

УДК 613.313

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ СХЕМ ЗАМЕЩЕНИЯ ГЛУБОКОПАЗНЫХ АСИНХРОННЫХ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ НА ОСНОВЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ

В. Ф. Сивокобыленко, С. Н. Ткаченко

Государственное высшее учебное заведение «Донецкий национальный технический университет»
ул. Артема, 58, г. Донецк, 83001, Украина. E-mail: svf@elf.dgtu.donetsk.ua, tsn1981@mail.ru

Работа посвящена дальнейшему совершенствованию методов идентификации параметров эквивалентных схем замещения глубокопазных асинхронных электродвигателей на основе экспериментальных данных. Предложенный метод основан на использовании данных регистрации величин фазных токов и напряжений, скольжения в режимах прямого пуска и работы при различной нагрузке механизма. Учёт вытеснения тока в обмотке ротора для промежуточных скольжений выполнен с помощью гиперболических зависимостей для эквивалентного прямоугольного паза. Для повышения точности расчёта динамических режимов предложено ветвь намагничивания представлять в виде отдельного активно-индуктивного контура, аналогичного контуру ротора.

Ключевые слова: эквивалентная схема замещения, асинхронный электродвигатель, скольжение, идентификация параметров, короткозамкнутый ротор.

ВИЗНАЧЕННЯ ПАРАМЕТРІВ ЗАСТУПНИХ СХЕМ ГЛИБОКОПАЗНИХ АСИНХРОННИХ ЕЛЕКТРОДВИГУНІВ НА ОСНОВІ ДАНИХ ЕКСПЕРИМЕНТІВ

В. Ф. Сивокобыленко, С. М. Ткаченко

Державний вищий навчальний заклад «Донецький національний технічний університет»
вул. Артема, 58, м. Донецьк, 83001, Україна. E-mail: svf@elf.dgtu.donetsk.ua, tsn1981@mail.ru

Робота присвячена подальшому вдосконаленню методів ідентифікації параметрів еквівалентних заступних схем глибокопазних асинхронних електродвигунів на основі даних експериментів. Запропонований метод засновано на використанні даних реєстрації величин фазних струмів та напруг, ковзання в режимах прямого пуску та роботи при різному навантаженні механізму. Урахування витіснення струму в обмотці ротора для проміжних ковзань виконано за допомогою гіперболічних залежностей для еквівалентного прямокутного паза. Для підвищення точності розрахунку динамічних режимів запропоновано гілку намагнічування надавати у вигляді окремого активно-індуктивного контуру, який є аналогічним контуру ротора.

Ключові слова: еквівалентна заступна схема, асинхронний електродвигун, ковзання, ідентифікація параметрів, короткозамкнений ротор.

АКТУАЛЬНОСТЬ РАБОТЫ. В настоящее время асинхронные электродвигатели (АЭД) с короткозамкнутым ротором (КЗР) являются одними из самых распространённых типов электрических машин переменного тока, применяемых в промышленности. Проблема качественного математического моделирования переходных процессов в АЭД напрямую связана с избираемой для модели эквивалентной схемой замещения (ЭСЗ) и методами определения её параметров. Вопросам идентификации параметров схем замещения посвящено достаточно большое количество работ [1–4]. Погрешность большинства существующих методов велика (около 40 %), и поэтому они не пригодны для машин, в обмотке КЗР которых существенно проявляется эффект вытеснения тока [4, 5]. Целью работы является решение задачи совершенствования методов определения параметров ЭСЗ АЭД с КЗР.

МАТЕРИАЛ И РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ. В данной работе для проведения идентификации параметров ЭСЗ будем использовать данные экспериментов прямого пуска и работы при различной нагрузке механизма. Для проведения измерений должны использоваться современные цифровые осциллографы, позволяющие регистрировать мгновенные значения токов и напряжений, а также скольжение. Частота аналого-цифровых преобразователей (АЦП) установки должна составлять не менее 10 кГц на канал. Скольжение возможно измерять с использованием датчиков угла положения ротора (цифровых энкодеров), механически связан-

ных с валом ротора, с помощью не связанных с ротором оптических или магнитных датчиков, а также классическим способом – с помощью стробоскопа [5].

