

Міністерство освіти і науки України  
Донбаська державна машинобудівна академія

Шатель Денис Вікторович

УДК 621.3.07

**РОЗРОБКА ТА ДОСЛІДЖЕННЯ ІМІТАЦІЙНОЇ МОДЕЛІ  
ЕЛЕКТРОПРИВОДУ, ВИКОНАНОГО ЗА СХЕМОЮ «ТИРИСТОРНИЙ  
РЕГУЛЯТОР НАПРУГИ – АСИНХРОННИЙ ДВИГУН»**

Спеціальність 141 – «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»

Автореферат магістерської роботи

Краматорськ 2020

Робота виконана на кафедрі електромеханічних систем автоматизації Донбаської державної машинобудівної академії Міністерства освіти і науки України, м. Краматорськ.

**Науковий керівник:**

доктор технічних наук, професор  
Шеремет Олексій Іванович,  
Донбаська державна машинобудівна  
академія, завідувач кафедри  
«Електромеханічні системи  
автоматизації».

**Рецензент:**

---

---

---

Захист відбудеться «22» грудня 2020 р. о 10:00 на засіданні державної екзаменаційної комісії за спеціальністю 141 – «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка» в Донбаській державній машинобудівній академії на кафедрі ЕСА за адресою: 84313, м. Краматорськ, бульвар Машинобудівників, 39, 2-й корпус, ауд. 2133.

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

На сьогоднішній день електроприводи змінного струму знайшли своє застосування в різних галузях промисловості. Більше половини електроприводів побудовано на основі асинхронних машин, з огляду на їх непогані показники з точки зору ціни і надійності. Асинхронні двигуни (АД) з короткозамкненою обмоткою активно застосовуються на виробництвах, де їх необхідна потужність може досягати від декількох кіловат до мегават.

Має значне розповсюдження асинхронний електропривод з тиристорним регулятором напруги (ТРН-АД). При пуску АД з великою вихідною потужністю виникають значні пускові струми, які негативно впливають як на механічну систему електроприводу, так і на мережу живлення. Прямий пуск без обмежень по струму і моменту призводить до ударів, які можуть привести до порушення функціонування механізму чи машини. Пристрої плавного пуску (ППП) на базі електроприводу ТРН-АД дозволяють уникнути вищезгаданих несприятливих факторів при експлуатації.

Для підвищення ефективності управління як в динаміці, так і в статичі електроприводу ТРН-АД, необхідно забезпечити зворотний зв'язок по кутовій швидкості. Наявність зворотного зв'язку по кутовій швидкості в електроприводі ТРН-АД дозволяє здійснити розгін АД по заздалегідь заданій характеристиці. Необхідний темп розгону електроприводу при навантаженні, що змінюється на валу двигуна і моменту інерції, можливо забезпечити лише за наявності зворотного зв'язку. Зворотній зв'язок по швидкості також дає можливість отримати жорсткі статичні характеристики і підвищити стійкість електроприводу при роботі на низьких швидкостях. Для ряду механізмів встановити датчик швидкості на валу двигуна проблематично. У таких випадках слід кутову швидкість оцінювати з допомогою непрямих методів на основі вимірювання статорних струмів і напруг.

**Зв'язок роботи з планами і темами кафедри.** Робота була виконана на кафедрі електромеханічних систем автоматизації Донбаської державної машинобудівної академії відповідно до тематичного плану держбюджетної науково-дослідної роботи ДР № 0117U007402 «Розробка та дослідження електронних та електромеханічних систем перетворення електричної енергії з використанням сучасних цифрових засобів автоматизації» згідно з напрямком наукової роботи кафедри.

**Актуальність** розробки та дослідження імітаційних моделей електроприводу, виконаного за схемою «тиристорний регулятор напруги – асинхронний двигун» пов'язана з тим, що системи, побудовані на базі ТРН є в декілька разів дешевшими, ніж більш розповсюджені системи на основі частотних перетворювачів.

**Метою роботи** є розробка та дослідження імітаційних моделей електроприводу, виконаного за схемою «тиристорний регулятор напруги.

