



DOI: 10.31388/2220-8674-2023-1-33

УДК 621.316.929

І. О. Попова, к.т.н.

ORCID: 0000-0001-5429-8269

С. В. Чаусов, к.т.н.

ORCID: 0000-0003-3811-9077

*Таврійський державний агротехнологічний університет імені Дмитра Моторного,*

e-mail: iryna.popova@tsatu.edu.ua, тел.: 098-376-55-19

e-mail: sergii.chausov@tsatu.edu.ua, тел.: 066-743-76-21

## ПІДВИЩЕННЯ ТОЧНОСТІ РОБОТИ МІКРОПРОЦЕСОРНОГО ПРИБОРУ ЗАХИСТУ АСИНХРОННОГО ДВИГУНА

*Анотація.* Під час експлуатації двигунів в мовах агропромислового комплексу кожен рік з ладу виходить до чверті асинхронних двигунів в зв'язку з різними експлуатаційними факторами, які не були враховані виробником. Найбільш уразливим елементом конструкції електродвигуна є його обмотка. На швидкість зносу ізоляції впливає ряд чинників, що, веде до збільшення температури обмотки та погіршення властивостей. В роботі розглядається пристрій захисту асинхронного двигуна на рівні: алгоритму роботи пристрою, структурної та принципової електричної схеми пристрою захисту асинхронного двигуна на базі мікроконтролера та сучасної апаратної бази при несиметрії напруги мережі і тривалого температурного перевищення температури статорних обмоток. Висунуті вимоги, яким повинен задовольняти пристрій захисту групи електродвигунів і розроблено його алгоритм роботи і принципова схеми на сучасній апаратній базі. Пристрій передбачає контроль фазних і лінійних напруг асинхронного двигуна, діагностування температури обмоток статора, сигналізацію аварійних режимів роботи двигуна.

*Ключові слова:* надійність експлуатації, математична модель, пристрій захисту, моніторинг, трифазний асинхронний двигун, датчик температури, структурна схема, принципова схема.

*Постановка проблеми.* Найбільшого застосування на сільськогосподарських підприємствах знаходять асинхронні трифазні двигуни з короткозамкненим ротором (АД), які надійні, прості і дешеві.

В сільськогосподарському виробництві використовують АД різних потужностей, але переважають електродвигуни потужністю 0,6-13 кВт, причому в цій групі найбільша кількість АД потужністю 1,5-5,5



кВт, а це більше 60 % від усіх АД, що використовуються, з них найбільша доля потужністю 1-3 кВт [1]. А електродвигуни потужністю до 20 кВт складають 96 % задіяних у АПК для виготовлення комбікормів, у зернопереробних комплексах, вентиляції, водопостачанні, зрошенні, пневмотранспорті та інше.

Не дивлячися не це, щорічно в сільському господарстві виходить з ладу 20–25 % АД від наявного парку [2]. Все це виникає не заважаючи на те, що АД, як правило, забезпечені пускозахисною апаратурою.

Основна причина виведення їх з ладу – аварійні режими: перевантаження, обрив фазного проводу і несиметрія напруги мережі (до 45 %), заклинювання і руйнування підшипникового вузла та інші. Зі сказаного слідує, що виникнення несиметрії фазних напруг і обрив фазного проводу та перегрів обмотки статора є однією з основних причин виходу з ладу асинхронних двигунів [2].

Висока аварійність асинхронних електродвигунів обумовлює необхідність вдосконалення існуючих або розробки нових засобів діагностики і захисту їх від аварійних режимів роботи на базі сучасної мікропроцесорної техніки.

*Аналіз останніх досліджень.* До особливостей експлуатації слід віднести перевантаження асинхронного двигуна за струмом, а до специфічних умов експлуатації - віднести низьку якість електроенергії, зокрема несиметрію напруги мережі. На стабільність і, особливо, симетричність напруги трифазної мережі впливає відносно велика довжина ліній електропередачі і змішане підключення трифазних і однофазних споживачів. Несиметрична система напруги на затискачах асинхронного двигуна призводить до виникнення напруги зміщення нейтралі, що викликає несиметрію фазних струмів, наслідком чого є збільшення фазних струмів. Такі експлуатаційні особливості створюють значні ускладнення при роботі асинхронних двигунів і, особливо, при виборі пристроїв діагностування їхніх режимів роботи й захисту від аварійних режимів [1].

