

**Литвиненко Р.С.**

ИМИТАЦИОННАЯ МОДЕЛЬ ПРОЦЕССА ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА С УЧЕТОМ НАДЕЖНОСТИ ЕГО ЭЛЕМЕНТОВ

В статье предложен вариант имитационной модели, позволяющей оценить надежность электротехнического комплекса на ранних этапах разработки, используя информацию о составе и надежности его элементов.

Ключевые слова: элемент, комплекс, надежность, блок, наработка, моделирование.

Надежность современных электротехнических комплексов (ЭТК) является важной составляющей их качества и необходимым условием обеспечения эффективности функционирования. Научно-обоснованный анализ надежности и эффективности ЭТК предусмотрен требованиями государственных и международных стандартов. Такой анализ необходим практически на всех стадиях жизненного цикла комплекса и, прежде всего, важен на стадии проектирования. Главной конечной целью анализа является своевременное получение достоверной информации, необходимой для выработки и реализации обоснованных решений в области обеспечения надежности ЭТК.

В основе научного анализа надежности элементов ЭТК лежат математические модели. С их помощью осуществляется обоснование и оценка показателей надежности, решаются задачи оптимизации, синтеза, выработки и обоснования решений. От обеспечения возможности достаточно точно и оперативно решать указанные задачи непосредственно зависит эффективность разрабатываемого ЭТК.

Одним из наиболее удобных инструментов моделирования различных процессов на этапе разработки является имитационное моделирование. Имитационное моделирование основано на воспроизведении с помощью программных средств развернутого во времени процесса функционирования комплекса с учетом его взаимодействия с внешней средой. Основой любой имитационной модели является:

- разработка модели исследуемого комплекса на основе частных имитационных моделей подсистем, объединенных в единое целое;
- выбор информативных характеристик объекта исследования, способов их получения и анализа;
- построение модели взаимодействия объекта с внешней средой в виде имитационных моделей воздействующих факторов;
- выбор способа исследования имитационной модели в соответствии с методами планирования имитационных экспериментов.

Прежде, чем перейти к рассмотрению вопросов надежности, необходимо дать определение самому понятию «электротехнический комплекс». В соответствии с [1] можно в составе ЭТК выделить следующие разновидности компонентов, представленные на рис.1.

