

13. **Гарбер М. Е.** Отливки из белых износостойких чугунок. М.: Машиностроение, 1972. 112 с.
14. **Вакуленко І.О., Кадильникова Т.М., Пройдак С.В.** Технологія механічної обробки металевих матеріалів. Дніпропетровськ: Стандарт-Сервіс, 2014. 176 с.
15. **Нетребко В.В.** Влияние марганца на структуру высокохромистых чугунок. Вісн. Дніпропетр. нац. ун-ту заліз. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. 2012. Вип. 42. С. 167–169.
16. **Янюшкин А.С., Лобанов Д.В., Рычков Д.А.** Методика сравнительного анализа конструкций сборного режущего инструмента. Механика XXI века. 2009. №8.
17. **Яцун Е.И., Кудряшов Е.А., Смирнов И.М., Павлов Е.В.** Совершенствование инструментального обеспечения процессов точения конструктивно сложных деталей. СТИН. 2017, №9. С. 23-28.

Рукопис подано до редакції 15.10.2020

УДК 622.647.2

І. А. МАРИНИЧ, С. А. РУБАН, кандидати техн. наук, доценти,  
О. Ю. СЕРДЮК, канд. техн. наук, ст.викладач  
Криворізький національний університет

## ЗАСТОСУВАННЯ ПАКЕТУ TRUETIME ПРИ МОДЕЛЮВАННІ ПРОЦЕСУ КЕРУВАННЯ ОБ'ЄКТАМИ ІЗ ЗАПІЗНЮВАННЯМ І ВАРІЙОВАНИМ ПЕРІОДОМ ДИСКРЕТНОСТІ

**Мета.** Метою даної роботи є підвищення якості керування об'єктами з запізненням або змінним періодом дискретності за рахунок використання моделювання в режимі реального часу.

**Методи дослідження.** У роботі використано методи теорії автоматичного керування для вибору і обґрунтування структури математичної моделі об'єкту керування, методи імітаційного і комп'ютерного моделювання в режимі реального часу, комп'ютерні інформаційні та програмні технології для підвищення якості керування об'єктами з запізненням або змінним періодом дискретності.

**Наукова новизна.** У роботі пропонується застосування пакету TrueTime як допоміжної бібліотеки MATLAB/Simulink, спеціально розробленого для моделювання дискретних керуючих пристроїв і систем, цифрових систем в режимі реального часу. Використання цього пакету дозволяє полегшити моделювання поведінки багатозадачного процесорного ядра, що працює в режимі реального часу.

**Практична значимість** полягає у доцільності застосування пакету TrueTime, що підтримує різні технології передачі даних, як допоміжної бібліотеки MATLAB/Simulink, оскільки дозволяє реалізувати змінний період дискретизації та визначити найбільш доцільну мережу передачі інформації, що в свою чергу призведе до підвищення якості керування об'єктом в цілому.

**Результати.** Під реальним часом в роботі маюся на увазі урахування в системі керування властивостей основних промислових телекомунікаційних мереж, а саме затримки через час на повторне відсилання пакетів через колізії в мережі. Діаграми часу на виконання показали, що період дискретизації регулятора став неперіодичним, а з відхиленнями – змінним, тобто, за допомогою пакету TrueTime вдалося створити систему зі змінним періодом дискретизації. Моделювання 4 різних мереж: CAN, Ethernet, FDMA та TDMA показало, що найефективнішою стала мережа CAN, а найгірший показник має мережа FDMA. Не зважаючи на те, що система працювала у режимі реального часу з затримками у мережі, система залишилася стійкою.

**Ключові слова:** варійований період дискретності, затримка сигналу, мережі передачі даних, моделювання, об'єкт з запізненням, truetype

doi: 10.31721/2306-5451-2020-1-51-39-46

**Проблема та її зв'язок з науковими і практичними задачами.** Цифрові системи, що здійснюють керування в реальному масштабі часу і використовують ЕОМ для формування закону керування, є досить складними для аналізу. У даний час такі системи, як правило, виконуються на базі багатозадачних керуючих контролерів і мають мережеву організацію.

