

УДК 681.58

DOI: <https://doi.org/10.32515/2414-3820.2019.49.213-220>

**Н.В. Смирнова**, доц., канд. техн. наук, **В.В. Смирнов**, доц., канд. техн. наук  
*Центральноукраїнський національний технічний університет, м. Кропивницький, Україна*  
*e-mail: swckntu@gmail.com*

## Синхронное управление пулом сервоприводов радиоуправляемых робототехнических систем

Приведена реализация системы управления радиоуправляемым объектом по нескольким координатам с учетом временных задержек при передаче задающего воздействия. Разработан протокол передачи задающего воздействия исполняющей системе и формат передаваемого пакета. Уменьшено время реакции системы на изменение значения задающего воздействия. Реализовано синхронное управление пулом сервоприводов, что позволило осуществить управление объектом по нескольким координатам без задержек в запуске циклов управления.

**система управления, сервопривод, синхронное управление, объект, прерывание, RTOS**

**Н.В. Смірнова**, доц., канд. техн. наук, **В.В. Смірнов**, доц., канд. техн. наук  
*Центральноукраїнський національний технічний університет, м. Кропивницький, Україна*

## Синхронне управління пулом сервоприводів радіокерованих робототехнічних систем

Наведено реалізація системи управління керованим по радіо об'єктом по декількох координатах з урахуванням тимчасових затримок при передачі впливу що задається. Розроблено протокол передачі значення впливу що задається виконуючої системою і формат пакета що передається. Зменшено час реакції системи на зміну значення впливу що задається. Реалізовано синхронне управління пулом сервоприводів, що дозволило здійснити управління об'єктом по декількох координатах без затримок у запуску циклів управління.

**система управління, сервопривід, синхронне управління, об'єкт, переривання, RTOS**

**Постановка проблемы.** В настоящее время существует множество реализаций систем управления сервоприводами для различных робототехнических систем, радиоуправляемых устройств, таких, как шасси, квадрокоптеры, беспилотные летательных аппараты (БПЛА) и т.д. Основным назначением таких систем является формирование управляющего воздействия для сервоприводов с минимальной задержкой и минимальной ошибкой.

В сельском хозяйстве в системах точного земледелия, когда БПЛА используются для обработки посевов, возрастают требования к системе управления БПЛА. Сбои в системе управления приводят к нежелательным результатам и нестандартным ситуациям. Поэтому, помимо дублирования основных каналов управления, необходимо учитывать факторы, снижающие скорость реакции исполнительных механизмов БПЛА и точность отработки поступающих команд.

Одним из таких факторов является несинхронность управления пулом сервоприводов.

В зависимости от реализации системы управления и параметров объекта управления проблемой может являться несинхронность управления пулом сервоприводов, которая вызвана различными причинами.

Причиной несинхронности управления может являться:

- временные задержки при передаче значений управляющего воздействия;
- неоптимальная программная реализация драйвера блока управления сервоприводами;
- люфты в исполнительных механизмах объекта управления.

Если время изменения координат объекта в пространстве значительно превосходит время цикла работы сервопривода, то несинхронность управляющих сигналов при изменении положения валов координатных сервоприводов не является проблемой.

Однако, при высоких скоростях перемещения объекта в пространстве, когда изменение траектории движения объекта управления осуществляется по нескольким координатам, относительные задержки в управляющих сигналах координатных сервоприводов могут привести к отклонению реальных координат объекта от заданных и непредсказуемому поведению объекта управления (рис.1).

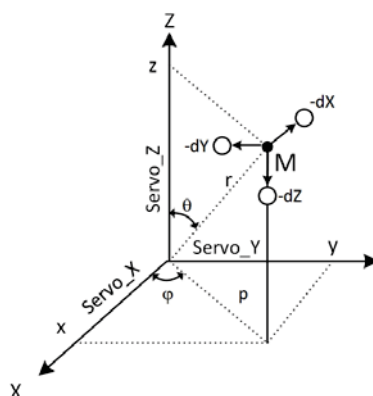


Рисунок 1 – Отклонение реальных координат объекта от заданных

Источник: разработано автором

Например, реальные координаты  $x$ ,  $y$ ,  $z$  объекта могут отличаться от заданных на величину  $dX$ ,  $dY$ ,  $dZ$  и принимать следующие значения:

$$x = (r \sin \theta \cos \varphi) \pm dX, y = (r \sin \theta \sin \varphi) \pm dY, z = (r \cos \theta) \pm dZ. \quad (1)$$

**Анализ исследований и публикаций.** На быстродействие системы управления и синхронность управления пулом сервоприводом влияют:

- временные задержки различного происхождения;
- программная и аппаратная реализация системы управления.

