

Вікович І. А.,
Зубачик Р. М.

РОЗРОБЛЕННЯ ІМІТАЦІЙНОЇ МОДЕЛІ ДЛЯ ВИЗНАЧЕННЯ МАКСИМАЛЬНОЇ ДОВЖИНИ ЧЕРГИ АВТОМОБІЛІВ НА КООРДИНОВАНОМУ ПЕРЕХРЕСТІ

У статті розглядається імітаційна модель для визначення максимальної довжини черги транспортних засобів на суміжному у напрямку координації регульованому перехресті, яка написана мовою програмування Objective-C на базі розробленої аналітичної моделі. Перевіряється адекватність запропонованої моделі і порівнюються результати із значеннями у середовищі VISSIM.

Ключові слова: імітаційна модель, максимальна довжина черги, ділянка координації, суміжне регульоване перехрестя.

1. Вступ

До регульованих перетинів, на яких складно забезпечити просторово-часовий пріоритет міським маршрутним автобусам відносять перехрестя, підходи яких мають не більше двох смуг руху в одному напрямку. Для реалізації такого пріоритету у цих умовах в [1] запропоновано метод «спеціальна смуга в зоні перехрестя». Цей метод можна впроваджувати як на ізольованих перехрестях, так і на тих, які поєднані системою координованого керування.

Основним етапом впровадження цього методу, є визначення оптимальної довжини спеціальної смуги на підході до перехрестя. Для визначення оптимальної довжини спеціальної смуги на підході до наступного із двох суміжних регульованих перехресть, що об'єднані координованим керуванням необхідно визначити на ньому максимальну довжину черги, що утворюється вздовж головної вулиці на ділянці координації.

2. Аналіз досліджень і публікацій

Для визначення максимальної довжини черги транспортних засобів на суміжному перехресті можна використовувати формулу Робертсона [2, 3], яка описує процес розпаду групи автомобілів, що рухається ділянкою координації та дозволяє встановлювати, скільки автомобілів проїде суміжне перехрестя без зупинки:

$$q_2(t) = \frac{1}{1 + \alpha\beta\tau} q_1(t) + \left(1 - \frac{1}{1 + \alpha\beta\tau}\right) q_2(t-1), \quad (1)$$

де q_2 — кількість автомобілів групи, що проїхали суміжне перехрестя без зупинки в момент часу t ; q_1 — кількість автомобілів у групі, на живлячому перехресті в момент часу t ; τ — тривалість проїзду ділянки координації з швидкістю координації; α, β — параметри розпаду груп автомобілів, t — дискретний інтервал часу.

Сьогодні ця формула і далі використовується, при чому вона є вбудованою у багатьох спеціалізованих програмних забезпеченнях таких як TRANSYT та VISUM, і з її використанням можуть визначатися транспортні затримки на суміжних регульованих перехрестях та ефективність координованого керування.

Важливо зазначити, що за формулою (1) можна визначити довжину черги лише з автомобілів, що рухаються від підходу головної вулиці (живлячого підходу), тоді як не враховуються потоки, що в'їжджають на ділянку координації із другорядних вулиць. Крім цього на сьогодні не проведено жодних детальних досліджень щодо самого процесу утворення черг на суміжному перехресті, яке включене у систему координованого керування. Це дозволяє сформулювати мету, яка буде вирішуватися у даній роботі.

3. Мета статті

Дана робота присвячена розробці імітаційної моделі для визначення максимальної довжини черги автомобілів на суміжному у напрямку координації перехресті, яка, в свою чергу, базується на аналітичній моделі.

4. Виклад основного матеріалу

4.1. Аналітична модель для визначення максимальної довжини черги на суміжному перехресті. Ефективність координованого керування, як відомо, залежить від багатьох чинників [4, 5], тому для визначення максимальної довжини черг, розглянемо сприятливі умови для його реалізації, зокрема: прямолінійна ділянка магістральної вулиці; головна вулиця характеризується інтенсивним рухом, де транзитність потоку більше 80 %; низька інтенсивність поворотних маневрів з магістралі і на неї; однаковий двофазний цикл на обох перехрестях та сталий часовий фазовий зсув між ними. До уваги беруться дорожні умови, що характеризуються двома смугами руху в обох напрямках (рис. 1, а).

Функціонування ділянки координації двох суміжних перехресть, можна розглядати як деяку систему S , у якій відбувається спрощений Марковський процес з дискретними станами та дискретним часом [6]. У системі можна виділити дві підмножини станів, зокрема початкові або стани джерела та поглинальні стани, які відповідно позначаємо W_1 та W_2 . За початкові стани приймаємо інтенсивності вхідних потоків на ділянку координації із живлячого перехрестя P_0 впродовж циклу. Розділяючи потоки прямого напрямку за смугами руху та враховуючи поворотні потоки, загалом, утворюється

чотири стани підмножини W_1 , тобто $W_1 = \{A_1, A_2, A_3, A_4\}$. За поглинальні стани, якими завершується процес у системі S , приймаємо інтенсивність вихідних потоків з ділянки координації на суміжному перехресті P_1 з аналогічним розподілом за смугами руху, а саме: $W_2 = \{E_1, E_2, E_3, E_4\}$.

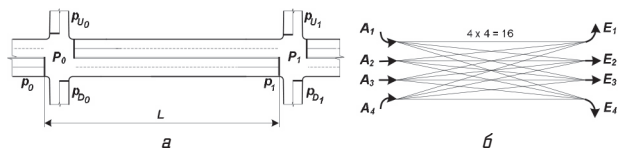


Рис. 1. Ділянка координації двох суміжних перехрестів: а — схема ділянки координації; б — можливі зв'язки між вхідними та вихідними потоками на ділянці координації

Перехід системи із підмножини станів W_1 у W_2 відбувається за один крок, де кроком процесу є тривалість циклу, який виконується k разів ($k \in M$). Кожний стан A_i підмножини W_1 переходить до усіх станів підмножини W_2 , що утворює загалом 16 зв'язків між двома підмножинами (рис. 1, б). Для спрощення подальших розрахунків приймаємо, що зі стану A_2 система може перейти у всі крім E_3 , а зі стану A_3 — у E_2 . Дане спрощення полягає у тому, що транспортні засоби, які рухаються із живлячого підходу у прямому напрямку, не змінюють смуг руху в процесі переміщення до суміжного перехрестя, в результаті чого загалом утворюється 14 зв'язків.

