

Я. С. БЕДЕРАК, О. Г. ГРИБ, І. Т. КАРПАЛЮК, Р. І. ДЕМ'ЯНЕНКО, Г. І. КАРПАЛЮК

ВПЛИВ НИЗЬКОЇ ЯКОСТІ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ЕНЕРГІЇ НА РОБОТУ ЕЛЕКТРООБЛАДНАННЯ

Розглядається один із параметрів якості електричної енергії – провали напруги. Описується вплив провалів напруги в мережах промислових підприємств і їх вплив на обладнання промислових підприємств. Саме технологічні процеси дуже залежні від впливу провалів напруги, для яких короточасні зупинки, перерви та зміни швидкості технологічних циклів призводять до незворотних втрат і тривалого часу для повторних запусків. Наведені причини провалів напруги, що зазвичай відбуваються через несправності в мережах загального доступу або електроустановках споживачів. Провали напруги є показниками якості електроенергії, що найчастіше зустрічаються, які впливають на роботу саме промислового обладнання. Також вразливими для провалів напруги є потужні силові напівпровідникові пристрої, забезпечені мікропроцесорами, такі як інвертори, зарядні пристрої батарей та джерела живлення, які погано переносять короточасні (50–200 мс) провали та відключення напруги живлення з подальшим його поверненням. Для можливості проведення дослідження впливу було проведено групування обладнання по чутливості до провалів напруги. Показано типи обладнання за максимально допустимою тривалістю провалу. За результатами проведення досліджень було запропоновано заходи, що мінімізують наслідки провалів напруг у мережах промислових підприємств. Окремо визначено, що провали напруги призводять до кидків пускового струму, що також негативно впливає на мережу живлення, приводячи до ще більших провалів напруги, що позначається на стійкості роботи інших споживачів. І як рекомендація для механізмів електродвигунів з легкими умовами пуску рекомендовано застосовувати систему імпульсно-фазового керування, що дозволяє регулювати уставки струмообмеження, а для виконавчих механізмів приводів з важкими умовами пуску рекомендовано застосовувати частотний пуск синхронних електродвигунів, здатний автоматично підтримувати необхідний момент на валу двигуна та струм споживання.

Ключові слова: електрична мережа промислового підприємства, показник якості електроенергії, електрична енергія, провали напруги, електроспоживачі чутливі до провалів напруги, втрата потужності.

Я. С. БЕДЕРАК, О. Г. ГРИБ, І. Т. КАРПАЛЮК, Р. І. ДЕМ'ЯНЕНКО, А. І. КАРПАЛЮК

ВЛИЯНИЕ НИЗКОГО КАЧЕСТВА ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ НА РАБОТУ ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЯ

Рассматривается один из параметров качества электрической энергии – провалы напряжения. Описывается влияние провалов напряжения в сетях промышленных предприятий и их влияние на оборудование промышленных предприятий. Именно технологические процессы очень зависимы от воздействия провалов напряжения, для которых кратковременные остановки, перерывы и изменения скорости технологических циклов приводят к необратимым потерям и длительному времени для повторных запусков. Приведены причины провалов напряжения, обычно происходящие из-за неисправностей в сетях общего доступа или электроустановках потребителей. Провалы напряжения являются наиболее часто встречающимися показателями качества электроэнергии, которые влияют на работу именно промышленного оборудования. Также уязвимыми для провалов напряжения мощные силовые полупроводниковые устройства, снабженные микропроцессорами, такие как инверторы, зарядные устройства батарей и источники питания, плохо переносящие кратковременные (50–200 мс) провалы и отключение напряжения питания с последующим его возвратом. Для возможности проведения исследования воздействия была проведена группировка оборудования по чувствительности к провалам напряжения. Показаны типы оборудования по максимально допустимой продолжительности провала. По результатам проведения исследований были предложены меры, минимизирующие последствия провалов напряжений в сетях промышленных предприятий. Отдельно определено, что провалы напряжения приводят к броскам пускового тока, что также негативно влияет на питающую сеть, приводя к еще большим провалам напряжения, что сказывается на устойчивости работы других потребителей. И в качестве рекомендации для механизмов электродвигателей с легкими условиями пуска рекомендуется применять систему импульсно-фазового управления, позволяющую регулировать уставки токоограничения, а для исполнительных механизмов приводов с тяжелыми условиями пуска рекомендуется применять частотный пуск синхронных электродвигателей, способный автоматически поддерживать необходимый момент на валу двигателя и ток потребления.

Ключевые слова: электрическая сеть промышленного предприятия, показатель качества электроэнергии, электрическая энергия, провалы напряжения, электропотребители чувствительны к провалам напряжения, потеря мощности.

