

ПРОБЛЕМА ВИНИКНЕННЯ ПРОВАЛІВ НАПРУГИ В ЕЛЕКТРИЧНІЙ МЕРЕЖІ

Анотація. Проблема беззаперечного дотримання визначених ДСТУ рівнів ПЯЕ за останнє десятиліття набула ще більшої актуальності через стрімке залучення до технологічних процесів, зокрема в металургійному комплексі, мікропроцесорів та зростанням рівня автоматизації та диспетчеризації циклів. Необхідність всебічного дослідження показника ПЯЕ – провали напруги – зумовлена чутливістю пристроїв напівпровідникової та мікропроцесорної елементної бази до стабільності показника напруги живлення. Також самі нелінійні струмоприймачі є джерелом спотворення якості електроенергії, зокрема джерелом виникнення провалів напруги. В статті розглянуто причини виникнення, типи провалів напруги та можливі впливи на переважні споживачі електроенергії промислових підприємств металургійної галузі. Також проаналізовано можливість врахування негативних впливів на коректне функціонування окремих груп електроприймачів.

Ключові слова: Провали напруги. Показники якості електроенергії. Електричні мережі. Проектування.

Вступ. Протягом останнього десятиліття із широким запровадженням у промислові технологічні процеси мікропроцесорної елементної бази автоматичного керування та регулювання і захисту, вентильних перетворювачів, сучасних установок дугових сталеплавильних печей, дробарок, зварювальних апаратів, потужних електродвигунів значення якості електричної енергії, зокрема фактору провал напруги набуває особливого значення, оскільки сучасні електроприймачі не лише надзвичайно вибагливі до якості споживаної електроенергії, але й зазвичай їхнє ввімкнення в електричну мережу призводить до суттєвого зниження ПЯЕ.

Також потрібно зважати, що від 23.02.2022 року Україна остаточно від'єдналась від Єдиної енергетичної системи СНД та 16.03.2022 стала членом "енергетичного Євросоюзу", тобто приєдналась до європейської енергетичної системи ENTSO-E. Україна повністю інтегрується з європейським ринком, з усіма його перевагами та недоліками, а українські виробники зможуть експортувати електроенергію за вищими цінами, ніж всередині країни.

ENTSO-E (англ. *European Network of Transmission System Operators for Electricity*) – це європейська мережа операторів системи передачі електроенергії, що була створена у 2009 році. Станом на 2021 рік вона об'єднувала 42 оператори у 35 країнах континенту. Приєднання до ENTSO-E та кошти європейських донорів нададуть поштовх до оновлення застарілої інфраструктури – відбудовувати застарілі екстенсивні радянські блоки вугільної та атомної генерації після перемоги не планується – в умовах ринкового ціноутворення це б зробило українську енергетику не конкурентоздатною порівняно з іншими європейськими країнами. Отже нас очікує програма з модернізації енергетичної інфраструктури. І саме на часі акцентувати увагу інженерів та менеджменту на проблемі показників якості електричної енергії (ПЯЕ). Недостатнє усвідомлення значущості беззаперечного дотримання цих показників на належному за ДСТУ рівні, відсутність всебічного і глибокого дослідження деяких показників – зокрема падіння напруги – , відсутність достовірних статистичних даних впливу провалів напруги на перебіг безперервних технологічних процесів гірничовидобувної та металургійної промисловості можуть виявитись наріжними причинами відсутності комплексних рішень під час відбудови та реконструкції енергетичної інфраструктури задля підвищення енергоефективності промисловості.

Мета та завдання статті – проаналізувати переважні причини виникнення провалів напруги, систематизувати наявні відомості про негативні впливи провалів напруги на окремі групи електроприймачів промислових підприємств гірничої та металургійної галузі, оскільки саме комплексний підхід до аналізу проблеми провалів напруги та його впливів на системи автоматизації,

диспетчеризації, на різні типи електродигунів ГВК тощо висвітлює приховані резерви підвищення енергоефективності підприємства та системи в цілому.

