

НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
«ХАРКІВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ»
МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

Кваліфікаційна наукова
праця на правах рукопису

САКУН ЄВГЕНІЙ ВЛАДИСЛАВОВИЧ

УДК 621.33

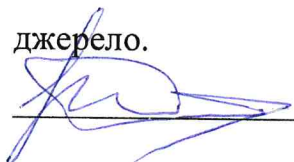
ДИСЕРТАЦІЯ
ЕЛЕКТРОПРИВОД ЕЛЕКТРОМОБІЛЯ З ДВОСТУПЕНЕВОЮ
КОРОБКОЮ ПЕРЕДАЧ

141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка

14 – Електрична інженерія

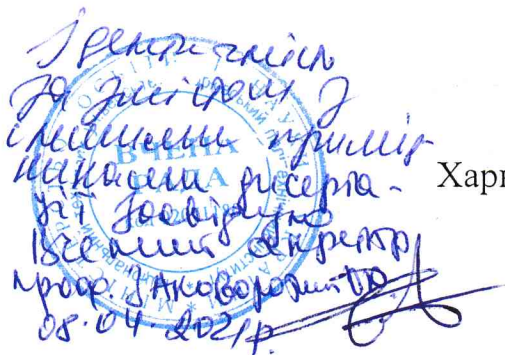
Подається на здобуття наукового ступеня доктора філософії.

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело.

 Є.В. Сакун

Науковий керівник:

Клепиков Володимир Борисович,
доктор технічних наук,
професор


Харків-2021
05.04.2021

АНОТАЦІЯ

Сакун Є.В. Електропривод електромобіля з двоступеневою коробкою передач. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка» (14 – Електрична інженерія) – Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», 2021.

Роботу виконано на кафедрі «Автоматизовані електромеханічні системи» Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут» Міністерства освіти і науки України.

Об'єкт дослідження – системи автоматичного регулювання електропривода електромобіля з двоступеневою коробкою передач, що забезпечують синхронізацію швидкостей та фаз валів.

Предмет дослідження – електромеханічні та електромагнітні процеси в електроприводі електромобіля при перемиканні двоступеневої коробки передач із забезпеченням синхронізації швидкостей валів та їх фаз.

Дисертаційне дослідження присвячене підвищенню енергоефективності електропривода електромобіля за рахунок використання двоступеневої коробки передач, яка є більш простою у порівнянні з традиційною багатоступеневою коробкою передач і тому більш надійною, дешевшою та легшою, а також не потребує механічних синхронізаторів для вирівнювання швидкостей валів. В роботі пропонується, на відміну від відомих технічних рішень, здійснювати не тільки синхронізацію швидкостей валів, а також забезпечувати автоматичну синхронізацію їх фаз, що підкріплено патентом України,

одержаним автором. При цьому підвищується швидкодія перемикання ступенів, усунення удару, покращується плавність руху.

Дисертація пов'язана з актуальною світовою проблемою економії паливних органічних енергетичних ресурсів, особливо важливою для України, яка забезпечена власними ресурсами лише на половину і споживає більшість нафти та газу за рахунок валютних коштів. Як відомо, ця актуальність визначається не тільки необхідністю зберігання органічних ресурсів, які є також сировиною для виготовлення пластмас, гербіцидів, фарб та інш., а й сприяє вирішенню екологічної проблеми, бо вже зараз у великих містах рівень вихлопних газів досягає, а іноді й перевищує, критичний.

У вступі обґрунтовано вибір теми дослідження та актуальність дисертаційної роботи, сформульовано мету і задачі, визначено об'єкт, предмет і методи дослідження, показано зв'язок роботи з науковими темами за планами МОН України, надано наукову новизну та сформульовано практичне значення отриманих результатів.