В данной работе будем использовать, как и в [6], базисную одноконтурную ЭСЗ с учётом потерь в стали статора, показанную на рис. 1.

Активное сопротивление (R_s) и индуктивное сопротивление рассеяния ($X_{\sigma s}$) обмотки статора АЭД могут быть измерены на отключенной от сети машине [7]. Для определения $X_{\sigma s}$ можно также использовать опытное значение пускового тока статора (I_p) при $s=1$, а сопротивление R_s обычно в 1–2 раза больше номинального скольжения $s_{НОМ}$ (все величины в работе будем использовать в системе относительных единиц (о.е.)):

$$X_{\sigma s} = (2I_p)^{-1}; R_s = (1 \div 2)s_{НОМ}. \quad (1)$$

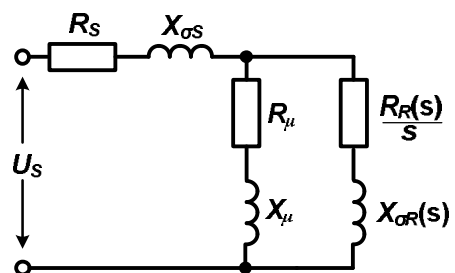


Рисунок 1 – Эквивалентная схема замещения АЭД с учётом потерь в стали статора и явления вытеснения тока в обмотке КЗР

В качестве закона изменения сопротивлений КЗР от скольжения (учёт скин-эффекта) будем использовать выражения (2) и (3):

$$R_R(s) = R_{R0}kr(s); X_{\sigma R}(s) = X_{\sigma R0}kx(s); \quad (2)$$

$$Z_R(s) = \frac{R_R(s)}{s} + jX_{\sigma R}(s), \quad (3)$$

где R_{R0} и $X_{\sigma R0}$ – соответственно активное и индуктивное сопротивления при $s \approx 0$; $kr(s)$, $kx(s)$ – коэффициенты, которые учитывают изменение сопротивлений КЗР из-за вытеснения тока в роторе при скольжении s .

В данной работе будем заменять реальный паз короткозамкнутого ротора АЭД эквивалентным прямоугольным пазом. Коэффициенты $kr(s)$ и $kx(s)$ для прямоугольного паза будем определять по (4):

$$kr(s) = \zeta(s) \frac{\text{sh}2\zeta_R(s) + \sin 2\zeta_R(s)}{\text{ch}2\zeta_R(s) - \cos 2\zeta_R(s)}; \quad (4)$$

$$kx(s) = \frac{3}{2\zeta_X(s)} \frac{\text{sh}2\zeta_X(s) - \sin 2\zeta_X(s)}{\text{ch}2\zeta_X(s) - \cos 2\zeta_X(s)},$$

где $\zeta_R(s)$, $\zeta_X(s)$ – приведенные высоты стержня ротора по активному и индуктивному сопротивлению.

В общем случае приведенная высота определяется по выражению (5):

$$\zeta(s) = h \sqrt{\frac{b \mu_0 \cdot \pi}{a \rho}} f_1 s, \quad (5)$$

где $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ – удельная магнитная проницаемость воздуха, Гн/м; a – ширина паза ротора, м; b – ширина проводника, м; h – высота проводника, м; f_1 – частота питающей сети, Гц; s – скольжение, ρ – удельное сопротивление проводника, Ом·м (для меди ρ_0 составляет $0,0175 \cdot 10^{-6}$ Ом·м при температуре 75°C).

На первой стадии, используя методику, изложенную в [7], вычисляем сопротивления R_{R0} и $X_{\sigma R0}$. Будем считать, что R_{R0} и $X_{\sigma R0}$ равны сопротивлениям обмотки ротора АЭД при номинальном скольжении $s_{НОМ}$ ($R_R^{s_{НОМ}}$, $X_{\sigma R}^{s_{НОМ}}$). Производим регистрацию мгновенных значений фазных токов, напряжений, скольжения для режимов пуска и работы АЭД при двух значениях коэффициента загрузки механизма. На основе экспериментальных данных определяем усреднённые эффективные значения тока (I_s) и напряжения (U_s) статора, потребляемой активной мощности (P_s) и скольжений (s_1 , s_2 и s_3).