Головна причина виходу асинхронних електродвигунів, в переважній більшості випадків, є пошкодження їх обмотки статора, руйнування ізоляції статорних обмоток із-за перегріву. Тому розробка і удосконалення пристроїв захисту від аварійного режиму роботи асинхронного двигуна є одним з шляхів вирішення проблеми їх експлуатаційної надійності.

Існуючі засоби захисту асинхронних двигунів доцільно класифікувати за параметрами, які контролюються чутливим органом. Діагностування здійснюється по:

- струму (максимальному, прямої, зворотної і нульової послідовності, куту зсуву фаз споживаних струмів і тепловій дії струму);



- напрузі (мінімальній, прямій, нульовій і зворотній послідовностей);

- температурі (обмоток статора, сталі статора і корпуса) [2, 3].

За принципом побудови пристроїв діагностування та захисту їх можна поділити на три групи.

До першої групи відносяться так звані спеціальні пристрої, що діагностують і захищають асинхронний двигун від одного аварійного режиму, наприклад, реле обриву фаз.

У другу групу входять універсальні пристрої (теплові реле, пристрої типів УВТЗ та ін.), які захищають двигун при різних аварійних ситуаціях. Вони контролюють один з параметрів асинхронного двигуна (силу струму, температуру обмотки й ін.), критичний для декількох аварійних режимів.

До третьої групи відносяться комбіновані пристрої, що дозволяють діагностувати і захищати двигуни при багатьох аварійних режимах. Це можна досягти, якщо контролювати кілька параметрів асинхронного двигуна [4,5]. Безумовно перевагу віддають комбінованим пристроям.

Використання сучасної цифрової мікросхемотехніки надає особливу актуальність розробці та впровадженню мікропроцесорного пристрою захисту асинхронних двигунів технологічних ліній [6-8].

Розроблений пристрій передбачає захист асинхронного двигуна з короткозамкненим ротором від несиметричних експлуатаційних режимів та тривалого перевантаження за струмом.

*Формулювання цілей статті.* Проаналізувати особливості процесів, які відбуваються в обмотках асинхронного двигуна під час експлуатації. На підставі аналізу існуючих досліджень розробити структурну і принципову схеми захисного пристрою асинхронного двигуна, що передбачає його захист від перевантаження та аномальних режимів експлуатації.

*Основна частина.* Швидкість теплового зносу ізоляції асинхронного двигуна в сталому режимі роботи залежить від несиметрії напруги мережі, технічних даних АД і робочої машини, коефіцієнта завантаження робочої машини, виду її механічної характеристики, температури навколишнього середовища [9, 10]. При синтезі функціоналу пристрою слід передбачити, що пристрій захисту трифазного асинхронного двигуна буде відключати двигун від мережі при обриві фази, відхиленні фазної напруги (перекосі фаз) більш ніж на  $\pm 30$  В. і нагріві обмотки статора більше ніж  $115^{\circ}\text{C}$  (за умови застосування класу ізоляції F).

З огляду на сучасні тенденції розробки сучасного приладобудування захисний пристрій доцільно реалізувати на базі мікроконтролера із застосуванням цифрового вимірювального



перетворювача температури. Якщо відбувається виникнення аварійних режимів в кожній фазі і виникають перевищення температури обмотки двигуна, то дана ситуація повинна супроводжуватись включенням відповідних сигнальних світло діодів, і за необхідності, відключенням двигуна. При цьому для покращення вимірювання значень напруги слід передбачити використання прецизійного джерела опорної напруги, що забезпечить задану точність перетворення аналогових даних в цифрові.

