

Министерство образования и науки Российской Федерации федеральное государственное
автономное образовательное учреждение высшего образования
НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ ИТМО

Факультет «Программной инженерии и компьютерной техники.»

Моделирование

Лабораторная работа №2

Выполнил

Григорьев Давид Владимирович

Группа: Р3315

Проверила

Авксентьева Елена Юрьевна

Содержание

1	Задание	1
1.1	Цель работы	1
1.2	Содержание отчета	1
1.3	Этапы работы	1
1.4	Порядок выполнения работы	1
1.5	Содержание отчета	2
2	Исходные данные	3
3	Выполнение	4
3.1	Описание исследуемой системы	4
3.2	Задание 2.2.1	4
3.3	Задание 2.2.2	5
3.3.1	Ключевые формулы	5
3.3.2	Сценарий а: фиксированное время между заявками	5
3.3.3	Сценарий б: фиксированное время обслуживания	5
3.4	Задание 2.2.3	8
4	Вывод	9
5	Программный код	10
5.1	GPSS для изначальной модели	10
5.1.1	Исходный код	10
5.1.2	Вывод программы	12

1 Задание

1.1 Цель работы

Исследование свойств систем и сетей массового обслуживания (СМО и СеМО) с однородным потоком заявок в среде имитационного моделирования GPSS при различных предположениях о структуре системы, законах распределения интервалов между заявками и длительности обслуживания, а также оценка влияния параметров нагрузки на характеристики функционирования систем.

1.2 Содержание отчета

Разработка и исследование имитационных моделей одно- и многоканальных СМО, а также замкнутых и разомкнутых сетей массового обслуживания (СеМО) в среде GPSS. Анализ зависимости характеристик систем (времени ожидания, времени пребывания, вероятности потерь, загрузки, длины очереди и др.) от параметров структуры и нагрузки. Сравнение результатов имитационного моделирования с теоретическими расчётами и обоснование выбора эффективной конфигурации системы.

1.3 Этапы работы

1. Анализ и корректировка GPSS-модели СМО согласно данным, полученным в предыдущих УИР (УИР 1 и УИР 2).
2. Освоение среды имитационного моделирования GPSS World.
3. Проведение серии имитационных экспериментов в соответствии с самостоятельно составленной программой исследований.
4. Обработка и анализ результатов моделирования (в табличной и графической форме).
5. Разработка и исследование моделей замкнутой и разомкнутой СеМО.
6. Сравнительный анализ характеристик СМО и СеМО, формулировка выводов и рекомендаций.

1.4 Порядок выполнения работы

1. Получить индивидуальный вариант задания.
2. Адаптировать базовую GPSS-модель `smo_GGKE.gps` под параметры выбранной в УИР 2 СМО или разработать собственную модель.
3. Выполнить имитационное моделирование и сравнить результаты с расчётами, полученными в УИР 2.
4. Провести серию экспериментов по программе исследований: варьировать загрузку системы, характер входного потока, законы распределения времени обслуживания, количество приборов, ёмкость накопителя.
5. Для части 2 работы разработать модели замкнутой (ЗСеМО) и разомкнутой (РСеМО) сетей массового обслуживания.
6. Провести имитационные эксперименты с СеМО, определить «узкое место», оценить влияние неэкспоненциальных распределений.
7. Сформулировать и обосновать выводы по влиянию структурных и нагрузочных параметров на характеристики систем и сетей.

1.5 Содержание отчета

1. Постановка задачи и исходные данные (включая параметры из УИР 1 и УИР 2).
2. Описание исследуемых моделей СМО и СеМО: структура, параметры, законы распределения.
3. Программа исследований (перечень варьируемых параметров и гипотез).
4. Результаты работы:
 - (a) листинг GPSS-моделей СМО и СеМО с пояснениями;
 - (b) таблицы исходных данных исследуемых вариантов (форма 1);
 - (c) таблицы и/или графики результатов имитационных экспериментов (форма 2);
 - (d) графики зависимости характеристик систем от параметров (загрузка, число приборов, ёмкость и т.д.);
 - (e) сравнение результатов имитационного моделирования с теоретическими оценками для М/М/1, М/Г/1;
 - (f) выводы по влиянию коэффициентов вариации на характеристики систем;
 - (g) результаты анализа ЗСеМО и РСеМО («узкое место», критическое число заявок, предельная интенсивность потока и т.п.);
 - (h) обоснованные рекомендации по выбору структуры системы на основе критериев эффективности.