Перший розділ присвячено огляду літературних джерел за темою дисертаційної роботи, зокрема комплексному аналізу стану автомобільного та електромобільного транспорту, типовим рішенням побудови трансмісій автомобілів та електромобілів. Розглянуті основні компоненти тягового електроприводу електромобілів, зроблено порівняння різних типів джерел електроживлення, напівпровідникових перетворювачів, електродвигунів, та обґрунтовано вибір їх типів для побудови систем керування та моделювання електромагнітних, електромеханічних та механічних процесів, що досліджуються і мають місце при перемиканні ступенів коробки передач з узгодженням швидкостей та фаз валів. З'ясована фізична природа підвищення

енергоєфективності електропривода електромобіля при використанні двоступеневої коробки передач. Сформульовано задачі дослідження.

У другому розділі відмічена можливість спрощення форми кулачків валів муфти перемикачів, а також обґрунтовано функціональну схему електромеханічної системи керування та принципову схему силової частини тягового електропривода з урахуванням створеного на кафедрі електромобіля на базі автомобіля «Ланос».

У третьому розділі побудовано математичну та комп'ютерну моделі електромеханічної системи електромобіля. Математична модель включала чотири групи рівнянь: рівняння механіки, рівняння силових електричних кіл, рівняння електромеханічного перетворення енергії, рівняння керування. Рівняння механіки враховували нелінійність опору руху автомобілю внаслідок наявності аеродинамічної складової, зміну приведенного до швидкості валу електродвигуна моменту інерції при перемикачній ступенів від першої до нейтральної, від нейтральної до другої і навпаки. Враховуючи значну частоту широтно-імпульсної модуляції напівпровідникового перетворювача, електромагнітну інерційність кола якоря електродвигуна та велику механічну інерційність рухомих частин електромобіля, математична модель перетворювача та електромеханічного перетворення енергії електродвигуном представлена по гладкій складовій – а саме аперіодичними ланками першого порядку. Керування електроприводом було обрано мікропроцесорним, що дозволило окрім рішення задач регулювання координат вирішувати необхідні логічні задачі. При існуючій тактовій частоті мікроконтролерів сигнали керування також можна розглядати як аналогові. Запропоновано вирішити проблему узгодження швидкостей валів та їх фаз використанням системи підпорядкованого керування. При цьому в контурі струму синтезовано ПІ-регулятор, а в контурі швидкості П-

регулятор. Узгодження фаз валів забезпечено доповненням вищевказаної системи керування зворотним зв'язком за положенням, значення якого вираховується мікропроцесором за даними енкодерів. Комп'ютерна модель була побудована у пакеті MATLAB/Simulink за структурними схемами усіх складових електромеханічної системи електропривода електромобіля.

У четвертому розділі наведені вхідні дані для комп'ютерного моделювання, які включали параметри коробки передач, електродвигуна, електромобіля, значення коефіцієнтів тертя кочення та аеродинамічного опору. Розглянуто процес розгону електромобіля з послідовним перемиканням коробки передач у наступних випадках: 1 - функціонує тільки система синхронізації швидкостей валів; 2 - функціонує система синхронізації швидкостей валів і фаз при налаштуванні на модульний оптимум; 3 - функціонує система регулювання швидкостей і фаз при зниженому коефіцієнті П-регулятора. Показано, що 2-й варіант викликає коливання фази у перехідному процесі, що усувається при реалізації 3-го варіанта. Перевірка комп'ютерним моделюванням процесу автоматичного узгодження швидкостей валів електродвигуна та вихідного валу коробки передач показала, що швидкодія узгодження швидкостей валів залежить від початкових умов і тим більше, чим більше їх неузгодженість. Як видно із часових діаграм при достатньо значній неузгодженості їх узгодження займає 60-68 мс. Синхронізація фаз починається після узгодження швидкостей і виконується за 28-29 мс. Тобто загальний час синхронізації швидкостей і фаз валів дорівнює 88-97 мс, що суттєво менше нормативних даних для легкових автомобілів (150-200 мс).

У п'ятому розділі розроблено лабораторний стенд для експериментальних досліджень та створена методом 3D-моделювання

двоступенева коробка передач і доведена можливість спрощення кулачкові муфти перемикання передач і шестерні з забезпеченням надійного перемикання ступенів.

Теоретичні та прикладні результати дисертаційної роботи використано у навчальному процесі кафедри «Автоматизовані електромеханічні системи» НТУ «ХП» для навчання студентів спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка» у лекційних курсах «Електрообладнання електромобіля», «Актуальні проблеми сучасного електропривода» та при підготовці лабораторного практикуму.