Підмножина станів W_1 задається вектором початкових умов $\vec{a} = (a_1, a_2, a_3, a_4)$, де a_i — це частка транспортного потоку від загальної кількості, що в'їжджає на ділянку координації впродовж циклу ($a_i \geq 0$ і $\sum_i a_i = 1$).

Перехід підмножини станів W_1 у W_2 утворюють квадратну матрицю зі значеннями β_{ij} , які є частками інтенсивності вихідних потоків, що розділяються з інтенсивності вхідних потоків. З врахування спрощень зроблених вище (стан A_2 не переходить у стан E_3 , а з стан A_3 — у E_2) матриця набуде вигляду:

$$\beta_{ij} = \begin{pmatrix} \beta_{11} & \beta_{12} & \beta_{13} & \beta_{14} \\ \beta_{21} & \beta_{22} & 0 & \beta_{24} \\ \beta_{31} & 0 & \beta_{33} & \beta_{34} \\ \beta_{41} & \beta_{42} & \beta_{43} & \beta_{44} \end{pmatrix} \quad (2)$$

Сума значень β_{ij} перших двох стовпців матриці визначають частку потоку, що проїдуть суміжне у напрямку координації перехрестя P_1 на крайній лівій смузі, а сума двох інших — на крайній правій смузі. Сумуючи значення β_{ij} у цих частинах за рядками впливає, що максимальну довжину черги транспортних засобів на крайній правій смузі підході p_1 утворюють транспортні засоби, що в'їжджають на ділянку координації L з живлячого підходу p_0 та другорядних підходів p_{U_0} та p_{D_0} . Аналітично це можна виразити такою формулою:

$$Q_{p_1}^k = Q_{ДЖ_{p_1}}^k + Q_{Ж_{p_1}}^k, \quad (3)$$

де $Q_{Д_{p_1}}^k$ — довжина черги на правій смузі підходу p_1 з автомобілів, що прибули від другорядних підходів p_{U_0}

та p_{D_0} за k -й цикл світлофорного керування; $Q_{Ж_{p_1}}^k$ — довжина черги на правій смузі підходу p_1 з автомобілів, що прибули від живлячого підходу p_0 за k -й цикл світлофорного керування.

Потрапляння автомобілів з другорядних вулиць у чергу на суміжному перехресті, зумовлене принципами координованого керування, за якими їх в'їзд на ділянку координації відбувається тоді, коли в напрямку координації триває заборонений сигнал. Однак, чи усі автомобілі, що в'їхали на ділянку координації чи певна їх частина потраплять у чергу, залежить від параметрів керування між суміжними перехрестями, зокрема тривалості дозволених сигналів на обох перехрестях в напрямку координації та величини фазового зсуву.

Аналізуючи ці часові параметри, при цьому приймаючи, що автомобілі з другорядних вулиць рухаються з постійною швидкістю (швидкістю координації), було виявлено, що проїхати суміжне перехрестя (тобто не потрапити у чергу) можуть як автомобілі, які стартують на другорядних підходах (автомобілі «лідери»), так і ті, що їх проїжджають наприкінці дозволеного сигналу. З огляду на це, тривалість дозволеного сигналу на другорядних підходах, доцільно умовно поділити на три відрізки часу — $t_{3\Delta 1}$, $t_{3\Delta 2}$ і $t_{3\Delta 3}$, де за перший і третій автомобілі можуть проїхати суміжне перехрестя без зупинки, а за другий — обов'язково потраплять у чергу (рис. 2).

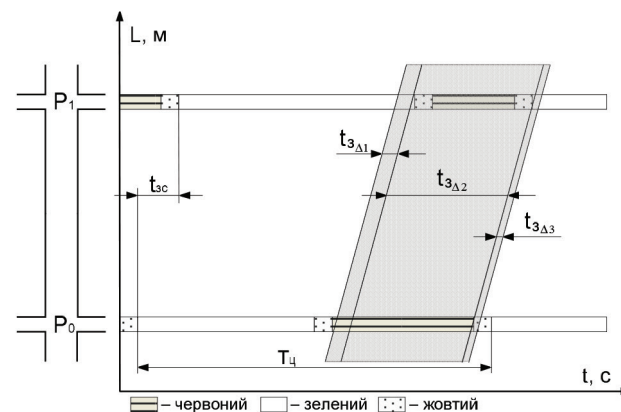


Рис. 2. Графічне тлумачення тривалості дозволеного сигналу на другорядних підходах і його умовний поділ: $t_{3\Delta 1}$, $t_{3\Delta 3}$ — відрізки часу дозволеного сигналу, за які автомобілі можуть проїхати суміжне перехрестя без зупинки; $t_{3\Delta 2}$ — відрізок часу дозволеного сигналу, за який автомобілі потрапляють у чергу на суміжному перехресті; t_{3c} — часовий фазовий зсув; $T_{ц}$ — тривалість циклу

Відрізок часу $t_{3\Delta 1}$, можна визначити за такою формулою:

$$t_{3\Delta 1} = \begin{cases} (\mu'_{p_1} - \mu_{ДР_{p_0}}) - \theta_k & \text{при } t_{3\Delta 1} > 0, \\ 0 & \text{при } t_{3\Delta 1} \leq 0, \end{cases} \quad (4)$$

де $\mu'_{p_1} = t_{3p_1} + t_{3c}$ — момент завершення дозволеного сигналом на підході p_1 відносно початку циклу на перехресті P_0 ; t_{3p_1} — тривалість дозволеного сигналу на підході p_1 ; t_{3c} — часовий фазовий зсув між перехрестями P_0 і P_1 ; $\mu_{ДР_{p_0}} = t_{3p_0} + t_{ж}$ — момент початку дозволеного сигналу на другорядних підходах p_{U_0} та p_{D_0} відносно початку циклу на перехресті P_0 ; t_{3p_0} — тривалість дозволеного сигналу на підході p_0 ; $t_{ж}$ — тривалість

проміжного такту на підході p_0 ; θ_k — тривалість проїзду відстані L зі швидкістю координації.

Оптимальний часовий фазовий зсув між суміжними перехрестями доцільно визначати за формулою [7]:

$$t_{зс} = \frac{L}{V_k} - \eta, \tag{5}$$

де L — довжина ділянки координації; V_k — швидкість координації; η — відрізок часу для роз'їзду черги автомобілів на підході p_1 , які прибули з другорядних підходів.