Оскільки для передачі інформації мережею потрібен певний час, при реалізації цифрового керування виникає часова затримка. Це призводить до зниження якості керування, іноді до неприпустимо низького рівня, а іноді і до виходу системи з ладу взагалі. Щоб уникнути негативного впливу такого запізнювання і оптимально використовувати доступні системі керування обчислювальні ресурси, проектування алгоритмів керування та програмного забезпечення повинне вестися з урахуванням реального часу.

**Аналіз досліджень і публікацій.** У теорії цифрового керування інтервали здійснення вибірки зазвичай приймаються однаковими, а затримка керування вважається несуттєвою або постійною. Однак на практиці це має місце лише в окремих випадках. У контролері завдання накладаються одне на одне і блокуються в очікуванні загальних ресурсів. Час виконання самих завдань може змінюватись. Передача даних мережею відбувається із затримками, величина і стабільність яких залежать як від протоколу зв'язку, так і від завантаженості каналів. У цих умовах аналітичний аналіз поведінки цифрових систем керування є складним завданням, і так як немає єдиного методу боротьби зі змінними запізненнями в контурі керування, найбільш природнім представляється шлях імітаційного моделювання [1, 2].

Імітаційне моделювання є ефективним інструментом оцінки характеристик процесів функціонування складних систем на етапах їх дослідження та проектування. Але цим можливості даного методу не обмежуються: у сучасних системах керування імітаційне моделювання використовується безпосередньо в контурі керування, на його основі вирішуються завдання прогнозування для прийняття рішень про необхідне керування територіально розподіленим об'єктом.

Розробка імітаційної моделі, яка характеризується змінним значенням кроку дискретизації, може вестися різними способами. Серед готових інструментів моделювання можна виділити побудовану на базі програми MATLAB пакет StateFlow [3]. Якщо залишатися в рамках стандартного набору MATLAB, можна побудувати Simulink-модель, використовуючи як приклад модель дискретної системи зі змінним тактом квантування [2,3], яка змінює крок квантування при зміні вхідного впливу, тобто за сигналом синхронізації.

Ще один варіант, який є найбільш цікавим і в достатній мірі не вивченим, полягає в застосуванні пакету TrueTime як допоміжної бібліотеки MATLAB/Simulink, яка доповнює і розширює можливості Simulink для моделювання цифрових систем в режимі реального часу. Ця бібліотека була створена для полегшення моделювання поведінки багатозадачного процесорного ядра, що працює в режимі реального часу [3, 4].

**Постановка задачі.** Завданням цієї роботи є застосування пакету TrueTime разом з MATLAB/Simulink для підтвердження доцільності його застосування при моделюванні цифрової мережевої системи керування об'єктом з запізненням. Для цього необхідно розглянути цифрову систему керування, реалізуючи мережу передачі даних, актуатор, датчик та регулятор засобами TrueTime. У якості мереж зв'язку обрати найбільш поширені мережі: CAN, Ethernet, FDMA та TDMA.

**Викладення матеріалів і результатів.** У TrueTime основними елементами є ядро операційної системи і мережевий блок у вигляді Simulink блоків під назвами TrueTime Kernel і TrueTime Network відповідно, які є S-функціями Simulink, і інтерфейси яких представлені на рис. 1. Блок Kernel керується подіями та виконує код, що буде моделюватися. Ядро цієї підпрограми насправді виконує роль повноцінної операційної системи, що базується на подіях, а Simulink використовується лише як інтерфейс та для видачі завдань з безперервних процесів. Політика планування окремих блоків процесорного ядра є довільною і вирішується користувачем. Наприклад, у мережі, повідомлення відправляються і приймаються відповідно до обраної користувачем мережевої моделі [3,4].