2 Исходные данные

Таблица 1. Параметры структурной и функциональной организации исследуемых систем

Вариант	Система 1		Система 2	
	Приборы	Емкость Накопителей	Приборы	Емкость Накопителей
1/8	3	2/0/0	1 ($H, v=2.4$)	3

Критерий эффективности: (в) максимальная нагрузка системы

Таблица 2. Параметры нагрузки

Номер варианта	Интенс. потока $\lambda, 1/c$	Ср.длит.обсл. b, c	Вероятности занятия прибора		
			П1	П2	П3
15	1,0	2	0,6	0,25	0,15

3 Выполнение

3.1 Описание исследуемой системы

- Система содержит 1 обслуживающий прибор с гиперэкспоненциальным распределением времени обслуживания
- Поток поступающих в систему заявок однородный
- Длительность обслуживания заявок – случайная величина с коэффициентом вариации $v = 2.4$
- Перед прибором есть место для заявок, ожидающих обслуживания, с ёмкостью накопителя 3
- Поступающие в систему заявки образуют простейший поток с интенсивностью $\lambda = 1.0 \text{ c}^{-1}$
- Средняя длительность обслуживания $b = 2.4 \text{ c}$, интенсивность обслуживания $\mu = 1/b \approx 0.4167 \text{ c}^{-1}$
- Гиперэкспоненциальное обслуживание реализовано через две последовательные фазы:
 - Фаза 1: интенсивность $\mu_1 = 0.7663 \text{ c}^{-1}$ (быстрая фаза)
 - Фаза 2: интенсивность $\mu_2 = 0.0670 \text{ c}^{-1}$ (медленная фаза)
- Дисциплина буферизации – с потерями: заявка, поступившая при заполненном накопителе (4 заявки в системе), теряется
- Дисциплина обслуживания – FIFO
- Максимальное число заявок в системе (включая обслуживаемую): 4 (1 на обслуживании + 3 в накопителе)

Обозначение по Кендаллу: $M/H_{2,4}/1/3$

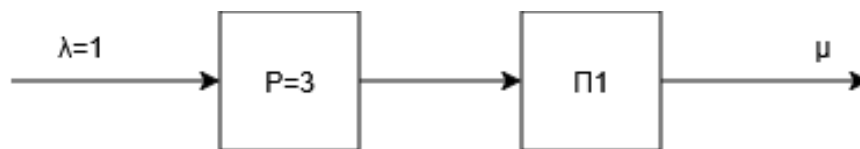


Рис. 1: Схематичное представление Системы 2.

3.2 Задание 2.2.1

Показатель	Значение
Нагрузка (предложенная)	2.4000
Загрузка системы	0.9988
Вероятность потери	0.6438
Средняя длина очереди	2.6212
Среднее число заявок в системе	3.6200
Производительность	0.3562
Коэффициент простоя	0.0012
Среднее время ожидания	7.3589
Среднее время пребывания	10.1648

Таблица 1: Показатели эффективности Системы 2

Характеристика	Сист. 2 (из отчета)	Имитационная модель	Процент отклонения
Загрузка системы	0.9988	0.969	-2.98
Вероятность потери	0.6438	0.5916	-8.11
Среднее число заявок в системе	3.6200	4.100	13.26
Средняя длина очереди	2.6212	3.131	19.45
Производительность	0.3562	0.4085	14.68
Среднее время пребывания (сек)	10.1648	10.037	-1.26
Среднее время ожидания (сек)	7.3589	7.664	4.15
Коэффициент простоя	0.0012	0.031	2483.33

Таблица 2: Сравнение характеристик Системы 2: аналитическая модель vs имитационная модель

3.3 Задание 2.2.2

3.3.1 Ключевые формулы

Основные соотношения для расчётов:

$$\rho = \lambda \cdot b = \frac{b}{t_a} \quad (1)$$

$$k = \frac{b}{b_0} \quad (2)$$

$$t_1 = t_1^{(0)} \cdot k \quad (3)$$

$$t_2 = t_2^{(0)} \cdot k \quad (4)$$

где $b_0 = 2.4$ с, $t_1^{(0)} = 1.3050$ с, $t_2^{(0)} = 14.9190$ с.