Результати дисертаційної роботи впроваджено при виконанні теми М3423 МОН України «Дослідження енергоефективного електропривода електромобіля подвійного призначення з підвищеними тяговими та маскувальними характеристиками» в якій розділ «Підвищення енергоефективності електромобіля за рахунок спрощеної коробки передач» виконано автором дисертації особисто.

Ключові слова: електропривод електромобіля, енергоефективність, двоступенева коробка передач, синхронізація швидкостей, синхронізація фаз.

СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗДОБУВАЧА

Наукові праці, в яких опубліковано основні наукові результати дисертації:

1. V. Klepikov and Y. Sakun, "Speed and Angle Synchronisation Control of Two-Speed Electric Vehicle Transmission," 2020 IEEE Problems of Automated Electrodrive. Theory and Practice (PAEP), Kremenchuk, Ukraine, 2020, pp. 1-4, doi: 10.1109/PAEP49887.2020.9240803.

2. Клепиков В. Б., Сақун Е. В., Курочкин Д. А. Управление электроприводом электромобиля с энергоэффективной коробкой передач // Вісник Національного технічного університету "ХПІ". Сер. : Проблеми автоматизованого електропривода. Теорія і практика = Bulletin of the National Technical University "KhPI". Ser. : Problems of automated electrodrive. Theory and practice : зб. наук. пр. – Харків : НТУ "ХПІ", 2019. – № 9 (1334). – С. 94-98.

3. Клепиков В. Б., Сақун Е. В. Программная синхронизация положений валов коробки передач электропривода электромобиля // Вестник Национального технического университета "Харьковский политехнический институт" = Bulletin of National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute" : [сб. науч. тр.]. – Харьков, 2017. – Вып. 27 (1249) : Проблемы автоматизированного электропривода. Теория и практика. Силовая электроника и энергоэффективность = Problems of Automated Electrodrives. Theory and Practice. Power Electronics and Energy Efficiency : темат. вып. – С. 445-448.

4. Клепиков В.Б., Семиков А.В., Сақун Е.В., Ротару А.В., Воробьёв Б.В. Моделирование динамических процессов электромеханической системы электромобиля при буксовании колес. // Modern problems of power engineering and ways of solving them. – 2019 – № 3 (91). – С. 34–42. ISSN 1512-0120

Опубліковані праці апробаційного характеру:

5. Пат. 140567 Україна, МПК В60L15/20 Электропривод электромобиля з коробкою перемикачів передач. Клепиков В.Б., Сақун Е.В., Моїсєєв О.М., Семиков О.В., Курочкин Д.А. (Україна) / заявник та патентовласник Національний технічний університет

“Харківський політехнічний інститут”.- № u201906000; заявл. 30.05.2019.; опубл. 10.03.2020. Бюл. №5.

6. Клепиков В. Б., Сакун Е. В., Курочкин Д. А. Физическое моделирование процессов синхронизации при переключении скоростей в энергоэффективном электроприводе электромобиля с упрощенной коробкой передач. Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я = Information technologies: science, engineering, technology, education, health : наук. вид. : тези доп. 27-ї міжнар. наук.-практ. конф. MicroCAD–2019, [15-17 травня 2019 р.] : у 4 ч. Ч. 2 / ред. Є. І. Сокол. – Харків : НТУ "ХПІ", 2019. 80 с.

7. Клепиков В. Б., Сакун Е. В. Система переключения передач электромобиля ланос. XI Міжнародна науково-практична конференція магістрантів та аспірантів : матеріали конф., 18-21 квітня 2017 р. : у 3 ч. Ч. 2 / ред. Є. І. Сокол ; Нац. техн. ун-т "Харків. політехн. ін-т" [та ін.]. – Харків : НТУ "ХПІ", 2017. – 64 с.

ABSTRACT

Ye. Sakun. Electric drive of an electric vehicle with a two-stage gearbox.
– Qualifying scientific work as a manuscript.