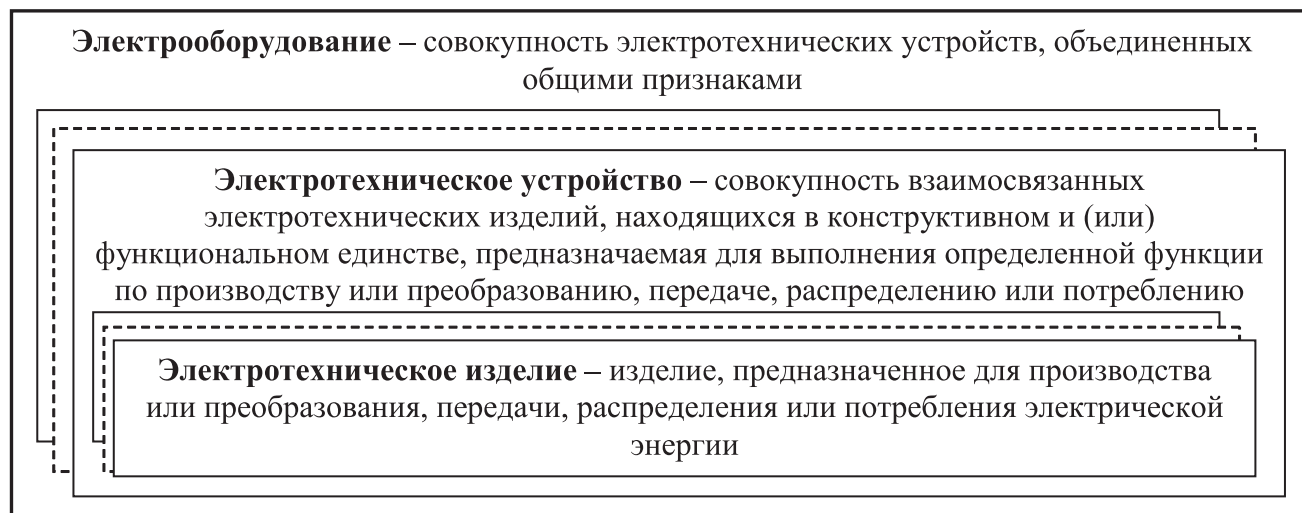


Рис.1. Элементная база электротехнического комплекса

Таким образом, электротехническое изделие будет соответствовать элементу, устройство – сборочной единице (СЕ), а электрооборудование в целом – электротехническому комплексу, под которым будем понимать – совокупность электротехнических устройств в составе технической системы, предназначенных для производства или преобразования, передачи, распределения или потребления электрической энергии. Элемент – наименьший компонент системы, не подлежащий дальнейшему делению и выполняющий определенную функцию.

На рис.2 представлен один из вариантов блок-схемы имитационного моделирования процесса функционирования ЭТК с учетом надежности его элементов.

В блоке 1 производится ввод исходных данных для дальнейшего моделирования процесса функционирования ЭТК. Эти данные условно можно разделить на три группы:

А. Система исходных данных о составе ЭТК:

1. Количество типов СЕ и элементов – p (было принято, что $p=1$ соответствует электрическим; $p=2$ – механическим; $p=3$ – гидравлическим СЕ и элементам). Возможно также изменение типов в зависимости от наличия элементов другой физической природы (электронных, электромеханических, механоэлектрических и т.д.). Было бы удобнее не делить элементы на типы, но для последующего анализа результатов проведенного моделирования это необходимо, т.к. позволит сделать вывод о мерах по повышению надежности ЭТК;

2. Количество СЕ p -го типа в составе ЭТК – $N^{(p)}$; порядковый номер СЕ p -го типа $i = 1, N^{(p)}$;

3. Количество элементов p -го типа в составе i -ой СЕ – $M_i^{(p)}$, $i = 1, N^{(p)}$; порядковый номер элемента p -го типа в составе i -ой СЕ $j = 1, M_i^{(p)}$.

Б. Статистические данные о надежности элементов различных типов в составе ЭТК:

1. Интервальная оценка интенсивности отказов j -го элемента в составе i -ой СЕ p -го типа: верхняя граница – $\lambda_{i,j}^{(p)с}$; нижняя граница – $\lambda_{i,j}^{(p)н}$. Данные могут быть по-

лучены по результатам эксплуатации, если в составе разрабатываемого ЭТК есть элементы уже используемые в других системах;

2. Минимальная и максимальная интенсивность отказов элементов p -го типа – $\lambda_{\min}^{(p)}$ и $\lambda_{\max}^{(p)}$. Эти оценки будут использованы для формирования показателей надежности тех элементов, которые являются абсолютно новыми и не имеют аналогов (прототипов).

3. Время восстановления j -го элемента в составе i -ой СЕ p -го типа – $T_{\text{в.и.}j}^{(p)}$. Предполагается, что все элементы являются восстанавливаемыми в связи с тем, что даже для невосстанавливаемых и отказавших элементов предусматривается агрегатный способ ремонта, когда неисправный элемент (агрегат) заменяется на новый либо заведомо исправный.

В. Модельные данные

1. Время моделирования – T_{mod} . Время моделирования позволяет задать интересующую разработчика продолжительность непрерывной работы ЭТК, с учетом простоев в случае отказа и последующего восстановления неисправного элемента, СЕ.

