

**РОССИЙСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ОТКРЫТЫЙ
ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ ПУТЕЙ СООБЩЕНИЯ**

11/27/4

**Одобрено кафедрой
«Электрификация
и электроснабжение»**

ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ

**Задание на контрольную работу
с методическими указаниями
для студентов VI курса
специальности**

190401 ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЕ ЖЕЛЕЗНЫХ ДОРОГ (ЭНС)



Москва – 2008

Составитель – канд. техн. наук, проф. Р.В. Шиловская

Рецензент – ст. преп.З.А. Фомина

ЗАДАНИЕ НА КОНТРОЛЬНУЮ РАБОТУ

Задача 1

Моделирование графика движения поездов для расчета параметров тяговой нагрузки.

1. Рассчитать и построить функцию распределения интервалов между поездами для участка магистральной железной дороги.

2. Рассчитать интервалы между поездами и моменты отправления поездов в течение 3 ч.

3. Составить таблицу интервалов между поездами и моментов их отправления с начальной станции участка железной дороги.

Исходные данные

1. Размеры движения в парах поездов N и минимальный межпоездной интервал Q_0 даны в табл. 1 в соответствии с последней цифрой учебного шифра студента.

Таблица 1

| | | | | | | | | | | |
|----------------------------------|----|----|----|----|----|----|-----|-----|-----|-----|
| Последняя цифра учебного шифра | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 |
| N пар поездов в сутки | 70 | 75 | 80 | 85 | 90 | 95 | 100 | 105 | 110 | 115 |
| Минимальный интервал Q_0 , мин | 10 | 10 | 10 | 9 | 9 | 8 | 8 | 8 | 7 | 7 |

2. Шаг перемещения поездов по времени Δt указан в табл. 2 в соответствии с предпоследней цифрой учебного шифра. Там же указано число разрядов $n_{\text{разр}}$ функции распределения интервалов.

3. Случайные числа, равномерно распределенные на отрезке $[0,1]$, даны в табл. 3. Первое случайное число определяется по первой строчке в соответствии с цифрой, указывающей число сотен в учебного шифре.

4. Интервал между поездами не должен быть более $Q_{\text{max}} = 40$ мин.

Таблица 2

| | | | | | | | | | | |
|---|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| Предпоследняя цифра учебного шифра | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 |
| Шаг перемещения поездов по времени Δt , мин | 0,2 | 0,3 | 0,4 | 0,5 | 0,2 | 0,3 | 0,4 | 0,5 | 0,2 | 0,3 |
| Число разрядов $n_{\text{разр}}$ функции распределения интервалов | 8 | 7 | 6 | 5 | 5 | 6 | 5 | 6 | 7 | 8 |

Таблица 3

Таблица случайных чисел

| № п/п | Цифра (число сотен в шифре) | | | | | | | | | |
|----------|-----------------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 |
| 1 | 0,04 | 0,85 | 0,60 | 0,43 | 0,17 | 0,89 | 0,05 | 0,07 | 0,97 | 0,49 |
| 2 | 0,77 | 0,25 | 0,88 | 0,58 | 0,62 | 0,08 | 0,67 | 0,82 | 0,20 | 0,84 |
| 3 | 0,30 | 0,29 | 0,65 | 0,68 | 0,39 | 0,91 | 0,16 | 0,19 | 0,73 | 0,99 |
| 4 | 0,37 | 0,80 | 0,15 | 0,23 | 0,93 | 0,06 | 0,46 | 0,92 | 0,18 | 0,31 |
| 5 | 0,22 | 0,81 | 0,12 | 0,38 | 0,54 | 0,51 | 0,57 | 0,32 | 0,47 | 0,78 |
| 6 | 0,45 | 0,42 | 0,09 | 0,98 | 0,83 | 0,50 | 0,11 | 0,36 | 0,94 | 0,79 |
| 7 | 0,75 | 0,26 | 0,71 | 0,27 | 0,72 | 0,96 | 0,95 | 0,01 | 0,44 | 0,63 |
| 8 | 0,28 | 0,86 | 0,56 | 0,55 | 0,64 | 0,24 | 0,14 | 0,66 | 0,61 | 0,69 |
| 9 | 0,90 | 0,21 | 0,76 | 0,74 | 0,02 | 0,10 | 0,53 | 0,13 | 0,41 | 1,00 |
| 10 | 0,34 | 0,59 | 0,35 | 0,87 | 0,03 | 0,48 | 0,70 | 0,52 | 0,40 | 0,33 |

Задача 2

Разработка алгоритма расчета заданного параметра тяговой нагрузки

1. Составить упрощенную блок-схему алгоритма расчета.
2. Указать условия моделирования графика движения в ЭВМ при расчете заданного параметра: размеры движения поездов и длительность моделирования.