Для досягнення поставленої мети в роботі вирішувалися наступні задачі:

- проаналізовано особливості застосування і використання електроприводів типу ТРН-АД;
- здійснено техніко-економічне обґрунтування вибору ТРН-АД;
- виконано аналіз існуючих і перспективних варіантів побудови спостерігачів швидкості для електроприводів ТРН-АД;
- обґрунтовано метод, заснований на вимірюванні електрорушійної сили (ЕРС) статора;
- проаналізовано можливості нейромережевого спостерігача швидкості;
- проаналізовано можливості застосування фільтра Калмана;
- розглянуто перспективні методи ідентифікації параметрів схеми заміщення асинхронної машини;
- проаналізовано перспективи застосування електроприводів по схемі ТРН-АД зі спостерігачем кутової швидкості ротора для автоматизації установок з насосним навантаженням;
- розроблена імітаційна модель електропривода ТРН-АД та висунуто ос-новні допущення при математичному моделюванні електроприводу ТРН-АД;
- виконано дослідження імітаційної моделі електроприводу ТРН-АД при роботі на типових механічних навантаженнях;
- розроблено непрямий метод оцінки кутової швидкості обертання ротора асинхронного двигуна в електроприводах, побудованих по схемі ТРН-АД.

**Об'єкт дослідження** – системи керування електроприводами, виконаними за схемою «тиристорний регулятор напруги – асинхронний двигун» (ТРН-АД).

**Предмет дослідження** – моделі спостерігачів швидкості в системі ТРН-АД, синтезовані на основі модифікації спостерігача Люенбергера.

**Методи досліджень.** В роботі використано загальні положення та методи теорії керування, теорії електроприводу, лінійної алгебри, числові методи розв'язання диференційних рівнянь для розрахунків параметрів систем автоматичного керування електроприводами, перевірка ефективності отриманих теоретичних результатів здійснювалася засобами чисельного моделювання в програмному середовищі MATLAB з використанням сучасних засобів автоматизації математичних і інженерних розрахунків.

### **Наукова новизна роботи:**

1. Розроблено імітаційну модель в трифазній системі координат асинхронного електропривода за схемою ТРН-АД, що дозволяє враховувати такі особливості імпульсно-фазового управління, як несинусоїдність струмів і напруг і наявність безструмових пауз.

2. Створено структуру спостерігача кутової швидкості ротора для асинхронного електропривода за схемою ТРН-АД на основі двофазної математичної моделі АД і метод оцінки моменту навантаження, що дозволяє з використанням штатних засобів вимірювання проводити оцінку швидкості у всіх статичних і динамічних режимах електропривода.

3. Покращено класичний підхід при розробці спостерігача швидкості на основі математичного апарату Люенбергера для асинхронного електропривода, який традиційно утруднений тим, що АД є складним нелінійним об'єктом високого порядку.

**Практична цінність роботи.** Проведені дослідження та розробки мають практичну цінність, оскільки за результатами виконаних досліджень в перспективі можна розробити енергоефективну систему «тиристорний регулятор напруги – асинхронний двигун», яка є в декілька разів дешевшою ніж широко розповсюджені частотні перетворювачі.

**Наукова апробація роботи.** Результати досліджень доповідались та обговорювались на наукових конференціях регіонального та міжнародного рівня: IV Всеукраїнська науково-технічна конференція «Сучасні інформаційні технології, засоби автоматизації та електропривод» (16-18 квітня 2020 року), XLII Науково-технічна конференція науково-педагогічних працівників, докторантів, аспірантів, магістрантів і студентів (23-27 листопада 2020 року).

**Публікація результатів наукових досліджень.** Матеріали магістерської роботи опубліковано у двох тезах доповідей регіональних та міжнародних науково-технічних конференцій і одній науковій статті у фаховому виданні «Вісник Донбаської державної машинобудівної академії» (перереєстровано – Наказ МОН України № 326 від 04.04.2018).