2. Шаг моделирования – Δt . От того, какой длины будет выбран шаг моделирования, будет зависеть детальность и частота просчета модели. Если в качестве шага выбрать один час, то можно получить сложную динамику, ярко демонстрирующую вклад случайных процессов (отказов) на результаты работы модели. Традиционно шаг моделирования выбирается константой, хотя существуют модели, в которых это правило сознательно нарушается. В зависимости от времени и шага моделирования, формируется интервал моделирования – интервал шкалы модельного времени, на котором будет просчитана модель с частотой, равной шагу моделирования. В нашем случае интервал моделирования определяется следующими границами $[0, T_{\text{mod}}]$.

Блок 2 предназначен для формирования показателей надежности элементов и СЕ, являющихся случайными величинами. Такими показателями являются:

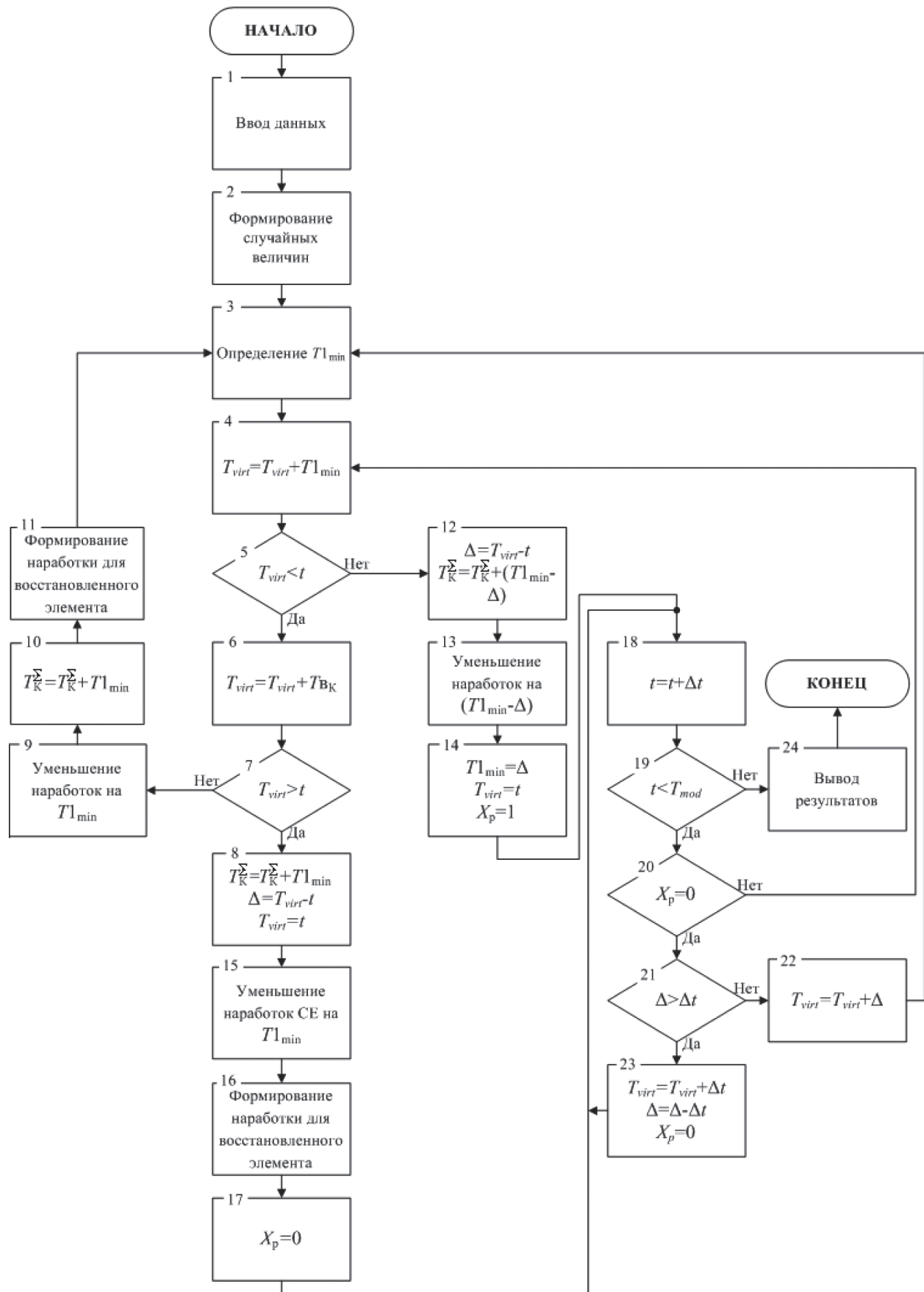


Рис. 2. Блок-схема алгоритма функционирования ЭТК с учётом надёжности его элементов

1. Параметр потока отказов j -го элемента p -го типа в составе i -ой СЕ $-\lambda_{i,j}^{(p)}$. Определяется как равномерно распределенная на интервале $[\lambda_{i,j}^{(p)u}, \lambda_{i,j}^{(p)g}]$ случайная величина

$$\lambda_{i,j}^{(p)} = (\lambda_{i,j}^{(p)g} - \lambda_{i,j}^{(p)u})\xi + \lambda_{i,j}^{(p)u}; i = \overline{1, N^{(p)}}, j = \overline{1, M_i^{(p)}},$$

где ξ – равномерно распределенная на интервале $[0, 1]$ случайная величина, формируемая с использованием генератора случайных чисел [2].

Для элементов, информация о надежности которых отсутствует в связи с тем, что они являются новыми и не имеют аналогов, параметр потока отказов формируется по следующей формуле в зависимости от типа элемента