Матеріал і результати досліджень було отримано застосуванням методу системного аналізу інформації з відкритих джерел щодо окресленої проблеми, порівняння, класифікації та узагальнення інформації з подальшою систематизацією та синтезом висновків. Було розглянуто питання провалів напруги – цей показник безпідставно подекуди забувають, обговорюючи ПЯЕ. Аналіз наукових джерел засвідчив відсутність будь-якої статистики негативних впливів провалів напруг на окремі групи промислових споживачів електроенергії. Також аналіз відкритих джерел засвідчив відсутність комплексного підходу в Україні до вивчення впливів провалів напруг, оскільки чутливість окремих груп електроприймачів до цього фактору ПЯЕ докорінно відрізняється, тому лінійно поширити висновки дослідження однієї групи на всі неможливо. Для синтезу комплексної картини необхідно виокремити кожен групу споживачів і дослідити її.

Якість електричної енергії - це сукупність властивостей електричної енергії відповідно до встановлених стандартів, які визначають ступінь її придатності для використання за призначенням.

Відповідно до положень пункту 11.4.6 глави 11.4 розділу XI Кодексу систем розподілу, затвердженого постановою НКРЕКП від 14.03.2018 № 310 (далі – КСР), параметри якості електроенергії в точках приєднання споживачів в нормальних умовах експлуатації мають відповідати параметрам, визначеним у ДСТУ EN 50160:2014 «Характеристики напруги електропостачання в електричних мережах загальної призначеності».[1]

Згідно з чинними нормами, провалом напруги називають короточасне (від півперіоду до кількох десятків секунд) різке зменшення величини середньоквадратичного значення напруги більш ніж на 10 % від номінального в деякій точці електричної мережі, з подальшим її відновленням до попереднього або близького до нього значення. Для провалу напруги згідно з [1] (рисунки 1) використовують такі основні характеристики:

– глибина провалу, яку визначають за найменшим значенням напруги під час її провалу [5, с 390],

$$\delta U_n = \frac{U_{\text{ном}} - U_{\text{мін}}}{U_{\text{ном}}} 100\%$$

– тривалість провалу, яку визначають як час від моменту зменшення напруги нижче від 90 % до моменту, коли під час відновлення вона стає більшою від цього значення,

$$\Delta t_{\text{п}} = t_{\text{п}} - t_{\text{к}}$$

– амплітуда провалу, яка є відносним найменшим значенням напруги під час її провалу,

$$U_n = \frac{U_{\text{мін}}}{U_{\text{ном}}} 100\%$$

– інтенсивність провалів, яку визначають щодо сумарної кількості провалів напруги M для визначеної кількості провалів m з глибиною $\delta U_{\text{п}}$ і тривалістю $\Delta t_{\text{п}}$ за період T ,

$$F_n = \frac{m(\delta U_n, \Delta t_n)}{M} 100\%$$

Розрізняють збалансований та незбалансований провали.

Збалансований провал напруги відбувається за умови, що амплітуда коливань всіх трьох фаз напруги (фаза А, фаза В та фаза С) зменшується на однакову величину (рис.2). Збалансований провал напруги може виникнути з різних причин: коротке замикання, відключення постачання енергії або інші проблеми в електричній мережі.

Незбалансований провал напруги відбувається, коли напруга в одній фазі зменшується більше, ніж в інших фазах (рис 3). Це може статися, коли в електричній мережі є проблеми з нерівномірним розподілом навантаження між фазами або через проблеми з провідниками, з'єднувальними елементами тощо. Також незбалансований провал напруг і при наявності відхилень кутів від 120 градусів, а також при зменшенні величини напруг в декількох фазах.

Також незбалансований провал напруги відбувається і за наявності відхилень кутів між фазами від 120 градусів, а також при зменшенні величини напруг в кількох фазах (рис 4).