Однак навіть при виконанні умови $t_{з\Delta 1} > 0$ автомобілі з другорядних вулиць можуть бути зупинені через групу автомобілів, що рухається від живлячого підходу і відставання окремих з неї автомобілів. Тобто проїзд автомобілів з другорядних вулиць суміжного перехрестя за відрізок часу $t_{з\Delta 1}$ залежить, також, від кількості автомобілів у групі та її складу на живлячому підході.

Відрізок часу $t_{з\Delta 3}$, можна визначити за такою формулою:

$$t_{з\Delta 3} = \begin{cases} (\mu'_{дрp_0} + \theta_k) - \mu_{p_1} & \text{при } t_{з\Delta 3} > 0, \\ 0 & \text{при } t_{з\Delta 3} \leq 0, \end{cases} \tag{6}$$

де $\mu'_{дрp_0} = t_{зp_0} + t_{чp_0} + t_{жp_0} + \theta_k$ — момент завершення дозволеного сигналу на другорядних підходах перехрестя P_0 ; $\mu_{p_1} = t_{зс} + T_{ц}$ — момент початку дозволеного сигналу на підході p_1 відносно початку циклу на перехресті P_0 ; $t_{чp_1}$ — тривалість забороненого сигналу на підході p_1 .

З наведеного випливає, що величина $Q_{д}$ визначається або інтенсивністю вихідного потоку за весь період дозволеного сигналу t_3 або за певну його частину, тобто за період $t_{з\Delta 2}$. Залежність інтенсивності вихідного потоку від параметрів керування, що функціонують на обох суміжних перехрестях наведено у табл. 1.

Таблиця 1

Залежність між інтенсивності вихідного потоку на другорядних підходах та параметрами керування на суміжних перехрестях

Інтенсивність вихідного потоку	Параметри керування між суміжними перехрестями	
$N(t_3)$	$t_{зp_0} \approx t_{зp_1}$	$t_{зс} \approx \theta_k$
$N(t_{з\Delta 2})$	$t_{зp_0} \approx t_{зp_1}$	$t_{зс} < \theta_k$
	$t_{зp_0} < t_{зp_1}$	$t_{зс} \approx \theta_k$
	$t_{зp_0} < t_{зp_1}$	$t_{зс} < \theta_k$

Примітка: $N(t_3)$, $N(t_{з\Delta 2})$ — інтенсивність вихідного потоку на другорядних підходах як функція часу відповідно при аргументах t_3 та $t_{з\Delta 2}$.

Використання інтенсивності вихідного потоку для визначення $Q_{д}$ є доцільним лише тоді, коли впродовж дозволеного сигналу постійно відбувається роз'їзд черги (рух потоком насичення), при чому з окремої смуги в одному напрямку. Оскільки в реальних умовах роз'їзд автомобілів з однієї смуги може виконуватися у кількох напрямках і в потоці можуть появлятися часові розриви, зокрема після роз'їзду черги, то інтенсивність вихідного потоку слід виразити через інтенсивність прибуття впродовж циклу (N').

Щоб спростити вирішення цього завдання приймемо, що усі другорядні підходи на живлячому перехресті є ізольовані. Тоді, для визначення інтенсивності при-

буття можна прийняти гіпотезу, про те, що автомобілі, які прибувають до одного підходу за деякий період T , у загальному випадку є випадковим процесом $X(t)$, який можна виразити залежністю:

$$X(t, \omega) = (X_1(t, \omega), X_2(t, \omega), \dots, X_k(t, \omega)), \tag{7}$$

де $X_1(t, \omega)$, $X_2(t, \omega)$, ..., $X_k(t, \omega)$ — координати вектора випадкового процесу.

Тоді, кількість автомобілів, що прибуває за кожний цикл можна визначити із виразу:

$$N'(t, \omega) = \max \left\{ n : \sum_{i=1}^n X_i(t, \omega) < k \cdot t \right\} - \max \left\{ n : \sum_{i=1}^n X_i(t, \omega) < (k-1) \cdot t \right\} \text{ при } t \in T, \tag{8}$$

де $N'(t, \omega) = N'(t)$ — інтенсивність прибуття автомобілів впродовж циклу; ω — елементарна подія, поява автомобіля за період t ; $X(\omega)$ — випадкова величина, момент появи автомобіля на підході до перехрестя; n — кількість автомобілів при фіксованому $t = t_0$; $k = \frac{T}{t}$ — кількість січень випадкового процесу за період T .

Моменти появи автомобілів на підході або часові інтервали між автомобілями, що прибувають до перехрестя доцільно описувати законом розподілу Гіпер-Ерланга, отримані значення за яким відповідають реальним даним [8].

З використанням формули (8) інтенсивність вихідного потоку, наприклад, для підходу p_{U_0} дорівнюватиме:

$$N_{U_0}(t_3) = \begin{cases} N'_{U_0}(t) & \text{при } t_3 > t_p, \\ N_{U_0}^{\text{нас}}(t) & \text{при } t_3 \leq t_p, \end{cases} \tag{9}$$

або

$$N_{U_0}(t_{з\Delta 2}) = \begin{cases} N'_{U_0}(t) - (N'_{U_0}(t_{з\Delta 1}) + N'_{U_0}(t_{з\Delta 3})) & \text{при } t_3 > t_p, \\ N_{U_0}^{\text{нас}}(t) - (N_{U_0}^{\text{нас}}(t_{з\Delta 1}) + N_{U_0}^{\text{нас}}(t_{з\Delta 3})) & \text{при } t_3 \leq t_p, \end{cases} \tag{10}$$

де $N_{U_0}(t_3)$, $N_{U_0}(t_{з\Delta 2})$ — інтенсивність лівоповоротного вихідного потоку на підході p_{U_0} відповідно за t_3 та $t_{з\Delta 2}$; $N'_{U_0}(t)$ — інтенсивність прибуття лівоповоротного потоку до підходу p_{U_0} впродовж циклу; $N_{U_0}^{\text{нас}}(t)$ — інтенсивність вихідного потоку, що здійснюється потоком насичення; t_3 — тривалість дозволеного сигналу; t_p — відрізок часу, який потрібний для роз'їзду черги.