Исходные данные

Заданный параметр тяговой нагрузки определяется по последней цифре учебного шифра:

| Последняя цифра учебного шифра | Заданный параметр тяговой нагрузки |
|--------------------------------|---|
| 0 | Максимальный ток фидера $I_{\max \text{ ф}}$ |
| 1 | Максимальный ток плеча тяговой подстанции $I_{\max \text{ п}}$ |
| 2 | Средняя интенсивность относительно износа витковой изоляции тягового трансформатора F |
| 3 | Максимальная температура нагрева обмотки трансформатора $\vartheta_{\max \text{ обм}}$ |
| 4 | Максимальная температура нагрева полупроводникового вентиля выпрямителя тяговой подстанции постоянного тока $\vartheta_{\text{вент}}$ |
| 5 | Наибольшее значение эффективного тока фазы вторичной обмотки трансформатора $I_{\text{э} \max}$ |
| 6 | Среднее напряжение у поезда за время хода по лимитирующему перегону $U_{\text{лимит пер}}$ |
| 7 | Максимальный ток подстанции постоянного тока $I_{\max \text{ п/ст}}$ |
| 8 | Наибольшее значение эффективного тока фидера $I_{\text{эф} \max \text{ ф}}$ |
| 9 | Суточная потеря электроэнергии в проводах контактной сети $\Delta W_{\text{сут}}$ |

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ К ЗАДАЧЕ 1

Для выполнения контрольной работы необходимо ознакомиться с методом имитационного моделирования, используемого для расчетов систем электроснабжения магистральных железных дорог [1, 2, 3] и метрополитена [6].

Сущность метода заключается в том, что на ЭВМ производится моделирование движения поездов по заданному участку.

Непрерывное движение поездов заменяется дискретным с небольшим шагом по времени Δt . По заданным токам поездов и их местоположениям рассчитываются мгновенные значения тяговых нагрузок системы электроснабжения. Таким образом, в процессе моделирования рассчитываются требуемые функции времени: токи фидеров $i_{\text{ф}}(t)$, напряжения в контактной сети $U_{\text{кст}}(t)$, потери мощности в тяговой сети $\Delta P(t)$, потенциалы рельс-земля

$\varphi_{p-3}(t)$, токи подстанций постоянного тока $i_{п/ст}(t)$, токи фаз тягового трансформатора подстанций переменного тока $i_{\text{фазы тр}}(t)$, минимальные значения токов короткого замыкания в тяговой сети $i_{кз \min}(t)$ и т.д.

По ним далее рассчитываются параметры тяговой нагрузки: средние, эффективные и экстремальные значения.

Ход указанных функций в значительной степени определяется графиком движения поездов по рассматриваемому участку, а, следовательно, числом поездов на линии. Размерами движения поездов называется число пар поездов в сутки. Для расчета системы электроснабжения магистральных железных дорог, используются следующие размеры движения:

N_0 – наибольшие размеры движения или наибольшая пропускная способность;

N – заданные размеры движения соответствуют числу пар поездов в сутках интенсивного месяца:

$N_{\text{ср}} = N/K_{\text{нер}}$ – средние размеры движения, где $K_{\text{нер}}$ – коэффициент неравномерности движения; $K_{\text{нер}} = 1, 15$.

В данной контрольной работе рассматриваются однотипные поезда, для которых функции токов поездов от времени $i_{п}(t)$ будут одинаковыми. Тогда при наибольших размерах движения интервалы между поездами будут одинаковыми и равны минимальному $Q_0 = \frac{T_{\text{сут}}}{N_0}$, где $T_{\text{сут}}$ – сутки.

При заданных размерах движения $N < N_0$ интервал между поездами становятся неравными: $Q \geq Q_0$. В этом случае для расчета параметров тяговой нагрузки интервалы между поездами рассматривают как случайные величины. Задают их при помощи функции распределения теоретической или опытной.

В данном случае представим ее в виде усеченного экспоненциального распределения:

$$F(Q) = 1 - e^{-\frac{t-Q_0}{Q_{\text{ср}}-Q_0}},$$

Экспоненциальное распределение является неограниченным справа, т.е. время t измеряется от нуля до бесконечности.

Примем, что наибольшее значение интервала Q не может превышать Q_{\max} : $Q \leq Q_{\max}$.