**Особистий вклад здобувача.** Усі основні результати магістерської роботи, що виносяться на захист, здобувач отримав особисто. Зокрема, проаналізовано особливості застосування і використання електроприводів типу ТРН-АД; здійснено техніко-економічне обґрунтування вибору ТРН-АД; виконано аналіз існуючих і перспективних варіантів побудови спостерігачів швидкості для електроприводів ТРН-АД; обґрунтовано метод, заснований на вимірюванні електрорушійної сили (ЕРС) статора; проаналізовано можливості нейромережевого спостерігача швидкості; проаналізовано можливості застосування фільтра Калмана; розглянуто перспективні методи

ідентифікації параметрів схеми заміщення асинхронної машини; проаналізовано перспективи застосування електроприводів по схемі ТРН-АД зі спостерігачем кутової швидкості ротора для автоматизації установок з насосним навантаженням; розроблена імітаційна модель електропривода ТРН-АД та висунуто основні допущення при математичному моделюванні електроприводу ТРН-АД; виконано дослідження імітаційної моделі електроприводу ТРН-АД при роботі на типових механічних навантаженнях; розроблено непрямий метод оцінки кутової швидкості обертання ротора асинхронного двигуна в електроприводах, побудованих по схемі ТРН-АД.

**Структура та обсяг магістерської роботи.** Магістерська кваліфікаційна робота складається з вступу, шести розділів, загальних висновків, переліку використаних джерел.

Загальний обсяг магістерської роботи становить 127 сторінок, в тому числі 25 таблиць по тексту, 39 рисунків по тексту, перелік використаних джерел із 71 найменувань на 8 сторінках.

## ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

**Вступ** містить обґрунтування актуальності теми дослідження, її основну мету, наукову новизну і практичну цінність отриманих результатів.

У **першому розділі** здійснено аналіз досліджень, присвячених електромеханічним системам на базі ТРН-АД.

На ринку електроприводів на сьогоднішній день активним попитом користуються асинхронні автоматизовані електроприводи (АЕП) з частотним керуванням і з тиристорним регулятором напруги (ТРН), які знайшли застосування в різних галузях промисловості і є досить потужним інструментом для створення складних систем АЕП.

Електропривод ТРН-АД в основному використовується як пристрій, що забезпечує плавний пуск АД з заданими параметрами (час розгону, допустимий максимальний струм). Такий вид управління добре підходить для підприємств, де є АД великої потужності, що працюють на насосне або вентиляторне навантаження і, де є необхідність в безударному пуску. Оскільки прямий пуск, особливо потужних АД, призводить до просідання напруги і появи ударних струмів в мережі, то необхідно сформувати таку розгінну характеристику приводу, яка б задовольняла заданим показниками.

Силова частина електроприводу ТРН ПТТ-ПП складається з двох зустрічно-паралельно включених тиристорів в кожній фазі. Управління тиристорами здійснюється за допомогою системи імпульсно-фазового управління (СІФУ). Якщо керуючий сигнал на напівпровідникові вентиля не подається, то вони знаходяться в закритому стані. Принцип СІФУ побудований на тому, щоб сформувати імпульси управління з затримкою від точки природного відпирання вентиля. При куті управління рівному нулю, тиристор буде відкриватися в точці природної комутації і на виході ТРН буде сигнал, який відповідає величині напруги живлення. Чим більше величина затримки і, отже, більше кут управління, тим менше значення напруги прикладається до статора.

Існує досить багато різних структур управління для електроприводів ТРН-АД. Прикладом однієї з них може бути система, де пуск здійснюється шляхом подачі спочатку на дві фази статора лінійної напруги, а потім підключається третя фаза при максимумі фазної напруги. Відмінною

особливістю даного типу управління від класичного є подача спочатку напруги тільки на дві фази, а потім, через певний час, підключається третя.

Використання повністю керованих ключів в системі ТРН-АД дозволяє здійснити квазіоптимальний пуск. Суть даного способу пуску полягає в наступному: спочатку на статорні обмотки АД подають напругу рівну величині мережі живлення. Потім, через строго певний проміжок часу, АД переводять в режим динамічного гальмування, після чого знову подають напругу мережі на обмотки статора. Запропонований спосіб пуску електродвигуна в складі електроприводу ТРН-АД дозволяє зменшити динамічні навантаження на механічну систему і підвищити її експлуатаційні характеристики.

Для АД малої потужності, наприклад, в гірській промисловості, які працюють з невеликим навантаженням, добре підходить система з пофазним пуском, а для АЕП великої потужності більш ефективний квазіоптимальний спосіб пуску.

При вивченні ринку попиту і пропозиції АЕП для АД було встановлено, що як в Україні, так і за кордоном на сьогодні використовуються два типи силових асинхронних перетворювачів – це перетворювач частоти (ПЧ) і ТРН.