Вычисляем входные сопротивления АЭД по (6):

$$R_{BX}(s) = \frac{P}{I_s^2}, X_{\sigma BX}(s) = \sqrt{\left[\frac{U_s}{I_s}\right]^2 - R_{BX}^2(s)}. \quad (6)$$

Сопротивления ветви намагничивания и роторной цепи машины определяем как

$$R_{\mu R}(s) = R_{BX}(s) - R_s, X_{\sigma \mu R}(s) = X_{\sigma BX}(s) - X_{\sigma S}; \quad (7)$$

$$G_{\mu R}(s) = \frac{R_{\mu R}(s)}{R_{\mu R}(s)^2 + X_{\sigma \mu R}(s)^2}; \quad (8)$$

$$B_{\mu R}(s) = \frac{X_{\sigma \mu R}(s)}{R_{\mu R}(s)^2 + X_{\sigma \mu R}(s)^2}.$$

Используя (8), вычисляем разности проводимостей в опытах работы при различной нагрузке механизма (s_1 , s_2):

$$\Delta G_R = G_{\mu R}(s_1) - G_{\mu R}(s_2); \Delta B_R = B_{\mu R}(s_1) - B_{\mu R}(s_2). \quad (9)$$

Данные разности проводимостей также можно выразить через искомые сопротивления обмотки КЗР АЭД по (10):

$$\Delta G_R = \frac{R_R s_1^{-1}}{(R_R s_1^{-1})^2 + (X_{\sigma R})^2} - \frac{R_R s_2^{-1}}{(R_R s_2^{-1})^2 + (X_{\sigma R})^2};$$

$$\Delta B_R = \frac{X_{\sigma R}}{(R_R s_1^{-1})^2 + (X_{\sigma R})^2} - \frac{X_{\sigma R}}{(R_R s_2^{-1})^2 + (X_{\sigma R})^2}.$$

Произведя деление ΔG_R на ΔB_R в (9), (10), получаем квадратное уравнение (11), которое выражено относительно постоянной времени цепи КЗР АЭД $\tau_R = X_{\sigma R}/R_R$, которая неизвестна. Все коэффициенты в этом уравнении известны из экспериментов:

$$s_1 s_2 \tau_R^2 + \frac{\Delta G_R}{\Delta B_R} (s_1 + s_2) \tau_R - 1 = 0, \quad (11)$$

$$\text{где } \frac{\Delta G_R}{\Delta B_R} = \frac{G_{\mu R}(s_1) - G_{\mu R}(s_2)}{B_{\mu R}(s_1) - B_{\mu R}(s_2)}.$$

Постоянную времени τ_R определяем из решения квадратного уравнения (11):

$$\tau_R = -\frac{\Delta G_R}{2\Delta B_R} (s_1^{-1} + s_2^{-1}) + \sqrt{\frac{\Delta G_R^2}{2\Delta B_R^2} (s_1^{-1} + s_2^{-1})^2 + (s_1 s_2)^{-1}}. \quad (12)$$

Далее вычисляем сопротивления КЗР R_{R0} и $X_{\sigma R0}$:

$$R_{R0} = \Delta G_R^{-1} (s_1 (1 + \tau_R^2 s_1^2)^{-1}) - s_2 (1 + \tau_R^2 s_2^2)^{-1};$$

$$X_{\sigma R0} = \Delta B_R^{-1} ((1 + \tau_R^2 s_1^2)^{-1}) - (1 + \tau_R^2 s_2^2)^{-1}. \quad (13)$$

Далее определяем по (14) сопротивления ветви намагничивания R_μ и X_μ :

$$R_\mu = \frac{1}{G_{\mu R}(s_1) - G_R(s_1)}; \quad (14)$$

$$X_\mu = \frac{1}{B_{\mu R}(s_1) - B_R(s_1)}.$$

Для определения коэффициентов $kr(s)$, $kx(s)$ считываем приведенные высоты $\zeta_R(s)$ и $\zeta_X(s)$ из решения системы уравнений (15):

$$\begin{cases} \zeta_R(s) \frac{\text{sh}2\zeta_R(s) + \sin 2\zeta_R(s)}{\text{ch}2\zeta_R(s) - \cos 2\zeta_R(s)} - \frac{R_R^{s=1}}{R_R^{s_{111}}} = 0; \\ \frac{3}{2\zeta_X(s)} \frac{\text{sh}2\zeta_X(s) - \sin 2\zeta_X(s)}{\text{ch}2\zeta_X(s) - \cos 2\zeta_X(s)} - \frac{X_{\sigma R}^{s=1}}{X_{\sigma R}^{s_{111}}} = 0, \end{cases} \quad (15)$$