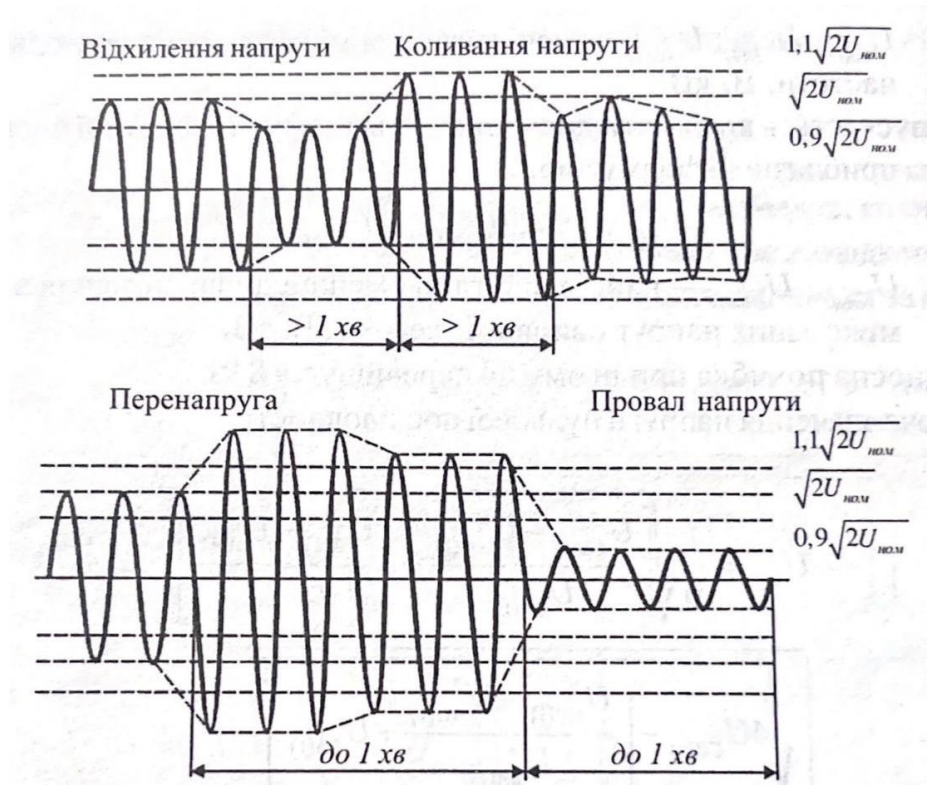


Рисунок 1 – Порівняння провалів напруги з відхиленнями напруги [5, с 390]