Для вимірювання і порівняння використовуємо випрямлену напругу фаз відносно нульового проводу. Для живлення МК і інших мікросхем використане без трансформаторне джерело живлення. Для відключення АД від мережі в разі аварійного режиму передбачаємо проміжне реле, яке повинно бути приєднане до від вихідних портів мікроконтролеру через пристрої гальванічної розв'язки.

Розроблена блок-схема алгоритму функціонування, яка представлена на рисунку 1. Алгоритм роботи пристрою захисту наступний. Після включення мікроконтролера виконується ініціалізація його регістрів і включається керуючий вихід. Після чого проводиться зчитування значення опорної напруги.

Під час пуску двигуна або групи двигунів, можливі провали або стрибки напруги в фазах, які обумовлені пусковими струмами, тому пристрій захисту по напрузі починає працювати через одну хвилину після включення двигуна. Затримка реалізована шляхом послідовного включення таймера МК і двох дільників, кожний з яких має коефіцієнт ділення, наприклад, 30.

Далі послідовно виконується вимір напруги фаз А, В, С. Після кожного виміру фаза перевіряється на обрив. Якщо виміряна напруга дорівнює нулю, тобто спостерігається обрив фази, тоді вихід зразу відключається. Після чого слідує перевірка величини виміряної напруги у фазі на вихід за межі діапазону. Нормальне значення діапазону встановлюється в межах 190-250 В. Якщо величина визначеної напруги вийшла за діапазон 190-250 В, то включається лічильник помилок, який необхідний для підвищення завадостійкості пристрою. Таким чином забезпечується стійкість до різних випадкових викидів напруги. При декрементуванні восьмирозрядного лічильника від нуля до нуля його коефіцієнт ділення дорівнює 256. Якщо в середньому період проходження всієї програми 7 мс, час затримки вимикання двигуна приблизно 1,8 с. Для кожного порівняння напруги має місце свій автономний лічильник, з приводу цього якщо наступне вимірювання напруги прийде до норми, тоді даний лічильник обнулюється. Таким чином, для вимикання АД необхідно послідовно 256 помилок вимірювання. Після порівняння лінійної (міжфазної) напруги А-В, В-С, С-А, їх різниця перевіряється на перевищення заданого граничного значення ( $\pm 30\text{В}$ ). Якщо несиметрія між лінійними



напругами перевищує задане граничне значення ( $\pm 30$  В), тоді включається лічильник помилок.