Рівень моделювання елементів також обирається користувачем - хоча, найчастіше, моделювання виконання коду на рівні інструкцій або мережевих передач на рівні бітів є непотрібним і небажаним. TrueTime дозволяє враховувати час виконання завдань і час на передачу повідомлень, які будуть змодельовані як постійні, випадкові, або залежні від даних змінні. Крім того, TrueTime дозволяє імітувати контекстне перемикання (мається на увазі такий тип багатозадачності, при якому операційна система одночасно завантажує

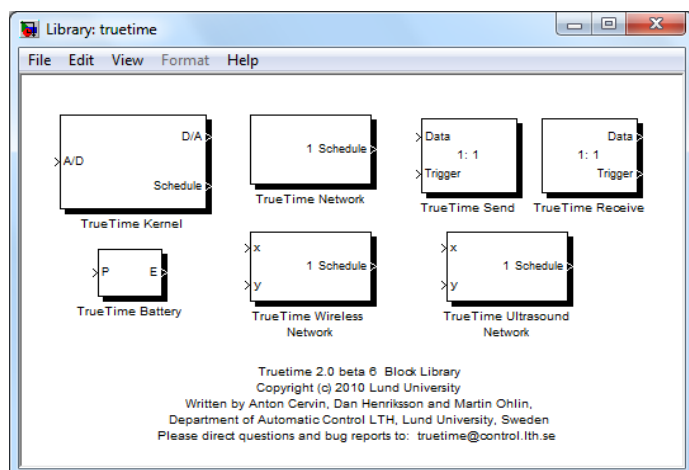


Рис. 1. Бібліотека TrueTime v2.0

два або більше додатків в пам'ять, але процесорний час надається тільки основним та синхронізацію задач за допомогою подій або контрольно-керуючого пристрою.

На додаток до блоку бібліотеки на рис. 1, TrueTime надає набір функцій мовою C++ з відповідним для MATLAB мех-інтерфейсом. Деякі функції використовуються для налаштування моделювання шляхом створення завдань, обробки переривань, таймерів і т.п. Решта функцій викликаються з коду завдань під час виконання: функції для аналого-цифрового і цифро-аналогового перетворення, параметри зміни завдань, моніторинг вхідних і вихідних даних, відправки та отримання мережевих повідомлень, і багато іншого.

TrueTime формується в компіляторі C++, який потрібно активувати в MATLAB, або в m-файлі програми MATLAB, що викликається для ініціалізації скрипту.

Блок Kernel є S-функцією MATLAB, і його функцією є імітація комп'ютера з простим, але гнучким процесорним ядром реального часу, аналого-цифровим і цифро-аналоговим перетворювачем, мережевим інтерфейсом і зовнішнім перериванням каналів. Kernel виконує користувальницькі завдання і обробку переривань. Внутрішньо, Kernel підтримує кілька структур даних, які зазвичай зустрічаються в ОС реального часу: готовність черг, час черги, реєстрація завдань, обробники переривань, спостерігачів і таймери, які були створені для моделювання [4, 6, 7].

Для роботи в TrueTime Kernel може бути створено довільне число завдань. Завдання також можуть бути створені динамічно під час процесу моделювання. Завдання використовуються для моделювання як періодичних дій, наприклад опитування портів введення/виводу, так і аперіодичних, таких як комунікаційні завдання і подієво-керовані регулятори [5,6].

Моделювання відбувається на трьох рівнях різних пріоритетів: рівень переривань (високий пріоритет), рівень процесорного ядра, і рівень завдань (нижчий пріоритет). Виконання може бути пріоритетним перериванням зв'язку або без нього, що може бути визначено індивідуально для кожного завдання і обробника переривання.

Наступний основний блок - Network. Блок імітації мережі передачі даних керується подіями і виконується тоді, коли повідомлення з'являються або зникають у мережі. Коли вузол намагається передати повідомлення, сигнал синхронізації передається в блок Network на відповідний вхід. Коли передача повідомлення закінчена, блок Network посилає новий сигнал синхронізації на канал допоміжного вузла, відповідного вузлу одержувача. Передане повідомлення записується до буферу приймаючого комп'ютерного вузла.