Раніше застосування даних типів силових перетворювачів для АЕП було обмежено потужністю напівпровідникових вентилів. На даний момент випускаються ПЧ і ТРН від декількох кіловат до мегават.

**У другому розділі** вивчено перспективи застосування електроприводів по схемі ТРН-АД.

Для забезпечення оцінки кутовий швидкості більшості спостерігачів необхідні параметри схеми заміщення АД. Від того наскільки адекватно вони будуть визначені, залежить точність і працездатність спостерігача. На сьогоднішній день методів, що дозволяють здійснювати ідентифікацію параметрів АД, досить багато: адаптивна ідентифікація, метод найменших квадратів, за допомогою нейронних мереж.

Адаптивна ідентифікація параметрів. Даний метод ідентифікації параметрів АД заснований на використанні двофазної математичної моделі в нерухомій системі координат і ряду припущень, зумовлених використанням тягових АД середньої потужності. Відомий також і інший алгоритм визначення параметрів АД, що базується на використанні математичної

моделі електричної машини. Основна ідея даного методу полягає в тому, щоб по вимірним значенням струмів і напруг, попередньо відфільтрованих і перетворених в двофазну систему координат, зробити мінімізацію функціоналу методом найменших квадратів. Відносна похибка оцінки активного опору ротора  $R_r$  становить не більше 36%, а активного опору статора  $R_s$  – не більше 5%.

Фільтр Калмана фактично є градієнтним методом, отже, можливо не тільки потрапляння в локальний мінімум цільової функції з неточно оціненими параметрами, але і взагалі отримати значення, яке буде коливатися щодо якоїсь точки екстремуму. Крім того, необхідно формувати коваріаційні матриці шуму стану і шуму вимірювання. Використання нейронних мереж для ідентифікації параметрів АД ускладнене тим, що необхідно мати цільову функцію при навчанні з «учителем». Завдання ідентифікації за допомогою нейронних мереж розглядають як апроксимацію багатовимірної функції, де необхідно виявити зв'язок між вхідними та вихідними даними. Ряд досліджень показали, що більша частина інформації, за якою визначаються параметри схеми заміщення АД, закладено саме в динаміці.

У **третьому розділі** здійснена розробка та дослідження імітаційної моделі електроприводу, виконаного за схемою ТРН-АД.

Імітаційна модель асинхронного електроприводу була реалізована в трифазній системі координат. Модель дозволяє досліджувати вплив несиметрії напруги, що подається на обмотки АД, обрив фаз статора, а також вплив несинусоїдальності напруги на електромеханічні процеси.

Силова частина електроприводів типу ТРН-АД зазвичай виконується на основі тиристорів або симісторів, які відносяться до класу частково керованих ключів. Для виявлення основних особливостей вище зазначених напівпровідникових приладів в електроприводі ТРН-АД була створена імітаційна модель однієї з фаз АД у вигляді активно-індуктивного навантаження.

Система автоматичного управління (САУ) АЕП складається з задатчика інтенсивності, регулятора швидкості, блоку обмеження. Формування розгінної характеристики здійснюється за допомогою задатчика інтенсивності. Як регулятор швидкості використовується елемент PID

Controller з стандартного набору бібліотеки Simulink. Блок Lockuptable дозволяє реалізувати зворотну залежність між кутом завдання і швидкістю завдання.

При моделюванні асинхронного двигуна були прийняті наступні припущення:

- не враховуються втрати в сталі;
- робоче поле електричної машини вважається плоскопаралельним;
- враховуються тільки перші просторові гармоніки;
- не враховуються насичення шляхів розсіювання та взаємний вплив потоків розсіювання;
- симетричні обмотки статора і ротора;
- лінійні електромагнітні зв'язки;
- не враховується витіснення струму;
- нехтування втратами в сталі і вихровими струмами;
- синусоїдальний розподіл магнітних полів.

За результатами виконаного моделювання зроблено наступні висновки:

1. Для повноцінного моделювання процесів електроприводу ТРН-АД необхідно використовувати імітаційну модель АД в трифазній системі координат з огляду на спотворення вхідних напруг при зміні кута управління.

2. При моделюванні електромеханічних і електромагнітних процесів електроприводу ТРН-АД необхідно враховувати вплив ЕРС статора двигуна і кута управління на форму струмів і напруг.