При моделировании поездов по линии задача состоит в определении моментов отправления поездов с начальной станции или в определении интервалов между поездами.

Вычисление случайных интервалов, подчиняющихся заданной функции распределения может быть выполнено при помощи таблицы случайных чисел [4], равномерно распределенных на отрезке $[0,1]$.

Процедуру расчета можно представить следующим образом.

Сначала строится график функции распределения интервалов (рис. 1). Затем значение функции разбивается на равные части—разряды. На рис. 1 таких частей пять. Вероятности попадания в каждую из них одинаковы и равны $p_1=1/5=0,2$. На горизонтальной оси отмечены границы разрядов: $[Q_0, Q_1']$ — 1-й разряд; $[Q_1', Q_2']$ — 2-й разряд и т.д. Граница последнего разряда соответствует максимальному значению интервала $Q_5' = Q_{\max}$.

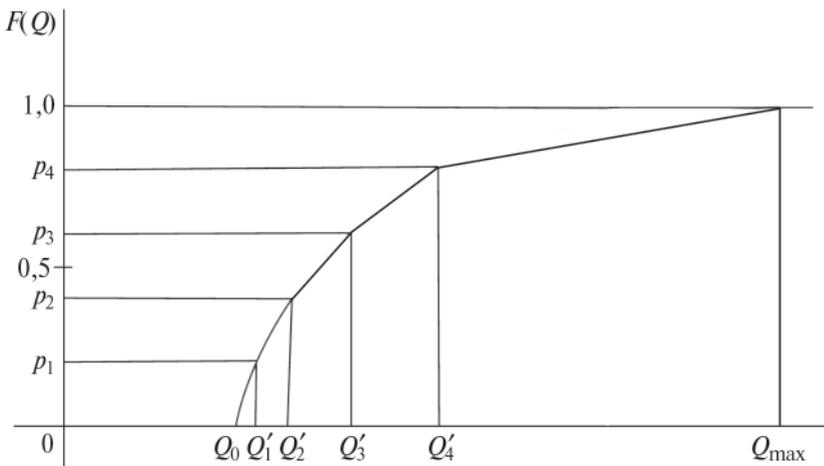


Рис. 1. Функция распределения интервалов между поездами $F(Q)$

Значение случайного интервала определяется при помощи таблицы случайных чисел в два этапа. Первое случайное число выбирается из первой случайной строки (см. табл. 3) по ве-

личине цифры сотен в учебном шифре. Возьмем его равным $x_1=0,43$. Обратимся к рис.1. Это число соответствует третьему интервалу, где $p_2 < 0,43 < p_3$, для которого случайное число Q лежит в разряде $[Q_2', Q_3']$. Для того, чтобы выбрать конкретное значение Q , функцию распределения $F(Q)$ представляют в виде отрезков прямых для каждого разряда. Таким образом, можно определить искомый случайный интервал Q , используя второе случайное число, равномерно распределенное на отрезке $[0,1]$. Далее выбираем случайные числа из табл. 3 по порядку, идя слева направо. В 1-й строке следующим числом будет $x_2 = 0,17$. Тогда случайный интервал Q_1 будет равен:

$$Q_1 = Q_2' + x_2(Q_3' - Q_2')$$

Аналогичным образом вычисляются следующие интервалы, по которым определяются моменты отправления поездов с начальной станции. За начальный момент времени можно принять $t = 0$.

Полученное значение интервала нужно соотносить с шагом квантования по времени Δt , округлив его до нужной величины.

Далее приводится табл. 4, в которой даются значения вспомогательной функции e^{-x} для построения функции распределения интервалов $F(Q)$.