Y. S. BEDERAK, O. G. GRIB, I. T. KARPALIUK, R. I. DEMIANENKO, H. I. KARPALIUK

EFFECT OF LOW QUALITY OF ELECTRIC POWER ON THE OPERATION OF ELECTRIC POWER SUPPLY

One of the parameters of the quality of electrical energy is considered are voltage dips. The article describes the influence of voltage dips in the networks of industrial enterprises and their influence on the equipment of industrial enterprises. It is the technological processes that are very dependent on the impact of voltage dips. For which short-term stops, breaks and changes in the speed of technological cycles lead to irreversible losses and a long time for repeated starts. The reasons for voltage dips are given, usually due to faults in public networks or electrical installations of consumers. Voltage dips are the most common power quality indicators that affect the performance of industrial equipment. Power semiconductors equipped with microprocessors, such as inverters, battery chargers and power supplies, which are also vulnerable to voltage sags, cannot tolerate short-term (50–200 ms) sags and power failure followed by voltage reconnection. To make it possible to study the impact, the equipment was grouped according to its sensitivity to voltage dips. The types of equipment are shown according to the maximum allowable duration of the dip. Based on the results of the research, measures were proposed to minimize the consequences of voltage dips in the networks of industrial enterprises. Separately, it was determined that voltage dips lead to inrush current surges, which also negatively affects the supply network, leading to even larger voltage dips, which affects the stability of the operation of other consumers. And as a recommendation for mechanisms of electric motors with light starting conditions, it is recommended to use a pulse-phase control system that allows you to adjust the current limiting settings, and for actuators of drives with severe starting conditions, it is recommended to use a frequency start of synchronous electric motors that can automatically maintain the required torque on the motor shaft and current consumption.

Keywords: electrical energy, power quality indicator, voltage dips, consequences of voltage dips, economic damage.

© Я. С. Бедерак, О. Г. Гриб, І. Т. Карпалюк, Р. І. Дем'яненко, Г. І. Карпалюк, 2021

Постановка проблеми. Один із очевидних наслідків провалів напруги в мережах промислових підприємств є вихід з ладу відповідального обладнання і як наслідок брак та/або недовипуск продукції.

Технологічні процеси дуже залежні від впливу провалів напруги, що може призводити до різних за характером втрат. Особливо відчутний вплив провали напруги надають на такі технологічні процеси із безперервними виробництвами. Які характерні для хімічних виробництв, машинобудуванні, та ін. галузях. Для яких короточасні зупинки, перерви та зміни швидкості технологічних циклів призводять до незворотних втрат і тривалого часу для повторних запусків. Технологічний ланцюг випуску продукції на таких виробництвах зазвичай складний і включає безліч апаратів. Процеси виробництва де технологічний процес відбувається при певних значеннях температури, тиску, при певних об'ємних або вагових співвідношеннях реагентів, де зміна в пропорціях параметрів обов'язково призводить до повторного налаштування, а це не тільки час але й витрати енергії і часу.

Деякі електроприводи великої одиничної потужності не підлягають самозапуску, що призводить до відключення їх під час роботи автоматичного вмикання резерву (АВР). До відключень обладнання призводить також і спрацювання захисних апаратів та реле в ланцюгах контролю, сигналізації та блокування технологічних агрегатів. У деяких випадках достатньо одному з механізмів технологічного ланцюжка зупинитися або навіть знизити свою продуктивність, як параметри технологічного процесу перевищать критичні значення і його буде зупинено системою протипожежної автоматики. Шкода, що виникає при цьому, у кращому випадку виявляється у псуванні частини продукції, а в гіршому – потрібна повна зупинка технологічного процесу.

Причини провалів напруги зазвичай відбуваються через несправності в мережах загального доступу або електроустановках споживачів. Визначення провалу напруги наведено в стандарті [1] де зазначено, що провал напруги це тимчасове зменшення напруги у конкретній точці електричної системи нижче встановленого граничного значення. Порогове значення початку провалу вважається рівним 90 % опорної напруги.

Провал напруги, як правило, пов'язаний із виникненням та закінченням короткого замикання або іншого різкого зростання струму в системі або електроустановці, підключеної до електричної мережі. У трифазних системах електропостачання за початок провалу напруги приймають момент, коли напруга в одній з фаз падає нижче за порогове значення початку провалу напруги, за закінчення провалу напруги приймають момент, коли напруга у всіх фазах зростає вище порогового значення закінчення провалу напруги. Тривалість провалу напруги може бути змінена від 10 мс до 1 хв. Це може бути викликане також наявністю підживлення від потужних

синхронних двигунів, підключених до електричної мережі.