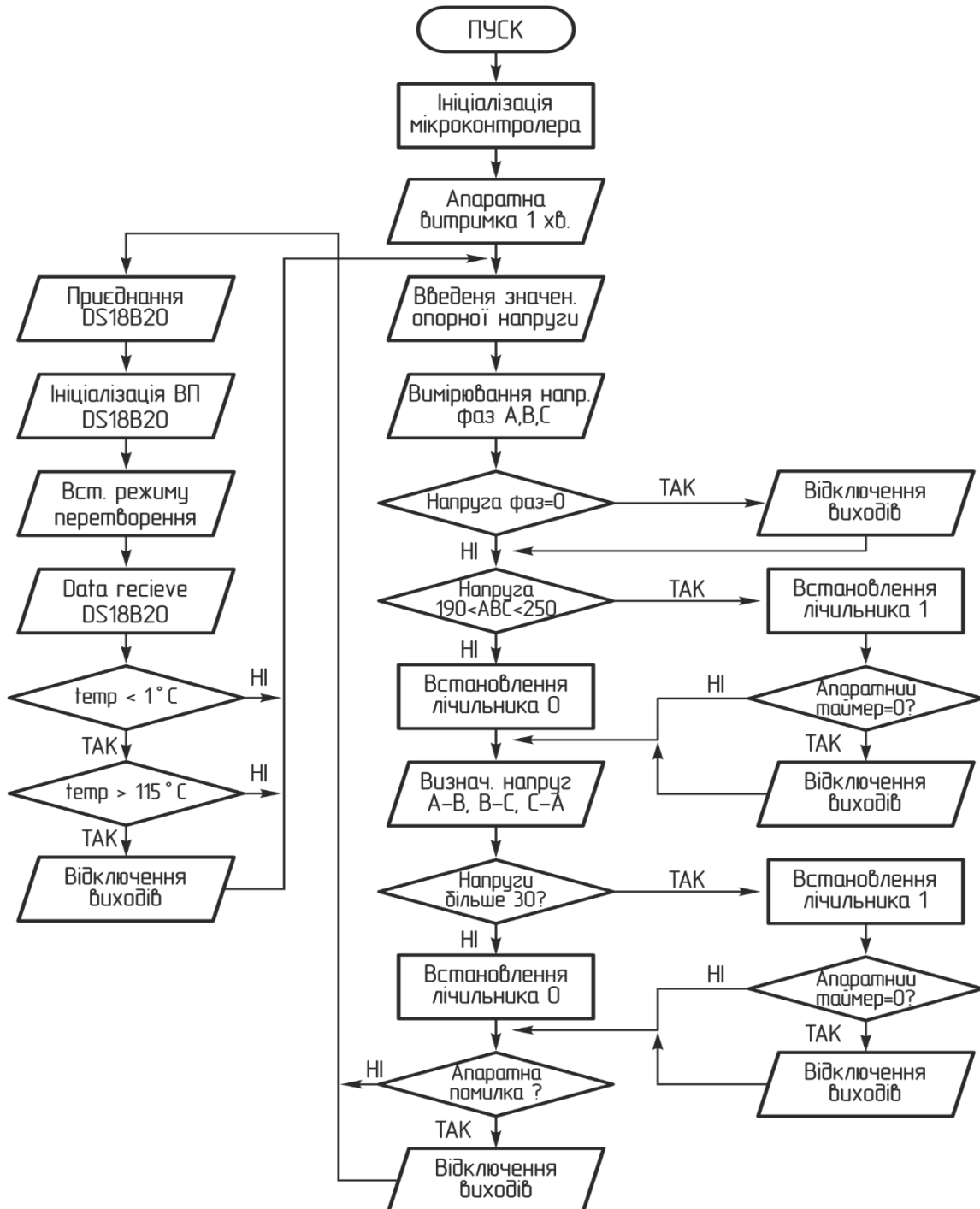


Рисунок 1. Блок-схема алгоритму роботи пристрою захисту трифазного асинхронного двигуна.

Вимикання виходу відбувається за алгоритмом аналогічно описаному вище, через 1,8 с. При вимиканні виходу встановлюється ідентифікатор помилки, який вимикається тільки після перезапуску МК кнопкою «Reset». При відсутності помилки підтверджується включення виходу і МК переходить до блока вимірювання температури





електродвигуна.

Визначення температури починається з ініціалізації вимірювального перетворювача температури і видачі команди дозволу перетворення. Після прийому даних від датчика температури, впродовж однієї секунди секунд (1 с), оскільки перші данні можуть бути недостовірні і потрібен деякий час для їх стабілізації, введена затримка часу початку порівняння. Оскільки обмотки двигуна мають певну теплову інерцію, то за такий короткий час обмотки двигуна не встигнуть істотно нагрітися. Таким чином подібна затримка не знижує якості захисту електродвигуна. Після відпрацювання часу затримки встановлюється ідентифікатор «однієї секунди», і кожне наступне вимірювання перевіряється на задане граничне перевищення температури ізоляції обмотки. Якщо температура перевищує граничне перевищення температури ізоляції обмотки, вихід виключається. Програма переходить до нового циклу вимірювання напруги по фазах.

Розробка структурної схеми пристрою. На основі алгоритму роботи пристрою захисту стає можливим розробити структурну схему пристрою, Пристрій повинен містити з наступні блоки: блок випрямлення напруги фаз, блоки дільників напруги фаз, згладжуючі фільтри; блок синтезу опорної напруги аналогово-цифрового перетворювача; первинний перетворювач температури обмоток; блок підстроювання; мікроконтролер керування; блок світлової індикації напруги та температури; блок гальванічної розв'язка кіл; блок керування двигуном; блок живлення мікросхем пристрою захисту