Враховуючи вищенаведене та формули (8–10) $Q_{д}$ для підходу p_1 визначатиметься за такою формулою:

$$Q_{дp_1}^k = \begin{cases} \int_{k \cdot T_{ц}}^{(k-1) \cdot T_{ц}} (\lambda_{U_0}(t) \cdot \beta_L + \lambda_{D_0}(t) \cdot \beta_R) dt & (k = \overline{1, M}), \\ \int_{(k-1) \cdot T_{ц}}^{k \cdot T_{ц}} (\lambda'_{U_0}(t) \cdot \beta_L + \lambda'_{D_0}(t) \cdot \beta_R) dt & (k = \overline{1, M}), \end{cases} \tag{11}$$

де $Q_{дp_1}^k$ — довжина черги на правій смузі підходу p_1 , з автомобілів, що прибули з другорядних підходів p_{U_0} і p_{D_0} за k -й цикл світлофорного регулювання, авто;

$$\lambda_{U_0}(t) = \frac{N_{U_0}(t_3)}{T_{ц}}, \quad \lambda_{U_0}'(t) = \frac{N_{U_0}(t_{з\Delta 2})}{T_{ц}}, \quad \lambda_{D_0}(t) = \frac{N_{D_0}(t_3)}{T_{ц}},$$

та $\lambda_{D_0}(t) = \frac{N_{D_0}(t_{3\Delta 2})}{T_{ци}}$ – ступінь насичення рухом відпо-
відно на підходах p_{U_0} і p_{D_0} при t_3 та $t_{3\Delta 2}$; β_L і β_R –
частки транспортних засобів, що прибули з другорядних
підходів p_{U_0} та p_{D_0} на праву смугу підходу p_1 ; $T_{ци}$ –
тривалість циклу; $M = \frac{T}{T_{ци}}$ – кількість циклів за період
дослідження T .

Для визначення величини $Q_{ж}$ на підході p_1 необ-
хідно розглянути процес руху групи («пачки») авто-
мобілів на ділянці координації, що сформувалася на
підході p_0 впродовж забороненого сигналу світлофора.
Після входу автомобілів групи на ділянку координації L ,
починається, як відомо, поступовий її розпад (зростає
просторова та часова довжина), що зумовлене нерівно-
мірністю руху окремих автомобілів, які сформували цю
групу, різнорідністю складу потоку та не дотриман-
ня деяких водіїв рекомендованої швидкості руху. На
рис. 3 зображено процес деформації групи автомобілів
та утворення черги на підході до суміжного у напрямку
координації перехресті.

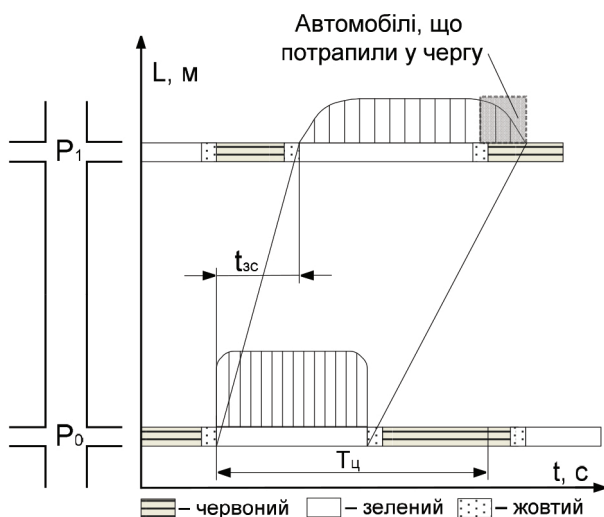


Рис. 3. Процес утворення черги на суміжному перехресті

З рис. 3 видно, що автомобілі, які потрапляють
у чергу, є та частина часової довжини групи автомобілів,
що спостерігається після моменту завершення дозволе-
ного сигналу на суміжному перехресті, а їх кількість
визначається з відношення цієї часової довжини до
середнього інтервалу між автомобілями у групі (при-
пускається, що ці інтервали є однакової величини).

Для визначення цього потрібно знати кількість
автомобілів, що формують групу за кожний цикл на
живлячому підході p_0 та величину фазового зсуву між
перехрестями P_0 та P_1 .

Кількість автомобілів групи, що формується за кож-
ний цикл (ті, які спостерігаються при роз'їзді черги)
можна визначити за такою формулою:

$$N_{гр}(t) = N(t) - N_{вил}(t), \quad (12)$$

де $N_{гр}(t)$ – кількість автомобілів групи на підході p_0 ;
 $N(t)$ – інтенсивність вихідного потоку на живлячому
підході p_0 ; $N_{вил}(t)$ – інтенсивність вихідного потоку на

підході p_0 після роз'їзду черги (період вільного проїзду
перехрестя [7]).

Для того щоб визначити часову довжину групи на
суміжному перехресті доцільно зробити припущення про
те, що тривалість проїзду кожним автомобілем групи
ділянки L є випадковою величиною X , яка розпо-
діляється за нормальним законом [9]. У [10] для цього
також використовується логнормальний розподіл, однак
отримані значення за ним відрізняються від реальних,
зокрема при незначній довжині ділянки L (не більше
500 м). З цих причин використовуємо лише нормаль-
ний розподіл, щільність якого задається залежністю:

$$f(\tau) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \cdot e^{-\frac{(\tau-a)^2}{2\sigma^2}}, \quad (13)$$

де a, σ – параметри розподілу, $a \in \mathbb{R}, \sigma > 0$; a – три-
валість проїзду ділянки L зі швидкістю координації;
 σ – середнє квадратичне відхилення значень τ відносно
математичного сподівання a .

Таке припущення має усі підстави, оскільки біль-
шість водіїв приблизно дотримуються рекомендованої
швидкості руху (швидкості координації).

З використанням формул (5), (12) та (13) частину
часової довжини, яка потрапляє на заборонений сиг-
нал на суміжному перехресті P_1 можна визначити за
такою формулою:

$$\tau_{гр} = \tau_p + \tau_{max} - t_{3c} - t_{3p_1}, \quad (14)$$

де $\tau_{гр}$ – часова довжина групи, яка буде зупинена на
суміжному перехресті P_1 ; τ_{max} – тривалість проїзду від-
стані L останнього автомобіля групи; $\tau_p = N_{гр}(t) \cdot h_{p_0}$ –
тривалість роз'їзду групи на живлячому підході p_0 ;
 h_{p_0} – середній інтервал між автомобілями при роз'їзді
черги на живлячому підході p_0 ; t_{3c} – тривалість фа-
зового зсуву; t_{3p_1} – тривалість дозволеного сигналу на
суміжному у напрямку координації перехресті P_1 .