У стандарті [2] наведено визначення такого поняття як переривання напруги як ситуація, за якої напруга в точці передачі електричної енергії менше 5 % опорної напруги. Переривання напруги відносять до створюваних навмисно, якщо користувач електричної мережі поінформований про майбутнє переривання напруги, і до випадкових, що викликаються тривалими або короточасними несправностями, зумовленими, в основному, зовнішніми впливами, відмови обладнання або впливом електромагнітних перешкод.

Створювані навмисно переривання напруги, зазвичай, обумовлені проведенням запланованих робіт у електричних мережах. Випадкові переривання напруги поділяються на тривалі (тривалість понад 3 хв) та короточасні (тривалість не більше 3 хв).

Щорічна частота тривалих переривань напруги (тривалістю понад 3 хв) значною мірою залежить від особливостей системи електропостачання (насамперед застосування кабельних або повітряних ліній) та кліматичних умов. Короточасні переривання напруги найімовірніше за її тривалості менше кількох секунд. У трифазних системах електропостачання до переривання напруги відносять ситуацію, при якій напруга менше 5 % опорної напруги у всіх фазах. Якщо напруга менше 5 % опорної напруги не у всіх фазах, ситуацію розглядають як провал напруги [2].

Одним із показників якості електроенергії є провал напруги. Він дуже часто зустрічається при живленні промислового обладнання і впливає на його роботу. В наслідок чого, через провали напруги, відбувається понад 30 зупинок виробництва за рік і 2–3 зупинки на рік через відключення.

Електродвигуни, включаючи вироби з регульованим приводом, особливо вразливі перед провалами напруги, оскільки навантаження все ще вимагає енергії, якої, за винятком інерції частин, що рухаються, вже недостатньо. За відсутності напруги на асинхронних електродвигунах протягом 300–500 мс вектори залишкової електрорушійної сили навантажених електродвигунів можуть залишитися у протифазі з вектором напруги мережі. В результаті, в момент відновлення живлення в ланцюзі електродвигунів виникає імпульс струму з такою амплітудою, яку можна порівняти зі струмом короткого замикання (КЗ), який може викликати глибокі провали напруги, відключення розчіплювачів захисних пристроїв та відключення електродвигунів. Короточасні провали напруги тривалістю менше 300 мс (найпоширеніші в мережі) не завдають особливої шкоди електродвигунам.

Провали напруги в мережі 0,4 кВ на промислових підприємствах можуть викликати серйозні порушення виробничого циклу, пов'язані з масовим відключенням (через відпадання магнітних пускатрів або контакторів), з самозапуском великої кількості електродвигунів, що саме по собі викликає значне зниження напруги в мережі.

Особливістю низьковольтних мереж змінного струму власних потреб підстанцій є те, що вони не містять технологічного обладнання, що не допускає перерв живлення, а всі найбільш відповідальні споживачі електроенергії (релейний захист, реєстратори аварійних режимів, системи зв'язку, сигналізації та телеуправління) підключені, як правило, від потужної акумуляторної батареї. Водночас, від ланцюгів власних потреб змінного струму підстанцій отримують живлення потужні силові напівпровідникові пристрої, забезпечені мікропроцесорами, такі як інвертори, зарядні пристрої батарей та джерела живлення. Практичний досвід експлуатації таких пристроїв показує, що вони погано переносять короткочасні (50–200 мс) провали та відключення напруги живлення з подальшим його поверненням.

Іноді такі пристрої встигають зависнути навіть під час автоматичного швидкодіючого перемикавання з основного на резервне джерело живлення. Ще однією «хворобою» потужних зарядних пристроїв, що містять потужні силові трансформатори живлення на вході, є дуже великі пускові струми, що виникають при раптовому зникненні та подальшому поверненні живлення, що викликає відключення такого пристрою електромагнітним розчіплювачем вступного автомата. Стан справ у ланцюгах власних потреб підстанцій значно посилюється в деяких випадках, коли навіть одиночні зареєстровані провали напруги тривалістю 100–200 мс викликають багаторазові спрацьовування та відпускання потужних електромагнітних контакторів у ланцюги перемикавання з основного на резервне джерело живлення.

У системах з декількома електроприводами керуючі елементи, визначивши зниження напруги, можуть подати сигнал на відключення двигуна при різних фактичних значеннях зменшеної напруги та застосувати різні величини уповільнення порівняно один з одним, що призведе до повної втрати контролю над таким швидкоплинним процесом [3].

Групування обладнання по чутливості до провалів напруги. Обладнання загального призначення визначається меншою чутливістю до якості електроенергії, порівняно з іншими видами електроприймачів, і може працювати без збоїв при значній глибині та тривалості провалів.