где $R_{R0} = R_R^{s_{НОМ}}$ и $X_{\sigma R0} = X_{\sigma R}^{s_{НОМ}}$; $R_R^{s=1}$, $X_{\sigma R}^{s=1}$ – сопротивления обмотки КЗР при скольжении $s=1$, определяемые по данным регистрации режима прямого пуска асинхронного электродвигателя как:

$$Z_R^{s=1} = R_R^{s=1} + jX_{\sigma R}^{s=1} = \frac{Z_\mu (Z_{BX}^{s=1} - Z_S)}{Z_\mu - (Z_{BX}^{s=1} - Z_S)}, \quad (16)$$

где $Z_S = R_S + jX_{\sigma S}$ – полное сопротивление обмотки статора; $Z_\mu = R_\mu + jX_\mu$ – полное сопротивление ветви намагничивания; $Z_{BX}^{s=1}$ – полное входное сопротивление АЭД с КЗР при скольжении $s=1$.

Далее, согласно методике, изложенной в [6], с целью повышения точности расчетов динамических режимов, выделяем контур потерь в стали статора ($X_{\mu N}$, R_{FE} , $X_{\sigma FE}$). ЭСЗ машины преобразуется к виду, показанному на рис. 2.

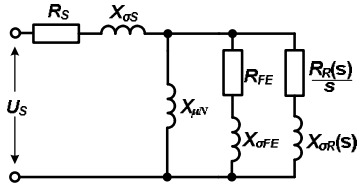


Рисунок 2 – Эквивалентная схема замещения АЭД с контуром потерь в стали статора и учётом явления вытеснения тока в обмотке КЗР

В качестве примера работа предложенного метода идентификации параметров ЭСЗ проверена для АЭД с КЗР типа АВ–630–1000–УХЛ1 мощностью 630 кВт и напряжением статора 6 кВ. Были зафиксированы параметры текущего режима в режимах работы пуска ($s_1 = 1$) и работы при различной нагрузке механизма ($s_2 = 0,01$, $s_3 = 0,003$). Скользяние измерялось оптическим датчиком Autronics® BF4R. На основе данных экспериментов были определены для всех указанных режимов усреднённые значения токов и напряжений статора, потребляемые активные мощности, скользяния и входные сопротивления машины (табл. 1).

Таблица 1 – Расчётно-экспериментальные данные

Скольжение, о.е.	I_s , о.е.	U_s , о.е.	P_s , о.е.	R_{BX} , о.е.	$X_{\sigma BX}$, о.е.
$s_1 = 1$	4,9	1	1,327	0,055	0,196
$s_2 = 0,01$	0,861	1	0,74	0,999	0,592
$s_3 = 0,003$	0,403	1	0,244	1,498	1,976

На основе данных, приведенных в табл. 1, были определены по (1)–(16) параметры ЭСЗ (рис. 2): $R_s = 0,02$ о.е.; $X_{\sigma S} = 0,068$ о.е.; $X_{\mu N} = 3,452$ о.е.; $R_{FE} = 15,379$ о.е.; $X_{\sigma FE} = 26,672$ о.е.; $R_R^{s=1} = 0,038$ о.е.; $R_R^{s_{НОМ}} = 0,012$ о.е.; $X_{\sigma R}^{s=1} = 0,134$ о.е.; $X_{\sigma R}^{s_{НОМ}} = 0,174$ о.е.

Полученные зависимости активного ($R_R(s)$) и индуктивного ($X_{\sigma R}(s)$) сопротивлений обмотки КЗР от скользяния приведены на рис. 3. Зависимости тока статора ($I_s(s)$) и электромагнитного момента ($M(s)$) от скользяния, рассчитанные по выражениям, приведенным в [6], представлены на рис. 4.