Блок Network моделює доступ до середовища і передачу пакетів локальною комп'ютерною мережею. На даний час бібліотека TrueTime версії 2.0 підтримує дев'ять технологій передачі даних: CSMA / CD (локальна офісна мережа Ethernet), CSMA / AMP (мережа CAN), Round Robin (Token Bus), FDMA, TDMA (TTP), Switch Ethernet, FlexRay, Profinet, а також NCM. Затримка розповсюдження в програмі не враховується, оскільки вона незначно мала [3-6].

Блоки Network формуються діалоговими масками, які є різними для кожного виду мережі. Так, є деякі загальні параметри для всіх мереж, до них відносяться номер мережі, кількість вузлів, швидкість передачі даних або розмір мінімального кадру. Інші параметри блока залежать від типу мережі, наприклад, потужність передачі або поріг приймача сигналу в бездротових мережах. Провідні мережі мають діалогове вікно як на рис. 2.

Наступні параметри мережі спільні для всіх моделей: кількість вузлів, бітрейт (біт/с), мінімальний розмір фрейму (байт), затримки до та після обробки даних, та вірогідність втрат. Атрибути, що визначені специфікою протоколу, включають розміри слоту для TDMA, розмір та тип буферу для Ethernet. Також може бути кілька мережевих блоків в одній системі. Саме тому кожна мережа має ідентифікаційний номер.

Бібліотека TrueTime окрім описаних вище має ще 5 блоків. Вони виконують наступні задачі [3, 7, 8]:

TrueTime Wireless Network: функція цього блоку аналогічна TrueTime Network, але замість провідної мережі використовується бездротова;

TrueTime Battery: цей блок використовується, коли потрібно імітувати батарею і проаналізувати вплив різних схем управління живленням;

TrueTime Receive: Блок для отримання повідомлень з мережі.;

TrueTime Send: Блок для відправки повідомлень до мережі;

TrueTime Ultrasound Network: Найновіший блок, що імітує ультразвукову мережу.