Найбільш чутливим обладнанням до провалів напруги є двигуни з електронним управлінням, різноманітна обчислювальна техніка, що має широке розповсюдження. Таке обладнання чутливе до провалів близько 10 % тривалістю менше 0,05, що значно підвищує вимоги до якості електропостачання [4]. За ступенем чутливості до провалів напруги розрізняють сім видів електроприймачів (за даними Electric Power Research Institute (EPRI) – Інституту дослідження електроенергетики США) (наведені за чутливістю до провалів):

- реле захисту;
- контактори;

- джерела постійного струму (блоки живлення персональних комп'ютерів, контролери);

- трифазні джерела живлення;
- вакуумні насоси;
- турбонасоси;
- електроприводи змінного струму.

Відповідно, що кількість зупинок обладнання буде більшою для обладнання із більшою чутливістю до провалів тому таке обладнання потребує відповідної уваги. Вкрай важливо визначити поріг чутливості тих елементів, які відповідають за виконання всього технологічного процесу на промислових підприємствах, щоб запобігти зупинкам (табл. 1).

Таблиця 1 – Поріг чутливості для кожного виду електроприймача або елемента керування системами електропостачання (за даними EPRI)

Тип обладнання	Залишкова напруга, %	Максимально допустима тривалість провалу, коли обладнання залишається в роботі, мс
Пускач електродвигуна	50	40
Двигун зі змінною частотою обертання	85	10
Контролер із програмованою логікою	50	8–20
Частотний перетворювач	82	1,5
Регульовані електроприводи	50–80	2–3
Контролер технологічного процесу	70	<8
Верстати з числовим програмним управлінням	70	<8
Контролер електроприводу постійного струму	88	<8
Персональні комп'ютери	50–70	60–160
Контактори	50–60	20–30
Електромагнітний вимикач	50	10
Електромагнітне реле	50–60	15–40
Медичне обладнання	60	130

Тільки за наявності стаціонарного контролю якості, а також інформації від переносних вимірювальних комплексів, можливо проводити аналіз та готувати заходи щодо покращення якості електроенергії. Для цього успішно можуть використовуватися реєстратори з високим класом точності. Вимірювання необхідно проводити в характерних точках мережі, наприклад, в центрах живлення, в точках загального приєднання споживачів. Споживач, маючи ці відомості, вирішує питання забезпечення безперебійності електропостачання, встановлених у його системі електропостачання шляхом резервування живлення, підвищення швидкодії засобів автоматики, застосування

автономних джерел живлення та різних систем безперебійного живлення [5].

Після встановлення захисного обладнання, також потрібно контролювати ефективність його роботи. Для промислових підприємств потрібна система контролю провалів та переривань напруги, для якої функції контролю інших показників якості електричної енергії є другорядними, має мінімальну вартість і не потребує високої кваліфікації користувачів та обслуговуючого персоналу [6].

Отримані в результаті розрахунків дані щодо тривалості та глибини провалів сортуються за тривалістю та зображуються графічно у просторі параметрів потоку провалів з координатами реально виявлених поєднань [7]: тривалості провалу (t_{np} , сек); остаточної напруги ($U_{ост}$, %); частоти (w , 1/год).

Ці дані є характеристикою системи електропостачання.

Заходи, що мінімізують наслідки провалів напруг у мережах промислових підприємств. Заходи, що мінімізують наслідки провалів напруг, систематизовані В. С. Фішманом [8] та В. І. Гуревичем [9].

1. Розробка таких схем роботи синхронного двигуна (СД), при яких досягається стійкість його роботи за рахунок надійного живлення систем збудження. Бажано виконувати їх так, щоб збуджуючі пристрої жили від джерела, напруга якого не залежить від напруги основного джерела живлення електродвигуна. У практиці експлуатації трапляються випадки відключення систем збудження (СД) при відновленні живлення після провалу напруги, що пов'язано з кидком струму збудження та спрацьовуванням захисту тиристорів. Але в цьому випадку є інша небезпека: коли відбувається провал напруги у такого джерела, можливе відключення СД щодо втрати збудження. Якщо на СД встановлені мікропроцесорні збудники, то вони можуть зробити так, щоб протягом $0,5 \div 1$ с при зникненні (або зниженні) напруги в мережі живлення збудників 380 В, вони б не видавали аварійний сигнал на відключення вимикача 6 кВ і при відновленні робочого рівня напруги продовжили роботу з форсованим струмом збудження.

2. Створення схем, що приводять до зменшення ймовірності відключення магнітних пускатів відповідальних електродвигунів при найчастіших видах пошкоджень – однофазних коротких замикань в мережах 110 кВ за рахунок підключення котушок управління магнітними пускатими із групою з'єднання обмоток силового трансформатора 10 (6)/0,4 кВ [10].