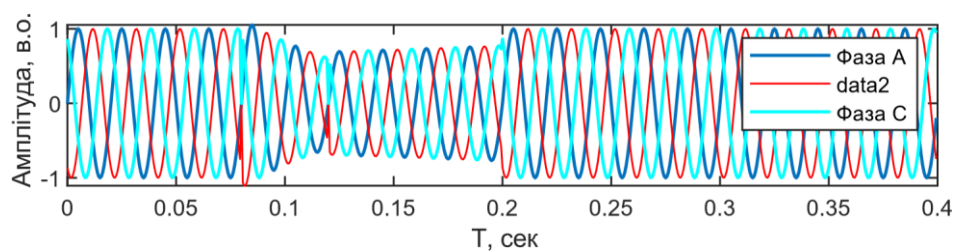


Рисунок 2 – Трифазний збалансований провал напруги

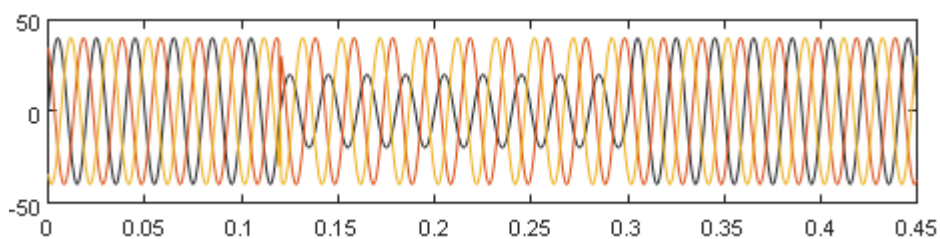


Рисунок 3 – Трифазний незбалансований провал напруги - фаза A

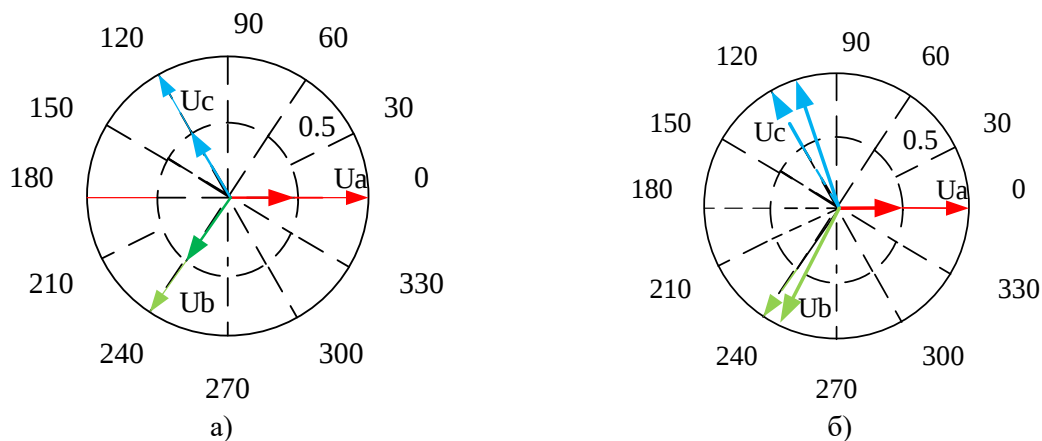


Рисунок 4 – Векторна діаграма трифазної напруги :
а) – норма, б) - трифазний незбалансований провал напруги - фаза B і C

Загальновідомо, що будь-які зниження напруги в електричних мережах спричиняються або стрімким зростанням струму в певній частині електромережі, або раптовим збільшенням реактивного опору системи. Тому основними чинниками провалів напруги визначимо включення потужного навантаження, короткі замикання та помилки в роботі засобів регулювання напруги.

Коротке замикання спричиняє стрімкий сплеск струму в електромережі і призводить до збільшення реактивного опору системи після ліквідації КЗ через вимкнення окремих елементів системи таких, як трансформаторів та ділянок ліній, а це призводить до спаду напруги. Від причини КЗ, конфігурації мережі, величини навантаження, віддаленості точки КЗ природно може залежати такий параметр, як глибина провалу напруги.

Якщо ж лінія після відключення вмикається пристроєм автоматичного повторного ввімкнення (АПВ) чи спрацюванням автоматичного ввімкнення резерву (АВР), провали напруги виникають на затискачах споживачів під час КЗ. Глибина провалу зменшується (але не обернено пропорційно) із збільшенням відстані до точки КЗ.

Тривалість провалу напруги залежить від часу спрацювання пристроїв автоматики і релейного захисту. Проте на повітряних лініях, що живлять окремих споживачів, відключення через пошкодження спричиняє провал напруги, який триває до ввімкнення АПВ. Це спричиняє більше шкоди, ніж провал напруги від КЗ, проте використання пристроїв АПВ та АВР є необхідним для забезпечення безперервності електропостачання, хоча може і погіршувати ситуацію з огляду на провали напруги.

З огляду на наведені факти можна виснути гіпотезу, що виникнення провалу напруги на затискачах споживача має вищу ймовірність, аніж втрата живлення, тому що знеструмлення в разі КЗ очікує лише на споживачів за вимикачем фідера, тоді як провал напруги відчують усі споживачі мережі. Постачальні компанії активно включають в мережі АПВ і цим скорочують тривалість аварійних відключень, але саме за рахунок зниження якості енергії.

Тому, робота пристроїв АПВ та АВР потрібно налагоджувати з урахуванням явищ провалів напруги та їх наслідків.

Ще однією причиною утворення провалів напруги можна назвати надмірний пусковий струм потужних великих електродвигунів, оскільки він 6-7 разів перевищує номінальний струм. В результаті відбувається відключення систем через перевантаження по струму, вимкнення пристрою через зниження напруги, порушення роботи контролерів і простій електродвигунів. Цю проблему можна вирішити за рахунок застосування технології компенсації пускового струму чи застосування схем м'якого («плавного») пуску, або обмеження струму при запуску двигуна за допомогою з'єднання «зірка».

Провали напруги за своєю природою непередбачувані та непостійні за місцем і часом. На цей час неможливо дати статистичні результати стосовно частоти провалів напруги, що повністю охоплюють усі європейські мережі, але мусимо зауважити, що залежно від вибраного методу вимірювання потрібно враховувати невизначеність вимірювання, що впливає на результати, особливо відносно до короткочасних подій. Щодо невизначеності вимірювання потрібно застосовувати ДСТУ EN 61000-4-30. «Зазвичай, тривалість провалів напруги залежить від вибраної стратегії побудови захисту в мережі, що залежить від структури мережі та уземлення нейтралі.»[1, с 10, п 4.3.2.4.]. Отже глибина дослідження проблеми провалів напруги визначатиме рівень захищеності електричних мереж та забезпечення належного рівня ПЯЕ.

