

Д. В. Голуб<sup>1</sup>  
В. В. Біліченко<sup>2</sup>  
В. В. Аулін<sup>1</sup>  
А. С. Замуренко<sup>1</sup>  
Р. П. Кічура<sup>1</sup>  
О. Ю. Ювженко<sup>1</sup>

## ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ТА ПІДВИЩЕННЯ НАДІЙНОСТІ Й ЕФЕКТИВНОСТІ ПРОЦЕСУ АВТОМОБІЛЬНИХ ВАНТАЖНИХ ПЕРЕВЕЗЕНЬ ПОБУДОВОЮ ДЕРЕВА ВІДМОВ СТРУКТУРНИХ ЕЛЕМЕНТІВ ТРАНСПОРТНОЇ СИСТЕМИ

<sup>1</sup>Центральноукраїнський національний технічний університет

<sup>2</sup>Вінницький національний технічний університет

*З'ясовано, що для забезпечення та підвищення надійності транспортних систем необхідна наявність ефективного інструментарію ідентифікації та класифікації їх відмов, кількості за даний період часу функціонування та визначення необхідного числа структурних елементів у формі учасників.*

*Показано, що ефективним інструментарієм ідентифікації і класифікації відмов транспортних систем є побудова дерева їх відмов. Наведено процедуру його побудови та її реалізацію на прикладі транспортної системи перевезення гірської маси для виробництва щабелю. Побудовано дерево відмов цієї системи та розроблено основні напрями її діяльності із забезпечення технічної справності рухомого складу і попередження її відмов. Увагу зосереджено на коефіцієнті технічної готовності автопарку, наведено аналіз різних видів формул для оцінки цього комплексного показника надійності та способи підвищення його рівня. Визначено фактори, що впливають на безвідмовність транспортної системи, та наведено їх перелік.*

*Виявлено, що незалежно від взаєморозташування елементів транспортної системи виникає складність віднесення будь-якого з них до категорії головних. Водночас основним аргументом є те, що відмова будь-якого структурного елемента транспортної системи може призвести до повної її відмови, за винятком паралельно з'єднаних елементів.*

*Зроблено низку припущень щодо формування організаційно-виробничої структури підприємства автоперевізника за функціональними ознаками, коли групування і виділення елементів виробничої системи підприємства здійснюється відповідно до спільності виконуваних функцій. Наведено напрями діяльності підприємств автоперевізників із попередження відмов у транспортній системі, що викликані технічною несправністю рухомого складу.*

*Встановлено, що за наслідками аналізу можливих відмов у транспортній системі проводиться оптимізація кількості елементів структурно-функціональної схеми виробничого процесу перевезень, при розв'язанні задачі якої визначається мінімально необхідне число його учасників. Критерій оптимізації при цьому вибирається з урахуванням вартості процесу перевезення, що містить умовно постійні і змінні витрати безпосередньо на переміщення об'єкта перевезення та термінальну його обробку в дорозі проходження.*

**Ключові слова:** транспортна система, процес перевезень, надійність, ефективність, дерево відмов, структурні елементи, оптимізація.

### Вступ

Відомо, що рівень надійності технічних систем та процесів їх функціонування значною мірою залежить від їх виду і сфери використання [1]. Багато видів технічних систем і технологічних процесів у них, що пов'язані із забезпеченням безпеки життєдіяльності людини, повинні мати максимально можливу надійність.

Порівняно з технічними системами автомобільні транспортні системи складніші через те, що їхніми структурними елементами є групи людей, які взаємодіють через організовані процеси перевезення вантажів і пасажирів [2]. Це потребує необхідності детального розгляду методів аналізу надійності автомобільних транспортних систем та їх показників надійності, які можуть бути використані в контексті транспортних систем. Саме тому особливий інтерес викликають методи, які дають змогу не лише обчислювати кількісні показники надійності та якості роботи автомобільних транспортних систем, але також надають візуальне уявлення про їхню ефективність з погляду надійності [3, 4].

Метою роботи є побудова дерева відмов транспортної системи за її структурно-функціональною схемою надійності з деталізацією функціональних зв'язків структурних елементів і використанням логічних змінних та їх заперечень.

### Аналіз останніх досліджень і публікацій

Забезпечити та підвищити надійність транспортних систем можна за наявності ефективного інструментарію ідентифікації та класифікації їх відмов, кількості за даний період часу функціонування, а також визначення необхідного числа учасників (структурних елементів) [5]. Зазначене реалізується при побудові дерева відмов. Метою цієї побудови є схематичне уявлення послідовності виникнення умов, що призводять до відмови елементів або системи загалом із використанням спеціальних символів. Одержувана при цьому структурна логічна схема відображає функціональні взаємозв'язки елементів системи та враховує взаємну залежність відмов елементів їх груп [6].

Вершиною дерева відмов є кінцева подія – повна відмова системи. Проміжні вершини утворюють ієрархічну структуру з пониженням рівнів у напрямі початкових відмов елементів [7]. Зв'язок рівнів дерева відмов проводиться за допомогою логічних операцій, що відповідають теоретико-множинному опису на мові бінарної логіки [8]. Після того, як дерево відмов побудовано, проводиться його якісний і кількісний аналіз, у результаті якого визначаються можливе число та ймовірність виникнення відмов різних структурних елементів системи, а також ймовірність відмови системи загалом. З погляду методології побудова дерева відмов обумовлює сумісне застосування методів теорії графів і математичної логіки [9].

### Результати дослідження

Побудова дерева відмов передбачає попереднє складання структурно-функціональної схеми (блок-схеми) надійності процесу перевезень, що показує функціональний взаємозв'язок елементів системи. Процедура перетворення блок-схеми в дерево відмов за послідовного і паралельного з'єднання елементів відображена на рисунку 1.