Thesis for the degree of Doctor of Philosophy in specialty 141 "Electrical power engineering, electrical engineering and electromechanics" (14 – Electrical engineering) – National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", 2021.

The work was carried out at the Department of "Automated Electromechanical Systems" of the National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute" of the Ministry of Education and Science of Ukraine.

The object of research is the automatic control system of an electric drive of an electric vehicle with a two-speed gearbox, which ensures synchronization of the speeds and phases of the shafts.

The subject of research is electromechanical and electromagnetic processes in the electric drive of an electric vehicle when switching a two-speed gearbox with the synchronization of the speeds of the shafts and their phases.

The thesis is devoted to improving the energy efficiency of an electric drive of an electric vehicle through the use of a two-speed gearbox, which is simpler than a traditional multistage gearbox and therefore more reliable, cheaper and lighter, and does not require mechanical synchronizers to align the shaft speeds. It is proposed, in contrast to the known technical solutions, not only to synchronize the speeds of the shafts, but also to ensure the automatic synchronization of their phases, which is supported by the patent of Ukraine, obtained by the author. At the same time, the speed of step switching, elimination of shock increases, and the smoothness of movement is improved.

The thesis is connected with the actual world problem of saving fuel organic energy resources, especially important for Ukraine, which is provided with its own resources only by half and consumes most of the oil and gas at the expense of foreign exchange. As it is known, this relevance is determined not only by the need to store organic resources, it is a raw material for the manufacture of plastics, herbicides, paints, etc., but also contributes to the solution of the environmental problem, because now in large cities the level of exhaust gases reaches, and sometimes exceeds critical.

In the introduction, the choice of the research topic and the relevance of the thesis are substantiated, the aim and objectives are formulated, the object, subject and methods of research are determined, the connection of work with scientific topics according to the plans of the Ministry of Education and Science of Ukraine is shown, scientific novelty is provided and the practical significance of the results obtained is formulated.

The first section is devoted to a review of literary sources on the thesis topic, in particular, a comprehensive analysis of the state of automobile electric vehicles, a typical solution for the construction of transmissions for cars and electric vehicles. The main components of the traction electric drive of electric vehicles are considered, a comparison is made of various types of power supplies, semiconductor converters, electric motors and the choice of their types for the construction of control systems and simulation of electromagnetic, electromechanical and mechanical processes is substantiated. The physical nature of the increase in the energy efficiency of the electric drive of an electric vehicle using a two-stage gearbox has been clarified. Research objectives are formulated.

In the second section, the possibility of simplifying the shape of the dogs of the gear and sleeve is noted, as well as the reasonably functional diagram of the electromechanical control system and the schematic diagram of the power

unit of the traction electric drive, taking into account the electric vehicle created at the department on the basis of a "Lanos" car.

In the third section, a mathematical and computer model of the electromechanical system of an electric vehicle is built. The mathematical model included four groups of equations: the equations of mechanics, the equation of power electric circuits, the equations of electromechanical energy conversion, and the control equation. The equations of mechanics took into account the nonlinearity of the aerodynamic resistance component, the change in the moment of inertia converted to the speed of the electric motor shaft when switching the speeds from the first to neutral, from neutral to the second and vice versa. Considering the significant frequency of the pulse-width modulation of the semiconductor converter, the electromagnetic inertia of the armature circuit of the electric motor and the large mechanical inertia of the moving parts of the electric vehicle, the mathematical model of the converter and electromechanical energy conversion by the electric motor is represented by a smooth component – namely, the aperiodic link of the first order. The control of the electric drive was chosen to be microprocessor-based, which made it possible, in addition to solving the problems of coordinate control, to solve the necessary logical tasks. With a high clock frequency of the microcontroller, the control signals can be considered analog. It is proposed to solve the problem of matching the speeds of the shafts and their phases using a cascade control system. A PI controller is synthesized for the current loop, and a P controller is synthesized for the speed loop. The phase alignment of the shafts is ensured by the addition of the above-mentioned position feedback, the value of which is calculated by the microprocessor based on the encoder signals. The computer model was built in the MATLAB/Simulink environment according to the structural diagrams of all components of the electromechanical system of an electric vehicle electric drive.