Протягом провалу напруги потрібна енергія не поступає до електро - приймачів, і характер наслідків цього залежить від характеру та призначення приймача. Також приймачі різного типу через конструкційні особливості мають різні рівні чутливості до провалів напруг, які на сьогодні в Україні слабо досліджені. Але можна впевнено стверджувати, що у споживачів (приймачів) електричної енергії існує критична межа амплітуди напруги постачання, і зменшення амплітуди під час провалу напруги нижче цього критичного рівня спричинить порушення його коректного функціонування. [4, с 18]. Так, зменшення напруги на величину 25% від номінального значення протягом 0,1 с сприймається зором як блимання світла. В побутового споживача це спричинить емоційні незручності, оскільки процес короткочасний і до втрати чи погіршення зору не призведе. Однак, такий провал напруги в електропостачанні промислового підприємства (дробильної, збагачувальної фабрики, шахти тощо) з неперервним технологічним процесом може зумовити ланцюгову реакцію помилок і порушень в роботі виробничого обладнання та апаратури автоматичного контролю, правління та релейного захисту, а часто і його зупинку, що може призвести до значних матеріальних втрат внаслідок виготовлення бракованої продукції (за умови індукційної плавки сталі чи кольорових

сплавів), зупинення виробництва через потребу заміни пошкодженого обладнання та додаткових втрат під час відновлення виробництва. Також виникатиме проблема зниження продуктивності праці, оскільки блимання освітлення у виробничому приміщенні прискорює втомлюваність персоналу через вищу ймовірність провалів напруг під час електропостачання фабрик металургійного комплексу зокрема через використання в технологічних процесах потужних великих синхронних двигунів, здебільшого в обладнанні кар'єрів криворізького залізничного басейну.

Розглянемо впливи провалів напруг на окремі групи електроприймачів.

- Прилади освітлювання. На роботу ламп розжарювання майже не впливають. Проте зниження напруги спричиняє зменшення світлового потоку, а отже і освітленості та може призвести до підвищення ризиків виробничого травматизму. Натомість провал напруги з падінням амплітуди на 20 % цілком унеможлиблює роботу газорозрядних та люмінесцентних ламп через неможливість світіння. Стандартом визначається вплив коливань напруги на освітлювальні установки, що впливають на зір людини. Мерехтіння світла джерел освітлення (флікер - ефект) створює неприємний психологічний ефект, втому зору й організму в цілому. Це веде до зниження продуктивності праці, а в ряді випадків і до травматизму. Найбільш сильний вплив на око людини надають миготіння з частотою 3 -10 Гц, тому допустимі коливання напруги в цьому діапазоні мінімальні - менше 0,5%.

- Асинхронні двигуни. При зміні напруги змінюється механічна характеристика АД - залежність його обертового моменту М від ковзання s або частоти обертання. Через падіння амплітуди напруги під час провалу напруг асинхронний двигун зазнає суттєвих перевантажень, що спричиняє значне скорочення терміну служби цих двигунів і призводить до значних економічних збитків промислових підприємств через необхідність заміни. Частота обертання змінюється залежно від поданої напруги настільки, що навіть коливання і дозволеному інтервалі : -5% - + 10% призводить до втрати ефективності технологічного обладнання, зокрема автоматизованих ліній, конвеєрів, станків, що зазвичай обладнані потужними асинхронними двигунами з короткозамкненим ротором [4].

Під час тривалих провалів напруги тривалістю кілька секунд (іноді менше 1 с), коли зниження напруги є значним, можливе "перекидання" (гальмування) асинхронних двигунів. Електромагнітний момент, що розвиває асинхронний двигун, залежить від квадрата напруги на його затискачах. Усталений режим роботи двигуна характеризується балансом між електромагнітним моментом двигуна та моментом опору навантаження. З виникненням провалу напруги різко знижується електромагнітний момент асинхронного двигуна внаслідок зниження діючого значення прикладеної напруги. У результаті, момент двигуна стає меншим від моменту опору механізму навантаження і ротор починає гальмуватися. Якщо тривалість провалу напруги перевищує час, за якого ковзання зросте до значень, більших від критичного ковзання, то після усунення к.з. це може спричинити повне гальмування ротора. Тому провали напруги негативно впливають не тільки на системи керування, але й на самі двигуни, будучи причиною порушення їх нормальної роботи і навіть повної зупинки. Проте, як правило, на короточасні (менше 0,5-1 с) провали напруги асинхронні двигуни практично не реагують. Якщо двигун довго працює при зниженій нарузі, то через прискорений знос ізоляції термін служби двигуна зменшується. Наближено термін служби ізоляції Т можна визначити за формулою