3. Використання схем із застосуванням контакторів керування із можливістю утримання у включеному положенні. Однак такі схеми можна застосовувати тільки тоді, коли це допустимо як з міркувань техніки безпеки, так і за умовами технології, оскільки можливість повторного включення не обмежується за часом.

4. Створення умов швидкого відключення контактора живлення власних потреб (за проміжок часу 10–12 мс) на підстанціях в момент зниження рівня

напруги в мережі нижче 160 В. Забезпечення технічної можливості повернення контактора у початковий стан при відновленні рівня напруги при значеннях вище 185 В (витримка часу має становити 5–10 с).

Підключення і відключення ланцюгів потреб до трансформаторів потреб здійснюється зазвичай за допомогою потужних електромагнітних контакторів на струми 200–400 А з котушками управління змінного струму. Ці контактори є найважливішими елементами системи живлення власних потреб, від властивостей яких залежить надійна робота всієї підстанції.

Аналіз отриманих осцилограм показує, що повний час відключення контактора (тобто час від моменту подачі напруги на котушку до моменту замикання його головних контакторів) становить близько 20 мс (20–40 мс за паспортними даними), а час повного вимкнення (тобто час від моменту вимкнення напруги на котушці до моменту розриву головних контактів) становить близько 15–18 мс (10–30 мс для номінальної напруги та 10–15 мс для напруги 0,8 від номінальної за паспортними даними). Такі невеликі для такого великого та важкого апарату часу спрацьовування та відпускання свідчать про те, що при типових за часом, а також при переміжних провалах та відновлення напруги контактор встигатиме відключати та повторно включати головні ланцюги живлення кілька разів. Більше того, реакція контактора на провали напруги на 75 % номінального значення складніша, ніж на 100 % провали, при цьому час відпадання контактора в першому випадку приблизно на 40–50 % менше, ніж у другому, і може становити 10 мс навіть для великого апарату. Аналіз поведінки контактора при зниженні та збільшенні напруги живлення його котушки управління показав, що при зниженні напруги змінного струму на котушці контактора від номінального значення до 150–135 В його магнітна система починає сильно вібрувати, а амплітуда вібрацій така, що його головні контакти замикаються та розмикаються. Такий же режим роботи виникає при збільшенні змінної напруги на котушці від нуля до 160–185 В. Можливість роботи контактора в такому режимі спільно з його високою швидкістю означає, що навіть при одноразовому, стійкому протягом 100–200 мс провалі напруги до величини 135–150 В контактор перетворюється на потужний генератор глибоких багаторазових провалів напруги в ланцюгах власних потреб підстанції, викликаючи сильний негативний вплив на силову електронну апаратуру. Такий же результат може призвести до спроби увімкнення контактора при напрузі 150–170 В.

Одноразова перерва в 5–10 с у мережі потреб змінного струму підстанцій не викликає серйозних порушень роботи підстанції, що має потужну акумуляторну батарею, від якої живляться найбільш відповідальні споживачі. Водночас, такий алгоритм роботи контакторів може запобігти серйозним збоєм у роботі потужного електронного обладнання.

5. Використання додаткових проміжних реле в схемах керування електродвигунами. Таке реле має низьку напругу повернення (близько $0,05 U_{ном}$) у

поєднанні з витримкою часу на повернення $0,5 \div 1,1$ с, завдяки чому електродвигун відновить свою роботу навіть після глибоких короточасних провалів напруги. При відключенні живлення завдяки підживленню від синхронних та асинхронних електродвигунів напруга зникає не відразу, тому фактична витримка часу буде значно більшою за $0,5 \div 1,1$ с [11].

6. Створення схем, що дозволяють використовувати декілька послідовних черг при повторному включенні електродвигунів. Окремі черги можуть запускатися через задані проміжки часу, або в міру підвищення напруги або зниження струму самозапуску електродвигунів попереднього ступеня. Подібні схеми розробляються та впроваджуються спеціалізованими пусконаладжувальними організаціями.

7. Використання релейних захистів із використанням мікропроцесорних пристроїв. Такі сучасні захисти мають показники збільшеної швидкодії захисту; скороченого рівня селективності за часом. За допомогою мікропроцесорного пристрою можна застосовувати логічну селективність. Тобто є можливість відмовитися від селективності за часом і запобігати можливим аваріям використовуючи діагностику стану електрообладнання.

8. Створення схем АВР. Звичайне АВР забезпечує включення резервного живлення після відключення вступного вимикача і після згасання напруги на секції, що резервується. На промислових підприємствах необхідно забезпечувати безвідмовну роботу схем АВР на напрузі 10 (6) та 0,4 кВ.

