

ринбург: ГОУ ВПО «УГТУ-УПИ», 2003. – 400 с.

5. **Тарасов В. П.** Особенности газодинамики зернистого слоя/ В. П. Тарасов, С. В. Кривенко // Сталь: Международный научно-технический и производственный журнал. - 2014. - № 5. – С. 12-16.

6. **Кривенко С. В.** Коэффициент газодинамического сопротивления слоя окомкованной агломерационной шихты/ С. В. Кривенко // Сталь: Международный научно-технический и производственный журнал. - 2013. - № 4. – С. 16-19.

7. **Гольдштик М.А.** Процессы переноса в зернистом слое / М.А. Гольдштик. – Новосибирск, 1984. – 164 с.

8. **Томаш О.А.** Структура зернистого шару і рух газів у доменних печах: автореф. дис. докт. техн. наук : спец. 05.16.02 «Металургія чорних і кольорових металів та спеціальних сплавів» / **О.А. Томаш.** – Донецьк, 2004. – 35с.

9. **Лейбензон Л.С.** Движение живостей и газов в пористой среде/ **Л.С. Лейбензон.** – М.-Л.: ОГИЗ. – 1947. – 244 с.

10. **Аэров М.Э.** Гидродинамические и тепловые расчеты аппаратов со стационарным и кипящим зернистым слоем / **М.Э. Аэров, О.М. Годес.** – М.: Химия, 1968. - 512 с.

11. Кривенко С. В. Исследование трехфракционного зернистого слоя / **С. В. Кривенко** // Вісник Приазовського державного технічного університету: Зб. наук. пр. – Маріуполь, 2006. – Вип. 16. – С. 13-16.

12. **Кривенко С. В.** Анализ вариации грансостава сыпучих материалов / **С. В. Кривенко** // Известия вузов. Черная металлургия: Научно-технический и производственный журнал, 010. – № 8. – С. 7-11.

Рукопись поступила в редакцию 14.04.17

УДК 62-54: 621.313-024.67.

О.К. ДАНИЛЕЙКО, ст. викладач, А.С. КУЗЬМЕНКО, ст. викладач,  
Г.В. КОЛОМІЦ, асистент, О.К. КОЛОМІЦ, магістрант  
Криворізький національний університет

## РОЗРОБКА ПРОГРАМНИХ ТА АПАРАТНИХ ЗАСОБІВ ДЛЯ КЕРУВАННЯ КРОКОВИМИ ДВИГУНАМИ

**Мета.** Розробка програмного та апаратного забезпечення для керування КД. Для досягнення поставленої мети потрібно зробити: розглянути основні принципи керування для обраних КД; обрати алгоритм керування для кожного КД; проаналізувати можливості програмованого логічного контролера (ПЛК); розробити для (ПЛК) програму керування відповідним КД.

**Методи дослідження.** При вирішенні задачі використовувались загальні методи обчислювальної техніки, побудови локальних мереж та програмування.

**Наукова новизна.** Розглянуті питання побудови систем автоматики та керування технологічними механізмами з КД. Розроблена оригінальна програма керування КД для ПЛК *ABB ACS500-еСо*.

**Практична значимість.** Сучасний стан цифрової електроніки суттєво поширив область використання крокових двигунів (КД). Вони широко використовуються в пристроях з позиційними системами керування а також в сучасних напрямках техніки, таких як механотроніка, робототехніка.

Поява роботів зі замінною позиційних систем, без зворотних зв'язків з дешевими транзисторними перемикачами, посприяло більш поширеному використанню КД.

**Результати.** Для підготовки фахівців, які мають навички в питаннях побудови та налаштування позиційних систем з КД в ДВНЗ «Криворізький національний університет» в навчовий процес впроваджуються лабораторні роботи з аналізу способів керування КД – для чого створено декілька стендів. Перший стенд побудовано на трифазному уніполярному кроковому двигуні. Комутації обмоток фаз реалізована з використанням програмованого логічного контролера (ПЛК). Другий стенд побудовано на двофазному біполярному кроковому двигуні типу *28BYJ-48*, який завдяки невисокій вартості має широкий спектр застосування. Третій стенд побудовано на двофазному біполярному кроковому двигуні з використанням досить поширеного драйвера *MP8825* на базі контролера *DRV8825*. Відповідно обраним способам керування розроблені алгоритми управління двигунами та створенні відповідні програми. Розглянуті питання сприяють покращенню професійної підготовки студентів, та дозволять їм набутти необхідних навичок.

**Ключові слова:** кроковий двигун, контролер, апаратні засоби, стенди.

**Проблема та її зв'язок з науковими і практичними задачами.** Потреби в крокових двигунах стали поштовхом для випуску різноманітних типів крокових двигунів, які мають беззаперечні переваги та малу кількість недоліків, що являє собою недорогу альтернативу позиційному приводу [1].