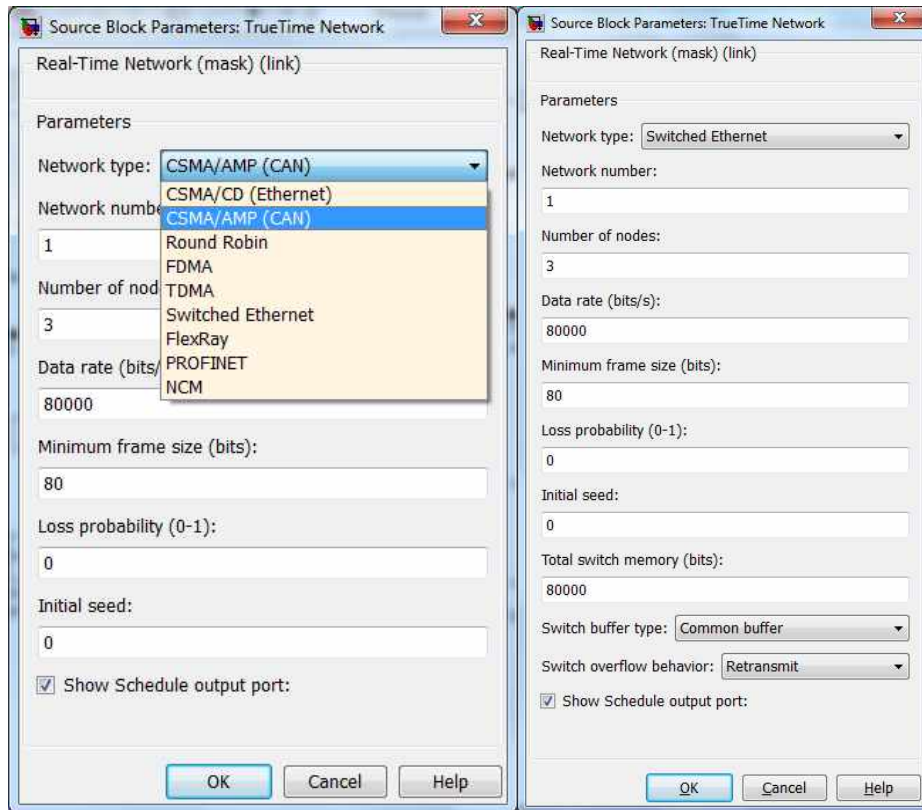


Рис. 2. Можливі налаштування блоку TrueTime Network

Перед тим, як запускати моделювання, необхідно ініціалізувати блоки процесорних ядер та мережеві блоки, а також запустити завдання, обробники переривань, таймери, події, спостерігачі і т.п. для моделювання. Код ініціалізації та код, що виконується під час моделювання, можуть бути записані або у вигляді М-файлів програми Matlab або мовою C++.

Розглянемо на прикладі моделювання цифрової системи автоматичного керування зі змінним періодом дискретизації [9]. У Simulink досить просто моделюються об'єкти з різного роду затримками. Використовуючи мову програмування C++, можна отримати в TrueTime опис керуючої частини системи, що моделюється. При цьому алгоритм керування може мати скільки завгодно високу складність, тимчасові затримки можуть бути як детермінованими, так і носити випадковий характер.

Конвеєр є ланкою запізнювання, тобто передає сигнал із входу на вихід без перетворювання форми, але миттєві значення вхідної величини (вантажопотоку), вихідна величина формується з деяким відставанням (запізнюванням).

Рівняння ланки запізнювання

$$y(t) = x(t - \tau),$$

де  $\tau$  – тривалість запізнювання.

Рівняння не є диференціальним і належить до класу особливих рівнянь зі зміщеним аргументом.

Передаточна функція конвеєра має вигляд

$$W(s) = \frac{Y(s)}{X(s)} = e^{-s\tau}$$

Ланка запізнювання робить характеристичне рівняння трансцендентним, тому при практичних розрахунках передаточну функцію розкладають у ряд Пада й враховують тільки два або три перших члени ряду, замінюють її дробовою раціональною функцією

$$W(s) \approx \frac{1 - 0.5\tau s}{1 + 0.5\tau s}$$

або

$$W(s) \approx \frac{1}{\left[ \left( \frac{\tau}{n} \right) s + 1 \right]^n},$$

де  $n$  – кількість послідовно з'єднаних інерційних ланок першого порядку з однаковими постійними часу  $T = \tau/n$ . Причому, чим більше  $n$ , тим точніше апроксимація.

В ролі регулятора оберемо PID-регулятор, передавальна функція якого представляється наступними рівняннями [10]

$$P = K \cdot [\beta \cdot r(kh) - y(kh)],$$

$$I(kh + k) = I(kh) + K \cdot h \frac{r(kh) - y(kh)}{T_i};$$

$$D(kh) = T_d \cdot D \frac{(kh - h)}{(Nh + T_d)} - K \cdot T_d \cdot N \frac{y(kh) - y(kh - h)}{(Nh + T_d)};$$

$$u(kh) = P(kh) + I(kh) + D(k),$$

де  $K$  – постійна пропорційності,  $K=1$ ;  $T_i$  – постійна інтегрування або час скидання,  $T_i=0.12$ ;  $T_d$  – постійна диференціювання,  $T_d=0.04$ ;  $N$  – використовується для обмеження підсилення високих частот,  $N=1000$ ;  $h$  – шаг дискретизації,  $h=0.01$ ;  $\beta$  – обмеження команд сигналу  $r$ , впливає на пропорційну частину;  $y$  – вихід.