9. Застосування схем, що дозволяють підтримувати напругу в інтервалі 35–60 % від номінальної напруги мережі $U_{ном}$ для забезпечення рівня напруги відпадання пускачів і контакторів при зниженні напруги. Необхідно контролювати цю величину і за необхідності проводити налаштування або регулювання пускачів та контакторів.

10. Застосування схем відключення електродвигунів 6 і 0,4 кВ із витримкою часу на відключення при самозапуску електродвигунів.

11. Використання заходів із контролю струму збудження синхронних електродвигунів та контролю їх коефіцієнта завантаження. Перевантажені СД легко випадають із синхронізму при невеликих провалах напруги. В експлуатації доцільно підтримувати струм збудження близьким до номінального. Одним із засобів підвищення результуючої стійкості синхронних двигунів є «...робота в нормальних режимах з номінальними струмами збудження. Робота з номінальним струмом збудження забезпечує найбільший можливий синхронний момент та прискорює досягнення стельового значення струму при форсуванні збудження. Це найпростіший засіб знизити чутливість двигунів до коливань напруги. Робота зі зниженим струмом збудження, особливо з коефіцієнтом потужності, близьким до одиниці, виправдана лише у випадках, де протиаварійні заходи не потрібні...» [13].

12. Застосування схем швидкодіючого АВР на напрузі 10 (6) кВ [10]. Швидкодіюче АВР забезпечує можливість включення резервного живлення до того, як загасне напруга на секції, що резервується, завдяки контролю за величиною ΔU – різницею напруг на резервованих та резервуючих секціях. Швидкодіючий АВР характеризується надзвичайно малим (від кількох часток періоду до кількох періодів змінного струму) часом перерви живлення, протягом якого синхронні електродвигуни не встигають вийти з синхронізму, а асинхронні практично не знижують швидкість обертання. Однак швидкодіючий АВР має істотний недолік: напруга на секції, що резервується, знижується так само глибоко, як і на резервованій, тільки на менший час. При цьому на секції, що резервує, можуть мати місце самовідключення електроприймачів. Також при використанні швидкодіючого АВР збільшується струм КЗ, який має розірвати вимикач на введенні. Застосування швидкодіючого АВР може призвести до тяжких наслідків у разі відмови у вимкненні вхідного вимикача.

13. Створення схем для використання пристроїв плавного пуску потужних високовольтних електродвигунів.

Прямий пуск високовольтного електродвигуна супроводжується $6 \div 8$ -кратним кидком пускового струму, що створює ударний електромагнітний момент, що передається через вал двигуна на механізм, що наводиться в рух. Виникаючі великі знакозмінні електродинамічні зусилля в статорній обмотці призводять до погіршення ізоляції секцій і вигину лобових частин обмотки внаслідок зміщення провідників один до одного. Знакозмінний момент викликає вібрацію як самого електродвигуна, так і механізму, що приводиться в рух. В результаті ударні навантаження призводять до руйнування та пробоя ізоляції обмоток статора електродвигунів, перегорання міжкатушкових з'єднань, обгорання вивідних кінців, поломок валів, сполучних муфт, редукторів та інших неполадок. Також несприятливо позначаються кидки пускового струму на мережу живлення, приводячи до великих провалів напруги, що негативно позначається на стійкості роботи інших споживачів.

Тому доцільно застосовувати пристрої плавного пуску, які забезпечують протягом заданого часу розгону електродвигуна плавне наростання напруги на обмотках статора від нуля до номінального значення та збільшення пускового струму плавно із заданим струмообмеженням.

Причому необхідно звертати увагу, що для механізмів електродвигунів з легкими умовами пуску та «вентиляторною» (квадратичною залежністю від швидкості) характеристикою навантажувального моменту (відцентрові компресори, насоси, вентилятори, димососи та інші аналогічні механізми) необхідно застосовувати систему імпульсно-фазового керування, що дозволяє регулювати уставки струмообмеження від 1,0 до 4,0 $I_{ном}$. Для виконавчих механізмів приводів з важкими умовами пуску, таких

як шарові млини, конвеєри, вентилятори з великими інерційними масами, необхідно застосовувати частотний пуск синхронних електродвигунів, здатний автоматично підтримувати необхідний момент на валу двигуна та струм споживання не більше $1,5 I_{ном}$. Така система плавного пуску ідеально підходить для систем електропостачання з обмеженою потужністю (наприклад, для блоків трансформатор-двигун, де потужності трансформатора недостатньо для пуску електродвигуна).