$$T = \frac{T_{\text{ном}}}{R}$$

де $T_{\text{ном}}$ - термін служби ізоляції двигуна при номінальній нарузі і номінальному навантаженні;

R – коефіцієнт, що залежить від значення і знаку відхилення напруги, а також від коефіцієнта завантаження двигуна

- Синхронні двигуни. Провали напруги також впливають на зменшення електромагнітного моменту синхронних двигунів, оскільки він прямо пропорційно залежить від напруги на затискачах двигуна. Внаслідок цього відбувається зменшення швидкості обертання ротора і починається його гальмування, що може призвести до випадання з синхронізму синхронного двигуна. Однак для таких двигунів значний вплив на величину електромагнітного моменту має величина струму збудження.

- Електропечі . Провали напруг суттєво впливають на перебіг технологічного процесу дугових печей за регулювання сталості напруги чи потужності – зумовлюють підвищене споживання електричної енергії, залежність квадратична від амплітуди напруги . зниження напруги на 8-10 % для печі опору чи індукційної печі унеможлиблює доведення до завершення технологічного процесу, а отже є неприйнятним.[3, с 151].

- Зварювальне обладнання. Для якісного шва потрібна певна визначена тривалість циклу для прогріву шва, яка за провал напруги з амплітудою 10% спричиняє збільшення тривалості циклу на 20 % і призводить до погіршення якості самого шва.

- Мікропроцесорні системи керування. Провали напруги можуть призвести до втрати даних в пристроях обробки інформації, що дуже знижує їх загальну ефективність. Власне саме широке залучення мікропроцесорів та комп'ютерної техніки в системи автоматичного керування та контролю технологічних процесів і загострило проблему провалів напруги внаслідок її вразливості до провалів напруги, оскільки навіть дуже короточасні зниження діючого значення напруги можуть спричинити помилки у роботі пристроїв обробки та зберігання інформації..

- Пристрої силової електроніки.

Особливо чутливими до провалів є пристрої автоматики, системи захисту, контролери параметрів та мікропроцесори. Сприйнятливність електроприймачів до короточасних випадкових перешкод визначається їхньою інерційністю, тобто часом, протягом якого вони здатні зберегти енергію електромагнітного або електростатичного поля, що запаслась. Тому електроприймачі, що мають індуктивний або ємнісний характер споживання електроенергії, менш чутливі до провалів на відміну від безінерційних, наприклад мікропроцесорного обладнання.

Чутливість такого обладнання, як верстати та прокатні стани, проявляється через чутливість до перешкод не приводів, а їх мікропроцесорних систем керування. При роботі таких систем можуть бути критичними різкі зміни напруги, які повторюються, розмахом 1,5-2% із частотою 3-5 Гц або періодичністю 0,2 - 0,4 с.

Провали напруги несуть також небезпеку для електромагнітних реле та контакторів і можуть бути причиною вимкнення контрольованого кола у той час, коли всі інші елементи кола стійко його переносять. Чутливість реле та контакторів до провалів напруги може бути визначальною тоді, коли всі інші елементи технологічної системи мають нижчу чутливість до провалів напруги, що може спричинити порушення в роботі систем живлення чи керування процесами.

Економічні збитки.