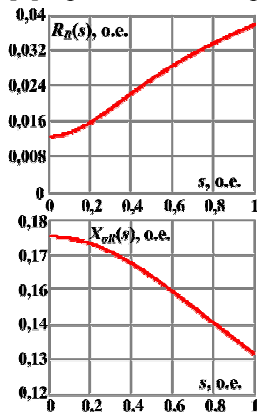


Рисунок 3 – Зависимости активного и индуктивного сопротивлений ротора от скользяния

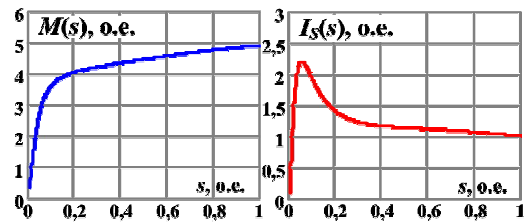


Рисунок 4 – Зависимости тока статора ($I_s(s)$) и электромагнитного момента ($M(s)$) от скользяния

Используя полученные зависимости (рис. 4), определяем ток холостого хода ($I_0 = 0,311$ о.е.) и номинальное скользяние ($s_{НОМ} = 0,012$ о.е.) машины.

Для проверки работоспособности предложенного метода был рассчитан режим прямого пуска и работы под нагрузкой для АЭД типа АВ–630–1000–УХЛ1. Для этой цели использовалась математическая модель, основанная на полных дифференциальных уравнениях [6]. Для моделирования использовались методы математического моделирования АЭД с КЗР, изложенные в [8]. Результаты моделирования представлены на рис. 5 в виде зависимостей тока статора фазы А, угловой частоты вращения ротора и электромагнитного момента асинхронной машины от времени.

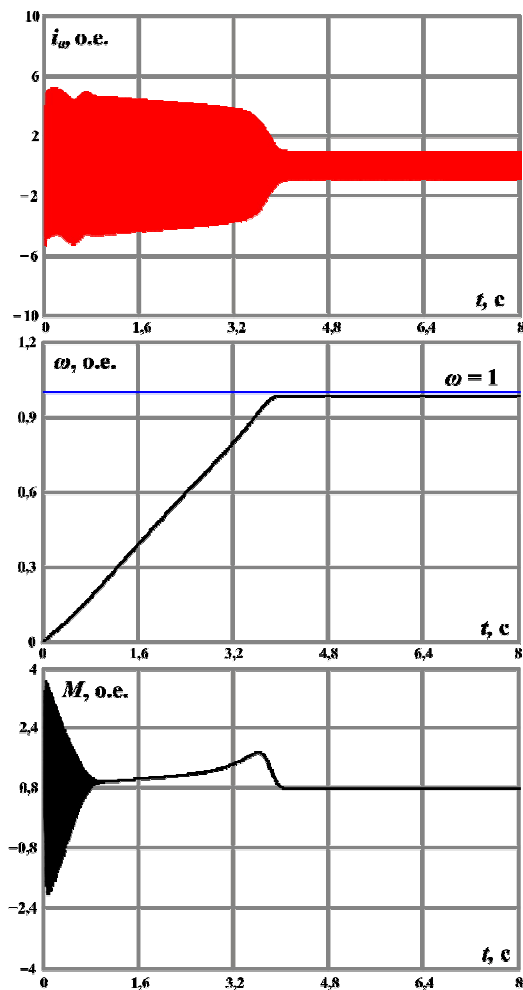


Рисунок 5 – Зависимости мгновенных значений тока статора (фаза А), угловой частоты вращения ротора и электромагнитного момента АЭД от времени

ВЫВОДЫ. В работе предложен усовершенствованный способ определения параметров эквивалентных схем замещения глубокопазных асинхронных электродвигателей на основе экспериментальных данных. Метод более удобен для практической реализации в промышленных условиях.

ЛИТЕРАТУРА

1. Артишевская С.В. Экспериментально-аналитический метод определения параметров асинхронных машин // *Электричество*. – 1999. – № 11. – С. 29–31.
2. Определение параметров трёхфазного асинхронного двигателя из опыта несимметричного питания / Ю.А. Мощинский, И.Л. Осин // *Электричество*. – 1993. – № 1. – С. 39–43.
3. Proco A.B., Keyhani A. Induction motor parameter identification from operating data for electric drive applications / *Digital Avionics Systems Conference, 1999. Proceedings 18th*. – Iss. 2. – PP. 2–6.
4. Сивокобыленко В.Ф., Лебедев В.К. Переходные процессы в системах электроснабжения собственных нужд электростанций: уч. пособие. – Донецк: ДонНТУ, 2002. – 136 с.