Напруга фаз  $L_1, L_2, L_3$  спочатку випрямляється блоком випрямлення, потім знижується за допомогою дільників напруги. Згладжуючим конденсаторним фільтром прибираються вищі гармоніки напруги. Після чого значення напруги поступає на мікроконтролер, де відбуваються порівняння напруги згідно алгоритму. Блок світлової сигналізації спрацьовує в разі аварійної ситуації (відсутості напруги на фазах двигуна або невідповідності напруги заданим граничним значенням, тощо). На виході МК через гальванічну розв'язку кіл, виконану на оптосимістрі, включається пристрій керування двигуном. Його контакти включають і відключають двигун від трифазної мережі живлення. В структурі пристрою доцільно передбачити кнопку «Reset» для пере запуску контролера керування і включення електродвигуна після усунення аварійної ситуації. Для контролю температури фаз двигуна доцільно використати цифровий вимірювальний перетворювач температури, який необхідно вбудувати в обмотки двигуна. Для настройки величини температури обмоток, слід передбачити модуль підстроювання або можливість проведення цієї процедури при перепрограмування пристрою.

Розробка принципової електричної схеми пристрою. Пристрій



захисту повинен забезпечувати виконання наступних умов [9]:

- здійснення контролю напруги фаз А, В, С, а при відхиленні фазної напруги (перекосі фаз) в межах 19-250 В відключати його від електричної мережі;

- здійснення контролю лінійної напруги А-В, В-С, С-А, при відхиленні більш ніж на  $\pm 30$  В відключати його від електричної мережі;

- здійснення контролю температури статорної обмотки, при перевищенні гранично допустимого значення для класу ізоляції АД (наприклад, 115 °С) відключати його від електричної мережі;

- світлова сигналізація виникаючих аварійних ситуацій: відхилення напруги, обрив фази або перевищення температури обмотки статора граничнодопустимого для класу ізоляції АД.

Пристрій побудований на мікроконтролері (МК) PIC16F676 і цифровому вимірювальному перетворювачі температури DS1820 [12]. Виникнення аварійних режимів в кожній фазі і перевищення температури статорних обмоток двигуна супроводжується включенням відповідних сигнальних світлодіодів. В пристрої для виміру і порівняння використовується випрямлена напруга фаз відносно нульового проводу. Принципова електрична схема пристрою показана на рисунку 2. Для зниження напруги, що виміряна на фазах використані дільники напруги, які реалізовані резисторами R1...R3 і R10...R12, які мають коефіцієнт ділення 1:100. Змінна напруга на фазах випрямляється однополуперіодним випрямлячем, що складається з діодів VD1...VD3 та стабілітронів VD7...VD9. Випрямлена напруга згладжується конденсаторним фільтром C4...C6 і поступає ви входи RA0...RA2 МК DD2. У лінії зв'язку термодатчика DD1 з входом RC4 МК встановлений резистор R13.

Частота МК задається від внутрішнього генератора частоти 4 МГц. Частоту тактового генератора, поділену на чотири (1 МГц), можна спостерігати на виході RA4 (вихід 3 МК), контролюючи таким чином працездатність МК. Вихід RA3 МК через оптотиристор U1 і симистор VS1 включає пускове реле K1. Його контакти K1.1...K1.3 здійснюють подачу напруги на електродвигун або виключають його. Світлодіоди HL1... HL4 сигналізують про виникнення аварійного режиму. Величини резисторів R6...R9 підбирають в залежності від вибраного типу світло діодів і необхідної яскравості світіння. На принциповій схемі прийняті світлодіоди типу КІП Д21-ПК.