Економічні збитки від провалів напруги, по-перше, визначаються характером технологічного процесу. Максимальної шкоди провали напруг завдають « безперервним технологічним процесам» гірничовидобувної галузі, металургійного виробництва, нафтопереробки, хімічної промисловості тощо. Зупинка і повторний пуск таких процесів вимагають тривалого (кілька годин – кілька діб) часу та можуть мати невідворотні наслідки – вибраковка сієї лави чавуну чи вихід з ладу дорого вартісного обладнання (стрічкових конвеєрів, машин безперервного розливу сталі, кристалізаторів, дробарок тощо) через порушення технологічного регламенту. Такий процес забезпечується складним технологічним ланцюгом, і вихід з лад чи зупинка одного агрегат, чутливого до провалу напруги певної глибини запускає ланцюгову реакцію зупинок обладнання. Тому збитки зумовлюються в кращому випадку вибраковуванням деякої частини продукції, в гіршому – в повній зупинці процесу, видаленні всіх непрореагованих мас сировини та продуктів плавки/ збагачення/ реакції, продувки/промивки всієї системи та налагодженні нового процесу. В найгіршому випадку додається необхідність заміни /ремонт виведеного з лад обладнання чи його компонентів.

Тому при проектуванні систем електропостачання промислових підприємств окремих галузей обов'язково має братись до ваги проблема ймовірності раптової зупинки лінії через провали напруги та враховуватись чутливість до його параметрів основних струмоприймачів. Повністю виключити провали напруги в системах зовнішнього електропостачання неможливо через об'єктивність причин їхнього виникнення, але мінімізація негативних наслідків можлива впровадженням комплексу запобіжних заходів.

Висновки. Малодосліджена проблема потребує ґрунтовного вивчення, оскільки може дати додаткові резерви для підвищення енергоефективності гірничої та металургійної галузі України та і промисловості в цілому. Чутливими до показника провалу напруг виявились не лише вентильні перетворювачі і мікропроцесори, але й електропечі та асинхронні двигуни. Також потерпають від цієї проблеми елементи освітлення ДЛР (дугова ртутна люмінесцентна лампа).

Мінімізувати негативні впливи провалів напруг на ефективність роботи промислового підприємства можливо через усвідомлення потреби у всебічному дослідженні впливу провалів напруг на струмоприймачі підприємства, оцінці чутливості до цього параметру якості енергії окремих приймачів та системи в цілому і врахуванні отриманих результатів під час пошуку оптимального комплексного рішення під час проектування чи реконструкції зовнішніх та внутрішніх електричних систем підприємства.

Список використаних джерел.

1. ДСТУ EN 50160:2014-1 «Характеристики напруги електропостачання в електричних мережах загальної призначеності».
2. Публічна інформація НКРЕКП. (n.d.). Якість електричної енергії. Отримано з <https://www.nerc.gov.ua/sferi-diyalnosti/elektroenergiya/yakist-elektropostachannya/yakist-elektrichnoyi-energiyi>
3. Федоров, А. А., & Каменева, В. В. (1984). Основы электроснабжения промышленных предприятий (4-е изд.). Москва: Энергоатомиздат. 1984. - 472 с.
4. Варецький, Ю. О., & Пукальський, А. М. (n.d.). Аналіз впливу провалів напруги на систему електроспоживання. Національний університет "Львівська політехніка".
5. Шестеренко, В. Є. (2004). Системи електроспоживання та електропостачання промислових підприємств. Підручник. Вінниця: Нова Книга.
6. Федонюк, М. (2009). Характер провалів напруги в розподільній мережі з місцевою електростанцією. В Е. Gubarevich (ред.), ELECTRIC POWER ENGINEERING & CONTROL SYSTEMS 2009 (с. 18). Львів, Україна.

K. Lyakhova¹, master student
¹National Technical University of Ukraine
“Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”

THE PROBLEM OF VOLTAGE FAILURES IN THE ELECTRICAL NETWORK

Abstract. *The problem of undisputed compliance with the levels of EQI determined by DSTU has become even more relevant in the last decade due to the rapid involvement of microprocessors in technological processes, in particular in the metallurgical complex, and the increase in the level of automation and dispatching of cycles. The need for a comprehensive study of the EQI indicator - voltage dips - is caused by the sensitivity of semiconductor and microprocessor element base devices to the stability of the supply voltage indicator. Also, the nonlinear current receivers themselves are a source of power quality distortion, in particular, a source of voltage drop. The article discusses the causes, types of voltage dips and possible effects on the main consumers of electricity of industrial enterprises in the metallurgical industry. The possibility of taking into account the negative effects on the correct functioning of certain groups of electrical receivers was also analyzed.*

Keywords: Voltage drops. Power quality indicators. Electrical networks. Designing.