Середній інтервал між автомобілями у групі на
стоп-лінії перехрестя P_1 з урахуванням формул (5),
(12) та (13) можна визначити за такою формулою:

$$t_{гр} = \frac{\tau_p + (\tau_{max} - \tau_{min})}{N_{гр}(t)}, \quad (15)$$

де $t_{гр}$ – середній інтервал між автомобілями у групі
на стоп-лінії перехрестя P_1 ; τ_{min} – тривалість проїзду
відстані L першого автомобіля групи.

Тоді, з врахуванням формул (14) і (15) після простих
перетворень величина $Q_{ж}$ для правої смуги підходу p_1
набуває такого вигляду:

$$Q_{ж p_1} = \begin{cases} \left(\frac{\tau_p + \tau_{max} - t_{3c} - t_{3p_1}}{\tau_p + (\tau_{max} - \tau_{min})} \right) \cdot N_{гр}(t) & \text{при } Q_{ж p_1} > 0, \\ 0 & \text{при } Q_{ж p_1} < 0, \end{cases} \quad (16)$$

де $Q_{ж p_1}$ – довжина черги з автомобілів на підході p_1 ,
що прибули від живлячого підходу p_0 , од.

**4.2. Імітаційна модель для визначення максимальної
довжини черги на суміжному перехресті.** Важливо зазна-
чити, що аналітична модель не завжди точно відтворює
досліджуваний об'єкт, оскільки не може описати усі
аспекти його функціонування. Тому на базі розробле-

ної вище аналітичної моделі розрахунку максимальної довжини черги автомобілів на суміжному перехресті, доцільно створити імітаційну модель, яка доповнюватиме аналітичну в процесі проведення модельного експерименту, і цим самим наблизитиме її результати до реальних умов.

Імітаційна модель функціонування ділянки координації двох суміжних перехрестів написана мовою програмування Objective-C у програмному середовищі Xcode. Вхідними параметрами моделі є: тривалість періоду розрахунку T ; тип живлячого перехрестя (пересічення чи примикання); довжина ділянки координації; інтенсивність руху відповідно на живлячому та другорядних підходах з розподілом по смугах руху, напрямках руху та складу потоку (легкові, вантажні, автобуси); частки транспортних засобів з другорядних підходів на смугах руху ділянки координації; тривалість циклу, фаз і тактів на обох перехрестях; швидкість координації.

Вихідними параметрами моделі є усереднена максимальна кількість автомобілів у черзі на суміжному у напрямку координації перехресті за k імітацій, а також максимальні їх значення.

Модель реалізована у такий спосіб, що при використанні, користувач може легко змінювати усі вхідні параметри, проте вона є придатною лише для координованих ділянок вулиць з двома смугами руху в одному або в обох напрямках, де живлячий і другорядні підходи є ізольовані і на обох суміжних перехрестях однакова тривалість циклу.

На рис. 4 наведено загальну блок-схему алгоритму моделювання роботи ділянки координації, яка узагальнюється однією смугою на живлячому і другорядному підходах. При збільшенні кількості смуг на підході алгоритм збільшується на відповідну кількість етапів моделювання, які виконуються паралельно.

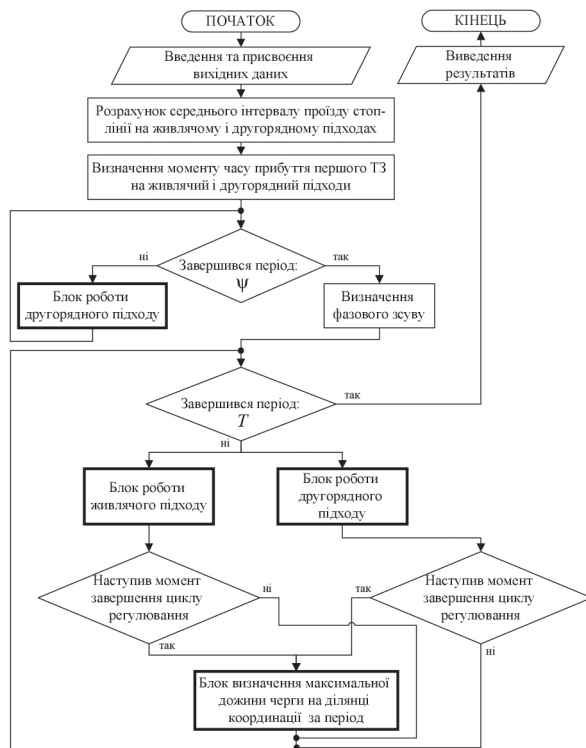


Рис. 4. Блок-схема алгоритму моделювання роботи ділянки координації

Весь алгоритм моделювання можна поділити на три етапи. На початковому етапі визначається середній інтервал між транспортними засобами, що проїжджають стоп-лінію на живлячому і другорядному підходах (аналогічно як у [8]) та момент прибуття першого автомобіля на цих підходах (поява наступного визначається на другому і третьому етапах).

Моменти прибуття автомобілів до підходів реалізуються у моделі через випадкові часові інтервали між автомобілями, які розподіляються за законом Гіпер-Ерланга [8].

На другому етапі, за формулою (5), визначається фазовий зсув між двома суміжними перехрестями. Для визначення величина η , яка є основною складовою цієї формули, імітується процес роботи другорядних підходів впродовж періоду ψ ($\psi = 900$ с). Після завершення періоду ψ , встановлюється середня довжина черги на суміжному у напрямку координації перехресті із автомобілів, що в'їжджають на ділянку координації з другорядних підходів. На основі цих результатів визначається відрізок часу, за який здійснюється їх роз'їзд, тобто величина η .

Для моделювання процесу роботи другорядних підходів використовується алгоритм, за яким період ψ розбивається на мінімальні інтервали Δt [7], який у моделі становить 0,1 с. З використанням цього ж алгоритму, впродовж періоду T ($T = 3600$ с), імітується процес функціонування ділянки координації, тобто виконується третій етап.

Третій етап є найважливішою процедурою алгоритму і в його складі можна виділити блоки функціонування живлячого і другорядного підходів, а також блок розрахунку максимальної довжини черги на суміжному у напрямку координації перехресті за період T . Перших два блоки виконуються паралельно і включають такі кроки як визначення поточної зміни світлофорних сигналів, напрямку руху і тип транспортного засобу, визначення моментів появи автомобілів на підході, проїзд перехрестя або формування черги та роз'їзд черги. Ці кроки реалізуються за аналогічними підходами як в моделі, що описана у [8].