3.3.2 Сценарий а: фиксированное время между заявками

Для сценария а ($t_a = 1$ с) параметры гиперэкспоненциального распределения масштабируются в соответствии с целевой загрузкой $\rho = b$:

ρ	t_a (с)	b (с)	t_1 (с)	t_2 (с)
0.10	1.00	0.10	0.0544	0.6216
0.33	1.00	0.33	0.1794	2.0513
0.50	1.00	0.50	0.2719	3.1081
0.73	1.00	0.73	0.3972	4.5340
0.94	1.00	0.94	0.5114	5.8419

Таблица 3: Параметры для сценария а ($t_a = 1$ с)

Коэффициент масштабирования: $k = \frac{\rho}{2.4}$, где $t_1 = 1.3050 \cdot k$, $t_2 = 14.9190 \cdot k$.

3.3.3 Сценарий б: фиксированное время обслуживания

Для сценария б ($b = 2.4$ с) изменяется только интервал между заявками:

ρ	t_a (с)	b (с)	t_1 (с)	t_2 (с)
0.10	24.000	2.4	1.3050	14.9190
0.33	7.273	2.4	1.3050	14.9190
0.50	4.800	2.4	1.3050	14.9190
0.73	3.288	2.4	1.3050	14.9190
0.94	2.553	2.4	1.3050	14.9190

Таблица 4: Параметры для сценария б ($b = 2.4$ с)
Здесь $t_a = \frac{2.4}{\rho}$, параметры распределения остаются неизменными.

ρ	Ср. длина очереди	Ср. время ожидания, с	Загрузка системы	Вероятность потери	Ср. время пребывания, с
0.10	0.036	0.036	0.101	0.0003	0.137
0.33	0.345	0.359	0.317	0.0393	0.689
0.50	0.699	0.768	0.458	0.0893	1.271
0.73	1.157	1.397	0.616	0.1716	2.137
0.94	1.545	2.075	0.718	0.2550	3.040

Таблица 5: Результаты имитационного моделирования для сценария а ($t_a = 1$ с)

ρ	Ср. длина очереди	Ср. время ожидания, с	Загрузка системы	Вероятность потери	Ср. время пребывания, с
0.10	0.036	0.865	0.101	0.0003	3.285
0.33	0.345	2.613	0.317	0.0393	5.011
0.50	0.699	3.686	0.458	0.0893	6.103
0.73	1.123	4.434	0.611	0.1672	6.848
0.94	1.550	5.315	0.718	0.2550	7.778

Таблица 6: Результаты имитационного моделирования для сценария б ($b = 2.4$ с)

ρ	Показатель	Сценарий а ($t_a = 1$ с)	Сценарий б ($b = 2.4$ с)
0.50	Средняя длина очереди	0.699	0.699
	Среднее время ожидания, с	0.768	3.686
	Загрузка системы	0.458	0.458
	Вероятность потери	0.0893	0.0893
	Среднее время пребывания, с	1.271	6.103
0.94	Средняя длина очереди	1.545	1.550
	Среднее время ожидания, с	2.075	5.315
	Загрузка системы	0.718	0.718
	Вероятность потери	0.2550	0.2550
	Среднее время пребывания, с	3.040	7.778

Таблица 7: Сравнение ключевых показателей эффективности систем при $\rho = 0.50$ и $\rho = 0.94$