$$\lambda_{i,j}^{(p)} = (\lambda_{\max}^{(p)} - \lambda_{\min}^{(p)})\xi + \lambda_{\min}^{(p)}; i = \overline{1, N^{(p)}}, j = \overline{1, M_i^{(p)}}. \quad (1)$$

2. Параметр потока отказов i -ой СЕ p -го типа $-\Lambda_i^{(p)}$. Показатель формируется путем сложения параметров потока отказов элементов, входящих в состав соответствующей СЕ

$$\Lambda_i^{(p)} = \sum_{j \in A_i^{(p)}} \lambda_{i,j}^{(p)}; i = \overline{1, N^{(p)}}, j = \overline{1, M_i^{(p)}}, \quad (2)$$

где $A_i^{(p)}$ – множество элементов, входящих в состав i -ой СЕ p -го типа.

3. Нароботка на отказ i -ой СЕ p -го типа $-Tl_i^{(p)}$. Определяется по формуле

$$Tl_i^{(p)} = \frac{1}{\Lambda_i^{(p)}}; i = \overline{1, N^{(p)}}.$$

4. Нароботка на отказ j -го элемента p -го типа в составе i -ой СЕ

$$Tl_{i,j}^{(p)} = \frac{1}{\lambda_{i,j}^{(p)}}; i = \overline{1, N^{(p)}}, j = \overline{1, M_i^{(p)}}. \quad (3)$$

Блок 3 производит сравнение и выбор элемента с наименьшей наработкой на отказ сначала среди электрических, механических и гидравлических агрегатов, а затем определяет элемент, имеющий наименьшую наработку на отказ в СЕ, т.е. элемент, который откажет первым. Так как отказ элемента, а, следовательно, и СЕ к которой он относится, приведет к отказу всего комплекса, полученная наработка является наработкой на отказ для разрабатываемого ЭТК.

В блоке 4 формируется виртуальное время с учётом наименьшей наработки между отказами по формуле

$$T_{virt} = T_{virt}^* + Tl_{\min}^*$$

где T_{virt}^* – значение виртуального времени, соответствующее предыдущему шагу итерации модели.

Под виртуальным временем T_{virt} будем понимать время, которое формируется сложением чередующихся наработок на отказ и времен восстановления ЭТК.