Висновки. Розглянуто проблему впливу провалів напруги на обладнанні промислових підприємств. Згруповано споживачів по чутливості до величин провалів напруги, що дозволило сконцентруватися на найефективніших заходах із захисту від провалів напруги. Проведено аналіз літератури із видів захисту і виходячи із практичних наробок, запропоновано перелік заходів щодо захисту електрообладнання промислових підприємств від провалів напруги. Результат проведеної роботи потребує створення автоматичного приладу із захисту обладнання, тому роботу по вивченню впливу провалів напруги буде продовжено.

Список літератури

1. ДСТУ ІЕС 61000-4-30:2010. Електромагнітна сумісність. Частина 4-30. Методи випробування та вимірювання. Вимірювання показників якості електричної енергії (ІЕС 61000-4-30:2008, ІДТ). Київ: Інститут електродинаміки Національної Академії наук України, 2010. 56 с.
2. ДСТУ EN 50160:2014. Характеристики напруження в системах електропостачання загального призначення (EN 50160:2010, ІДТ). Київ: Інститут електродинаміки Національної Академії наук України, 2010. 32 с.
3. Карташев І. І. Провали напруження. Реальність прогнозів і схемні рішення захисту. *Новості ЕлектроТехніки*. 2004. № 5 (29).
4. Сокол Е. І., Жаркін А. Ф., Васильченко В. І., і др. *Качество электрической энергии. Том 3. Методы и средства повышения качества электрической энергии*. Харків: ПП «Граф-Ікс», 2014. 292 с.
5. Сокол Є. І. та ін. *Цифровий облік електричної енергії з урахуванням показників її якості та визначенням відповідальності за погіршення*. Харків: ФОП Бровін О.В., 2021. 330 с.
6. Сокол Є. І., Гриб О. Г., Баженов В. М. та ін. *Проективання електроенергетичних і електромеханічних систем та пристроїв. Релейний захист: Навчальний посібник для студентів зі спеціальності електроенергетика, електротехніка та електромеханіка*. Харків: ФОП Бровін О. В., 2020. 128 с.
7. Гуров А. А., Сергунов Ю. А. Обоснование методики статистического исследования провалов напружения в системах электропостачання загального призначення. *Энергобезопасность и энергосбережение*. 2009. № 1. С. 15–20.
8. В. Фишман. Провалы напружения в сетях промпредприятий. Причины и влияние на электрооборудование. *Новості ЕлектроТехніки*. 2004. № 5 (29).
9. Гуревич Ю. Е., Либова Л. Е., Окли А. А. *Расчёты устойчивости и противоаварийной автоматики в энергосистемах*. Москва: Энергоиздат, 1990. 390 с.
10. Гулага М. А. Средства для повышения надёжности электропостачання промислових підприємств. *Електрооборудование: эксплуатация и ремонт*. 2010. № 2. С. 52–60.
11. Бедерак Я. С., Волков В. І. Виявлення і дослідження джерел вищих гармонік «неелектричного походження» в системі електропостачання промислового підприємства. *«Промислова електроенергетика та електротехніка» Промелектро : інформ. зб.*. 2019. №1. С. 8–11.
12. Victor A. Ramos Jr. *Treating Harmonics in Electrical Distribution System*. URL: <https://www.cpccorp.com/harmonic.htm> (дата звернення: 30.10.2021).
13. Бедерак Я. С., Бородин Д. В., Михайлов В. П. Сети промпредприятий. Устройства защиты от провалов напружений. *Новості ЕлектроТехніки*. 2012. №1. С. 24–32.

References (transliterated)