та реалізується у програмі мовою C++:

```
function [exectime, data] = controller_code(seg, switch seg
case 1
y = ttGetMsg;
% Obtain sensor value if isempty(y)
disp('Error in controller: no message received!');
y = 0.0;
end
r = ttAnalogIn(1);
% Read reference value P = data.K*(r-y);
D = data.ad*data.Dold + data.bd*(data.yold-y);
data.u = P + D; data.Dold = D;
data.yold = y; exectime = 0.0005;
case 2
ttSendMsg(2, data.u, 80);
% Send 80 bits to node 2 (actuator)
exectime = -1; % finished
end
```

Параметри контролеру були обрані таким чином, щоб замкнута система мала пропускну спроможність  $\omega_c=20$  рад/с і коефіцієнт загасання  $\zeta=0,7$ .

Модель цифрової системи керування, реалізуючої мережу передачі даних, актуатор, датчик та регулятор засобами TrueTime наведена на рис.3.

Контролер, а саме PID-регулятор, постійно опитує датчик, а також посилає управляючі імпульси на актуатор з інтервалами рівними шагу дискретизації. З іншого боку, в мережі передачі даних постійно діє механізм порушень, тобто в системі виникають затримки різного характеру. І тому, посылаючи запит від регулятора до датчика/виконавчого механізму, система зв'язку затримує сигнал синхронізації (планування затримок та черг), і, таким чином, регулятор отримує застарілу інформацію про стан датчика. Так з'являється змінний період дискретизації регулятора [9, 11, 13].

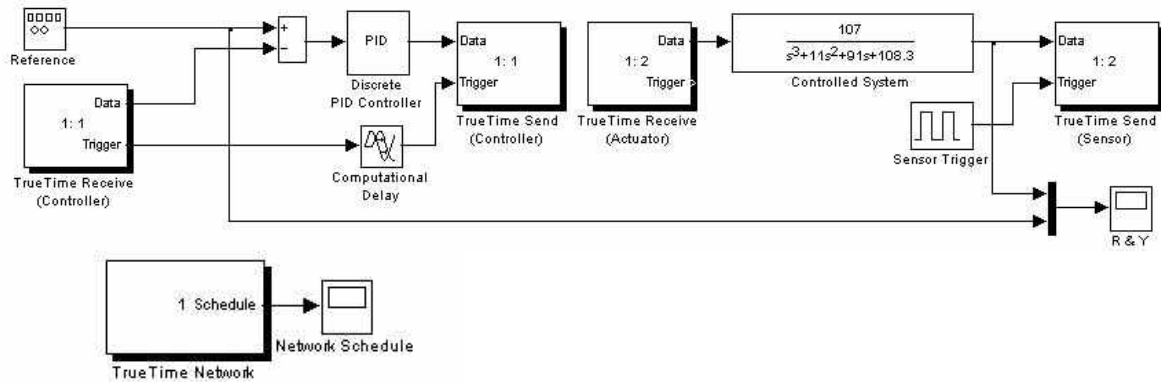


Рис. 3. Модель системи керування в пакеті TrueTime

Моделювання графіків вихідної величини для різних мереж разом з опорним значення представлені на рис. 4, на графіку було обрано 4 різні мережі: CAN (червона лінія), Ethernet (жовта лінія), FDMA (рожева лінія) та TDMA (синя) які включалися з однаковими характеристиками.