Систему управління кроковими двигунами достатньо легко оптимізувати під свої потреби, що додатково доводить його універсальність.

Наразі промисловістю випускається КД різних типів, які мають ряд суттєвих переваг:

кут повороту ротора визначається числом імпульсів, що подані на їх систему керування (драйвер);

відсутня необхідність у зворотному зв'язку, а швидкість КД пропорційна частоті вхідних імпульсів;

точне позиціонування та циклічність без накопичення помилок при повороті від кроку до кроку;

можливість отримання наднизьких швидкостей без застосування редуктора;

висока надійність за рахунок відсутності колектору.

До недоліків КД відноситься:

номінальне споживання енергії навіть без навантаження;

можливий пропуск кроку, а отже втрата контролю положення;

ускладнена робота на високих швидкостях внаслідок немиттєвої зміни струму.

**Аналіз досліджень і публікацій.** Крокові двигуни за конструкцією поділяються на біполярні та уніполярні.

У *біполярних* двигунах кожна фаза має одну обмотку, отже, для зміни напрямку магнітного поля необхідно змінювати полярність напруги живлення. У драйверів такого двигуна необхідно використовувати мостовий перетворювач.

У *уніполярних* двигунах в середині кожної обмотки є вивід, що дозволяє перемиканням половини обмоток змінювати напрямок магнітного поля. Це спрощує схему драйвера, тому що тепер немає необхідності зміни полярності напруги. Достатньо лише використовувати чотири простих перемикача. Іноді уніполярні двигуни мають чотири роздільні обмотки[3].

Виходячи з існуючих двох типів КД – біполярні та уніполярні, розрізняють чотири способи керування:

повнокроковий режим без перекриття фаз;

повнокроковий режим з перекриттям фаз;

напівкроковий режим.;

мікрокроковий режим.

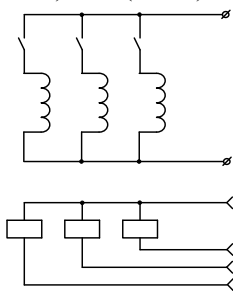
**Постановка задачі.** Для аналізу режимів керування кроковими двигунами було виготовлено три стенди:

стенд з трифазним уніполярним двигуном;

стенд з біполярним двофазним двигуном 28BYJ-48 та драйвером ULN2003;

стенд з біполярним двофазним двигуном та драйвером MP8825.

Викладання матеріалу і результати. *Стенд з трифазним уніполярним двигуном.* Принцип керування найбільш простий. Послідовно комутуються обмотки фаз. Порядок чергування фаз (1-2-3) або (1-3-2) задає напрямок обертання.



**Рис. 1.** Схема керування трифазним уніполярним кроковим двигуном

Ф1, Ф2, Ф3 обмотки двигуна, P1, P2, P3 – проміжні реле, необхідність в яких виникає в зв'язку з різною напругою живлення двигуна та напругою на виходах ПЛК.

В якості ПЛК застосовано програмуємий логічний контролер PLC ABB AC500 eCo.

Контролер програмується за допомогою поширеної системи програмування CoDeSys.

Для керування використані дискретні виходи контролера з номерами 0, 1, 2.

Символічні імена di0, di1, di2 присвоєні наступним дискретним входам – Input 0, Input 1, Input 2, ai0 - аналоговому входу Analog input 0.

Символічні імена do0, do1, do2 присвоєні наступним дискретним виходам Output 0, Output 1, Output 2.

Дискретні входи використані для дозволу роботи двигуна та завдання напрямку його обертання, аналоговий вхід для завдання кількості кроків двигуна, тобто величини кута повороту ротора [2].

Дискретні виходи використані для подачі напруги на проміжні реле, тобто фази двигуна.

```

0001 PROGRAM PLC_PRG
0002 VAR
0003   a1:BLINK;
0004   s1:CTU;
0005   s2:CTU;
0006   f1:BOOL:=0;
0007   a1:WORD;
0008
0009
0010
0011 END_VAR
0012
0013
0014 a1:=aI0/600;
0015 g1.OUT;
0016
0017 s1(CV:=g1.OUT);
0018 s2(CV:=g1.OUT);
0019 a1.CV;
0020
0021 IF a1.CV > 2 THEN a1.RESET:=1; ELSE a1.RESET:=0; END_IF;
0022 IF s2.CV >= a1
0023 THEN s2.RESET:=1; ELSE s2.RESET:=0; END_IF;
0024 IF s2.CV > 0 OR aI0 THEN f1:=1; ELSE f1:=0; END_IF;
0025
0026
0027 IF dI1=0 THEN
0028 IF a1.CV=0 THEN dO0:=1; ELSE dO0:=0; END_IF;
0029 IF a1.CV=1 THEN dO1:=1; ELSE dO1:=0; END_IF;
0030 IF a1.CV=2 THEN dO2:=1; ELSE dO2:=0; END_IF;
0031 END_IF;
0032
0033 IF dI1 THEN
0034 IF a1.CV=0 THEN dO0:=1; ELSE dO0:=0; END_IF;
0035 IF a1.CV=1 THEN dO1:=1; ELSE dO1:=0; END_IF;
0036 IF a1.CV=2 THEN dO1:=1; ELSE dO1:=0; END_IF;
0037 END_IF;
0038
0039
0040 (* dI0 - розрешення з'єднання - ніколи не сбросить, а протилежним слухом вращається в кругобу
0041 dI1 - дозволена вращація *);
0042
0043
0044
0045