Блок 5 производит сравнение виртуального времени и текущего модельного времени t , изменяющегося с шагом Δt . Под модельным временем будем понимать «искусственное» время, в котором «живет» модель или, другими словами, это время, которое является имитацией, прообразом (моделью) времени реального ЭТК. Для того чтобы вести отсчет модельного времени и обеспечить правильную хронологическую последовательность наступления основных событий, в имитационной модели используется так называемый таймер модельного времени, который представляет собой переменную t для хранения (фиксации) текущего значения модельного времени. В процессе моделирования системы таймер модельного времени постоянно корректируется в соответствии с теми основными событиями, которые возникают в реальном ЭТК. В предложенной имитационной модели коррекция модельного времени осуществляется с постоянным шагом Δt .

Если виртуальное время T_{virt} меньше модельного времени t , на данном этапе управление передаётся оператору 6, в котором виртуальное время T_{virt} увеличивается на величину времени восстановления $T\theta_{i,j}^{(p)}$ отказавшего элемента, соответствующую времени восстановления всего ЭТК $-T\theta_K$, ($T\theta_{i,j}^{(p)} = T\theta_K$). Далее в блоке 7 опять происходит сравнение виртуального времени T_{virt} и модельного времени t .

Дальнейшую работу модели функционирования ЭТК целесообразно рассмотреть с помощью возможных сценариев развития событий в зависимости от величины шага моделирования. Возможные варианты информационных ситуаций приведены на рис. 3, 4.

Информационные ситуации №1 и 2.

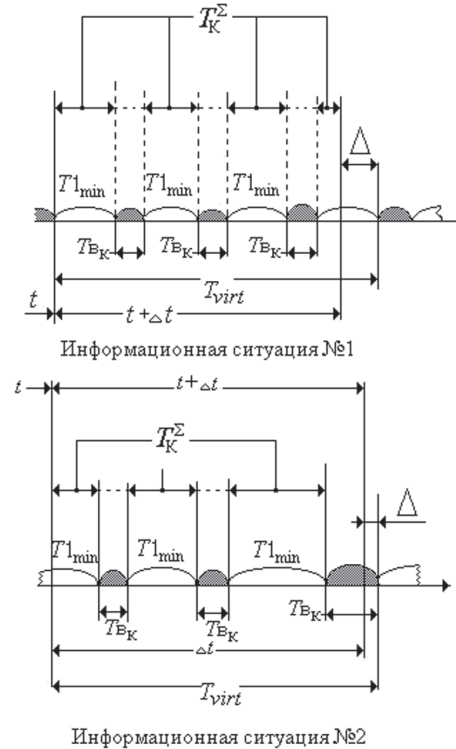


Рис.3. Информационные ситуации для $\Delta t \gg Tl_{\min}(T\theta_K)$

Заданный шаг моделирования Δt достаточно большой и вмещает в себя несколько чередующихся периодов работы и восстановления элементов (СЕ) комплекса. Отличие информационной ситуации № 1 от № 2 заключается в том, что на момент окончания очередного шага моделирования Δt , комплекс продолжает находиться в работоспособном состоянии (информационная ситуация № 2 – комплекс продолжает восстановление).

Алгоритм работы модели при возникновении информационной ситуации № 1 следующий. Если в блоке 7 сравнение покажет, что виртуальное время меньше модельного $T_{virt} < t$, то управление передаётся блоку 9, в котором корректируются наработки на отказ $T_{i,j}^{(p)}$ других элементов ЭТК по формуле

$$T_{i,j}^{(p)} = T_{i,j}^{(p)*} - T_{1_{\min}}; \quad i = \overline{1, N^{(p)}}, \quad j = \overline{1, M_i^{(p)}}, \quad (4)$$

где $T_{i,j}^{(p)*}$ – предшествующее значение наработки на отказ.

Далее в блоке 10 формируется суммарное время работы ЭТК T_K^Σ путём суммирования наработок на отказ элементов, проявивших себя (отказавших) в процессе функционирования комплекса. Суммарное время работы комплекса T_K^Σ необходимо для анализа надёжности ЭТК по результатам всего имитационного моделирования.