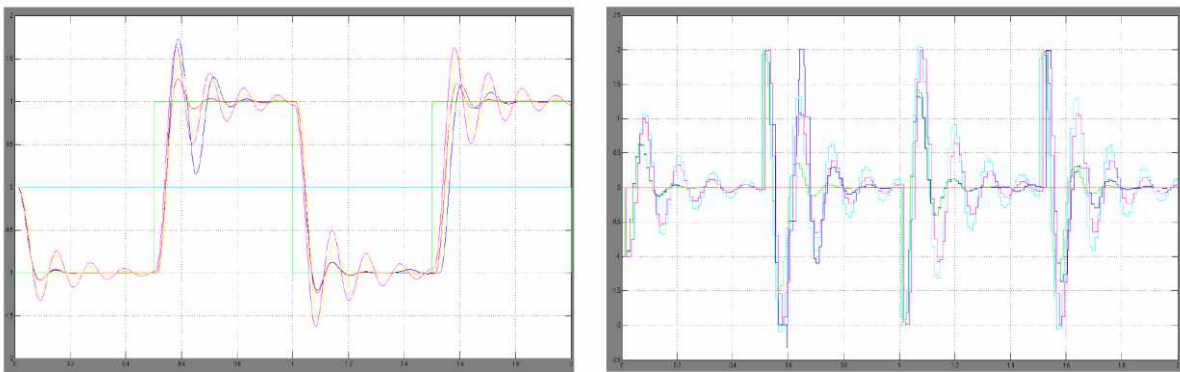


Рис.4. Графіки напруги привідного двигуна та сигналів керування PID-регулятора для різних мереж з однаковими характеристиками

Блоки TrueTime Kernel та Network генерують вихідні діаграми у залежності від моделювання. Кожне процесорне ядро виробляє дві діаграми: діаграми плану передавача (рис.5) та діаграми приймача (планування датчик/актуатор на рис. 6), а мережевий блок виробляє план затримок та черг для трьох об'єктів (рис. 7).

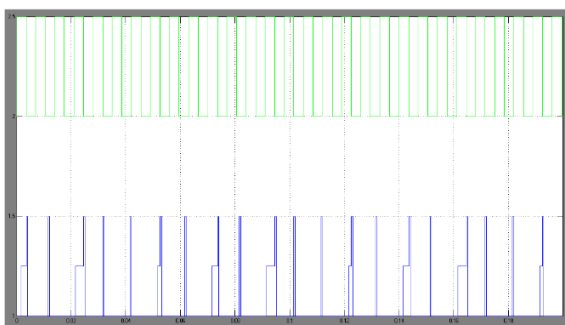


Рис. 5. Планування подій регулятора

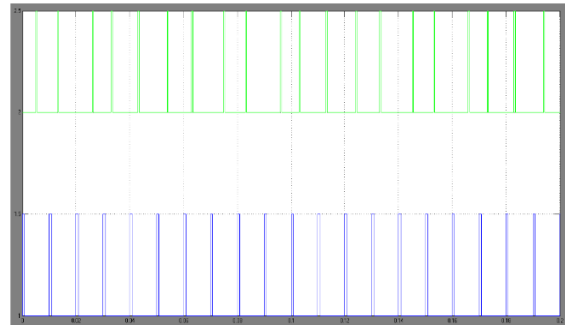


Рис. 6. Планування блоку актуатор/датчик

План регулятора показує лінії виконання кожного завдання та оброблювач переривань впродовж перебігу симулювання.

Буде одна лінія виконання для кожного завдання та оброблювача. Якщо сигнал високий, це значить, що завдання виконується. Середній сигнал показує, що завдання готове, але не виконується (очікує), тоді як низький сигнал значить, що завдання незайняте [8, 12].

Аналогічним шляхом планування мережі показує передачу повідомлень у мережі. Високий рівень сигналу означає передачу повідомлення, середній – очікування, низький – незайнятість.

**Висновки і напрямки подальших досліджень.** Під реальним часом в роботі малося на увазі урахування в системі керування властивостей основних промислових телекомунікаційних мереж, а саме затримки через час на повторне відсилення пакетів через колізії в мережі. Діаграми часу на виконання (рис. 5 – 7) слід інтерпретувати як квантування за часом. А опираючись на це згідно з рис. 7 бачимо, що період дискретизації регулятора став неперіодичним, а з відхиленнями - змінним. Тобто, за допомогою пакету TrueTime вдалося створити систему зі змінним періодом дискретизації.

Слід також зазначити, що у якості мереж зв'язку було обрано 4 різні мережі: CAN, Ethernet, FDMA та TDMA, результати дії яких вочевидь мають різний вплив на систему автоматизації. Було проведено моделювання системи регулювання конвеєром через ці мережі, які включалися з однаковими характеристиками: швидкість передачі 10кбайт/с., мінімальний розмір кадру 10байтів.