Временные задержки имеют место по двум причинам:

- 1) задержки, зависящие от протокола и скорости передачи данных на стороне задатчика (передатчика);
- 2) задержки, вызванные способом формирования управляющего воздействия для каждого сервопривода в пуле на стороне приемника системы управления.

Протокол передачи данных от передатчика (задатчика) к приемнику системы управления объектом зависит от фирмы-производителя оборудования [1-4]. В общем виде процесс управления пулом сервоприводов представлен на рис. 2.

Процесс управления пулом сервопривода имеет два цикла:

- цикл получения задающего воздействия;
- цикл управления сервоприводами.

В зависимости от протокола время передачи задающего воздействия  $t_3$  может составлять от 22 ms до 55 ms (табл. 1) и определяется выражением:

$$t_3 = B \log_2(1 + S/N), \quad (2)$$

где  $t_3$  – время передачи данных в канале битах в секунду;  
 $B$  – полоса пропускания канала в герцах;  
 $S$  – полная мощность сигнала над полосой пропускания, измеренной в ваттах или вольтах в квадрате;  
 $N$  – полная шумовая мощность над полосой пропускания, измеренной в ваттах или вольтах в квадрате;  
 $S/N$  – отношение сигнала к гауссовскому шуму, выраженное как отношение мощностей.

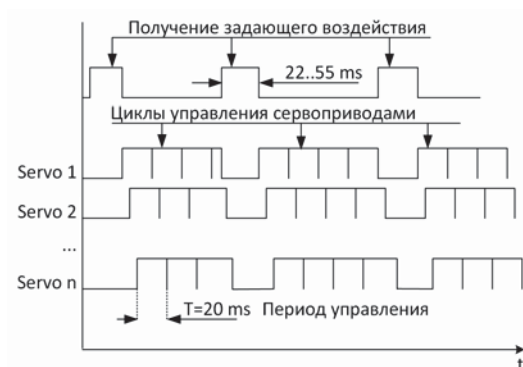


Рисунок 2 – Процесс управления пулом сервоприводов

Источник: разработано автором

В настоящее время широко распространены несколько методов кодирования и передачи данных: Pulse-Position Modulation (PPM) и Pulse-Code Modulation (PCM) [N]. Для метода кодирования PCM единый стандарт отсутствует. Метод кодирования Advanced Frequency Hopping Spread Spectrum (AFHSS) еще не получил широкого распространения [2]. Некоторые фирмы-изготовители не указывают технические подробности своей аппаратуры, поскольку передатчики и приемники работают в паре.

Таблица 1 – Основные параметры протоколов передачи данных

№	Фирма - изготовитель	Кодирование	Каналы	Разрядность, бит	Время передачи, ms
1	Turnigy	PPM	8	9	42
2	FlySky	PPM	8	10	43
3	JR/Graupner	Z-PCM	8	9	44
4	JR/Graupner	S-PCM	8	10	44
5	Simprop	PCM	12	8	55
6	Robbe Futaba	PCM	9	10	28
7	Hitec	AFHSS	8	12	7

Источник: разработано автором

Метод кодирования и передачи данных PPM представлен на рис. 3.



Рисунок 3 – Метод кодирования PPM

Источник: [5]

Из рисунка 3 следует, что метод кодирования PPM имеет ограничение на количество каналов управления, которые могут быть размещены в одном пакете.

Особенностью реализаций всех рассмотренных методов кодирования и передачи данных является передача значений всех каналов управления в одном или нескольких пакетах, даже если изменения значений элемента управления не произошло. Данная особенность связана с реализацией управляющей системы на стороне приемника объекта управления [5,6].

Представленные системы кодирования не обеспечивают синхронного управления сервоприводами.

На рис. 4 представлен стандартный цикл управления сервоприводом.