Таблица 4

Значения функции $\exp(-x)$

| x | | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 |
|-----|----|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| 0,0 | 0, | — | 9900 | 9802 | 9704 | 9608 | 9512 | 9418 | 9324 | 9231 | 9139 |
| 0,1 | 0, | 9048 | 8958 | 8869 | 8781 | 8694 | 8607 | 8521 | 8437 | 8353 | 8270 |
| 0,2 | 0, | 8187 | 8106 | 8025 | 7945 | 7866 | 7788 | 7710 | 7634 | 7558 | 7483 |
| 0,3 | 0, | 7408 | 7334 | 7261 | 7189 | 7118 | 7047 | 6977 | 6907 | 6839 | 6771 |
| 0,4 | 0, | 6703 | 6636 | 6570 | 6505 | 6440 | 6376 | 6313 | 6250 | 6188 | 6126 |
| 0,5 | 0, | 6065 | 6005 | 5945 | 5886 | 5827 | 5770 | 5712 | 5655 | 5590 | 5543 |
| 0,6 | 0, | 5488 | 5433 | 5379 | 5326 | 5273 | 5220 | 5168 | 5117 | 5066 | 5016 |
| 0,7 | 0, | 4966 | 4916 | 4867 | 4819 | 4771 | 4724 | 4677 | 4630 | 4584 | 4538 |
| 0,8 | 0, | 4493 | 4449 | 4404 | 4360 | 4317 | 4274 | 4232 | 4189 | 4148 | 4107 |
| 0,9 | 0, | 4066 | 4025 | 3985 | 3945 | 3906 | 3867 | 3829 | 3791 | 3753 | 3716 |
| 1,0 | 0, | 3679 | 3642 | 3606 | 3570 | 3534 | 3499 | 3465 | 3430 | 3396 | 3362 |
| 1,1 | 0, | 3329 | 3296 | 3263 | 3230 | 3198 | 3166 | 3135 | 3104 | 3073 | 3042 |
| 1,2 | 0, | 3012 | 2982 | 2952 | 2923 | 2894 | 2865 | 2836 | 2808 | 2780 | 2753 |

| x | | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 |
|-----|-----|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| 1,3 | 0, | 2725 | 2698 | 2671 | 2645 | 2618 | 2592 | 2567 | 2541 | 2516 | 2491 |
| 1,4 | 0, | 2466 | 2441 | 2417 | 2393 | 2363 | 2346 | 2322 | 2299 | 2276 | 2254 |
| 1,5 | 0, | 2231 | 2209 | 2187 | 2165 | 2144 | 2122 | 2101 | 2080 | 2060 | 2039 |
| 1,6 | 0, | 2019 | 1999 | 1979 | 1959 | 1940 | 1920 | 1901 | 1882 | 1864 | 1845 |
| 1,7 | 0, | 1827 | 1809 | 1791 | 1773 | 1735 | 1788 | 1720 | 1703 | 1686 | 1670 |
| 1,8 | 0, | 1653 | 1636 | 1620 | 1604 | 1588 | 1572 | 1557 | 1541 | 1526 | 1511 |
| 1,9 | 0, | 1496 | 1481 | 1466 | 1451 | 1437 | 1423 | 1409 | 1395 | 1381 | 1367 |
| 2,0 | 0, | 1353 | 1340 | 1327 | 1313 | 1300 | 1287 | 1275 | 1262 | 1249 | 1237 |
| 2,1 | 0, | 1225 | 1212 | 1200 | 1188 | 1177 | 1165 | 1153 | 1142 | 1130 | 1119 |
| 2,2 | 0, | 1108 | 1097 | 1086 | 1075 | 1065 | 1054 | 1043 | 1033 | 1023 | 1013 |
| 2,3 | 0, | 1003 | 0993 | 0983 | 0973 | 0963 | 0954 | 0944 | 0935 | 0926 | 0916 |
| 2,4 | 0,0 | 9072 | 8981 | 8892 | 8804 | 8716 | 8629 | 8544 | 8458 | 8374 | 8291 |
| 2,5 | 0,0 | 8208 | 8127 | 8046 | 7966 | 7887 | 7808 | 7730 | 7654 | 7577 | 7502 |
| 2,6 | 0,0 | 7427 | 7354 | 7280 | 7208 | 7136 | 7065 | 6995 | 6925 | 6856 | 6788 |
| 2,7 | 0,0 | 6721 | 6654 | 6587 | 6522 | 6457 | 6393 | 6329 | 6266 | 6204 | 6142 |
| 2,8 | 0,0 | 6081 | 6020 | 5961 | 5901 | 5843 | 5784 | 5727 | 5670 | 5614 | 5588 |
| 2,9 | 0,0 | 5502 | 5448 | 5393 | 5340 | 5287 | 5234 | 5182 | 5130 | 5079 | 5029 |
| 3,0 | 0,0 | 4979 | 4929 | 4880 | 4842 | 4784 | 4736 | 4689 | 4642 | 4596 | 4550 |

Примечание. В таблице приведены значения функции $\exp(-x)$ от 0,00 до 3,09 через 0,01. С целью сокращения объема таблицы приведены только цифры дробной части после нуля целых или нуля целых и нуля десятых. Например:

$$\exp(-0,05) = 0,9512;$$

$$\exp(-2,53) = 0,07966.$$

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ К ЗАДАЧЕ 2

Метод имитационного моделирования предназначен для решения задач проектирования и эксплуатации системы электропитания. Основными задачами являются выбор мощности тяговых подстанций, выбор сечения проводов контактной сети, выбор вариантов схем питания тяговой сети, корректировка пропускной способности участка, выбор установок защиты от токов короткого замыкания и др.