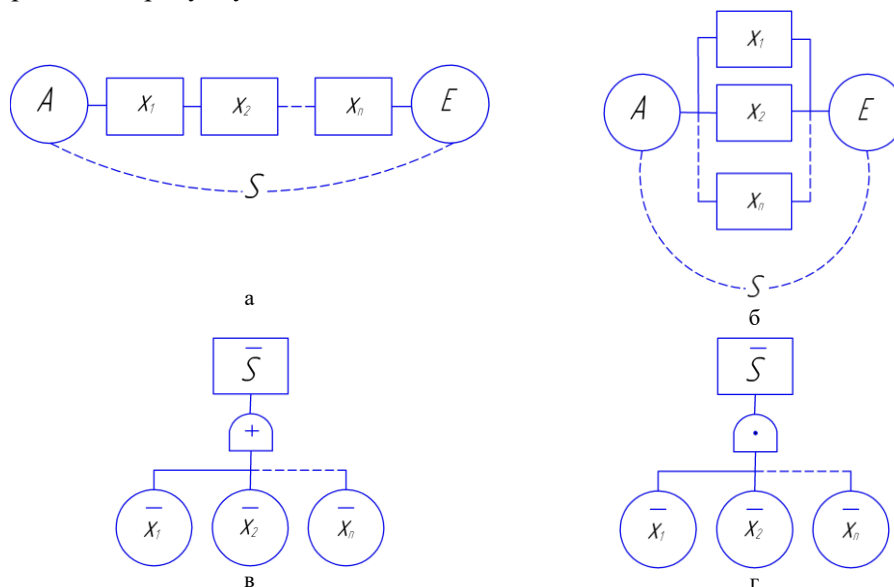


Рис. 1. Блок-схеми транспортних систем (ланцюгів) при послідовному (а) та паралельному (б) з'єднанні структурних елементів та відповідні їх дерева відмов (в, г)

Нагадаємо, що риска зверху над логічною змінною позначає її заперечення. Символи  $A$  і  $E$  в кружечках позначають початкову і кінцеву вершини графа, його вхід і вихід. Знак «•» позначає логічну операцію типу «І», знак «+», – відповідно, операцію «АБО». Якщо через  $X_i$  позначити логічну змінну, відповідну працездатному стану  $i$ -го елемента, а через  $S$  – стан працездатності системи, то зображені на рисунку 1 в, г схеми є деревами відмов. Ці дерева відмов можна продовжити, якщо є інформація про причини зумовлюючих порушення працездатних станів  $X_i$ . За такої умови логічні змінні будуть вершинами першого рівня і відображають первинні відмови.

Послідовність побудови дерева відмов використано на ПАТ «Кіровоградграніт» Кропивницької області при доставці гірської маси для виробництва щебеню. Технологія виробництва щебеню містить

кілька послідовних операцій з виїмки з гірського масиву і навантаження гірської маси в автосамоскиди, її транспортування до дробильно-сортувальної фабрики, розташованої на поверхні кар'єру, з подальшим подрібненням, сортуванням по фракціях і доставкою на склад готової продукції. Виїмка гірської маси в кар'єрі здійснюється екскаватором ЕКГ-5 в автосамоскиди Komatsu HD 785-7. Доставка гірської маси до приймального бункера щоклової дробарки дробильно-сортувальної фабрики проводиться чотирма автосамоскидами на відстань не більше 5 км, величина якої залежить від місця розташування екскаваторного забою.

Технологічна лінія подрібнення складається з послідовно розташованих щоклової і конусної дробарок. Подрібнена гірська порода сортується по фракціях на грохотах. Технологічний процес дробильно-сортувальної фабрики передбачає виробництво щебеню трьох фракцій, повторне подрібнення непросіяної гірської маси, відділення і складування відсіву. Потік щебеню певної фракції прямує на склад готової продукції. Транспортування гірської маси і товарного щебеню в межах дробильно-сортувальної фабрики і подача його на склад здійснюється стрічковими конвеєрами. Зі складу готової продукції товарний щебінь відвантажується в пересувний склад замовника: з бункерів у думпкери і піввагони; ковшовим навантажувачем в автомобілі. Графічно модель перевезення гірської маси для виробництва щебеню можна подати у вигляді структурно-функціональної схеми (рис. 2).

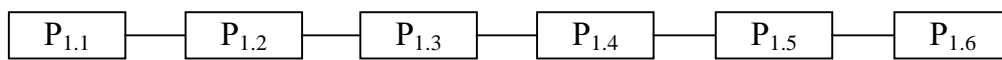


Рис. 2. Структурно-функціональна схема перевезень гірської маси для виробництва щебеню ПАТ «Кіровоградграніт» Кропивницької області та відповідні їхні ймовірності безвідмовної роботи:  $P_{1.1}$  – буро-вибухові роботи;  $P_{1.2}$  – виїмально-навантажувальні роботи;  $P_{1.3}$  – транспортування до дробильно-сортувальної фабрики;  $P_{1.4}$  – подрібнення та сортування;  $P_{1.5}$  – відвантаження замовнику;  $P_{1.6}$  – перевезення вантажу

Можна бачити, що безпосередньо транспортування займає тільки частину технології виробництва щебеню і є елементом виробничої системи цього підприємства. Зазначимо, що всі елементи, представлені на схемі, взаємозв'язані і рівноцінні з позиції надійності. Водночас в економічному аспекті структурні елементи технологічних процесів нерівнозначні за експлуатаційними витратами. Найбільш витратними технологічними процесами є транспортування та екскавація гірської маси. Зауважимо, що практично всі родовища будівельного щебеню розробляються відкритим способом із використанням автомобільного транспорту.

Оскільки на рисунку 2 елементи виробничої системи функціонально сполучені один з одним послідовно, то відмова в роботі будь-якого з елементів може стати причиною повної зупинки виробництва, тобто повної відмови системи. В цій ситуації будуть наявні так звані первинні відмови. На безвідмовність транспортної системи впливають кілька факторів: безвідмовна робота суміжних за технологічним ланцюгом елементів; задовільні для роботи автомобільного транспорту погодні умови; стан кар'єрних доріг і підготовленість забоїв; працездатність рухомого складу.

Ймовірність відмови такої транспортної системи внаслідок того або іншого фактора різна. Якщо прийняти за обмеження, що відмови суміжних елементів є незалежними подіями, то з урахуванням одночасної роботи на лінії трьох автосамоскидів блок-схема і дерево відмов транспортної системи матиме такий вигляд (рис. 3).