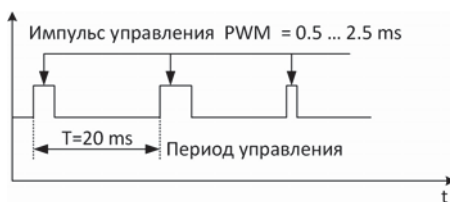


Рисунок 4 – Цикл управления сервоприводом

Источник: разработано автором.

Период цикла управления составляет 20 мс, а длительность управляющего импульса принимает значение в интервале 0,5 мс ... 2,5 мс. Угол поворота вала сервопривода определяется длительностью управляющего импульса в соответствии с выражением:

$$\varphi_{\text{в}} = (d\tau + \tau_0)k, \quad (3)$$

где  $\varphi_{\text{в}}$  – угол поворота вала сервопривода;

$d\tau$  – интервал изменения длительности управляющего импульса;

$\tau_0$  – минимальное значение длительности управляющего импульса (0,5 мс);

$k$  – передаточный коэффициент.

Например, импульс длительностью 1,5 мс устанавливает вал сервопривода в среднее положение, а значения 0,5 мс и 2,5 мс – в крайние положения.

Из рис. 4 следует, что при длительности цикла управления 20 мс пауза между управляющими импульсами в цикле управления составляет от 17,5 до 19,5 мс.

Из табл. 1, рис. 3 и рис. 4 следует, что время передачи задающего воздействия приемнику составляет 28-55 мс, что значительно больше паузы цикла управления сервоприводами.

Это означает, что следующий цикл управления сервоприводами начнется только после приема пакета со значениями управляющих воздействий с задержкой до 70 мс.

Такие задержки несут существенны при управлении низкоскоростными объектами, однако у высокоскоростных объектов (100 км/ч или 27 м/сек) задержки в управлении, например, рулями поворота или рулями высоты снижают управляемость и маневренность объекта на величину  $dX$ ,  $dY$ ,  $dZ$  (1).

**Постановка задачи.** Таким образом, с целью улучшения характеристик системы управления пулом сервоприводов радиоуправляемого объекта необходимо решить следующие задачи:

- уменьшить время передачи задающего воздействия системе управления объекта;
- минимизировать влияние временной задержки цикла приема задающего воздействия на длительность цикла управления сервоприводами;

- обеспечить синхронное управление пулом сервоприводов.

**Изложение основного материала.** Реализация системы управления пулом сервоприводов имеет свои особенности, обусловленные выбором архитектуры системного программного обеспечения контроллера.

Существует три модели создания управляющих программ, каждая из которых имеет свои преимущества и недостатки:

- 1) выполнение программы в среде операционной системы реального времени Real-Time Operating System (RTOS) (рис. 5);
- 2) выполнение программы в асинхронно – событийной среде;
- 3) выполнение программы в бесконечном цикле с прерываниями.

Для выбора оптимальной модели рассмотрим процессы выполнения управляющей программы в перечисленных средах.

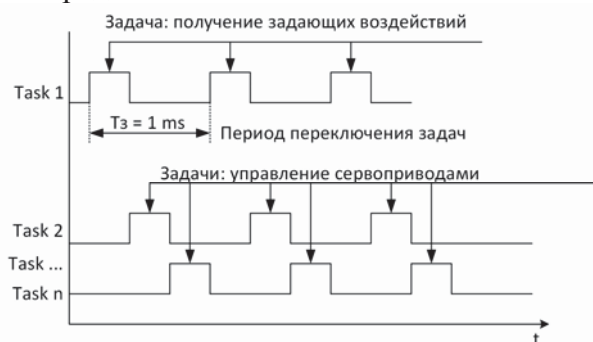


Рисунок 5 – Процесс выполнения управляющей программы в среде RTOS

Источник: разработано автором

RTOS. Из рис. 5 следует, что процесс переключения контекста задач прерывает циклы приема задающего воздействия и циклы управления сервоприводами, что неприемлемо для систем, требующим непрерывного управления [7].

Асинхронно-событийная модель управляющей программы также может прервать выполнение цикла управления при возникновении событий низкого уровня, имеющих системный приоритет над прикладным уровнем.

Бесконечный цикл с прерываниями. Поведение программы полностью контролируется программистом при ее создании.

Таким образом, для создания системы управления пулом сервоприводов целесообразно использовать модель бесконечного цикла с прерываниями. В этом случае, поведение программы будет полностью детерминировано.