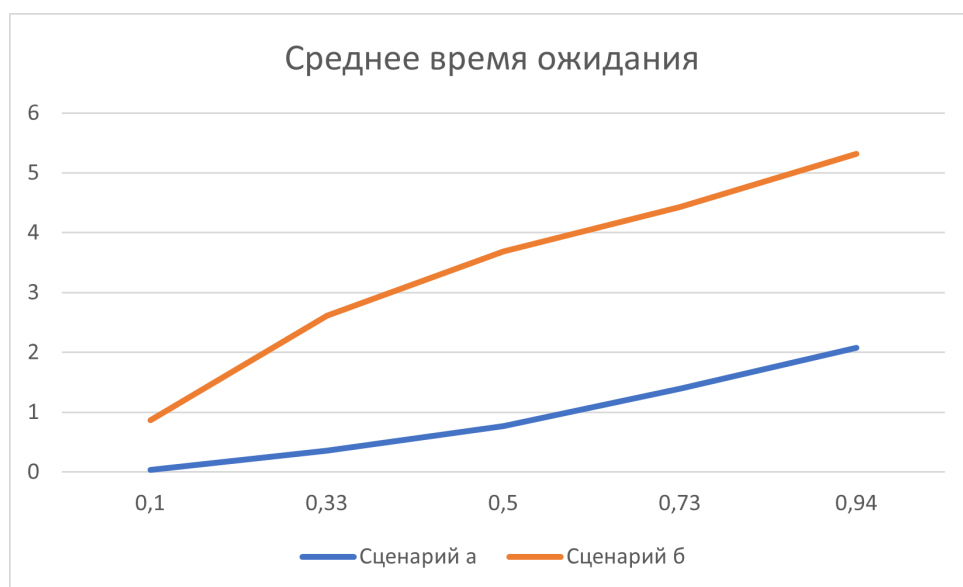


Рис. 2: Зависимость ср. времени ожидания от ρ

3.4 Задание 2.2.3

(ОБЯЗАТЕЛЬНЫЙ ПУНКТ) Исследование влияния на среднее время ожидания, среднее время пребывания заявок в системе и вероятность потерь следующих законов распределения интервалов между заявками в потоке: 1) заданная трасса (из УИР 1); 2) аппроксимирующее распределение (из УИР 1); 3) простейший поток; 4) равномерный, ... При этом средний интервал между поступающими в систему заявками, рассчитанный в УИР 1, не должен изменяться. Исследования по данному пункту рекомендуется проводить минимум для трех значений загрузки: 0,5; 0,75; 0,95 и 0,99. Указанные значения должны быть обеспечены за счет изменения средней длительности обслуживания заявок при одном и том же законе распределения (на усмотрение исследователя)

Таблица 8: Параметры исследуемых систем массового обслуживания

Поток	ρ	Кол-во приборов	Ёмкость накопителя	Ср. интервал (а)	Ср. обслуживание (b)	Коэф-т вариации
Гипер	0.50	1	3	30.079	15.039	2.40
Гипер	0.75	1	3	30.079	22.559	2.40
Гипер	0.95	1	3	30.079	28.575	2.40
Эксп	0.50	1	3	30.079	15.039	1.00
Эксп	0.75	1	3	30.079	22.559	1.00
Эксп	0.95	1	3	30.079	28.575	1.00
Эрл (k=2)	0.50	1	3	30.079	15.039	0.71
Эрл (k=2)	0.75	1	3	30.079	22.559	0.71
Эрл (k=2)	0.95	1	3	30.079	28.575	0.71

Таблица 9: Результаты имитационного моделирования для различных типов потоков

Поток	ρ	Заявок	Потери	Вер-ть потери	Длина очер.	Загрузка	Ср. вр. ож.	СКО вр.ож.
Гипер	0.50	10035	9304	0.927	2.923	0.999	41.906	25.396
Гипер	0.75	10035	9533	0.950	2.950	0.999	62.856	37.821
Гипер	0.95	10035	9623	0.959	2.959	0.999	77.935	45.924
Эксп	0.50	10022	9305	0.928	2.924	1.000	41.930	25.309
Эксп	0.75	10022	9534	0.951	2.953	1.000	62.978	37.926
Эксп	0.95	10022	9623	0.960	2.960	1.000	77.874	45.901
Эрл (k=2)	0.50	10022	9305	0.928	2.924	1.000	41.930	25.309
Эрл (k=2)	0.75	10022	9534	0.951	2.953	1.000	62.978	37.926
Эрл (k=2)	0.95	10022	9623	0.960	2.960	1.000	77.874	45.901

4 Вывод

Исследование СМО M/H2.4/1/3 показало, что с увеличением загрузки резко возрастают вероятность потерь (до 25.5% при $\rho = 0.94$), время ожидания и длина очереди. Сравнение с аналитической моделью выявило расхождения, требующие дополнительного анализа. Результаты демонстрируют критическую важность учета характеристик входного потока и распределения времени обслуживания при проектировании систем массового обслуживания.

