого, и т.д. Т.е., ведущий игру выступает в роли типичного авторитарного руководителя, использующего стандартный подход на основе кнута и пряника. Как правило, мы играем с 4-мя рабочими и в течение 2-х условных недель (один день – это когда все рабочие сделают по одной партии красных бус). Таким образом стандартная игра, которую мы проводим со студентами или другими обучаемыми, дает нам в итоге два набора данных по 40 значений в каждом наборе ($4 \text{ чел} \times 5 \text{ дней} \times 2 \text{ недели} = 40 \text{ точек}$). Типичные результаты игры приведены в табл. 1. Стоит отметить, что наш вариант игры отличается от деминговского. Он предпочитал играть с 6-ю рабочими в течение 4-х – 5-и условных дней по неизменным правилам и с 3 дефектами в качестве условия приемки [2] (иногда с одним допустимым дефектом [1]). Мы же на второй условной неделе вносим следующее изменение: перестаем возвращать красные бусы (КБ) в коробку, а складываем их в отдельную емкость. Ещё одно наше добавление: где-то в конце первой недели ведущий предлагает рабочим премию сразу после получения партии приемлемого качества (10 или 20 руб.). Это позволяет потом обсудить действенность денежной мотивации персонала. Вариант игры по Э. Демингу в исполнении одного из его последователей – С. Приветта (S. Prevette) – можно посмотреть на YouTube по адресу (ниже приведен адрес только первой части видео. Части 2-6 читатель легко найдет по тому же адресу): http://www.youtube.com/watch?v=HBW1_GhRKTA&feature=related

Таблица 1

Результаты игры Красные бусы (МИСиС, февраль, 2012)										
Рабочий	Пон-к	Вт-ник	Среда	Четверг	Пят-ца	Пон-к	Вт-ник	Среда	Четверг	Пят-ца
	Число красных бус в лопаточке									
1	8	9	9	12	10	12	7	7	9	11
2	7	11	13	13	13	11	8	6	8	9
3	5	7	13	9	9	9	10	10	6	5
4	7	6	12	14	10	9	9	6	6	14
	Время выполнения операции, сек									
1	10,3	11,5	5,0	4,2	5,3	5,2	5,4	5,3	4,7	11,5
2	5,9	13,5	15,6	31,6	5,8	5,5	6,4	5,3	10,7	4,7
3	3,7	15,2	7,0	8,6	6,4	5,9	5,9	8,5	5,6	5,6
4	4,7	5,1	22,2	6,1	5,7	5,8	5,6	7,0	7,1	6,0

Полученные данные наносим на графики в программе Excel (стандартный график с маркерами, помечающими точки данных) и получаем две карты хода процесса, показанные на рис. 1 и 2. На рис. 1 показана карта хода процесса (= run chart) для числа КБ, и аналогичная карта хода процесса для времени операций показана на рис. 2.