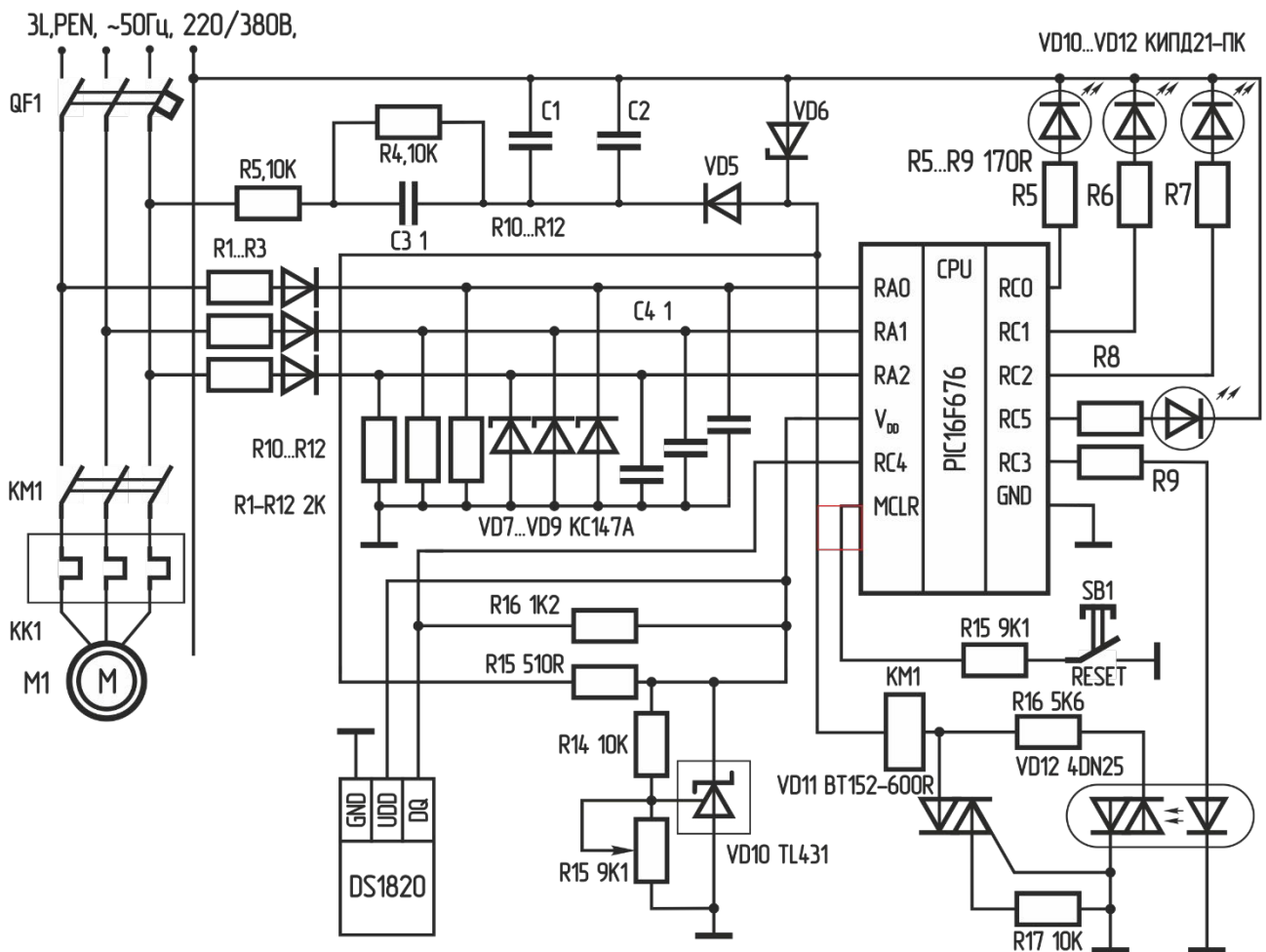


Рисунок 2. Структурна схема пристрою захисту.

Кнопка SB1 «Reset» необхідна для перезавантаження мікроконтролера і включення електродвигуна після усунення аварійного режиму. Для живлення схеми в мікроконтролера використане без трансформаторне джерело живлення з конденсатором C3. Конденсатор C3 типу K73-17 повинен мати допустиму напругу не менше 400 В. Для забезпечення необхідної точності вимірювання напруги в схемі використовується прецизійне джерело опорної напруги VD10 на базі TL431. Для підбора та регулювання значення опорної напруги в схемі застосовано резистор R15. З метою забезпечення заданої точності настройки опорної напруги даний резистор доцільно вибрати багатообертним. При цьому загальна величина значення опорної напруги може бути змінена співвідношенням резисторів дільника напруги R14 та R15.