Найефективнішою стала мережа CAN: перерегулювання вихідної координати системи найменше й складає 12%; час наростання – 0.05с.; період загасаючих коливань – 0.14с. Найгірший показник має мережа FDMA.

Не зважаючи на те, що система працювала у режимі реального часу з затримками у мережі, система залишилася стійкою.

#### Список літератури

1. Ю.В. Дворянников, М.П. Туманов. Переменное запаздывание в сетевом компоненте и его влияние на устойчивость систем управления // Приборостроение, методы и технологии. 2008г. №4
2. Д. А. Ермолович, А. П. Мовчан. Управление объектами с большим запаздыванием. // Труды Национального технического университета Украины «КПИ». 2009г. №39.
3. A. Cervin et. al. TrueTime 2.0 beta – Reference Manual, Department of Automatic Control, Lund University, January 2009
4. Simulation of Wireless Networked Control Systems. // Martin Andersson, Dan Henriksson, Anton Cervin. Box 118, SE-221 00 Lund, Sweden
5. Simulation of networked control systems using truetime. // E. Farkas, J. Hnát. Institute of Control and Industrial Informatics. 2011.
6. Wonham W.M. Stability Analysis of Linear Systems with Time-Varying Delays: Delay Uncertainty and Quenching. // New Orleans, LA, USA, Dec. 12-14, 2007.
7. D. Henriksson et. al. TrueTime Simulation of Networked Computer Control Systems, Preprints of the 2nd IFAC Conf. on Analysis and Design of Hybrid Systems (Alghero, Italy), 7-9 June 2006
8. A. Cervin et. al. Simulation of Networked Control Systems Using TrueTime [online], cit.24.10.2009, available at: <http://www.control.lth.se/documents/2007/cer+07ncs.pdf>
9. Об устойчивости сложных систем с запаздыванием. // Александров А.Ю., Жабко А.П. УТЭОСС, Санкт-Петербург. 2012г.
10. Денисенко В. В. ПИД - регуляторы: принципы построения и модификации // Современные технологии автоматизации. 2006. № 4. с. 66 – 74
11. А.Н. Скворцов, О.В. Сердюков, А.И. Тимошин, А.А. Дорошкин. Применение промышленной сети CAN в современных системах автоматизации // Автоматизация в промышленности. №11. 2003.
12. Åström, Karl J. and Björn Wittenmark (1997): Computer Controlled Systems (Third Edition), Prentice Hall, Englewood Cliffs, N.J., ISBN 0-13- 314899-8.
13. Optimal and robust control for linear state-delay systems. // Michael Basin, Jesus Rodriguez-Gonzalez, Leonid Fridman. Journal of The Franklin Institute, 2006.

Рукопис подано до редакції 16.10.2020

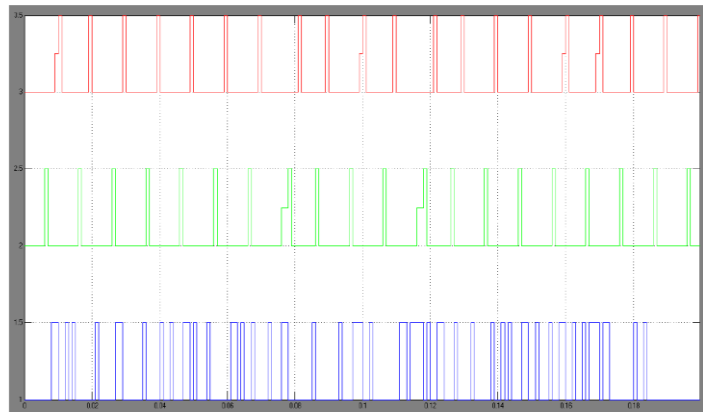


Рис. 7. Планування мережевого блоку мережі CAN