1. DSTU IEC 61000-4-30:2010. *Elektromagnitna sumisnist'. Chastyna 4-30. Metody vyprobuvannya ta vymiryuvannya. Vymiryuvannya pokaznykiv yakosti elektrychnoyi enerhiyi (IEC 61000-4-30:2008, IDT)* [State Standard IEC 61000-4-30:2010. Electromagnetic comparability. Part 4-30. Test and measurement methods. Measurement of electrical energy quality parameters]. Kyiv, NASU Institute of Electrodynamics Publ., 2010. 56 p.
2. DSTU EN 50160:2014. *Kharakterystyky napryazheniya v systemakh elektrosnabzheniya obshchego naznacheniya (EN 50160:2010, IDT)* [State Standard EN 50160:2014. Voltage characteristics in electricity supply systems.]. Kyiv, NASU Institute of Electrodynamics Publ., 2010. 32 p.
3. Kartashev I. I. Provaly napryazheniya. Real'nost' prognozov i skhemnye resheniya zashchity [Voltage dips. Reality of predictions and protection schemes]. *Electrical Engineering News*. 2004, no. 5 (29).
4. Sokol E. I., Zharkin A. F., Vasil'chenko V. I., i dr. *Kachestvo elektricheskoy energii. Tom 3. Metody i sredstva povysheniya kachestva elektricheskoy energii* [Quality of electrical energy. Volume 3. Methods and means to improve the quality of electrical energy]. Kharkiv, PP «Graf-Iks» Publ., 2014. 292 p.
5. Sokol Ye. I. et al. *Tsyfrovyi oblik elektrychnoyi enerhiyi z urakhuvannyam pokaznykiv yiyi yakosti ta vyznachenniyam vidpovidal'nosti za pohirshennya* [Digital metering of electricity, taking into account quality indicators and determining responsibility for deterioration]. Kharkiv, FOP Brovin O.V. Publ., 2021. 330 p.
6. Sokol Ye. I., Gryb O. H., Bazhenov V. M. et al. *Proektuvannya elektroenergetychnykh i elektromekhanichnykh system ta prystroyiv. Releynyy zakhyst: Navchal'nyy posibnyk dlya studentiv zi spetsial'nosti elektroenergetyka, elektrotehnika ta elektromekhanika* [Design of electric power and electromechanical systems and devices. Relay protection: Textbook for students of electrical power engineering, electrical engineering and electromechanics]. Kharkiv, FOP Brovin O. V. Publ., 2020. 128 p.
7. Gurov A. A., Sergunov Yu. A. Obosnovanie metodiki statisticheskogo issledovaniya provalov napryazheniya v sistemakh elektrosnabzheniya obshchego naznacheniya [Rationale for a statistical study of voltage dips in general-purpose power supply systems]. *Energy security and energy saving*. 2009, no. 1, pp. 15–20.
8. Fishman V. Provaly napryazheniya v setyakh prompredpriyatiy. Prichiny i vliyanie na elektrooborudovanie [Voltage dips in industrial networks. Causes and effects on electrical equipment]. *Electrical Engineering News*. 2004, no. 5 (29).
9. Gurevich Yu. E., Libova L. E., Okli A. A. *Raschety ustoychivosti i protivovariynoy avtomatiki v energosistemakh* [Stability and emergency control calculations in power systems]. Moscow, Energoizdat Publ., 1990. 390 p.
10. Gulaga M. A. Sredstva dlya povysheniya nadezhnosti elektrosnabzheniya promyshlennykh potrebiteley [Means to improve the reliability of electricity supply to industrial consumers]. *Electrical equipment: Operation and repair*. 2010, no. 2, pp. 52–60.
11. Bederak Ya. S., Volkov V. I. Vyyavlenniya i doslidzhenniya dzhерel vyshchykh harmonik "neelektrychno pokhodzhennya" v systemi elektropostachannya promyslovoho pidpryyemstva [Identification and investigation of sources of higher harmonics of "non-electrical origin" in the power supply system of an industrial enterprise]. *"Industrial Electricity and Electrical Engineering". Promelectro: information bulletin*. 2019, no. 1, pp. 8–11.
12. Victor A. Ramos Jr. *Treating Harmonics in Electrical Distribution System*. Available at: <https://www.cpccorp.com/harmonic.htm> (accessed 30.10.2021).
13. Bederak Ya. S., Borodin D. V., Mikhaylov V. P. *Seti prompredpriyatiy. Ustroystva zashchity ot provalov napryazheniy* [Industrial networks. Voltage dips protection devices]. *Electrical Engineering News*. 2012, no. 1, p. 24–32.

Надійшло (received) 16.12.2021

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Бедерак Ярослав Семенович (Бедерак Ярослав Семенович, Yaroslav Bederak) – кандидат технічних наук, Приватне акціонерне товариство «АЗОТ», керівник лабораторії, м. Черкаси, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2669-0965>; e-mail: yaroslav0768@gmail.com.

Гриб Олег Герасимович (Гриб Олег Герасимович, Oleg Gryb) – доктор технічних наук, професор, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», кафедра автоматизації та кібербезпеки енергосистем, м. Харків, Україна; ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-4758-8350>. e-mail: oleg47gryb@gmail.com.

Карпалюк Ігор Тимофійович (Карпалюк Игорь Тимофеевич, Igor Karpaliuk) – кандидат технічних наук, доцент, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», кафедра автоматизації та кібербезпеки енергосистем, м. Харків, Україна; ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-5634-6807>. e-mail: humpway@gmail.com.

Дем'яненко Роман Ігорович (Демяненко Роман Игоревич, Roman Demianenko) – аспірант кафедри автоматизації та кібербезпеки енергосистем, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0902-2607>; e-mail: romandemianenko192@gmail.com.

Карпалюк Ганна Ігорівна (Карпалюк Анна Игоревна, Hanna Karpaliuk) – магістрантка кафедри автоматизації та кібербезпеки енергосистем, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», м. Харків, Україна; e-mail: hanna.persimmon@gmail.com.