На початку третього блоку, що вступає у дію в момент завершення циклу регулювання, за формулою (12) визначається кількість автомобілів у групі, що рухаються від живлячого підходу у напрямку координації, а за формулами (9–10) – інтенсивність вихідного потоку на другорядних підходах. Після цього визначається кількість автомобілів у черзі, що прибули від живлячого і другорядних підходів, а також сумарна їх кількість, що відповідно реалізується за формулами (16), (11) і (2).

Запропонована формула (16), за якою визначається довжина черги з автомобілів, що прибувають із живлячого підходу, побудована на основі часової довжини групи автомобілів, зокрема тривалості проїзду ділянки L першого та останнього автомобіля кожної групи. Відповідно до гіпотези, що прийнята в аналітичній моделі, тривалість проїзду кожним автомобілем групи ділянки координації розподіляється за нормальним законом, функція якого, з використання функції помилок, має такий вигляд:

$$F(\tau) = y = \frac{1}{2} \left[1 + \operatorname{erf} \left(\frac{\tau - a}{\sqrt{2\sigma^2}} \right) \right] \quad (17)$$

У моделі цей закон розподілу реалізується за допомогою генерування випадкових чисел, що рівномірно розподілені в інтервалі (0; 1) та оберненої функції по відношенню до (17), яка після простих перетворень набуває такого вигляду:

$$\tau_i = a + \sqrt{2\sigma^2} \cdot \text{erf}^{-1}(2y_i - 1), \quad y_i \in (0;1), \quad (18)$$

де a — тривалість проїзду ділянки L зі швидкістю координації; σ — середнє квадратичне відхилення тривалості проїзду автомобілем ділянки L .

Величину σ визначає дотримання кожного автомобіля групи рекомендованої швидкості при русі на ділянці координації, що у свою чергу залежить від багатьох чинників (дорожні умови, умови руху, стан водія і мета його поїздки тощо). Однак найбільший вплив на величину σ здійснюють довжина ділянки координації, кількість автомобілів у групі та її склад, а також частка поворотних маневрів із живлячого перехрестя.

Для дослідження параметра σ використовується програмне забезпечення VISSIM, в якому створено прямолінійну ділянку вулиці (довжиною 700 м) з двома смугами руху в одному напрямку та живлячим перехрестям на відстані 100 м від її початку (спрощена модель ділянки координації). Щоб виявити залежності величини σ від вищезазначених чинників, у моделі змінювалися вхідна інтенсивність транспортного потоку (з 456 до 2964), тривалість дозволеного сигналу у напрямку координації (з 8 до 40 з інтервалом 2 с), частка легкових автомобілів у потоці (від 100 % до 80 % з інтервалом 5 %), частка потоку прямого напрямку (від 100 % до 70 % з інтервалом 10 %). Незмінними параметрами у моделі залишалися тривалість циклу 60 с, та швидкість координації (50 км/год), яку реалізовано через встановлення для легкових і вантажних автомобілів бажаної швидкості 50 км/год.

Для того щоб забезпечити на живлячому підході груповий рух та майже однакову кількість автомобілів у групі при заданій тривалості дозволеного сигналу, у моделі задавалася така інтенсивність вхідного транспортного потоку, при якій впродовж дозволеного сигналу здійснюється роз'їзд черги (ступінь насичення 0,95). При зменшенні частки потоку прямого напрямку загальна інтенсивність вхідного потоку збільшувалася на величину, що відповідає частці поворотних маневрів, в результаті інтенсивність прямого напрямку залишалася без змін.

Для визначення залежності σ від довжини ділянки координації, у моделі на відрізку вулиці було встановлено 5 вимірювальних пунктів через кожні 100 м, на яких фіксувалася тривалість проїзду кожного автомобіля групи, що рухався від стоп-лінії живлячого перехрестя. Одночасно у цих пунктах, а також у перерізі стоп-лінії фіксувалася загальна кількість автомобілів та кількість серед них вантажних, що проїхали впродовж циклу на кожній смузі (при однорідному потоці збір інформації про кількість вантажних не проводився).

Загалом в дослідженні було проведено 340 вимірів. Щоб усереднити результати для кожного виміру було проведено по 3 імітації, де тривалість однієї становила 10 хв.

За результатами моделювання, було визначено значення величини σ та встановлено їх залежності від довжини ділянки координації (рис. 5), кількості автомобілів у групі (рис. 6), складу групи та частки потоку прямого напрямку провівши для цього регресійний аналіз.

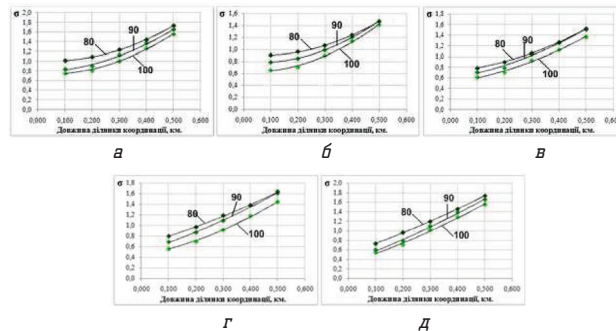


Рис. 5. Залежність σ від довжини ділянки координації (км), при частці потоку прямого напрямку 100 %: а, б, в, г, д — відповідно 4, 8, 12, 16 та 20 автомобілів у групі на одній смузі (цифри на кривих — частка легкових автомобілів у потоці)

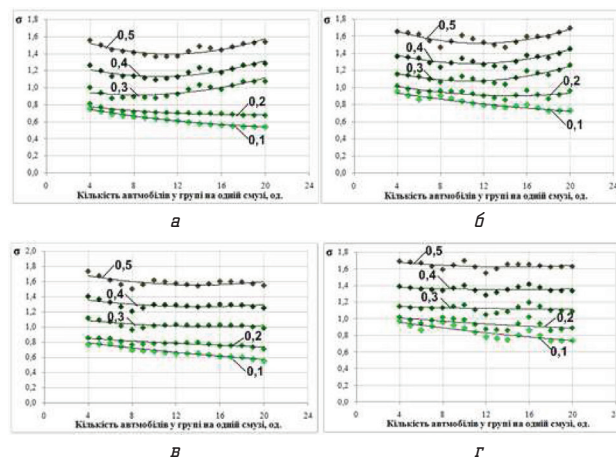


Рис. 6. Залежність σ від кількості автомобілів у групі: а, б — відповідно 100 % та 80 % легкових автомобілів у потоці при частці прямого потоку 100 %; в, г — відповідно 100 % та 80 % легкових автомобілів у потоці при частці прямого потоку 80 %