The fourth section provides input data for computer modeling, which included the parameters of the gearbox, electric motor, electric vehicle, the coefficients of the rolling friction and aerodynamic resistance. The process of acceleration of an electric vehicle with sequential gear shifting is considered in the following cases: 1 – only the shaft speed synchronization system functions; 2 – the system for synchronizing the speeds of shafts and phases is functioning when tuning to the modal optimum; 3 – the speed and phase control system is functioning at a reduced coefficient of the P controller. It is shown that the 2nd option causes phase fluctuations in the transient process, which are avoided with the implementation of the 3rd option. Verification by computer simulation of the process of automatic coordination of the speeds of the shafts of the electric motor and the output shaft of the gearbox showed that the speed of the coordination of the speeds of the shafts depends on the initial conditions and the more, the greater their inconsistency. As can be seen from the timing diagrams, with a sufficiently significant inconsistency, their coordination takes 60-68 ms. Phase synchronization starts after speed matching and is completed in 28-29 ms. That is, the total synchronization of the speeds and phases of the shafts is 88-97 ms, which is significantly less than the standard data for passenger vehicles (150-200 ms).

In the fifth section, a laboratory bench for experimental research is developed and a two-stage gearbox is created using the 3D modeling method, and the possibility of simplifying the dogs of the gearshift clutch and gears is proved to ensure reliable gear shifting.

The theoretical and applied results of the thesis were used in the educational process of the department "Automated electromechanical systems" NTU "KhPI" for training students in the specialty 141 "Electric power, electrical engineering and electromechanics" in the lecture courses "Electrical

equipment of an electric vehicle", "Actual problems of modern electric drive" and in the preparation of laboratory workshop.

The thesis results were introduced during the implementation of the program M3423 of the Ministry of Education and Science of Ukraine "Research of an energy-efficient electric drive of a dual-use electric vehicle with increased traction and camouflage characteristics", in which the section "Improving the energy efficiency of an electric vehicle using a simplified gearbox" was performed by the author of the thesis personally.

Keywords: electric drive of an electric vehicle, energy efficiency, two-stage gearbox, speed synchronization, phase synchronization.

LIST OF APPLICANT PUBLICATIONS

Scientific papers, in which the main scientific results of the thesis are published:

1. V. Klepikov and Y. Sakun, "Speed and Angle Synchronisation Control of Two-Speed Electric Vehicle Transmission," 2020 IEEE Problems of Automated Electrodrive. Theory and Practice (PAEP), Kremenchuk, Ukraine, 2020, pp. 1-4, doi: 10.1109/PAEP49887.2020.9240803.

2. Klepykov V. B., Sakun E. V., Kurochkyn D. A. Upravlenye elektropryvodom elektromobilya s enerhoeffektyvnoi korobkoi peredach // Visnyk Natsionalnoho tekhnichnoho universytetu "KhPI". Ser. : Problemy avtomatyzovanoho elektropryvoda. Teoriia i praktyka = Bulletin of the National Technical University "KhPI". Ser. : Problems of automated electrodrive. Theory and practice : zb. nauk. pr. – Kharkiv : NTU "KhPI", 2019. – № 9 (1334). – S. 94-98.

3. Klepykov V. B., Sakun E. V. Prohrammnaia synkhronyzatsyia polozhenyi valov korobky peredach elektropryvoda elektromobilya // Vestnyk

Natsyonalnoho tekhnicheskoho unyversyteta "Kharkovskiy polytekhnicheskyyi instytut" = Bulletin of National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute" : [zb. nauch. tr.]. – Kharkov, 2017. – Vyp. 27 (1249) : Problemy avtomatyzirovannoho elektropryvoda. Teoryia i praktyka. Sylovaia elektronika i enerhoeffektyvnost = Problems of Automated Electrodrivs. Theory and Practice. Power Electronics and Energy Efficiency : temat. vp. – S. 445-448.