Блок 11 формирует новую наработку на отказ для элемента, заменившего отказавший, по формулам (1 – 3). Управление переходит к блоку 3 и цикл повторяется до тех пор, пока в блоке сравнения 5 виртуальное время T_{virt} не превысит модельное время t и управление не перейдёт блоку 12, в котором определяется величина Δ , характеризующая разницу между виртуальным T_{virt} и модельным t временем, и корректируется суммарное время работы ЭТК T_K^Σ на данном этапе по следующим формулам

$$\Delta = T_{virt} - t,$$

$$T_K^\Sigma = T_K^{\Sigma*} - (T_{1_{\min}} - \Delta),$$

где $T_K^{\Sigma*}$ – предшествующее значение суммарного времени работы комплекса.

Далее в блоке 13 корректируются наработки на отказ других элементов по формуле

$$T_{i,j}^{(p)} = T_{i,j}^{(p)*} - (T_{1_{\min}} - \Delta); \quad i = \overline{1, N^{(p)}}, \quad j = \overline{1, M_i^{(p)}},$$

где $T_{i,j}^{(p)*}$ – предшествующее значение наработки на отказ.

В блоке 14 наименьшая наработка между отказами приравнивается величине Δ , признаку работоспособности комплекса X_p присваивается значение 1 (работоспособен) и виртуальное время выравнивается с модельным $T_{virt} = t$. Далее управление передаётся блоку 18, в котором модельное время t увеличивается на величину шага моделирования Δt до тех пор пока оно не превысит времени моделирования T_{mod} и эксперимент закончится.

Порядок работы имитационной модели в случае возникновения информационной ситуации № 2 аналогичен ситуации № 1 с той разницей, что момент превышения виртуального времени T_{virt} над модельным временем t наступает после его увеличения на величину времени восстановления $T_{\theta_k} = T_{\theta_{i,j}^{(p)}}$ отказавшего элемента, а, следовательно, и ЭТК (блок 6), после чего управление от блока сравнения 7 переходит к блоку 8.

В блоке 8 уточняется суммарное время работы комплекса T_K^Σ и корректируются следующие временные параметры модели: величина Δ и виртуальное время T_{virt}

$$T_K^\Sigma = T_K^{\Sigma*} + T_{1_{\min}},$$

$$\Delta = T_{virt} - t,$$

$$T_{virt} = t.$$

От блока 8 управление передаётся блоку 15, который, аналогично блоку 9, корректирует наработки элементов по формуле (4). В свою очередь блок 16, аналогично блоку 11, формирует новую наработку на отказ для элемента, заменившего отказавший после восстановления, по формулам (1 – 3). В блоке 17 признаку работоспособности ЭТК X_p присваивается значение 0 (комплекс неисправен и находится в процессе восстановления). Далее управление передаётся блоку сравнения 18 для определения окончания моделирования либо его дальнейшего продолжения.

Информационные ситуации №3 и 4.

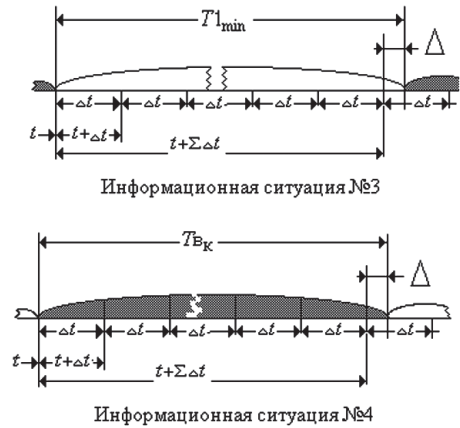


Рис. 4. Информационные ситуации для $\Delta t \ll T_{1_{\min}}(T_{\theta_k})$

Заданный шаг моделирования Δt достаточно мал и для последовательной корректировки величины времени восстановления $T_{\theta_{i,j}^{(p)}}$ (ситуация № 3) либо наработки между отказами $T_{1_{\min}}$ (ситуация № 4) необходимо несколько итераций (прогонов) модели с пошаговым увеличением модельного времени t на величину Δt . В этих ситуациях время восстановления $T_{\theta_{i,j}^{(p)}}$ либо наработка $T_{1_{\min}}$ между отказами ЭТК последовательно уменьшаются на величину шага моделирования Δt . С этой целью в имитационной модели предусмотрено