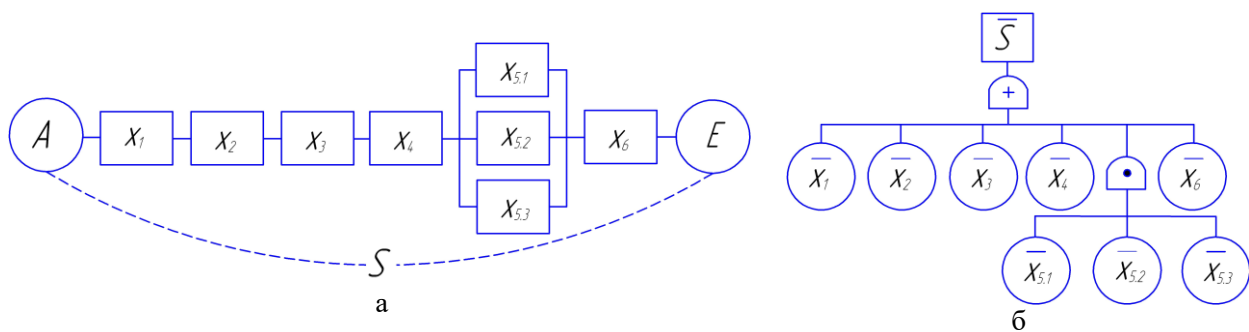


Рис. 3 Блок-схема (а) і дерево відмов (б) транспортної системи перевезення гірської маси для виробництва щебеню:  $x_1$  – працездатний стан екскаватора;  $x_2$  – підготовленість забою;  $x_3$  – задовільний стан автомобільної дороги;  $x_4$  – задовільні погодні умови;  $x_{5.1}$ ,  $x_{5.2}$ ,  $x_{5.3}$  – працездатний стан відповідно першого, другого та третього автосамосвалів;  $x_6$  – працездатний стан бункера для приймання щоклової дробарки;  $\bar{x}_1$ ,  $\bar{x}_2$ ,  $\bar{x}_3$ ,  $\bar{x}_4$ ,  $\bar{x}_{5.1}$ ,  $\bar{x}_{5.2}$ ,  $\bar{x}_{5.3}$ ,  $\bar{x}_6$  – заперечення відповідних логічних змінних

Заперечення логічних змінних  $\bar{x}_i$  є вершинами першого рівня дерева відмов транспортної системи, оскільки вони є первинними відмовами. Більш детальний аналіз надійності припускає подальшу побудову дерева відмов із зазначенням вершин 2-го, 3-го,  $n$ -го рівнів. Для цього необхідно визначити можливі причини відмови елементів, суміжних за технологічним ланцюгом із транспортуванням гірської маси. Ними є екскаватор, автодорога і приймальний бункер шокової дробарки. До цього переліку не була віднесена логічна змінна  $\bar{x}_4$ , оскільки погодні умови є некерованим фактором, який при розрахунку надійності враховувати необхідно, але можливість управління ним відсутня.

Можливими причинами втрати працездатності екскаваторів або причинами заперечення логічної змінної  $\bar{x}_1$  є: відсутність підготовленого до виїмки фронту робіт (не проведені буропідривні роботи, внаслідок чого гірський масив нерозпушений), відсутність силової електроенергії, відсутність на робочому місці машиністів екскаваторів, технічна несправність екскаваторів. Перераховані причини є відмовами елементів технології виробництва щебеню, що не є суміжними із транспортуванням гірської маси, але такими, які істотно впливають на надійність транспортної системи. Через це деталізація заперечення логічної змінної  $\bar{x}_1$  призведе до збільшення протяжності цієї гілки дерева відмов.

Підготовленість екскаваторного забою визначається наявністю бульдозерів для його підчищення від негабаритів. Оскільки ніяких логічних операцій типу «І» і «АБО» проводити не вимагається, можна прийняти відсутність бульдозера, а також втрату його працездатного стану первинною відмовою. Задовільний для роботи автомобільного транспорту стан кар'єрної автодороги забезпечується: підсипкою відсівом у період ожеледі; зволоженням у літній посушливий період; правильним плануванням із дотриманням нормативної величини подовжніх і поперечних ухилів траси; відсутністю на проїжджій частині крупних шматків породи, що вивалилися з кузова автосамоскидів під час руху. З урахуванням вказаних причин заперечення логічних змінних  $\bar{x}_1$ ,  $\bar{x}_3$  дерево відмов транспортної системи набуває вигляду (рис. 4):

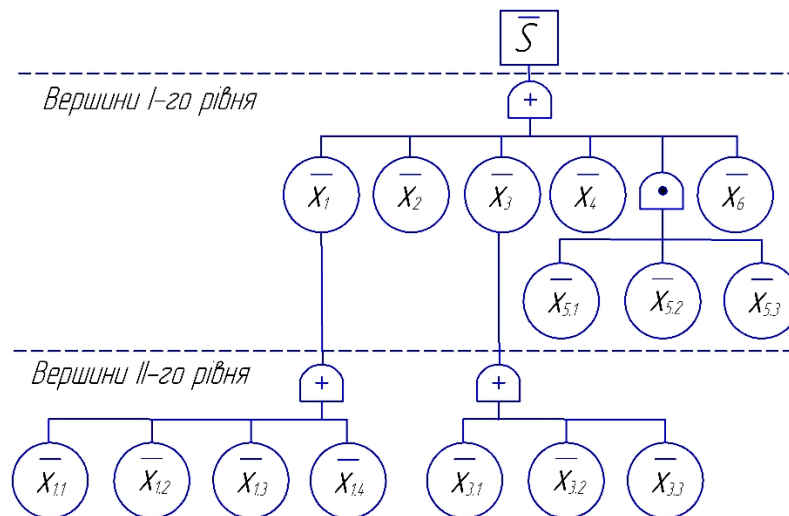


Рис. 4. Дерево відмов транспортної системи перевезення гірської маси для виробництва щебеню з деталізацією заперечення логічних змінних:  $\bar{x}_1$ ,  $\bar{x}_3$  – планування траси;  $\bar{x}_{3.3}$  – відсутність великих решток породи на поверхні автодороги;  $\bar{x}_{1.1}$  – підготовленість гірського масиву до виїмки;  $\bar{x}_{1.2}$  – наявність силової електроенергії;  $\bar{x}_{1.3}$  – наявність на робочому місці водія екскаватора;  $\bar{x}_{1.4}$  – технічний справний стан екскаватора;  $\bar{x}_{3.1}$  – підсипка відсівом у період ожеледиці або поливання водою у спекотний літній період;  $\bar{x}_{3.2}$  – дотримання нормативів