Стабілітрони VD7...VD9 можна замінити стабілітронами типу KC147A. Якщо відсутня необхідність у виміру перевищення температури ізоляції обмотки, тоді датчик температури DS1820 можна не встановлювати (тоді буде відсутній захист електродвигуна від перегріву ізоляції), але лінія зв'язку в обов'язковому порядку повинна





залишатися навантаженою резистором R13.

Пристрій працює наступним чином. Після включення МК виконується ініціалізація його регістрів і включається керуючий вихід. Під час пуску двигуна або групи двигунів, можливі провали або стрибки напруги в фазах, які обумовлені пусковими струмами, тому пристрій захисту по напрузі починає працювати через одну хвилину після включення двигуна. Далі послідовно виконується вимір напруги фаз А, В, С. Після кожного виміру фаза перевіряється на обрив. Якщо виміряна напруга дорівнює нулю, тоді вихід зразу відключається. Потім слідує перевірка величини виміряної напруги у фазі на вихід за межі діапазону (190-250 В). Якщо це трапилось, то включається лічильник помилок МК, який затримує час вимикання двигуна приблизно 1,8 с. Для кожного порівняння в МК має місце свій лічильник, з приводу цього якщо наступне вимірювання напруги прийде до норми, тоді даний лічильник скадається на 0. Після порівняння лінійної напруги А-В, В-С, С-А, їх різниця перевіряється на перевищення заданого граничного значення (30 В). Якщо несиметрія між лінійними напругами перевищує задане граничне значення (30 В), тоді включається лічильник помилок. Вимикання АД відбувається аналогічно через 1,8 с.

Налагодження пристрою виконується без МК. Спочатку перевіряють напругу живлення МК, яке повинно бути 5,1 В. При іспитах VD4 замінювався п'ятьма екземплярами стабілітронів IN4733A, і всі вони задовольняли цій умові. Перед встановленням резисторів R10... R12 підбирають їхній номінал з точністю 1 %. При цьому не має значення відхилення від величини 2 кОм. Можна використовувати резистори опорами 1,9...2,1 кОм, головним є – забезпечити рівність величин опорів резисторів між собою.

Далі підбирають величини резисторів R1... R3 так, щоб на входах 11...13 МК постійна напруга дорівнювала вхідній напрузі поділеній на 100. При цьому на всі входи може бути подана напруга однієї фази. Практично можна підібрати величину одного резистора, а інші резистори встановлювати величиною, ідентичною підбраному. Це буде справедливо при ретельному підборі резисторів R10... R12. Після встановлення запрограмованого МК пристрій готовий до роботи.

Робота з пристроєм зводиться до аналізу стану світлодіодів при виникненні аварійних режимів. Якщо електродвигун відключився і при цьому ні один світло діод не світиться, то стався обрив фази. Якщо горить один з світло діодів АВ, АС, СА, то можливий вихід напруги за межі діапазону 190...250 В. При цьому перша літера позначення світлодіоду вказує аварійну фазу. При несиметрію напруги («перекіс фаз») надпис під світло діодом, що світиться, відповідає тим фазам, різниця напруги яких більше, ніж 30 В. Як правило, одночасно



включається два світло діода, наприклад, АВ і СА. В цьому разі напруга фази А має відхилення від напруги фаз В і С більш ніж на 30 В. Після спрацьовування пристрою та усунення аварійної ситуації електродвигун вмикається натисканням кнопки «Reset».

*Висновки.* На підставі проведених досліджень видно, що безперервним діагностуванням доцільно охопити як процеси асинхронних двигунів як при перевантаженні за струмом, так і теплові процеси в режимах несиметрії напруги мережі та пошкодженні фазного дроту. Розроблений пристрій захисний пристрій з використанням сучасної апаратної бази та наведених теоретичних досліджень дозволить збільшити строк службі асинхронного електродвигуна при виникненні несиметрії напруги, в разі неповнофазних режимів його роботи, зворотному чергуванні фаз, а також перевантаженні за струмом.