З рис. 5 видно, що між середньоквадратичним відхиленням σ і довжиною ділянки координації L існує поліноміальна залежність другого степеня, хоча при збільшенні кількості автомобілів у групі (більше 15 автомобілів на одній смузі) вона наближається до лінійної (рис. 5, г, д). Між експериментальними даними і лініями регресії, у всіх випадках, є тісний зв'язок про що свідчать високі значення коефіцієнта кореляції (0,9069–0,9958). Із збільшення довжини ділянки координації величина σ зростає і на відстані 500 м від стоп-лінії, в порівнянні із довжиною 100 м, збільшується майже у двічі. Також, змінна σ має тенденцію до зростання при зменшенні частки легкових автомобілів у потоці та частки потоку прямого напрямку, але вид регресійних залежностей від довжини L — залишаються незмінними. При чому динаміка цих кривих зберігається і за різної кількості автомобілів у групі.

З рис. 6 видно, що залежність величини σ від кількості автомобілів у групі $N_{гр}$ є, також, нелінійною (поліноміальна регресія другого степеня) і спостерігається вона при різній довжині ділянки координації, складі потоку та частці потоку прямого напрямку. Залежність величини σ від частки легкових автомобілів у потоці γ та частки потоку прямого напрямку β_{ST} є лінійною і при їх зменшенні σ також зростає.

З аналізу впливає, що найменші значення σ спостерігаються при однорідному потоці та частці потоку

прямого напрямку 100 % ($\beta_{ST} = 1,0$), а найбільші — при найменших їх частках.

Оскільки розглянуті чинники, які впливають на величину σ мають широкий діапазон значень, зокрема довжина ділянки координат L , то для отримання спільної залежності від чотирьох аргументів (L , N_{TP} , γ , β_{ST}) було проведено множинний регресійний аналіз. При цьому щоб визначити залежність σ не від частки легкових автомобілів у потоці γ , а від кількості вантажних у кожній групі N_B ($N_B = 0, 1, 2, \dots, m$), отримані результати з VISSIM були відповідно опрацьовані.

В результаті отримано рівняння регресії, з множинним коефіцієнтом кореляції 0,9819, значення якого вказує на тісний зв'язок між величиною σ та чинниками, що розглядалися. Це рівняння закладено в імітаційну модель Objective-C і має такий вигляд:

$$\sigma = 0,9281 - 0,0256N_{TP} + 0,0009N_{TP}^2 + 0,6214L + 2,5695L^2 + 0,0332N_B - 0,2363\beta_{ST}, \quad (19)$$

де N_{TP} — кількість автомобілів у групі на одній смузі, од; L — довжина ділянки координат, км; N_B — кількість вантажних автомобілів у групі, од; β_{ST} — частка потоку прямого напрямку.

4.3. Перевірка адекватності імітаційної моделі та аналіз результатів. Для перевірки адекватності моделі Objective-C порівняємо її результати із значеннями моделі, яка додатково створена у середовищі VISSIM (модель ділянки координат). При цьому для порівняння розглядається лише значення довжини черги, що прибувають із живлячого підходу, оскільки саме ця черга є основою складовою максимальної довжини черги, що утворюється на суміжному перехресті. Вхідні параметри, які вводяться в обидві моделі наведено у табл. 2, а порівняння їх результатів у табл. 3.

Таблиця 2

Вхідні дані для моделей в Objective-C та VISSIM

Назва	Діапазон значень
Кількість смуг руху в одному напрямку	2
Швидкість координат, км/год.	50
Тривалість циклу, с	60
Тривалість дозволеного сигналу на живлячому перехресті у напрямку координат	20, 32
Тривалість дозволеного сигналу на суміжному у напрямку координат перехресті	24, 36
Довжина ділянки координат, м	300, 400, 500
Фазовий зсув відповідно при довжині ділянки координат (300, 400, 500), с	18, 24, 30
Інтенсивність вхідного потоку на живлячому підході, авто/год.	1140, 1824
Ступінь насичення на живлячому підході	$\geq 0,95$
Частка легкових автомобілів у потоці, %	100, 80
Частка потоку прямого напрямку, %	100

З результатів видно, що значення черги з обох моделей (модель в Objective-C та VISSIM) є дуже близькими при однорідному та різнорідному складі потоку. Найбільші відхилення спостерігаються при зменшенні частки однорідного потоку та довжині ділянки координат 500 м.

Виходячи з цього можна зробити висновок про підтвердження правильності прийнятої гіпотези щодо визначення черги з автомобілів, які прибувають із живлячого підходу через відношення часової довжини групи до середнього інтервалу між автомобілями у групі.

Таблиця 3

Довжина черги на суміжному перехресті за моделлю в Objective-C та VISSIM, авто.

Модель	Інтенсивність, авто/год.	Довжина ділянки координат, м.					
		300		400		500	
		Частка легкових автомобілів у потоці, %					
		100	80	100	80	100	80
VISSIM	1140	0,99	1,36	2,31	2,03	3,15	2,40
	1824	1,19	1,48	2,65	2,12	4,09	3,64
Objective-C	1140	1,11	1,47	2,48	2,79	3,96	4,19
	1824	1,35	1,77	2,83	3,05	4,85	5,08

5. Апробація результатів дослідження

Наукова новизна цієї роботи полягає у розробці аналітичної моделі процесу формування черги транспортних засобів на суміжному у напрямку координат перехресті.

Крім цього, з використанням VISSIM, встановлено залежності σ середньоквадратичного відхилення тривалості проїзду автомобілем ділянки координат від довжини ділянки координат, кількість автомобілів у групі, її складу та частки поворотних маневрів із живлячого перехрестя. Між величиною σ та довжиною ділянки координат, а також кількістю автомобілів у групі є нелінійні залежності і можуть описуватися поліноміальними функціями другого ступеня. На базі цієї статистичної моделі, яка виражається регресійним рівнянням, а також аналітичній моделі розроблена імітаційна модель для визначення максимальної довжини черги транспортних засобів на суміжному у напрямку координат перехресті.