Працездатний стан приймального бункера шокової дробарки (другий суміжний із транспортуванням гірської маси елемент) забезпечується станом працездатності устаткування дробильно-сортувальної фабрики. Комплекс дробильно-сортувального устаткування має таку послідовність: дві дробарки (шокова і конусна), чотири гуркоти, конвеєрні лінії з плужковими скидачами, бункерна естакада (три бункери за числом фракцій) для відвантаження товарного щебеню замовнику в залізничний пересувний склад і чотири штабелі. Три із чотирьох штабелів (за числом фракцій) призначені для складування товарного щебеню і його відвантаження замовнику в

автомобільний пересувний склад ковшовим навантажувачем. Один штабель призначений для складування відсіву.

Бункерна естакада і штабелі можуть працювати незалежно один від одного, тобто з погляду надійності транспортної системи ці два блоки сполучено паралельно. Таке з'єднання дає змогу у разі відмови бункера певної фракції, наприклад, при його переповнюванні, перенаправити потік щебеню у штабель тієї ж фракції. Внаслідок цього блок-схема досліджуваної транспортної системи істотно збільшиться (рис. 5).

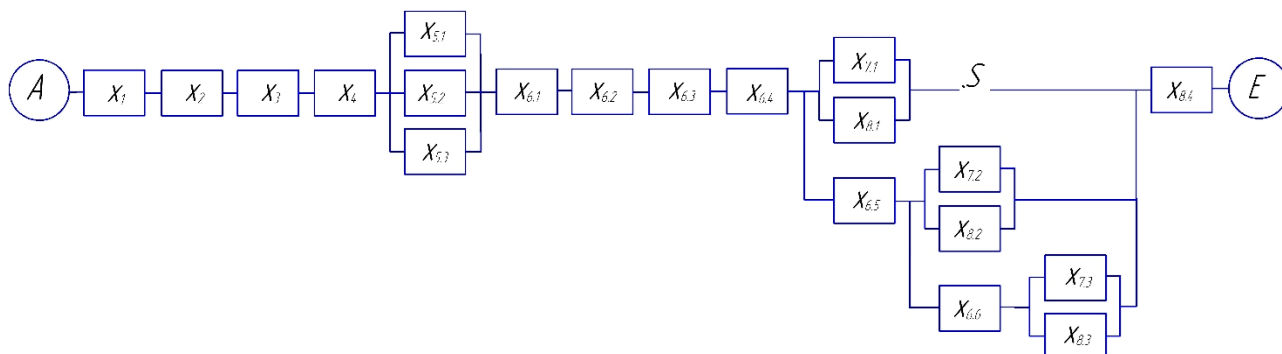


Рис. 5. Блок-схема транспортної системи перевезення гірської маси для виробництва щебеню з деталізацією функціональних зв'язків елементів дробильно-сортувальної фабрики:  $x_{6.1}$  – працездатний стан щоклової дробарки;  $x_{6.2}$  – працездатний стан конусної дробарки;  $x_{6.3}, x_{6.4}, x_{6.5}, x_{6.6}$  – працездатний стан відповідно 1–4 грохотів;  $x_{7.1}, x_{7.2}, x_{7.3}$  – працездатний стан відповідно 1–3 бункерів;  $x_{8.1}, x_{8.2}, x_{8.3}$  – працездатний стан відповідно 1–3 штабелів для складування щебеню;  $x_{8.4}$  – працездатний штабель з відсівом

Можна бачити, що переважна частина структурно-функціональних елементів блок-схеми має послідовне з'єднання. Саме тому вершини першого і другого рівня дерева відмов мають велику кількість логічних операцій типу «АБО», що украй негативно позначається на надійності транспортної системи. Загальний вид дерева відмов представлено на рисунку 6.

Аналізуючи представлене дерево відмов, можна відзначити, що незалежно від взаєморозташування елементів транспортної системи складно віднести будь-який із них до категорії головних. Основним аргументом при цьому є те, що відмова будь-якого структурного елементу може призвести до повної відмови транспортної системи, за винятком паралельно з'єднаних елементів. Отже, надійність транспортної системи істотно залежить від надійності будь-якого структурного елементу та їх функціональних взаємозв'язків.

Їх надійність визначається кількістю логічних змінних, заперечення яких призводить до його відмови. Зазначимо, що подовження гілки дерева відмов, вершина якої характеризує заперечення працездатності елементу, а також превалювання в межах цієї гілки логічних операцій типу «або», негативно позначається на надійності елемента. Побудова дерева відмов транспортної системи є своєрідним методом експрес-аналізу її надійності, виявленням критичних або «слабких» з погляду надійності елементів без використання яких-небудь кількісних методів. Максимальна довжина гілки дерева відмов транспортної системи припадає на заперечення логічної змінної  $x_6$ . За такої умови говорити про низьку надійність роботи дробильно-сортувальної фабрики неможна, оскільки велика частина її структурних елементів функціонує один з одним паралельно. Співвідношення кількості логічних операцій типу «І» в цій гілці у два рази більше кількості операцій логічної диз'юнкції. Крім того, дерево відмов транспортної системи можна продовжити, деталізуючи заперечення логічних змінних  $x_{5.1} \dots x_{5.3}$ , що характеризують працездатний стан автосамоскидів.