4. Klepykov V.B., Semykov A.V., Sakun E.V., Rotaru A.V., Vorobyev B.V. Modelyrovanye dynamicheskyykh protsessov elektromekhanicheskoi systemy elektromobilya pry buksovanny kole. // Modern problems of power engineering and ways of solving them. – 2019 – № 3 (91). – S. 34–42. ISSN 1512-0120

Published works for approbation purpose and other:

5. Pat. 140567 Ukraina, MPK B60L15/20 Elektropryvod elektromobilya z korobkoiu peremykannia peredach. Klepykov V.B., Sakun Ye.V., Moisieiev O.M., Siemikov O.V., Kurochkin D.A. (Ukraina) / zaiavnyk ta patentovlasnyk Natsionalnyi tekhnichnyi universytet "Kharkivskiy politekhnichnyi instytut".- № u201906000; zaiavl. 30.05.2019.; opubl. 10.03.2020. Biul. №5.

6. Klepykov V. B., Sakun E. V., Kurochkin D. A. Fyzycheskoe modelyrovanye protsessov synkhronyzatsyy pry perekliuchenyy skorostei v enerhoeffektyvnom elektropryvode elektromobilya s uproschennoi korobkoi peredach. Informatsiini tekhnolohii: nauka, tekhnika, tekhnolohiia, osvita, zdorovia = Information technologies: science, engineering, technology, education, health : nauk. vyd. : tezy dop. 27-yi mizhnar. nauk.-prakt. konf. MicroCAD–2019, [15-17 travnia 2019 r.] : u 4 ch. Ch. 2 / red. Ye. I. Sokol. – Kharkiv : NTU "KhPI", 2019. 80 s.

7. Klepykov V. B., Sakun E. V. Systema perekliucheniya peredach elektromobyliya "lanos". XI Mizhnarodna naukovo-praktychna konferentsiia mahistrantiv ta aspirantiv : materialy konf., 18-21 kvitnia 2017 r. : u 3 ch. Ch. 2 / red. Ye. I. Sokol ; Nats. tekhn. un-t "Kharkiv. politekhn. in-t" [ta in.]. – Kharkiv : NTU "KhPI", 2017. – 64 s.

ЗМІСТ

ЗМІСТ	2
ВСТУП	4
1 ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРИ	10
1.1 Стан розвитку і перспективи електромобільного транспорту	10
1.2 Компоненти тягової системи електромобіля	12
1.2.1 Джерело живлення	13
1.2.2 Силовий напівпровідниковий перетворювач	14
1.2.3 Електричний двигун	15
1.2.4 Трансмсія	16
1.3 Використання багатоступеневої коробки передач для підвищення енергоефективності	19
1.4 Постановка задач роботи	26
2 ФУНКЦІОНАЛЬНА ТА ПРИНЦИПОВА СХЕМИ ЕЛЕКТРОПРИВОДА	28
2.1 Обґрунтування функціональної та принципової схеми електропривода електромобіля з двошвидкісною коробкою передач	28
2.2 Система керування, що забезпечує синхронізацію швидкостей та фаз валів засобами електропривода	35
3 ПОБУДОВА МАТЕМАТИЧНОЇ І КОМП'ЮТЕРНОЇ МОДЕЛЕЙ	39
3.1 Математична модель об'єкта керування	39
3.2 Синтез системи автоматичного керування	45

3.3 Комп'ютерна модель електромеханічної системи	50
4 КОМП'ЮТЕРНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ДИНАМІЧНИХ ПРОЦЕСІВ ПРИ ПЕРЕМИКАННІ КОРОБКИ ПЕРЕДАЧ.....	58
4.1 Параметри моделювання	58
4.2 Моделювання електромеханічної системи з синхронізацією швидкостей валів.....	60
4.3 Моделювання електромеханічної системи з синхронізацією швидкостей та фаз валів	66
4.4 Моделювання системи з пониженим значенням коефіцієнта регулятора	72
4.5 Аналіз результатів моделювання.....	75
5 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ І ПРИКЛАДНІ РЕЗУЛЬТАТИ	77
5.1 Розробка експериментального стенда.....	77
5.2 Виготовлення прототипу спрощеної коробки передач.....	91
ВИСНОВКИ.....	93
СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ.....	95