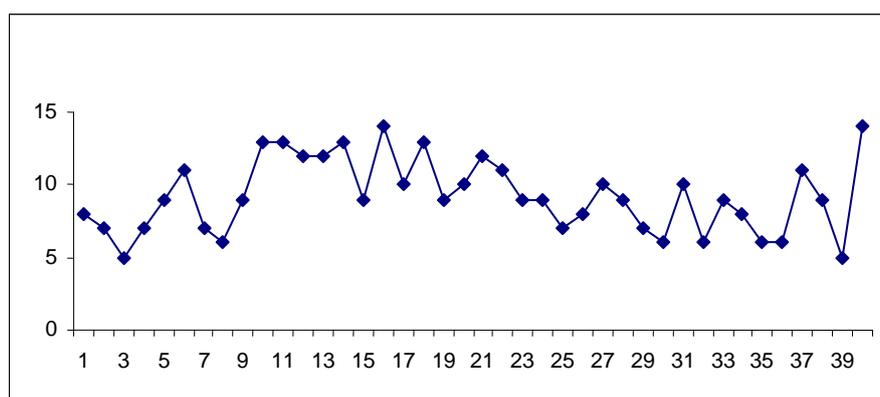


Рис. 1 Число КБ в 40 последовательных попытках

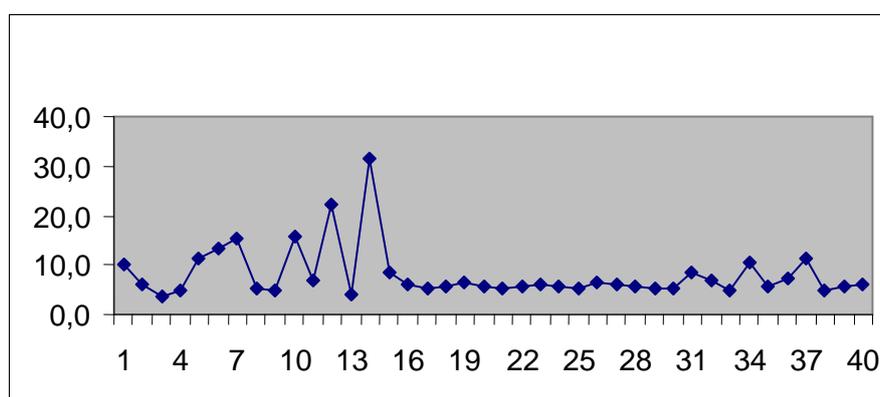


Рис. 2 Время изготовления партии КБ

Далее переходим к построению контрольных карт Шухарта (ККШ) на основе полученных данных.

Ведение ККШ предусматривает три этапа:

- этап предварительного исследования – сбор данных и предварительный расчет границ на ККШ;
- использование – мониторинг процесса;
- корректировка границ ККШ (после которой в цикле повторяются снова использование и корректировка).

Построение контрольной карты числа дефектов или *pn*-карты.

Итак, у нас есть данные по 40 значениям числа КБ (см. табл. 1). Ведение любой карты начинается с выбора её типа. В данном случае мы имеем дискретные данные – это число КБ - при постоянном объеме выборки - это число дырочек в лопаточке – разумно выбрать так называемую карту числа дефектов, или карту *pn*-типа. Как только тип карты выбран, формулы для расчета границ определены, поскольку все они давно известны и приведены в любом подходящем источнике (например [3, 4, 5]).

Следующий вопрос, на который мы должны дать ответ – это по какому числу точек следует определять границы.

Дело в том, что не существует и не может существовать формулы для определения числа данных, достаточного для первоначального определения границ на ККШ. Существуют лишь рекомендации, как это делать. Эти рекомендации можно разделить на две группы: статистические и процессно-ориентированные.

Статистические рекомендации сводятся к тому, что для расчета границ желательно иметь не меньше, чем 25-30 точек. Эти рекомендации основаны на том, что при расчете границ используются средние величины, а они становятся устойчивыми при объеме выборки $n \geq 25 - 30$. Если у вас меньше точек, то нужно взять все, какие есть. Если больше, то статистические рекомендации ничего не дают, и следует обратиться к процессно-ориентированным.

Процессно-ориентированные рекомендации сводятся к тому, что период предварительного исследования (ниже мы будем также использовать эквивалентный термин базовый период) должен охватывать все аспекты системы/процесса, какие могут влиять на выход. Например, представим себе, что у нас собрано более 30 точек по данным о результатах процесса за время работы одной смены в понедельник. Можем ли мы надеяться на то, что рассчитанные по этим данным границы будут отражать работу нашего процесса все дни недели и во всех сменах? Скорее всего, это маловероятно. Другой пример. Мы собирали данные полмесяца, рассчитали границы ККШ, но затем оказалось, что в конце каждого месяца в нашем процессе проводится наладка оборудования, после которой выход процесса изменяется. Это означает, что границы, которые мы нашли ранее окажутся скорее всего не вполне приемлемыми. Из всего вышесказанного вытекает следующее: выбрать объем предварительных исследований может только человек, детально знающий процесс, для которого планируется ведение ККШ.

Далее мы выбираем базовый период применительно к нашему конкретному процессу. В данном случае, у нас есть 40 точек, т.е. статистическому критерию выбора мы заведомо удовлетворяем, но рассчитывать границы по всем 40 точкам было бы ошибкой. Границы на нашей карте следует рассчитывать по 20 точкам, т.е. по данным только первой недели, т. к. всю вторую условную неделю мы не возвращали КБ обратно, т.е. происходило постоянное вмешательство в процесс и система все время менялась (напоминаем, что границы ККШ дают зону случайных колебаний процесса, когда в систему не вмешиваются никакие посторонние силы).