Втрата працездатного стану автосамоскидами відрізняється від інших відмов тим, що фактори, які визначають їх виникнення, повністю є керовані перевізником. Зазначимо, що будь-який процес, не тільки транспортний, не функціонуватиме, якщо він не забезпечений матеріально-технічними і трудовими ресурсами. У технологіях роботи автомобільного транспорту задіяні технічні (пересувний склад, технологічне устаткування), трудові (водії, машиністи спецтехніки, авторемонтники та інший операційний персонал) і матеріальні (сировина, матеріали і напівфабрикати, енергоносії, запасні частини, автошини та ін.) ресурси. Незабезпеченість процесу перевезень виробничими ресурсами зумовлює велику кількість відмов. Тому до факторів втрати працездатності РС насамперед потрібно віднести їх технічну несправність, недостатню кількість дизельного палива або його відсутність у

паливному баку автосамоскида, відсутність на робочому місці водія або присутність водія, що не має допуску і наряду-завдання на робочу зміну. Наявність будь-якого з перерахованих факторів призводить до виникнення відмови транспортної системи. Це так звана часткова відмова системи, оскільки схемою перевезення гірської маси передбачено експлуатацію автосамоскидів, і одночасна втрата працездатності всіх автомобілів має малу ймовірність.

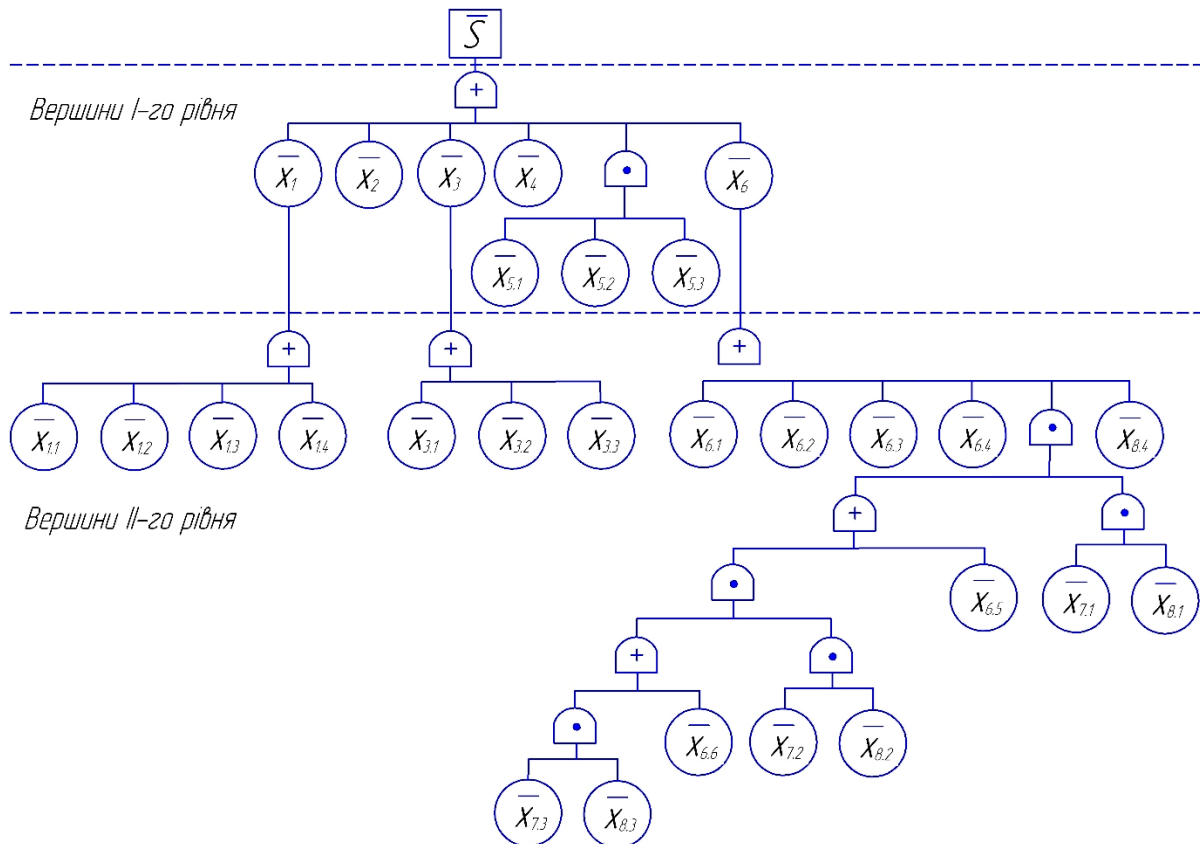


Рис. 6. Дерево відмов транспортної системи перевезення гірської маси для виробництва щебеню з деталізацією заперечення логічної змінної  $\bar{X}_6$

Зниження ймовірності втрати працездатного стану РС забезпечується організаційно-виробничою структурою перевізника. Організаційно-виробнича структура є встановленою і зафіксованою у Статуті підприємства автоперевізника схемою взаємодії і координації технологічних ланцюгів і персоналу. До неї належать:

- склад і взаємозв'язок відділів і підрозділів, що забезпечують організацію перевезень, матеріально-технічне постачання;
- наймання водіїв, ремонтного персоналу і робочих інших категорій;
- технічна готовність рухомого складу на лінії, відновлення його працездатності та інші роботи.

На підприємстві автоперевізника організаційно-виробнича структура зазвичай формується за функціональними ознаками, коли групування і виділення елементів виробничої системи підприємства здійснюється відповідно до спільності виконуваних функцій [10]. Назва, спеціалізація і розмір підрозділів залежать від величини підприємства автоперевізника, роду виконуваного ним процесу перевезень, прийнятої системи технічних дій на пересувний склад, ступеня диверсифікації виробництва та інших чинників.

Найскладнішим для перевізника є забезпечення технічної справності РС. Незалежно від чисельності і структури автопарку, наявності і розміру виробничо-технічної бази у перевізника в його організаційно-виробничій структурі виділяються основні напрями діяльності:

- роботи з технічного обслуговування РС;
- постові і дільничні роботи з поточного ремонту рухомого складу; роботи із забезпечення і підготовки виробництва;
- роботи, пов'язані з утриманням, реконструкцією і технічним переозброєнням;
- роботи із забезпечення незнижуваного запасу агрегатів, вузлів і деталей, інших матеріальних цінностей на проміжному і центральному складах, необхідних для роботи транспортної системи;

- розвиток, оперативне управління, облік і аналіз виробничої діяльності.