циклическое и последовательное повторение операций в следующих блоках: для информационной ситуации № 3 ($T_{\min} \gg \Delta t$) – 4 – 5 – 12 – 13 – 14 – 18 – 19 – 20 – 4; для информационной ситуации № 4 ($T_{\kappa} = T_{\kappa,j}^{(p)} \gg \Delta t$) – 18 – 19 – 20 – 21 – 23 – 18. Уменьшение величины $T_{\min}$ будет продолжаться до тех пор, пока в блоке сравнения 5 модельное время t не превысит виртуальное T_{virt} , и управление перейдет к блоку 6 (ситуация № 3); аналогично корректировка $T_{\kappa,j}^{(p)}$ будет проводиться, пока в блоке сравнения 21 величина Δ будет больше шага моделирования Δt , после чего управление переходит к блоку 22 (ситуация № 4).

Предложенный алгоритм, циклически повторяясь, формирует временные характеристики функционирования ЭТК и его компонентов (суммарное время работы, суммарное время восстановления, наработки на отказ и т.д.) до тех пор, пока модельное время t с шагом Δt не превысит времени моделирования T_{mod} . Когда имитационное моделирование будет закончено, полученные результаты поступят в блок 24. Используя результаты проведенного исследования, разработчик получает возможность провести оценку показателей надежности элементов, СЕ и всего ЭТК в целом [3, 4], а также оценить вклад в формирование уровня надежности комплекса элементов и СЕ различных типов.

Основываясь на первичных результатах моделирования, можно принять меры по повышению уровня надежности тех или иных элементов, после чего повторно провести эксперимент. Таким образом, используя предложенную имитационную модель функционирования ЭТК с учетом надежности его элементов, можно на самых ранних этапах разработки спрогнозировать,

каким уровнем надежности будет обладать комплекс и как это повлияет на эффективность и качество его использования.

Литература

1. ГОСТ 18311 – 80. Изделия электротехнические. Термины и определения основных понятий (с Изменениями N 1, 2). – Москва: Издательство стандартов, 1982. – 18 с.
2. Пат. 38510 Российская Федерация, МПК G06F 7/58. Генератор псевдослучайной последовательности с запрещенными комбинациями [Текст]/ Афонский А.В., Калистратов В.А., Литвиненко Р.С. и др.; заявитель и патентообладатель Афонский А.В., Калистратов В.А., Литвиненко Р.С. и др. – №2004101929; заявл. 21.01.2004; опубл. 20.06.2004, Бюл.№17. – 2 с.
3. Пат. 63949 Российская Федерация, МПК G06F 7/00. Устройство сбалансированного оценивания показателей надежности технической системы на основе объединения двух выборок [Текст]/ Павлов П.П., Литвиненко Р.С., Мубаракшин М.Н. и др.; заявитель и патентообладатель Павлов П.П. – №2007104528/22; заявл. 24.01.2007; опубл. 10.06.2007, Бюл.№16. – 3с.
4. Пат. 75484 Российская Федерация, МПК G06F 7/00. Устройство точечной оценки вероятности безотказной работы технической системы по полной выборке [Текст]/ Павлов П.П., Литвиненко Р.С., Юшин И.О. и др.; заявитель и патентообладатель Казанское высшее артиллерийское командное училище (институт). – №2008110711/22; заявл. 14.03.2008; опубл. 10.08.2008, Бюл.№22 – 2с.