После того, как тип карты и базовый период выбраны, задача расчета границ ККШ становится тривиальной. Центральная линия (далее ЦЛ) рассчитывается как среднее (арифметическое) число дефектов по базовому периоду. Обозначим через p долю дефектов в выборке, т.е.

$$p = \frac{d}{n}, \quad (1)$$

где d – число дефектов, n – объем выборки. Тогда (напоминаем, что $n = const$)

$$ЦЛ = \overline{pn} = \bar{p}n = \bar{d} = \frac{\sum_i d_i}{k}, \quad (2)$$

где d_i – число дефектов в i -ой выборке,
 k – число выборок, по которым мы считаем среднее (за период предварительного исследования).

Следовательно:

$$ЦЛ = \frac{8+7+5+\dots+9+10}{20} = 9,85$$

Верхний и нижний контрольные пределы (далее ВКП и НКП) определяются по формулам:

$$\left. \begin{array}{l} ВКП \\ НКП \end{array} \right\} = \bar{p}n \pm 3\sqrt{\bar{p}n(1-\bar{p})} \quad (3)$$

В формулу входит средняя доля дефектов (\bar{p}), которую легко найти из (2):

$$\bar{p} = \frac{\bar{p}n}{n} = \frac{9,85}{50} = 0,197$$

Отсюда сразу получаем:

$$\left. \begin{array}{l} ВКП \\ НКП \end{array} \right\} = 9,85 \pm 3\sqrt{9,85(1-0,197)} = 9,85 \pm 8,44 = \begin{cases} 18,29 \\ 1,41 \end{cases}$$

Теперь наносим ЦЛ, ВКП и НКП на нашу карту, и получаем рис. 3. (Здесь и везде далее мы наносим ЦЛ в виде сплошной черной линии, а ВКП и НКП – в виде пунктирных линий).

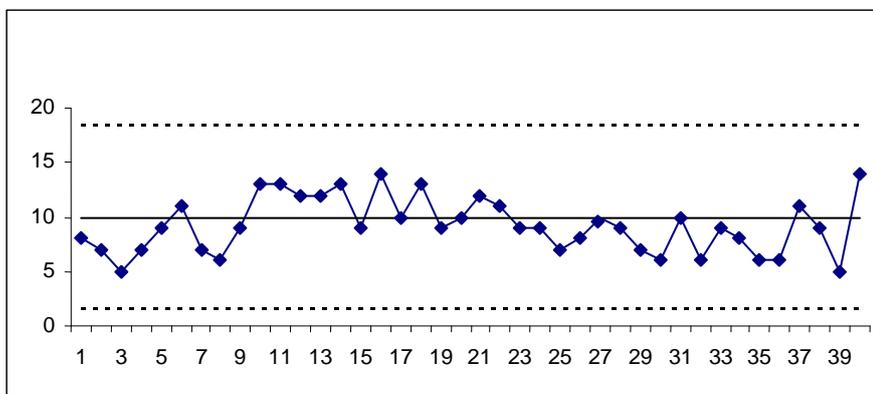


Рис. 3 ККШ для числа KB в 40 последовательных попытках

Кажется, что 27-я и 31-я точки лежат точно на ЦЛ. Легко убедиться, что это не так: из табл.1 видно, что 27-е и 31-е значения равны 10, а ЦЛ = 9,85. Если бы эти точки были бы равны значению ЦЛ, то процесс не был бы стабильным, т.к. тогда 14 точек подряд лежали бы ниже ЦЛ (см. дополнительные правила чтения ККШ).

Именно эта картинка и называется ККШ для числа дефектов, или картой *pn*-типа. Из неё следует, что мы имеем стабильный процесс – все точки лежат внутри зоны системной вариабельности – т.е. все рабочие работают одинаково. Другими словами, премии за якобы высокое качество - 5 и меньше КБ, равно как и наказания за якобы плохую работу – например, 13 КБ, были одинаково несправедливы. Все эти результаты – следствие того, какую систему мы создали, и усилия добросовестных рабочих не играют никакой роли в получении того или иного результата на выходе процесса. Заметим, что и результат рабочего сегодня ничего не говорит о том, что он же продемонстрирует завтра или послезавтра (см., например, результаты 3-го рабочего в табл. 1). Есть однако один очень важный нюанс, который важно подчеркнуть.

Практически все, кто занят в том или ином конкретном процессе, всегда знают, справедливы или несправедливы наказания и награды, раздаваемые высшим менеджментом. Люди чувствуют это без всяких карт Шухарта на уровне интуиции. И если наказания и награды несправедливы – а так получается всегда, когда результаты процесса зависят в основном от системы – то и отношение персонала к этим мерам будет соответственным. В частности, не стоит надеяться, что такие меры могут играть роль мотиваторов, способствующих улучшению процесса.