5 Программный код

5.1 GPSS для изначальной модели

5.1.1 Исходный код

```
*****
*                                     Модель CMO G/G/K/E
*****
*                                     И с х о д н ы е   д а н н ы е
*****
E_buf      EQU      3              ; емкость накопителя (буфера)
t_b        EQU      2.4            ; средняя длительность обслуживания заявки в приборе

RN_a       EQU      20              ; номер генератора для потока
RN_b       EQU      553             ; номер генератора для длительности обслуживания

* Параметры гиперэкспоненциального распределения:
RN_H       EQU      91              ; номер генератора для гиперэкспоненциального рас
qq         EQU      0.9196          ; вероятность выбора первой фазы
tt_1       EQU      1.3050          ; мат. ожидание первой фазы гиперэкспоненциальног
tt_2       EQU      14.9190         ; мат. ожидание второй фазы гиперэкспоненциальног
*****
TU_uzel    TABLE      M1,0.2,0.2,50;
TU_buf     QTABLE      buf1,0.1,0.1,50;
uzel       STORAGE     1
Erl_2      VARIABLE     (Exponential(RN_erl1,0,t_a/2))+(Exponential(RN_erl2,0,t_a/2)
*****
* Служебные переменные, необходимые для процедуры GetRandomNumberFromFile *
*****
ErrorCodes MATRIX ,2,1 ; Коды ошибок открытия/закрытия файла (при наличии ошибок в к
FilePosition MATRIX ,1,1 ; Текущий номер строки в файле, из которой читается число (уве
*****
* В качестве исполняемого оставить только ОДИН оператор GENERATE !!!*
*****
; Входной поток - простейший с =1.0
GENERATE (Exponential(RN_a,0,1.0))
*GENERATE      V$Erl_2
          TEST      L      Q$buf1,(E_buf+1),zyx
          QUEUE     buf1
*          SEIZE     uzel
          ENTER     uzel
          DEPART    buf1
          ; Гиперэкспоненциальное обслуживание
          ADVANCE (hyper1(RN_H, qq, tt_1, tt_2))
*          RELEASE   uzel
          LEAVE     uzel
          TABULATE   TU_uzel
          TERMINATE  1
zyx        TERMINATE  1
*****
* Процедура возвращает значение псевдослучайной величины, *
* распределенной по гиперэкспоненциальному закону, в *
* соответствии с параметрами распределения qq, tt_1, tt_2. *
*****
PROCEDURE hyper1(RN_H, qq, tt_1, tt_2) BEGIN
```

```
if (uniform(1,0,1) < qq) then return exponential(RN_H,0,tt_1);  
else return exponential(RN_H,0,tt_2);
```

```
END;
```

5.1.2 Вывод программы

GPSS World Simulation Report - Untitled Model 10.1.1

Sunday, November 30, 2025 18:54:53

START TIME	END TIME	BLOCKS	FACILITIES	STORAGES
0.000	99978.982	10	0	1

NAME	VALUE
BUF1	10011.000
ERL_2	10013.000
ERRORCODES	10014.000
E_BUF	3.000
FILEPOSITION	10015.000
HYPER1	10000.000
QQ	0.920
RN_A	20.000
RN_B	553.000
RN_ERL1	UNSPECIFIED
RN_ERL2	UNSPECIFIED
RN_H	91.000
TT_1	1.305
TT_2	14.919
TU_BUF	10010.000
TU_UZEL	10009.000
T_A	UNSPECIFIED
T_B	2.400
UZEL	10012.000
ZYX	10.000

LABEL	LOC	BLOCK TYPE	ENTRY COUNT	CURRENT COUNT	RETRY
	1	GENERATE	100004	0	0
	2	TEST	100004	0	0
	3	QUEUE	40841	3	0
	4	ENTER	40838	1	0
	5	DEPART	40837	0	0
	6	ADVANCE	40837	0	0
	7	LEAVE	40837	0	0
	8	TABULATE	40837	0	0
	9	TERMINATE	40837	0	0
ZYX	10	TERMINATE	59163	0	0