Решение поставленных задач возможно на базе простой архитектуры системы управления на стороне приемника, представленной на рис. 6.

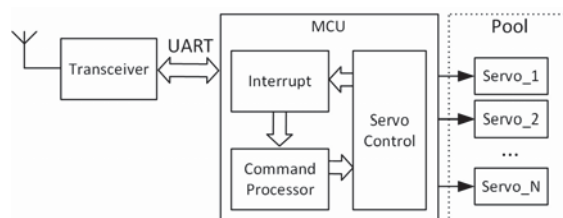


Рисунок 6 – Простая архитектура системы управления на стороне приемника

Источник: разработано автором

Контроллер выполняет следующие функции:

- получает задающее воздействие через последовательный порт UART;

- формує управляюче вплив для кожного сервопривода в пуле;
- здійснює синхронне управління сервоприводами.

Для рішення задачі мінімізації часу, необхідного на отримання задаючого впливу, був розроблений формат пакета, який включає в себе дані пропорційних і дискретних органів управління. В пакеті передаються дані тільки від тих органів управління, в яких відбулися зміни (рис. 7).

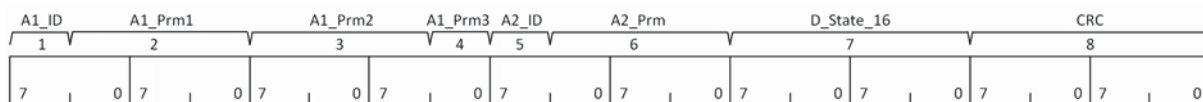


Рисунок 7 – Формат пакета передачі даних

Источник: разработано автором.

Пакет имеет 8 полей длины 10 байт. Назначение полей пакета:

Поля двухканального микшированного пропорционального органа управления:

- 1) A1\_ID: идентификатор объекта на стороне передатчика – 4 бита, адресует 16 микшируемых объектов;
- 2) A1\_Prm\_1: параметр 1 объекта A1\_ID. 12 бит, дискретность – 4096 уровней;
- 3) A1\_Prm\_2: параметр 2 объекта A1\_ID. 12 бит, дискретность – 4096 уровней;
- 4) A1\_Prm\_3: дискретный параметр 3 объекта A1\_ID. 4 бита, 16 значений.

Поля одноканального пропорционального органа управления:

- 5) A2\_ID: идентификатор объекта на стороне передатчика - 4 бита, адресует 16 объектов;
- 6) A2\_Prm: параметр объекта A2\_ID. 12 бит, дискретность – 4096 уровней.

Поля дискретного управления:

- 7) D\_State\_16: состояние 16 объектов, «1» - включено, «0» - выключено.

Поле контрольной суммы:

- 8) CRC – 12 бит.

Таким образом, в пакете передается информация об изменении состояния двух пропорциональных каналов и 16 дискретных объектов на стороне передатчика.

Принципиальное отличие протокола передачи пакета в разработанной системе заключается в следующем: исполняющей системе передается не значение управляющего воздействия, а численное значение состояния элементов управления на стороне передатчика. Численные значения могут быть условными величинами.

Интерпретация и обработка полученных данных осуществляется программой командного процессора управляющего контроллера, которая формирует управляющее воздействие для блока управления пулом сервоприводов.

Время передачи пакета составляет около 11.36 ms при скорости передачи 9600 кбит. При скорости 19200 кбит время передачи пакета сокращается до 6 ms (рис. 8).

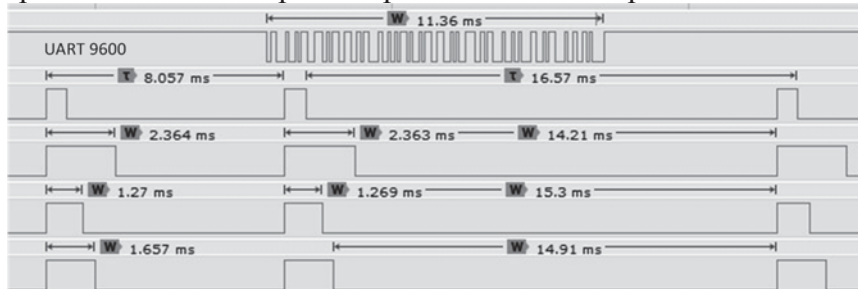


Рисунок 8 – Прием пакета задающих воздействий и синхронное управление пулом сервоприводов

Источник: разработано автором

Експериментально було встановлено, що сервоприводи устойчиво працюють і не піддаються перегреву при довготривалості циклу управління 8 ms. Поєднання з метою зменшення часу реакції об'єкта управління на керуючі впливи цикл управління сервоприводами був скорочений з 20 ms до 8 ms.