Именно ККШ дают практическое доказательство правил 85/15 (Джуран) или 94/6 (Деминг, например, [1]), и именно их применение показывает бессмысленность практики наказания исполнителей вместо поиска коренных причин проблем.

Построение контрольной карты индивидуальных значений и скользящего размаха (*x-mR* карты).

Теперь обратимся к данным по времени выполнения операции. Здесь у нас снова есть 40 точек (табл. 1). Однако время – это непрерывная величина, которая может принимать любое значение в некотором диапазоне. Поэтому здесь целесообразно использовать другую карту, а именно так называемую карту индивидуальных значений (*x*) и скользящих размахов (*mR* – от английских слов *moving range*). Эта карта двойная, т.е. состоит из двух карт: одна для самих значений процесса, другая – для величины, называемой скользящим размахом. Эта карта де факто стала одной из самых распространенных в силу своей простоты и отсутствия некоторых подводных камней, с которыми связано построение, например, карты средних и размахов. Чтобы построить карту *x-mR* нужно кроме исходных значений самого процесса рассчитать значения скользящих размахов:

$$mR_i = |x_i - x_{i-1}|, \quad (4)$$

где x_i – *i*-ое значение процесса.

При этом, поскольку данные всегда начинаются с первого значения, а предшествующего значения у нас просто нет, значение mR_1 отсутствует – следовательно карта скользящих размахов всегда имеет на одну точку меньше, чем карта индивидуальных значений. После того, как мы выбрали тип карты всегда встает вопрос о базовом периоде, т.е. об объеме предварительных данных для расчета границ. Легко сообразить, что для этой карты у нас нет ограничения, существовавшего при построении карты числа дефектов, т.к. с точки зрения времени операции процесс во вторую неделю ничем не отличается от первой недели. Поэтому здесь целесообразно считать границы по всем 40 точкам (больше точек, меньше вариабельность среднего). Итак, составляем табл. 2 (с целью экономии места показана часть данных).

Таблица 2

Данные из табл.1 по времени выполнения операции и значения скользящих размахов																	
i	1	2	3	4	5	6	7	8	...	33	34	35	36	37	38	39	40
$x=t$	10,3	5,9	3,7	4,7	11,5	13,5	15,2	5,1	...	4,7	10,7	5,6	7,1	11,5	4,7	5,6	6,0
mR	-	4,4	2,2	1,0	6,8	2,0	1,7	10,1	...	2,3	6,0	5,1	1,5	4,4	6,8	0,9	0,4

ЦЛ на этой карте – это среднее по периоду предварительного исследования, т.е.

$$ЦЛ = \bar{x} = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m x_i, \quad (5)$$

где $x_i = t_i$ – время i -й операции;
 m – объем данных в базовом периоде.

Следовательно:

$$ЦЛ = 8,03 \quad (6)$$

Среднюю линию на карте скользящих размахов мы будем обозначать через ЦЛР.
 Итак:

$$ЦЛР = \overline{mR} = \frac{1}{39} \sum_{i=2}^{40} (mR)_i = 4,41 \quad (7)$$

Теперь из любого источника [3, 4, 5] берем формулу для расчета границ:

$$\left. \begin{array}{l} ВКП \\ НКП \end{array} \right\} = \bar{x} \pm E_2 \overline{mR} \quad (8)$$

Для верхнего и нижнего контрольных пределов на карте скользящих размахов (ВКПР и НКПР, соответственно), имеем:

$$\left. \begin{array}{l} ВКПР \\ НКПР \end{array} \right\} = \begin{cases} D_4 \overline{mR} \\ 0 \end{cases} \quad (9)$$

В формулах (6) и (7) буквами с индексами обозначены константы, которые для данной карты всегда одни и те же:

$$\left. \begin{array}{l} E_2 = 2,66 \\ D_4 = 3,27 \end{array} \right\}$$

Подставляя в (8) и (9) значения из (6) и (7), получаем

$$\left. \begin{array}{l} ВКП = 19,77 \\ НКП = -3,71 \Rightarrow 0 \\ ВКПР = 14,43 \\ НКПР = 0 \end{array} \right\} \quad (10)$$

В выражении (10) равенство НКП = -3,71 не имеет физического смысла, поскольку время не может быть отрицательным.