5. Вольдек А.И., Попов В.В. Электрические машины. Машины переменного тока: учебник для вузов. – СПб.: Питер, 2007. – 350 с.

6. Математическое моделирование характеристик асинхронных электродвигателей с короткозамкнутым ротором с учётом потерь в стали / В.Ф. Сивокобыленко, С.Н. Ткаченко // *Збірник наукових праць ДВНЗ «Донецький національний технічний університет». Серія «Електротехніка і енергетика»*. – Донецьк, 2007. – Вип. 7 (128). – С. 126–131.

7. Синтез параметров схемы замещения асинхронного электропривода / В.Ф. Сивокобыленко, В.И. Калашников, В.И. Бондаренко // *Збірник наукових праць Дніпродзержинського державного технічного університету «Проблеми автоматизованого електроприводу. Теорія та практика»*. – Дніпродзержинськ, 2007. – С. 167–168.

8. Сивокобыленко В.Ф. Математическое моделирование в электротехнике и энергетике: уч. пособие. – Донецк, РВА ДонНТУ, 2005. – 350 с.

DETERMINATION OF EQUIVALENT SCHEMES OF DEEP-BAR INDUCTION MOTORS PARAMETERS USING EXPERIMENTAL DATA

V. Sivokobylenko, S. Tkachenko

Donetsk National Technical University

ul. Artema, 58, Donetsk, 83001, Ukraine. E-mail: svf@elf.dgtu.donetsk.ua, tsn1981@mail.ru

This work is devoted to development of identification parameters methods of deep-bar induction motors from experimental data. The main feature of prepositional method is using of data registration of phase currents and voltages values, slip value in starting condition, and work conditions with difference load factor. Account of rotor current skin-effect for intermediate slip values is made by using of equivalent square slot hyperbolic dependences. The special active-inductive circuit similar to rotor circuit is marked out for accuracy increasing of dynamic conditions calculations.

Key words: equivalent scheme, induction motor, slip, parameters identification, short-circuited rotor.

REFERENCES

1. Artishevskaya S.V. Experimental-analytics method of induction motors parameters determination. // *Electricity*. – 1999. – № 11. – PP. 29–31. [in Russian]
2. Determination of three-phase induction motors parameters from nonsymmetrical supply experiment / Y.A. Moshinsky, I.L. Osin // *Electricity*. – 1993. – № 1. – PP. 39–43. [in Russian]
3. Sivokobylenko V.F., Lebedev V.K. *Transients in electrical supply systems of electrical power plants auxiliaries: tutorial for institutes of higher education*. – Donetsk, DonNTU, 2002. – 136 p. [in Russian]
4. Proco A.B., Keyhani A. *Induction motor parameter identification from operating data for electric drive applications / Digital Avionics Systems Conference, 1999. Proceedings 18th*. – Iss. 2. – PP. 2–6.
5. *Electrical machines. Alternative current (AC) machines: textbook for institutes of higher education / A.I. Voldek, V.V. Popov*. – SPb: Piter, 2007. – 350 p. [in Russian]

6. Sivokobylenko V.F., Tkachenko S.N. The mathematical simulation of induction motors with squirrel-caged rotor characteristics with core losses allowing // *Proceedings of Donetsk National Technical University. Series «Electrical engineering and energetics»*. – Donetsk, 2007. – Iss. 7 (128). – PP. 126–131. [in Russian]

7. Parameters synthesis of equivalent scheme of induction electrical drive / V.F. Sivokobylenko, V.I. Kalashnikov, V.I. Bondarenko // *Proceedings of Dneprodzergintsk State Technical University. Series «Problems of automation electrical drive. Theory and practice»*. – Dneprodzergintsk, 2007. – PP. 167–168. [in Russian]

8. Sivokobylenko V.F. *Mathematical simulation in electrical engineering and energetics: tutorial for institutes of higher education*. – Donetsk, publishing house of DonNTU, 2005. – 350 p. [in Russian]

Стаття надійшла 3.07.2012.

Рекомендовано до друку
к.т.н., доц. Каліновим А.П.