3. В результаті дослідження на імітаційній моделі асинхронного електроприводу ТРН-АД було визначено, що з введенням зворотного зв'язку за швидкістю підвищується не тільки якість управління, а й поліпшуються пускові режими АД, а саме, зменшуються пускові струми і пусковий момент. Двигун розганяється з заданим темпом розгону, що дозволяє контролювати пуск АД на всій ділянці перехідного процесу.

У **четвертому розділі** здійснена розробка непрямого методу оцінки кутової швидкості обертання ротора асинхронного двигуна в електроприводах, побудованих по схемі ТРН-АД.

На відміну від ДПС НЗ, АД є нелінійною електромеханічною системою, математичний опис якої погано піддається лінеаризації. В електроприводі ТРН-АД додатково присутні проблеми з несинусоїдальності

напруг статора внаслідок імпульсно-фазового управління. Тому для електроприводу ТРН-АД необхідно розробити структуру спостерігача кутової швидкості, яка б враховувала його особливості і в той же час була простою для реалізації.

В основі більшості спостерігачів лежить математична модель об'єкта. Для адекватного використання математичної моделі об'єкта необхідно мати параметри схеми заміщення АД. Ці параметри часто відрізняються від каталожних або не завжди доступні, тому виникає необхідність у розробці методу ідентифікації параметрів схеми заміщення АД на основі експериментальних даних, отриманих з статорних датчиків струму і напруги.

Для підвищення якості динаміки електроприводів за схемою ТРН-АД в перехідних режимах і відпрацювання збурювальних впливів при набиранні навантаження необхідно вводити зворотний зв'язок по швидкості. Найбільш оптимальним варіантом вирішення даної проблеми для електроприводу ТРН-АД є спостерігач швидкості.

В основі більшості розроблених спостерігачів, які оцінюють швидкість АД, лежить математична модель електродвигуна. Вона може бути представлена у вигляді трифазної, двохфазної або орієнтованої в просторі певним чином системи координат.

Для роботи з математичною моделлю АД необхідно знати параметри схеми заміщення, які можуть відрізнятися від реально існуючих. Параметри схеми заміщення АД визначаються таким чином, щоб перехідні процеси за оцінкою швидкості і струму були практично ідентичні даними, отриманим за допомогою датчиків.

У разі ТРН-АД використання стандартного спостерігача Люенбергера як для ДПС НЗ ускладнене тим, що система має більш високий порядок.

У **п'ятому розділі** здійснено техніко-економічне обґрунтування виконаних досліджень. Розраховано оціночні результати вкладу магістра у наукові дослідження по тематиці кваліфікаційної роботи магістра.

У **шостому розділі** наведено результати аналізу з охорони праці, а саме аналіз небезпечних і шкідливих виробничих факторів, заходи щодо забезпечення безпечних умов праці, розглянуто дії при надзвичайних ситуаціях.

## ВИСНОВКИ

1. Для повноцінного моделювання процесів електроприводу ТРН-АД необхідно використовувати імітаційну модель АД в трифазній системі координат, враховуючи можливе спотворення вхідних напруг при зміні кута управління.

2. При моделюванні електромеханічних і електромагнітних процесів електроприводу ТРН-АД необхідно враховувати вплив ЕРС статора двигуна і кута управління на форму струмів і напруг.

3. В результаті дослідження на імітаційній моделі асинхронного електроприводу ТРН-АД було визначено, що з введенням зворотного зв'язку за швидкістю підвищується не тільки якість управління, а й поліпшуються пускові режими АД, а саме, зменшуються пускові струми і пусковий момент. Двигун розганяється із заданим темпом розгону, що дозволяє контролювати пуск АД на всій ділянці перехідного процесу.

4. Класичний підхід при розробці спостерігача швидкості на основі математичного апарату Люенбергера для асинхронного електроприводу утруднений тим, що АД є складним нелінійним об'єктом високого порядку, а спостерігачі Люенбергера розроблялися для лінійних динамічних систем.

5. Розроблену структуру спостерігача рекомендується використовувати для систем ТРН-АД, де відбувається постійно зміна електромагнітного моменту в результаті імпульсно-фазового регулювання напруги живлення, що подається на статорні обмотки.