Імітаційна модель реалізована у таких спосіб, що користувачу легко змінювати умови дослідження через зміну вхідних параметрів і може запускатися як на ПК, так і на переносних пристроях (мобільний телефон, планшет). Однак вона є придатною для координованих ділянок вулиць з двома смугами руху в одному або в обох напрямках, де живлячий і другорядні підходи є ізольовані і на обох суміжних перехрестях однакова тривалість циклу.

6. Висновки

1. Чергу на суміжному у напрямку координат перехресті формують автомобілі, що прибувають із живлячого і другорядних підходів.

2. Не потрапляння автомобілів з другорядних вулиць у чергу на суміжному перехресті залежить від параметрів керування на обох перехрестях (тривалості дозволеного сигналу та фазового зсуву) та характеристики групи автомобілів, що рухаються від живлячого перехрестя.

3. Довжина черги з автомобілів, які прибувають із живлячого підходу може визначатися із відношення часової довжини групи, що буде зупинена на суміжному

перехресті до середнього інтервалу між автомобілями у групі.

4. Значення максимальної довжини черги за моделлю в Objective-C є близькими до тих, що видає VISSIM.

5. В імітаційній моделі є такі спрощення: автомобілі групи не змінюють смуг руху після входу на ділянку координації; не враховуються автомобілі, що проїжджають живлячий підхід вільно, тобто не є автомобілями групи.

Література

1. Вікович, І. А. Розробка методу забезпечення пріоритету маршрутним автобусам на регульованих перехрестях [Текст] / І. А. Вікович, Р. М. Зубачик // Східно-Європейський журнал передових технологій. — 2013. — № 5/3(65). — С. 27–33.
2. Wasson, J. Reconciled Platoon Accommodation at Traffic Signals [Text] / J. Wasson, M. Abbas, D. Bullock, A. Rhodes, C. Zhu. — Indianapolis, December 1999. — 217.
3. Yu. L. Real-Time Calibration of Platoon Dispersion Model to Optimize the Coordinated Traffic Signal Timing in ATMS Networks [Text] / L. Yu. — Texas, Texas Southern University, June 1999. — 51.
4. Кременец, Ю. А. Технические средства организации дорожного движения [Текст] : учеб. для вузов / Ю. А. Кременец, М. П. Печерский, М. Б. Афанасьев. — М.: ИКЦ «Академ-книга», 2005. — 279 с.
5. Гаврилов, Е. В. Организация дорожного руху [Текст] / Е. В. Гаврилов, М. Ф. Дмитриченко, В. К. Доля. — К.: Знання України, 2007. — 452 с.
6. Вентцель, Е. С. Теория вероятностей и ее инженерные приложения [Текст] / Е. С. Вентцель, Л. А. Овчаров. — 2-е изд., стер. — М.: Висш. шк., 2000. — 480 с.
7. Гаврилов, А. А. Моделирование дорожного движения [Текст] / А. А. Гаврилов. — М.: Транспорт, 1980. — 190 с.
8. Вікович, І. А. Розробка імітаційної моделі для визначення максимальної довжини черги транспортних засобів [Текст] / І. А. Вікович, Р. М. Зубачик // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Збірник наукових праць. — 2013. — № 70(1043).
9. Иносэ, Х. Управление дорожным движением [Текст] : пер. с англ. / Х. Иносэ, Т. Хамада; под ред. М. Я. Блинкина. — М.: Транспорт, 1983. — 248 с.
10. Farzaneh, M. Modeling traffic dispersion [Text] / M. Farzaneh, H. Rakha / Virginia Polytechnic Institute and State University. — November 2005. — 139 p.

РАЗРАБОТКА ИМИТАЦИОННОЙ МОДЕЛИ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ МАКСИМАЛЬНОЙ ДЛИНЫ ОЧЕРЕДИ АВТОМОБИЛЕЙ НА КООРДИНИРОВАННОМ ПЕРЕКРЕСТКЕ

В статье рассматривается имитационная модель для определения максимальной длины очереди транспортных средств на смежном в направлении координации регулируемом перекрестке, которая написанная на языке программирования Objective-C на базе разработанной аналитической модели. Проверяется адекватность предложенной модели, и сравниваются результаты со значениями в среде VISSIM.

Ключевые слова: имитационная модель, максимальная длина очереди, участок координации, смежный регулируемый перекресток.

Вікович Ігор Андрійович, доктор технічних наук, професор, кафедра транспортної технології, Національний університет «Львівська політехніка», Україна.

Зубачик Роман Михайлович, аспірант, кафедра транспортної технології, Національний університет «Львівська політехніка», Україна, e-mail: roman.zubachyk@gmail.com.

Викович Игорь Андреевич, доктор технических наук, профессор, кафедра транспортных технологий, Национальный университет «Львовская политехника», Украина.

Зубачик Роман Михайлович, аспирант, кафедра «Транспортные технологии», Национальный университет «Львовская политехника», Украина.

Vikovych Ihor, Lviv National Polytechnic University, Ukraine.

Zubachyk Roman, Lviv National Polytechnic University, Ukraine, e-mail: roman.zubachyk@gmail.com

УДК 621.039.56

**Тодорцев Ю. К.,
Кокко Е. А.,
Никольский, М. В.**

ОЦЕНКА МАССЫ ТЕПЛОНОСИТЕЛЯ В РЕАКТОРНОЙ УСТАНОВКЕ ПРИ ПОЛНОЙ ПОТЕРЕ ПОДПИТКИ

Исследуется и предлагается новый метод определения массы пароводяной смеси в водородном энергетическом реакторе в аварийных режимах, а именно сравнение ранее полученных значений по взвешиванию реактора со всеми внутрикорпусными устройствами и теплоносителем в нормальном режиме эксплуатации с новыми значениями из-за изменения рабочих давления и температуры на период текущей аварийной ситуации.

Ключевые слова: водо-водяной энергетический реактор, масса пароводяной смеси, аварийный режим.

1. Введение

В настоящее время сторонники развития атомной энергетики утверждают, что высокая степень безопасности АЭС обеспечена множеством факторов. Основные из них — это принцип самозащитности реакторной установки, наличие нескольких барьеров безопасности и многократное дублирование каналов безопасности.

Необходимо отметить также применение активных и пассивных систем безопасности [1–3].

На данном этапе развития вопросов о безопасной эксплуатации энергетических установок рассмотрены и смоделированы предположительно возможные аварии на ядерных реакторах с потерей теплоносителя. К ним относятся большие, средние и малые течи. Серьезными аварийными ситуациями можно считать такие большие