QUEUE	MAX	CONT.	ENTRY	ENTRY(0)	AVE.CONT.	AVE.TIME	AVE.(-0)	RETRY
BUF1	4	4	40841	3054	3.131	7.664	8.284	0

STORAGE	CAP.	REM.	MIN.	MAX.	ENTRIES	AVL.	AVE.C.	UTIL.	RETRY	DELAY
UZEL	1	0	0	1	40838	1	0.969	0.969	0	3

TABLE	MEAN	STD.DEV.	RANGE	RETRY	FREQUENCY	CUM.%
TU_UZEL	10.037	12.854		0		
			- -	0.200	474	1.16
			0.200 -	0.400	462	2.29
			0.400 -	0.600	483	3.47
			0.600 -	0.800	516	4.74
			0.800 -	1.000	506	5.98
			1.000 -	1.200	562	7.35
			1.200 -	1.400	570	8.75
			1.400 -	1.600	607	10.24
			1.600 -	1.800	651	11.83
			1.800 -	2.000	705	13.56
			2.000 -	2.200	710	15.29
			2.200 -	2.400	733	17.09
			2.400 -	2.600	768	18.97
			2.600 -	2.800	805	20.94
			2.800 -	3.000	833	22.98
			3.000 -	3.200	829	25.01
			3.200 -	3.400	837	27.06
			3.400 -	3.600	875	29.20
			3.600 -	3.800	867	31.33
			3.800 -	4.000	798	33.28
			4.000 -	4.200	830	35.31
			4.200 -	4.400	842	37.38
			4.400 -	4.600	798	39.33
			4.600 -	4.800	825	41.35
			4.800 -	5.000	725	43.13
			5.000 -	5.200	807	45.10
			5.200 -	5.400	706	46.83
			5.400 -	5.600	709	48.57
			5.600 -	5.800	640	50.13
			5.800 -	6.000	650	51.73
			6.000 -	6.200	625	53.26
			6.200 -	6.400	617	54.77
			6.400 -	6.600	608	56.26
			6.600 -	6.800	601	57.73
			6.800 -	7.000	548	59.07
			7.000 -	7.200	537	60.38
			7.200 -	7.400	535	61.69
			7.400 -	7.600	482	62.87
			7.600 -	7.800	445	63.96
			7.800 -	8.000	422	65.00
			8.000 -	8.200	397	65.97
			8.200 -	8.400	387	66.92
			8.400 -	8.600	367	67.82
			8.600 -	8.800	337	68.64
			8.800 -	9.000	377	69.56
			9.000 -	9.200	313	70.33
			9.200 -	9.400	315	71.10
			9.400 -	9.600	320	71.89
			9.600 -	9.800	256	72.51
			9.800 - -		11225	100.00
TU_BUF	7.664	11.492		0		
			- -	0.100	3356	8.22
			0.100 -	0.200	310	8.98

0.200	-	0.300	285	9.68
0.300	-	0.400	355	10.54
0.400	-	0.500	334	11.36
0.500	-	0.600	390	12.32
0.600	-	0.700	339	13.15
0.700	-	0.800	397	14.12
0.800	-	0.900	348	14.97
0.900	-	1.000	371	15.88
1.000	-	1.100	406	16.87
1.100	-	1.200	411	17.88
1.200	-	1.300	393	18.84
1.300	-	1.400	435	19.91
1.400	-	1.500	406	20.90
1.500	-	1.600	498	22.12
1.600	-	1.700	472	23.28
1.700	-	1.800	431	24.33
1.800	-	1.900	469	25.48
1.900	-	2.000	453	26.59
2.000	-	2.100	468	27.74
2.100	-	2.200	450	28.84
2.200	-	2.300	510	30.09
2.300	-	2.400	510	31.34
2.400	-	2.500	478	32.51
2.500	-	2.600	479	33.68
2.600	-	2.700	442	34.76
2.700	-	2.800	554	36.12
2.800	-	2.900	513	37.38
2.900	-	3.000	484	38.56
3.000	-	3.100	491	39.76
3.100	-	3.200	503	40.99
3.200	-	3.300	447	42.09
3.300	-	3.400	456	43.21
3.400	-	3.500	445	44.30
3.500	-	3.600	434	45.36
3.600	-	3.700	417	46.38
3.700	-	3.800	455	47.49
3.800	-	3.900	409	48.50
3.900	-	4.000	442	49.58
4.000	-	4.100	413	50.59
4.100	-	4.200	385	51.53
4.200	-	4.300	381	52.46
4.300	-	4.400	355	53.33
4.400	-	4.500	387	54.28
4.500	-	4.600	378	55.21
4.600	-	4.700	392	56.17
4.700	-	4.800	377	57.09
4.800	-	4.900	324	57.88
4.900	-	-	17199	100.00

CEC XN	PRI	M1	ASSEM	CURRENT	NEXT	PARAMETER	VALUE
99992	0	99971.454	99992	4	5		

FEC XN	PRI	BDT	ASSEM	CURRENT	NEXT	PARAMETER	VALUE
100005	0	99979.002	100005	0	1		