Для решения указанных задач и ведется расчет необходимых параметров тяговой нагрузки. Система автоматизированных расчетов, например [5], представляет сложный программный комплекс, при помощи которого одновременно рассчитываются раз-

личные параметры. Их можно разбить условно на две группы: интегральные и экстремальные.

Например, средние и эффективные токи — это *интегральные* параметры:

$$I_{\text{ср}} = \frac{\sum_{j=1}^n I_j}{n}, \quad I_{\text{эф}}^2 = \frac{\sum_{j=1}^n I_j^2}{n},$$

где I_j — мгновенное значение тока;
 n — число перемещений на Δt .

Для расчета интегральных параметров в процессе перемещения поездов по участку накапливаются суммы первых степеней и квадратов токов I_j , а расчет $I_{\text{ср}}$ и $I_{\text{эф}}$ выполняется при окончании моделирования.

Экстремальные значения анализируются на каждом шаге Δt , и запоминается наибольшее (или наименьшее) значение из встретившихся. Так что к концу моделирования искомое значение будет найдено.

Длительность моделирования $T_{\text{модел}}$ зависит от того, какой график движения принят для расчета. Если $N = N_0$ и поезда одноплатные, то графики функций, например, токов фидеров и подстанций, будут периодическими или с периодом $T = Q_0$. Тогда этот период и будет временем моделирования $T_{\text{модел}} = T$. Если число поездов $N < N_0$, что такой режим соответствует разным интервалам между поездами или случайным интервалам. Тогда длительность моделирования нужно взять равной суткам $T_{\text{модел}} = T_{\text{сут}}$.

Алгоритм расчета параметров тяговой нагрузки системы электроснабжения с использованием метода имитационного моделирования упрощенно можно представить в следующей последовательности:

1. Выполнение тяговых расчетов.
2. Задание и расчет графика движения поездов.
3. Перемещение поездов на Δt .
4. Расчет мгновенных схем.
5. Накапливание сумм для расчета интегральных параметров тяговой нагрузки и фиксация экстремумов.
6. Проверка окончания расчетов.

7. Расчет параметров тяговой нагрузки.

8. Печать результатов.

9. Конец.

Основными исходными данными являются токи поездов в зависимости от времени t и местонахождения s : $i_n(t,s)$. Они определяются путем выполнения тяговых расчетов и хранятся в специальном файле, к которому обращаются по мере перемещения поездов и расчету мгновенных схем.

Задание графика движения, как отмечалось, может быть различным, как и различно время моделирования. Для расчета некоторых параметров тяговой нагрузки может потребоваться моделирование разных вариантов графика движения.

Далее осуществляется перемещение поездов на Δt и расчет мгновенных схем.

Проверка окончания расчетов соответствует времени $t = T_{\text{модел}}$.

При составлении блок-схемы алгоритма расчета заданного параметра тяговой нагрузки нужно указать требуемые размеры движения поездов и длительность моделирования.

Условные обозначения расчетных блоков должны соответствовать ГОСТу.

РЕКОМЕНДУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА

Основная

1. Ш и л о в с к а я Р.В. Расчет системы электроснабжения электрических железных дорог: Лекция. Ч. 2. — М., 2004.

Дополнительная

2. М а р к в а р д т К.Г. Электроснабжение электрифицированных железных дорог. — М.: Транспорт, 1982.

3. Справочник по электроснабжению железных дорог. Т. 1. — М.: Транспорт, 1980. — 256 с.

4. В е н т ц е л ь Е.С. Теория вероятностей. — М.: Наука, 2002.

5. Д л и н А.М. Математическая статистика в технике. — М.: «Советская наука», 1958.

6. Б ы к о в Е.И. и др. Тяговые сети метрополитенов. — М.: Транспорт, 1987.

ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ

Задание на контрольную работу
с методическими указаниями

Редактор *В.К. Тихонычева*
Корректор *В.В. Игнатова*
Компьютерная верстка *О.А. Денисова*

Переиздание

| | | |
|-----------------------------|-------------------|------------------------------|
| Тип. зак. | Изд. зак. 219 | Тираж 500 экз. |
| Подписано в печать 22.04.08 | Гарнитура NewtonС | |
| Усл. печ. л. 0,75 | | Формат 60×90 _{1/16} |

Издательский центр и Участок оперативной печати
Информационно-методического управления РГОТУПС,
125993, Москва, Часовая ул., 22/2