Общее правило:

В тех случаях, когда нижняя граница на контрольной карте отрицательна, и когда такая ситуация физически невозможна, за нижнюю границу принимается ноль.

Таким образом мы получаем рис. 4. Строго говоря, двойные карты желательно строить на одном поле, чтобы соответствие между значениями на них было очевидно, но, к сожалению, Excel не всегда позволяет это сделать так, чтобы получить понятную для анализа картинку (все профессиональные статистические пакеты – SAS, SPSS, MINITAB, Statistika, Statgraphics – позволяют это сделать без проблем).

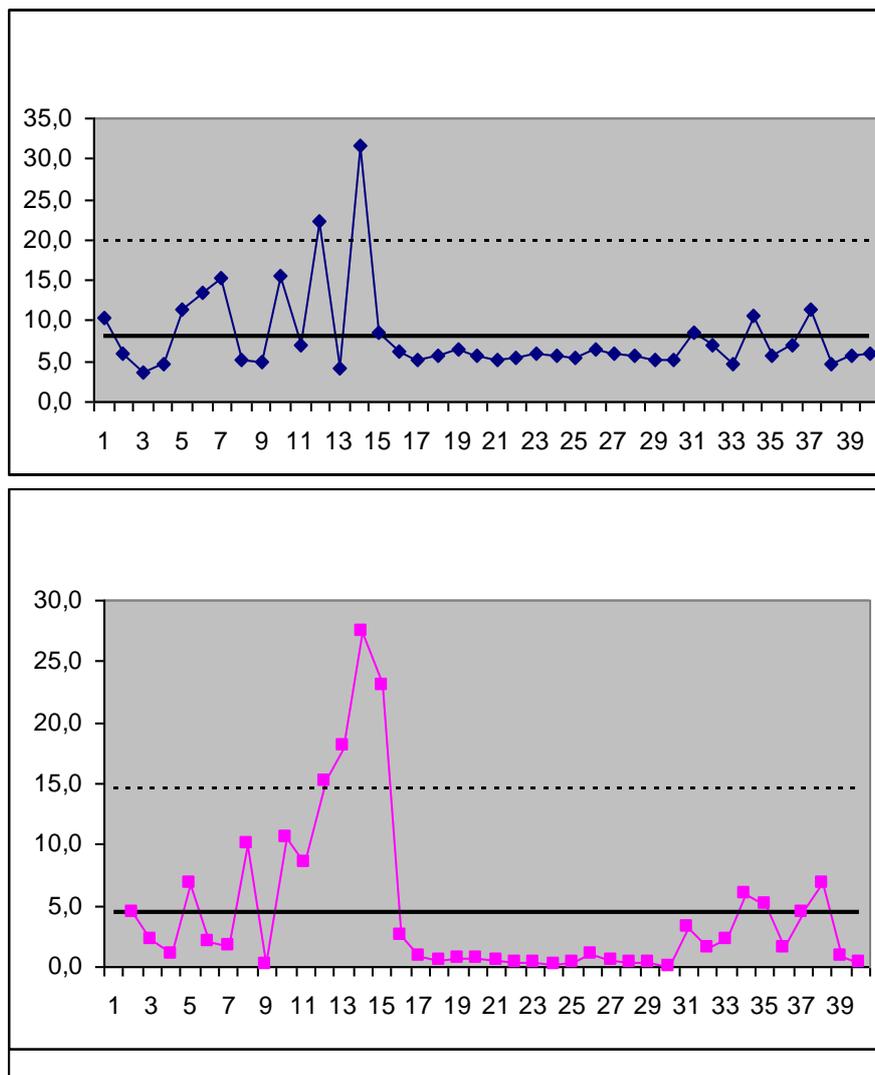


Рис. 4 Контрольная карта $\bar{x}-mR$ для времени производства партии КБ

Из обоих графиков следует, что в процесс что-то вмешивается. На рис.4 на карте индивидуальных значений (x) об этом свидетельствуют 12-я и 14-я точки, а на карте скользящих размахов (mR) четыре точки подряд от 12-й и до 15-й. Но ведь границы на ККШ должны показывать нам зону вариабельности, обусловленную системой, т.е. вариабельность процесса, когда в систему ничто не вмешивается. А наши границы рассчитаны с участием точек, когда в систему заведомо что-то вмешивалось. Это выглядит не логичным, и поэтому в тех случаях, когда в базовом периоде мы обнаруживаем точки, сигнализирующие о присутствии специальных причин вариаций, эти точки рекомендуются из расчета границ исключить, а границы пересчитать.