Перераховані напрями діяльності підприємств автоперевізників із забезпечення технічно справного стану РС і попередження відмов транспортної системи представлені в таблиці 1.

Таблиця 1

**Напрями діяльності підприємств автоперевізників із попередження відмов у транспортній системі, викликаних технічною несправністю рухомого складу**

Найменування напрямку	Сутність напрямку
Підтримання технічно справного стану РС	Виконання операцій діагностики ТЗ та всіх видів їх технічного обслуговування
Постачання	Організація складського господарства, матеріально-технічне постачання
Технічна підготовка виробництва	Підготовка виробництва, мийка, дефектування оборотних вузлів, перегін автомобілів у ремонтній зоні, обслуговування та ремонт технологічного обладнання, приміщень та споруд
Усунення технічних несправностей РС	Виконання постових та дільничних робіт поточного і капітального ремонту РС

Порушення під час виконання робіт зумовлюють технічну несправність автомобілів і є відмовами у транспортній системі третього рівня, відповідно до ієрархії дерева відмов. Причиною таких відмов, як і у випадку із запереченням логічних змінних  $x_{5,1} \dots x_{5,3}$ , є відсутність або недостатня забезпеченість виконання робіт матеріально-технічними і трудовими ресурсами.

Зазначимо, що починаючи з третього рівня, вершини дерева відмов досліджуваної транспортної системи чергуються. Чергування відбувається в послідовності: відмова у виконанні робіт (вершина третього рівня) виникає внаслідок відмов у забезпеченні виробничими ресурсами цих робіт (вершини четвертого рівня). Ресурсне забезпечення зі свого боку вимагає проведення робіт, які також необхідно забезпечити матеріально-технічними і трудовими ресурсами.

Процес забезпечення відбувається від вершини до вершини у міру зростання рівнів дерева відмов і ступеня його деталізації. За такої умови дерево відмов не є нескінченним. Підсумковим елементом гілки буде вид роботи або ресурсу, надані автоперевізннику лише на умовах аутсорсингу. Ним може бути також подія, що відбулася за обставин, які не залежать від перевізника, наприклад, подія  $x_4$ . Загальний вигляд дерева відмов з деталізацією причин втрати працездатності рухомого складу представлено на рисунку 7.

Послідовність побудови гілок дерева відмов є універсальною для деталізації будь-якої вершини більш ніж третього рівня. Аналогічно можна деталізувати відмови, пов'язані, наприклад, із відсутністю на робочому місці машиніста екскаватора або втратою працездатності якої-небудь технологічної ланки дробильно-сортувальної фабрики. За такої умови будь-які вершини, що формують дерево відмов, є відмовами транспортної системи, оскільки вони безпосередньо або опосередковано впливають на надійність роботи автоперевізника.

Підсумкові елементи дерева відмов (вершини  $n$ -го рівня) також є відмовами транспортної системи. Проте причинами виникнення таких відмов будуть не відхилення в роботі елементів транспортної системи, а збої в роботі підприємств-підрядчиків, що взаємодіють із перевізником на умовах аутсорсингу, або відмови, викликані обставинами, незалежними від перевізника: збої в електропостачанні, затримка з поставкою запасних частин, неякісне дизельне паливо для автосамоскидів, незадовільні погодні умови. Підсумкові елементи дерева відмов цієї транспортної системи можна піддати подальшій деталізації з прогнозуванням можливих подій і варіантів поведінки підрядчика у разі виникнення в його роботі певних збоїв. Але така деталізація до побудови дерева відмов не матиме стосунку, оскільки вона заснована на побудові так званого «дерева подій».

Побудова дерева відмов дає змогу просто й ефективно ідентифікувати можливі відмови транспортної системи, провести їх класифікацію і розрахунок кількості в одиницю часу. Це своєрідний метод експрес-аналізу надійності, виявлення в транспортній системі критичних або «слабких» з погляду надійності елементів без використання кількісних методів. Проте, знаючи ймовірність і причини виникнення тієї або іншої відмови, можна кількісно оцінити надійність транспортної системи. Отже, дерево відмов виконує подвійну роль: є методом аналізу надійності і є способом структуризації транспортно-технологічної схеми перевезень вантажів і пасажирів.