6. Проведений аналіз показав, що розроблений спостерігач кутової швидкості дозволяє забезпечити сигнал зворотного зв'язку для замкнутого електроприводу за схемою ТРН-АД з прийнятною точністю для вирішення завдань управління. Замкнута система по спостерігачеві на відміну від розімкнутої дозволяє контролювати пуск АД протягом всього перехідного процесу і забезпечує задану інтенсивність розгону.

## АНОТАЦІЯ

Шатель Д.В. Розробка та дослідження імітаційної моделі електроприводу, виконаного за схемою «тиристорний регулятор напруги – асинхронний двигун».

Магістерська робота за спеціальністю 141 – «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка», Донбаська державна машинобудівна академія, Краматорськ, 2020.

Магістерська кваліфікаційна робота складається з вступу, шести розділів, загальних висновків, переліку використаних джерел.

Загальний обсяг магістерської роботи становить 127 сторінок, в тому числі 25 таблиць по тексту, 39 рисунків по тексту, перелік використаних джерел із 71 найменувань на 8 сторінках.

Основні наукові результати магістерської роботи:

1. Розроблено імітаційну модель в трифазній системі координат асинхронного електропривода за схемою «тиристорний регулятор напруги – асинхронний двигун» (ТРН-АД), що дозволяє враховувати такі особливості імпульсно-фазового управління, як несинусоїдність струмів і напруг і наявність безструмових пауз.

2. Створено структуру спостерігача кутової швидкості ротора для асинхронного електроприводу за схемою ТРН-АД на основі двофазної математичної моделі АД і метод оцінки моменту навантаження, що дозволяє з використанням штатних засобів вимірювання проводити оцінку швидкості у всіх статичних і динамічних режимах електропривода.

3. Покращено класичний підхід при розробці спостерігача швидкості на основі математичного апарату Люенбергера для асинхронного електроприводу, який традиційно утруднений тим, що АД є складним нелінійним об'єктом високого порядку.

Ключові слова: ТИРИСТОРНИЙ РЕГУЛЯТОР НАПРУГИ, АСИНХРОННИЙ ДВИГУН, СПОСТЕРІГАЧ ЛЮЕНБЕРГЕРА, АВТОМАТИЗОВАНИЙ ЕЛЕКТРОПРИВОД

## ANNOTATION

Shatel D. V. Research and development of the electric drive simulation model made according to the scheme "thyristor voltage regulator - induction motor".

Master's thesis in specialty 141 – "Electricity, Electrical Engineering and Electromechanics", Donbas State Engineering Academy, Kramatorsk, 2020.

Master's thesis consists of an introduction, six sections, general conclusions, a list of the used sources.

The total volume of the master's work is 127 pages, including 25 tables on the text, 39 figures on the text, the list of the used sources from 71 names on 8 pages.

The main scientific results of the master's thesis:

1. A simulation model has been developed in a three-phase coordinate system of an asynchronous electric drive according to the scheme "thyristor voltage regulator – asynchronous motor" (TVR-AM), which allows to take into account such features of pulse-phase control as non-sinusoidal currents and voltages and currentless pauses.

2. The structure of the rotor angular velocity observer for asynchronous electric drive according to the TVR-AM scheme on the basis of two-phase mathematical model of AM and the method of load moment estimation is created.

3. Improved the classical approach in the development of a speed observer based on the Luenberger's mathematical apparatus for asynchronous electric drive, which is traditionally hampered by the fact that the AM is a complex nonlinear object of high order.

Keywords: THYRISTOR VOLTAGE REGULATOR, ASYNCHRONOUS MOTOR, LUENBERGER'S OBSERVER, AUTOMATED ELECTRIC DRIVE

Шатель Денис Вікторович

**РОЗРОБКА ТА ДОСЛІДЖЕННЯ ІМІТАЦІЙНОЇ МОДЕЛІ  
ЕЛЕКТРОПРИВОДУ, ВИКОНАНОГО ЗА СХЕМОЮ «ТИРИСТОРНИЙ  
РЕГУЛЯТОР НАПРУГИ – АСИНХРОННИЙ ДВИГУН»**

Підп. до друку

Формат 60×90/16

Офсетний друк

Умов. друк. арк. – 0,58

Тираж 1 прим.

Замовлення №

ДДМА, 84313, м. Краматорськ, вул. Академічна, 72