З рисунка 8 випливає, що:

1) час, отримання пакета керуючих впливів збільшує час циклу управління до 16,57 ms, що менше паспортного часу 20 ms;

2) імпульси управління сервоприводами формуються синхронно, без затримок.

Таким чином, завдання по зменшенню часових затримок в системі управління пулом сервоприводів вирішені в повному обсязі.

Для перевірки ефективності архітектури керуючої програми, на контролері PIC18F25K22 [8] була реалізована система синхронного управління пулом сервоприводів по 20 каналам з дозволяючою здатністю 12 разрядів.

**Висновки.** Реалізація розробленої системи управління пулом сервоприводів показала ефективність вибраної архітектури для створення програмного забезпечення і апаратної частини для радіокерованих робототехнічних систем.

Вирішені поставлені завдання по зменшенню часу передачі керуючого впливу системі управління об'єкта, мінімізації впливу часової затримки циклу прийому керуючого впливу на довготривалість циклу управління сервоприводами і забезпечено синхронне управління пулом сервоприводів.

В загальному випадку, кількість каналів управління залежить від кількості пінів вводу-випуску конкретного контролера (90 і більше).

Створена система використовується для управління роботом InMoov.

Для подальшого покращення якості характеристик системи синхронного управління пулом сервоприводів необхідно вирішити завдання по компенсації люфтів в виконавчих механізмах і помилок позиціонування, викликаних люфтами і іншими причинами.

Цілесловесно розглянути можливість використання регуляторів для усунення помилок позиціонування і статистичних методів для запобігання їх виникнення.

## Список літератури

1. Hitec. Flash 8. 8 Channel 2.4 GHz Aircraft Computer Radio System. URL : [https://hitecrd.com/images/products/pdf/394\\_Flash8\\_Manual\\_Web.pdf](https://hitecrd.com/images/products/pdf/394_Flash8_Manual_Web.pdf) (дата звернення: 02.10.2019)
2. MULTIPLEX Modellsport GmbH & Co. KG. Micro IPD. URL: <https://www.multiplex-rc.de/Downloads/Multiplex/Archiv/bedienungsanleitung-micro-ipd--de-en-fr-it-es.pdf> (дата звернення: 02.10.2019)
3. Hitec. Flash 8 - 8 Channel 2.4GHz Aircraft Computer Radio. URL : <https://hitecrd.com/products/aircraft-radios-receivers-and-accessories/aircraft-radio-systems/flash-8-8-channel-2.4ghz-aircraft-computer-radio/product> (дата звернення: 11.10.2019)
4. 4PLS. Futaba Digital Proportional System. Instruction Manual. URL : <http://manuals.hobbico.com/fut/4pls-manual.pdf> (дата звернення: 09.10.2019)
5. Васильков В., Пузрин В. Апаратура радіоуправління. Частина 1. Передатчики. URL : [http://www.rcdesign.ru/articles/radio/tx\\_intro](http://www.rcdesign.ru/articles/radio/tx_intro) (дата звернення: 19.10.2019)
6. Peter Rother. PCM or PPM? Possibilities, performance? URL : [http://www.aerodesign.de/peter/2000/PCM/PCM\\_PPM\\_eng.html](http://www.aerodesign.de/peter/2000/PCM/PCM_PPM_eng.html) (дата звернення: .2019)
7. The FreeRTOS™ Kernel. URL : <https://www.freertos.org/> (дата звернення: 09.10.2019)
8. PIC18(L)F2X/4XK22 / 28/40/44-Pin, Low-Power, High-Performance Microcontrollers with XLP Technology / Microchip Technology Inc. URL: [https://www.microchip.com/stellent/groups/picmicro\\_sg/documents/devicedoc/cn547043.pdf](https://www.microchip.com/stellent/groups/picmicro_sg/documents/devicedoc/cn547043.pdf) (дата звернення: .18.10.2019)