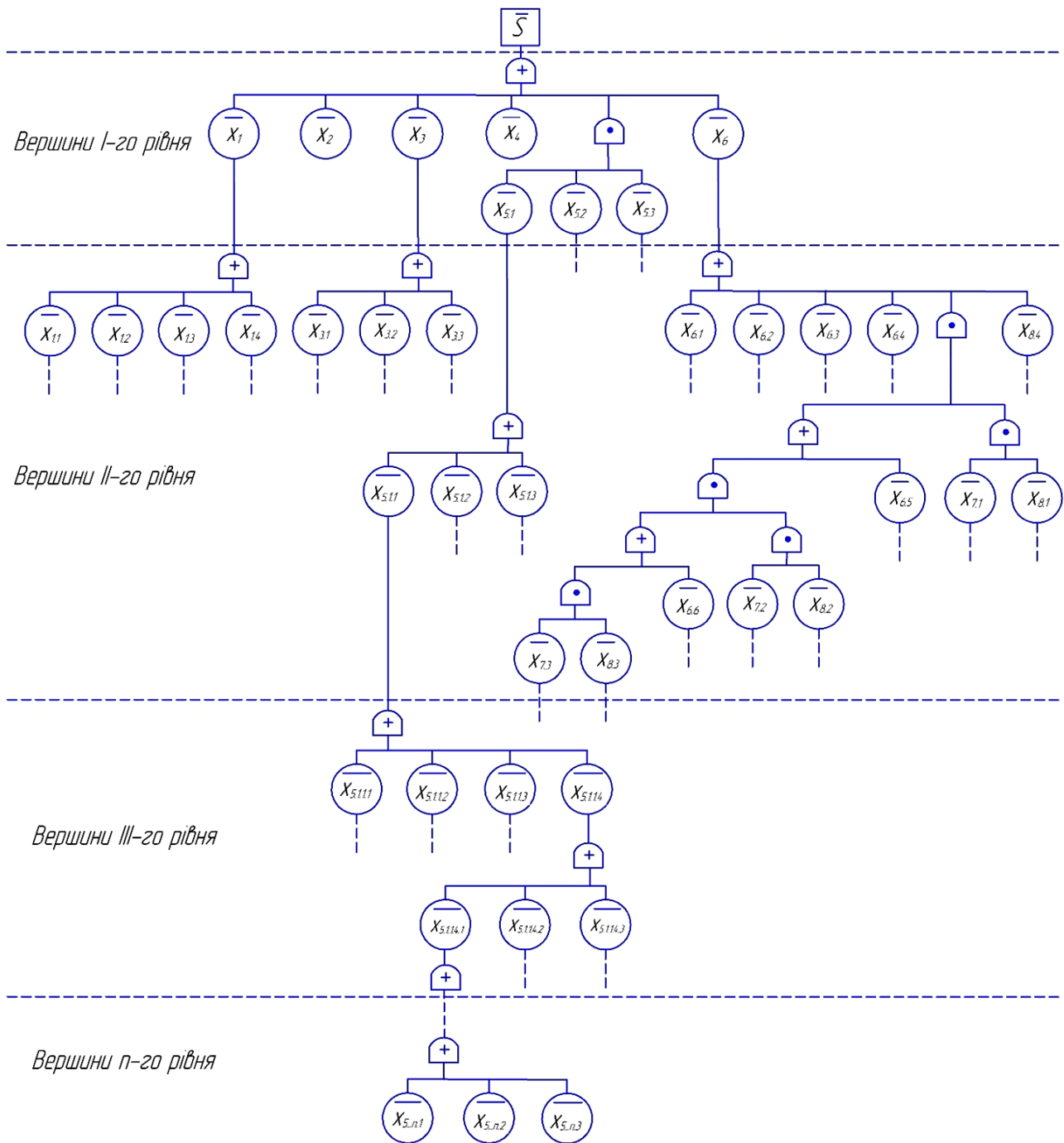


Рис. 7. Дерево відмов транспортної системи перевезення гірської маси для виробництва щебеню з деталізацією причин втрати працездатності рухомого складу:  $x_{5.1.1}$  – технічна працездатність автосамосвала;  $x_{5.1.2}$  – забезпеченість ТЗ паливом;  $x_{5.1.3}$  – присутність на робочому місці водія ТЗ і його відповідність кваліфікаційним вимогам;  $x_{5.1.1.1}$  – виконання функції постачання робіт із забезпечення технічної працездатності ТЗ;  $x_{5.1.1.2}$  – виконання функції технічної підготовки виробництва;  $x_{5.1.1.3}$  – виконання функції підтримки технічної працездатності ТЗ;  $x_{5.1.1.4}$  – виконання функції усунення технічної несправності ТЗ;  $x_{5.1.1.4.1}$ ,  $x_{5.1.1.4.2}$ ,  $x_{5.1.1.4.3}$  – наявність необхідного технологічного обладнання;  $x_{5.1.1.4.1}$ ,  $x_{5.1.1.4.2}$ ,  $x_{5.1.1.4.3}$  – наявність на робочому місці відповідного персоналу;  $x_{5.1.1.4.3}$ ,  $x_{5.1.1.4.3}$  – забезпеченість робіт енергоносіями, запасними частинами і матеріалами

Дерево відмов є також інструментом аналізу кількості структурних елементів у транспортній системі, тобто дає змогу визначити кількість учасників процесу перевезень вантажів і пасажирів при різних транспортно-технологічних схемах. Використовуючи термінологічний апарат математичної логіки, учасники процесу перевезень у дереві відмов є вершинами 1-го рівня. Саме тому метод дає



змогу одержувати початкові дані для вирішення задач структурного резервування транспортної системи перевезень вантажів і пасажирів з метою підвищення або забезпечення її надійності.

За наслідками аналізу можливих відмов у транспортній системі проводиться оптимізація кількості елементів структурно-функціональної схеми процесу перевезень. Під час розв'язання задачі визначається мінімально необхідне число учасників процесу перевезень. Критерій оптимізації за такої умови необхідно вибирати з урахуванням вартості процесу перевезення, що включає умовно постійні і змінні витрати безпосередньо на переміщення об'єкта перевезення і на термінальну його обробку в дорозі проходження. Складаючи оптимізаційне рівняння, необхідно врахувати вартість часу на перевезення, а в системі обмежень – умову забезпечення рівня надійності, заданого споживачем транспортної послуги на перевезення вантажів і пасажирів.

### Висновки

1. З'ясовано, що ефективним інструментарієм ідентифікації і класифікації відмов транспортної системи є побудова дерева її відмов.

2. Наведено процедуру побудови дерева відмов транспортної системи за її структурно-функціональною схемою надійності з використанням понять алгебри логіки: початкова і кінцева вершини графа, вхід і вихід графа, сукупність логічних операцій, працездатний і непрацездатний стани.

3. Розглянуто різні типи транспортних систем по з'єднанню структурних елементів. На прикладі транспортної системи перевезення гірської маси для виробництва щебеню побудовано структурно-функціональну схему у вигляді блок-схеми та дерева відмов із деталізацією функціональних зв'язків структурних елементів із використанням логічних змінних та їх заперечень. Побудовано дерево відмов цієї ж транспортної системи, але з деталізацією причин втрати працездатності рухомого складу, наявного в системі.

4. Розроблено основні напрями діяльності транспортної системи із забезпечення технічної справності рухомого складу і попередження її відмов.

### СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ:

- [1] Аулін В. В., Голуб Д. В., Гриньків А. В., Лисенко С. В. Методологічні і теоретичні основи забезпечення та підвищення надійності функціонування автомобільних транспортних систем: монографія. Кропивницький: Видавництво ТОВ «КОД», 2017. 370 с.
- [2] Аулін В. В., Голуб Д. В. Методичні аспекти кількісної, якісної та часової оцінки параметрів надійності функціонування транспортних систем. *Вісник Житомирського державного технологічного університету*. . Серія: Технічні науки. Житомир: ЖДТУ, 2018. Вип. 2(82). С. 3–10.
- [3] Bates J., Polak J., Jones P. A. Cook The valuation of reliability for personal travel. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*. 2001. Vol. 37, № 2/3. P. 191–229.
- [4] Аулін В. В., Голуб Д. В. Реалізація фізико-інформаційного підходу дослідження проблеми підвищення надійності та ефективності функціонування транспортних систем. *Вісник Харківського національного автомобільно-дорожнього університету*. Харків: ХНАДУ, 2018. Вип. 81. С. 3–10.
- [5] Голуб Д. В. Теоретична модель транспортної системи як сукупності взаємодіючих і взаємоперетворюючих елементів та підсистем. Кропивницький: ЦНТУ, 2022. Вип. 5(36). Ч. 2. С. 324–334.
- [6] Кунда Н. Т. Дослідження операцій у транспортних системах: навчальний посібник. Київ: Видавничий дім «Слово», 2008. 400 с.
- [7] Musatenko O. V. Analysis of Structural and technological Schemes of goods delivery. *Sciences of Europe Czech Republic*. Praha. 2017. № 12(12), Vol. 1. P. 74–78.
- [8] Dhillon B. S. *Transportation System s Reliability and Safety*. Taylor & Francis Group: New York, 2011. 230 P.
- [9] Лашених О. А., Кузькін О. Ф., Грицай С. В. Імовірнісні і статистико-експериментальні методи аналізу транспортних систем: навчальний посібник. Запоріжжя: ЗНТУ, 2011. 420 с.
- [10] Голуб Д. В. Підвищення ефективності управління технологічним процесом доставки на основі аналізу статичних та динамічних резервів транспортної системи. Кропивницький: ЦНТУ, 2023. Вип. 7(38). Ч. 1. С. 214–221.

**Голуб Дмитро Вадимович** – канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри експлуатації та ремонту машин, e-mail: [dimchik529@gmail.com](mailto:dimchik529@gmail.com)

**Аулін Віктор Васильович** – д-р техн. наук, професор, професор кафедри експлуатації та ремонту машин, e-mail: [AulinVV@gmail.com](mailto:AulinVV@gmail.com)

**Замуренко Артем Сергійович** – здобувач кафедри експлуатації та ремонту машин, e-mail: [artemzamurenko@gmail.com](mailto:artemzamurenko@gmail.com)

**Кічура Руслан Петрович** – здобувач кафедри експлуатації та ремонту машин, e-mail: [romnik83@ukr.net](mailto:romnik83@ukr.net)

**Ювзенко Олександр Юрійович** – здобувач кафедри експлуатації та ремонту машин, e-mail: [40101001@gmail.com](mailto:40101001@gmail.com)

Центральноукраїнський національний технічний університет, м. Кропивницький

**Біличенко Віктор Вікторович** – д-р техн. наук, професор, ректор, e-mail: [Bilichenko.v@gmail.com](mailto:Bilichenko.v@gmail.com)

Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця

**D. Golub<sup>1</sup>**  
**V. Bilichenko<sup>2</sup>**  
**V. Aulin<sup>1</sup>**  
**A. Zamurenko<sup>1</sup>**  
**R. Kichura<sup>1</sup>**  
**O. Yuvzenko<sup>1</sup>**

## **Ensuring and improving the reliability and efficiency of the road truck transportation process by building a failure tree of structural elements of the transportation system**

<sup>1</sup>Central Ukrainian National Technical University

<sup>2</sup>Vinnitsa National Technical University

*It was found that to ensure and improve the reliability of transport systems, it is necessary to have an effective toolkit for identification and classification of their failures, the number for a given period of operation and the determination of the required number of structural elements in the form of participants.*

*It is shown that the construction of a tree of their failures is an effective tool for identification and classification of transport system failures. The procedure for its construction and its implementation is presented on the example of a transport system for the transportation of rock mass for the production of crushed stone. A tree of failures of this system was built and the main directions of its activity were developed to ensure the technical serviceability of the rolling stock and prevent its failures. Attention is focused on the coefficient of technical readiness of the vehicle fleet, an analysis of various types of formulas for evaluating this complex indicator of reliability and ways to increase its level are provided. Factors affecting the reliability of the transport system are determined and their list is given.*

*It was found that regardless of the mutual location of the elements of the transport system, it is difficult to assign any of them to the main category. At the same time, the main argument is that the failure of any structural element of the transport system can lead to its complete failure, with the exception of elements connected in parallel.*

*A number of assumptions have been made regarding the formation of the organizational and production structure of a trucking company based on functional characteristics, when the grouping and selection of elements of the company's production system is carried out in accordance with the commonality of performed functions. Areas of activity of trucking companies to prevent failures in the transport system caused by technical malfunctions of rolling stock are given.*

*It was established that based on the results of the analysis of possible failures in the transport system, the optimization of the number of elements of the structural and functional scheme of the production process of transportation is carried out, when solving the problem, the minimum necessary number of its participants is determined. At the same time, the optimization criterion is selected taking into account the cost of the transportation process, which includes conditionally constant and variable costs directly for the movement of the object of transportation and its terminal processing on the way of passage.*

**Key words:** transport system, transportation process, reliability, efficiency, failure tree, structural elements, optimization.

**Golub Dmitry** – Ph. D. (Eng.), Assoc. Prof, Associate Professor, Department of Operation and Repair of Machines, e-mail: [dimchik529@gmail.com](mailto:dimchik529@gmail.com)

**Bilichenko Viktor** – Sc. Dr. (Eng.), Professor, Rector, e-mail: [Bilichenko.v@gmail.com](mailto:Bilichenko.v@gmail.com)

**Aulin Viktor** – Sc. Dr. (Eng.), Professor, Professor of the Department of Operation and Repair of Machines, e-mail: [AulinVV@gmail.com](mailto:AulinVV@gmail.com)

**Zamurenko Artem** – getter of the Department of Operation and Repair of Machines, e-mail: [artemzamurenko@gmail.com](mailto:artemzamurenko@gmail.com)

**Kichura Ruslan** – getter of the Department of Operation and Repair of Machines, e-mail: [romnik83@ukr.net](mailto:romnik83@ukr.net)

**Yuvzenko Oleksandr** – getter of the Department of Operation and Repair of Machines, e-mail: [40101001@gmail.com](mailto:40101001@gmail.com)