#### Список використаних джерел

1. Гурин В. В. Защита асинхронных трехфазных электродвигателей: учеб. пособ., ч.2. Минск: БГАТУ, 2011. 448 с.
2. . Кондратюк О.Ю., Егоров А.Б. Анализ аварийных режимов работы асинхронных двигателей к вопросу выбора их эффективной защиты /зб. наук. праць. Харьков: Укр. инж.-пед. академия, 2006. С. 108–116.
3. Крупенин Н. В., Голубев А. В., Завидей В.И. Новые возможности в диагностике электрических машин. Электричество. 2011. № 9. С. 45–48.
4. Микропроцессорные реле защиты для электродвигателей 6/10 кВ РДЦ-01-057-4, РДЦ-01-057-5. URL: <https://reلسis.ua/produktsiya/zashchita-dvigatелеj/rdts-01-057-4-5>. (дата звернення:17.10.2022).
5. M. Wolkiewicz, M. Skowron. Diagnostic system for induction motor stator winding faults based on axial flux. Power electronics and drives. 2(37), No. 2, 2017. Pp. 137–150. DOI: 10.5277/PED170204
6. Khadim M. S., Giri V. K. Fault diagnosis in induction motors by motor current signal analysis / International Journal of Electronics & Communication Technology. 2011. vol 2. Pp 114–119.
7. Gedzurs A. Temperature protection methods of induction motor /Research for rural development 2015, Latvia University of Agriculture, 2015. P. 258–263
8. Peresada S., Montanari M., Till A., Bolotnikov A., A speedsensorless indirect field-oriented control for induction motors: theoretical result and experimental evaluation / Збірник наукових праць Дніпродзержинського державного технічного університету (технічні науки). Тематичний випуск «Проблеми автоматизованого електропривода. Теорія і



практика». Дніпродзержинськ: ДДТУ. 2007. С.60–65.

9. Попова І. О., Курашкін С. Ф., Нестерчук Д. М. Захист асинхронного двигуна від несиметричних режимів. Проблеми енергозабезпечення та енергозбереження в АПК України: Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства ім. П. Василенка. Технічні науки. Вип. 195. Харків : ХНТУСГ, 2018. С. 114–115.

10. Курашкін С. Ф., Попова І. О. Пристрій захисту трифазних асинхронних електродвигунів. Праці ТДАТУ. Вип. 20 .Т.4. Мелітополь: ТДАТУ, 2020. С. 126–135.

Стаття надійшла до редакції 24.12.2022 р.

**I. Popova, S. Chausov**  
**Dmytro Motornyi Tavria state agrotechnological university**

**INCREASING THE PRECISION OF OPERATION OF THE  
MICROPROCESSOR PROTECTION DEVICE FOR THE  
THREE-PHASE ASYNCHRONOUS MOTORS**

***Summary***

During the operation of engines in the conditions of an agro-industrial complex, up to a quarter of asynchronous motors from the existing quantity fail every year.

In order to increase the operational reliability of asynchronous electric motors with a short-circuited rotor and their resource conservation, to reduce losses of active power in the stator windings, the process of resource consumption of the insulation of an asynchronous motor with a short-circuited rotor in the case of asymmetry of the voltage of the rural network and when the temperature of the stator winding of the asynchronous motor is increased relative to the nominal temperature is investigated in the work as a result of long-term current overload.

The article considers the asynchronous motor protection device at the level of: mathematical modeling, device operation algorithm, structural and principle electrical circuit of the asynchronous motor protection device based on a microcontroller and a modern hardware base in the case of network voltage asymmetry and long-term temperature excess of the stator windings.

The device provides control of phase and line voltages of an asynchronous motor, diagnostics of the temperature of the stator windings, signaling of emergency modes of operation of the motor.

**Key words:** operational reliability, mathematical model, protection device, monitoring, three-phase asynchronous motor, temperature sensor, structural diagram, schematic diagram.