

---

# Contents

---

<b>List of Notations</b> . . . . .	ix
<b>Preface</b> . . . . .	xi
<b>Chapter 1. Single-Server Queues Embedded at Departure Epochs</b> . . . . .	1
1.1. <i>BMAP/G/1</i> queue . . . . .	6
1.2. <i>MAP/G/1</i> queue . . . . .	50
1.3. <i>PH/G/1</i> queue . . . . .	56
1.4. <i>M/G/1</i> queue . . . . .	62
1.5. <i>PH/M/1</i> queue . . . . .	66
1.6. <i>M/M/1</i> queue . . . . .	67
1.7. Exercises . . . . .	68
<b>Chapter 2. Single-Server Queues Embedded at Arrival Epochs</b> . . . . .	83
2.1. <i>GI/PH/1</i> queue . . . . .	83
2.2. <i>GI/M/1</i> queue . . . . .	104
2.3. <i>M/PH/1</i> queue . . . . .	108
2.4. <i>M/M/1</i> queue . . . . .	117
2.5. Exercises . . . . .	117
<b>Chapter 3. Single-Server Queues Based on Arbitrary Epochs</b> . . . . .	131
3.1. <i>BMAP/PH/1</i> queue . . . . .	131
3.2. <i>MAP/PH/1</i> queueing model . . . . .	139
3.3. <i>PH/PH/1</i> queue . . . . .	146
3.4. <i>PH/M/1</i> queue . . . . .	149
3.5. <i>M/PH/1</i> queue . . . . .	153
3.6. <i>M/M/1</i> queue . . . . .	155
3.7. Exercises . . . . .	156

---

<b>Chapter 4. Busy Period in Queues</b> . . . . .	169
4.1. Busy period in $M/G/1$ -type queues (scalar case) . . . . .	170
4.2. Busy period in $M/G/1$ -type queues (matrix case) . . . . .	174
4.3. Busy period in $GI/M/1$ -type queues (scalar case) . . . . .	179
4.4. Busy period in $GI/PH/1$ -type queues . . . . .	180
4.5. $BMAP/PH/1$ queue . . . . .	189
4.6. Busy period in QBD-type queues . . . . .	193
4.7. When the fundamental period is not the busy period . . . . .	206
4.8. $GI/G/1$ queues . . . . .	208
4.9. Exercises . . . . .	211
<b>Chapter 5. Multi-Server Queues</b> . . . . .	221
5.1. $BMAP/PH/c$ queue . . . . .	221
5.2. $MAP/PH/3$ queue . . . . .	225
5.3. $BMAP/M/c$ queue . . . . .	262
5.3.1. $MAP/M/c$ queue . . . . .	275
5.3.2. $M/M/c$ queue . . . . .	280
5.4. $GI/PH/c$ queue . . . . .	281
5.5. Exercises . . . . .	283
<b>Chapter 6. Finite-Capacity Queues</b> . . . . .	293
6.1. Finite-capacity queues with single server . . . . .	293
6.1.1. $BMAP/PH/1/K$ queue . . . . .	294
6.1.2. $MAP/PH/1/K$ queue . . . . .	298
6.1.3. $PH/M/1/K$ queue . . . . .	308
6.1.4. $M/PH/1/K$ queue . . . . .	312
6.1.5. $M/M/1/K$ queue . . . . .	316
6.2. Finite-capacity queues with multiple servers . . . . .	318
6.2.1. $BMAP/M/c/K$ queue . . . . .	318
6.2.2. $MAP/M/c/K$ queue . . . . .	326
6.2.3. $PH/M/c/K$ queue . . . . .	330
6.2.4. $M/M/c/K$ queue . . . . .	334
6.3. Exercises . . . . .	337
<b>Chapter 7. Simulation</b> . . . . .	345
7.1. Introduction to ARENA . . . . .	345
7.2. Model building using ARENA . . . . .	348
7.3. $GI/G/c$ queues . . . . .	358
7.3.1. ARENA modules for $GI/G/c$ queues . . . . .	359
7.3.2. Validation of $GI/G/1$ queues . . . . .	367
7.3.3. Simulated examples for $GI/G/1$ queues . . . . .	372
7.3.4. Validation of $GI/G/c$ queues . . . . .	374

---

7.3.5. Simulated examples of $GI/G/c$ queues . . . . .	375
7.4. $BMAP/G/c$ queues . . . . .	382
7.4.1. ARENA modules for $BMAP/G/c$ queues . . . . .	382
7.4.2. Validation of $BMAP/G/1$ queues . . . . .	386
7.4.3. Simulated examples for $BMAP/G/1$ queues . . . . .	389
7.4.4. Validation of $BMAP/M/c$ queues . . . . .	390
7.4.5. Simulated examples for $BMAP/G/c$ queues . . . . .	393
7.5. Exercises . . . . .	402
<b>References</b> . . . . .	405
<b>Index</b> . . . . .	411
<b>Summary of Volume 1</b> . . . . .	413