Выполнив расчет, мы обнаруживаем, что у нас появились новые точки, выходящие за новые границы контрольной карты. Это означает, что этот процесс следует продолжить – т.е. снова исключить выпадающие точки и пересчитать границы – и так до того момента, когда у нас уже не будет точек, сигнализирующих о нестабильности процесса.

После того, как был выполнен пересчет и построены границы следует вернуться к исходным данным, чтобы обсудить очень важный принципиальный момент в построении и интерпретации ККШ. Дело в том, что построенная нами карта значений времени операции извлечения КБ имеет принципиальный дефект, делающий её неверной с самого начала. Чтобы понять суть этого дефекта, нужно вспомнить саму игру. Более точно, нужно вспомнить, когда у добросовестных рабочих возникали аномально большие значения времени изготовления партии. Как правило это происходило тогда, когда наш добросовестный рабочий обнаруживал, что лопаточка не полна, и её приходилось высыпать, чтобы затем повторить попытку. Это означает, что аномально большие времена соответствуют извлечению более чем одной партии (двух, трех и т.д.). Но изготовление двух партий заведомо требует в два раза больше времени (трех – в три, и т.д.). Другими словами, в наших данных смешаны разные процессы: процесс изготовления одной партии бусин, процесс изготовления двух партий бусин, и т.д. Анализировать заведомо разные процессы в рамках одной выборки математически возможно – формулам все равно, что мы в них подставляем – но физически это не имеет смысла (это все равно, что складывать помидоры с арбузами). Иначе: у нас имелись неоднородные данные, и мы пытались их анализировать, свалив все данные в одну кучу. Проблема однородности данных – одна из самых важных и плохо освещенных в литературе. Важно понимать, что эта проблема не формализуема, и решать её может и должен хозяин процесса. Предлагаемый нами вариант игры как раз и позволяет объяснить участникам на понятных им данных эту довольно сложную проблему.

Возможности анализа данных, полученных в ходе игры не ограничиваются построением ККШ. По данным о числе КБ можно, например, построить гистограмму. Заметим, что построение гистограммы по дискретным данным, как правило вызывает затруднение у слушателей, так как чаще всего в практике гистограммы строят для непрерывных данных. В целях изучения методов разведочного анализа данных, мы обычно используем данные игры для обучения слушателей построению гистограмм методом ствол-и-листья, после чего на тех же данных учим их строить и применять такой замечательный метод, как ящик-с-усами. Кроме того, можно аппроксимировать построенную слушателями гистограмму с помощью биномиального распределения, распределения Пуассона и распределения Гаусса, которое в свою очередь, можно тоже получить разными способами. Мы не можем рассказать о всех этих возможностях подробно в силу ограниченности данной статьи. Поэтому подведем итог. Модернизированный вариант игры КБ позволяет на очень простом и понятном слушателям материале обсудить следующие вопросы:

- проблему системы поощрений и наказаний, материального стимулирования, а также недостаточности строгого соблюдения технологической инструкции при несовершенстве системы;
- проблемы выбора базового периода для расчета границ ККШ;
- как правильно строить карты двух типов для дискретных и непрерывных данных;
- как интерпретировать ККШ.

Если к этому добавить вопросы, о которых мы только упомянули, то оказывается, что те же данные позволяют научить слушателей

- строить гистограммы различными методами;
- применять ящик-с-усами для сравнения выборок;
- аппроксимировать реальные гистограммы теоретическими кривыми различных функций распределения.

Стоит добавить, что все картинки и расчеты мы делаем с помощью стандартного пакета Excel.

Литература

- [1] Деминг Э. Выход из кризиса. Новая парадигма управления людьми, системами и процессами.- М.: Альпина Бизнес Букс, 2007.
- [2] Деминг Э. Новая экономика.-М.: Эксмо, 2006.
- [3] ГОСТ Р 51814.3–2001 Системы качества в автомобилестроении. Методы статистического управления процессами.
- [4] ГОСТ Р 50779.42–99 Статистические методы. Контрольные карты Шухарта.
- [5] Статистическое управление процессами. SPC. (2006) Ссылочное руководство. – Н. Новгород, ООО СМЦ "Приоритет". – 224 с.