## Referencis

1. Hitec. Flash 8. 8 Channel 2.4 GHz Aircraft Computer Radio System : website. *hitecrd.com*. Retrieved from : [https://hitecrd.com/images/products/pdf/394\\_Flash8\\_Manual\\_Web.pdf](https://hitecrd.com/images/products/pdf/394_Flash8_Manual_Web.pdf) [in English].
2. Micro IPD. MULTIPLEX Modellsport GmbH & Co. KG : website. *multiplex-rc.de*. Retrieved from : : <https://www.multiplex-rc.de/Downloads/Multiplex/Archiv/bedienungsanleitung-micro-ipd--de-en-fr-it-es.pdf> [in German].
3. Hitec. Flash 8 - 8 Channel 2.4GHz Aircraft Computer Radio : website. *hitecrd.com*. Retrieved from : <https://hitecrd.com/products/aircraft-radios-receivers-and-accessories/aircraft-radio-systems/flash-8-8-channel-2.4ghz-aircraft-computer-radio/> product [in English].
4. 4PLS. Futaba Digital Proportional System. Instruction Manual : website. *manuals.hobbico.com*. Retrieved from : <http://manuals.hobbico.com/fut/4pls-manual.pdf> [in English].
5. Васильков В., Пузрин В. Аппаратура радиоправления. Часть 1. Передатчики : website. *rcdesign.ru*. Retrieved from : [http://www.rcdesign.ru/articles/radio/tx\\_intro](http://www.rcdesign.ru/articles/radio/tx_intro) [in Russian].
6. Peter Rother. PCM or PPM? Possibilities, performance? : website. *aerodesign.de*. Retrieved from : [http://www.aerodesign.de/peter/2000/PCM/PCM\\_PPM\\_eng.html](http://www.aerodesign.de/peter/2000/PCM/PCM_PPM_eng.html) [in English].
7. The FreeRTOS™ Kernel : website. URL: <https://www.freertos.org/> [in English].
8. PIC18(L)F2X/4XK22 / 28/40/44-Pin, Low-Power, High-Performance Microcontrollers with XLP Technology / Microchip Technology Inc. : website. *microchip.com*. Retrieved from : [https://www.microchip.com/stellent/groups/picmicro\\_sg/documents/devicedoc/cn547043.pdf](https://www.microchip.com/stellent/groups/picmicro_sg/documents/devicedoc/cn547043.pdf) [in English].

**Natalia Smirnova**, Assoc. Prof., PhD tech. sci., **Volodymyr Smirnov**, Assoc. Prof., PhD tech. sci.  
*Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, Ukraine*

### **The Pool of Radio-controlled Robotic Systems Servo Synchronous Control**

The purpose of the article is to improve the characteristics a radio-controlled object servo drive pool control system and solve the problems: reduce the transmission time of the driving influence to the object control system, minimize the influence of the driving action receiving cycle the time delay on the servo drive control cycle duration, servo drive pool provide synchronous control.

The article describes the control system for a radio-controlled object in several coordinates implementation. The influence of time delays when transmitting data to the receiver is considered. It is shown that in such control systems there is no synchronous the servo pool control mode. The necessity a synchronous object's servos control system is substantiated creating. A data transfer protocol has been developed for the executing system. The format for the transmitted packet is developed. The fundamental difference between the packet transfer protocol in the developed system: not the value of the control action is transmitted to the executing system, but the numerical value of the state of the control elements on the transmitter side. The the control program architecture is developed. Reduced response time from the system to set action change in the value. The cycle of receiving the set action has a duration about 11 ms. The servo control cycle has a value from 8 to 17 ms. Implemented pool of servos synchronous control. Implemented object control in several coordinates without delays in starting control cycles. The created system is used to control the InMoov robot.

Implementation of the developed servo pool management system has shown the effectiveness of the selected architecture for creating software and hardware for radio-controlled robotic systems. Solved tasks to reduce the transmission time of the master object exposure control system to minimize the influence of the time delay cycle master receiving the impact on the duration and servo control loop is provided a synchronous servo control pool.

**control system, servo, synchronous control, object, interrupt, RTOS**

*Одержано (Received) 21.11.2019*

*Прорецензовано (Reviewed) 10.12.2019*

*Прийнято до друку (Approved) 23.12.2019*