```

Рис. 2. Структура програми керування

В секції опису змінних створено три екземпляри об'єктів:

g1 - генератор імпульсів; s1, s2 - інкрементні лічильники.

Створені дві змінні:

f1 – логічна змінна, яка використовується в системі керування двигуном; a1 – 16 бітова змінна, яка – для узгодження величини аналогового входу з розподільчою здатністю двигуна (максимальне значення аналогового входу – це один оберт двигуна).

Генератор g1 задає тактові

імпульси для керування (частота обмежена частотними характеристиками виходів ПЛК). За допомогою операторів *IF* реалізована логіка керування двигуном для прямого та зворотного напрямку обертання.

Лічильник s2 підраховує кількість зроблених кроків. Кількість кроків задається напругою на аналоговому вході aI0.



Рис. 3. Зовнішній вигляд стану для керування трифазним уніполярним кроковим двигуном

Стенд з двофазним біполярним двигуном з об'єднаною середньою точкою. Стенд розроблено для керування кроковим біполярним двигуном 28BYJ-48, зовнішній вигляд та схема з'єднання обмоток якого наведена на рис. 4.

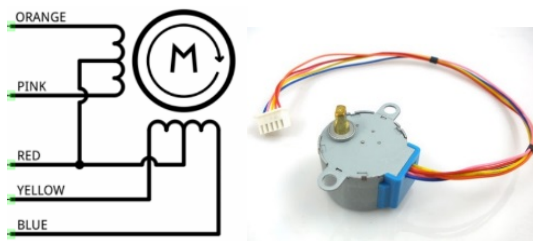


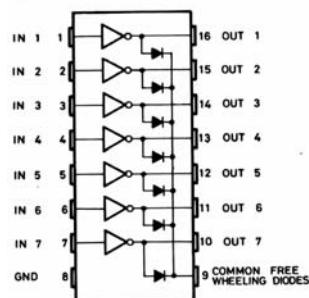
Рис. 4. Зовнішній вигляд та схема з'єднання обмоток крокового двигуна 28BYJ-48

Двигун оснащений редуктором з коефіцієнтом передачі 1/64.

Для керування двигуном використовується драйвер *ULN2003*, внутрішня схема якого наведена на рис. 5.

Драйвер являє собою звичайний дарлінгтонівський підсилювач та використовується для узгодження по рівням напруги та потужності двигуна та виходів ПЛК

Рис. 5. Внутрішня схема драйвера *ULN2003*



У зв'язку з тим, що у двигуна з'єднані середні точки напівобмоток для керування використовується напівкрокова послідовність керування, при якій одночасно під струмом знаходяться дві обмотки [4].

На входи *IN1*, *IN2*, *IN3*, *IN4* подаються сигнали з відповідних виходів ПЛК.

В якості ПЛК застосовано запрограмований логічний контролер *PLC ABB AC500 eCo*.

Рис.6. Схема керування двигуном



Для керування двигуном обрані дискретні входи з номерами 0, 1, 2, 3, дискретні виходи з номерами 0, 1, 2, 3 та аналоговий вхід з номером 0.

Вхід di0 використано для дозволу роботи, di1, di2 - завдання напрямку обертання, di3 - скидання. Аналоговий вхід - завдання куту повороту двигуна [5].

Дискретні виходи використовуються для подачі напруги на фази двигуна.

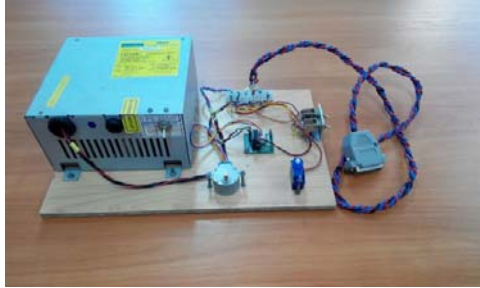
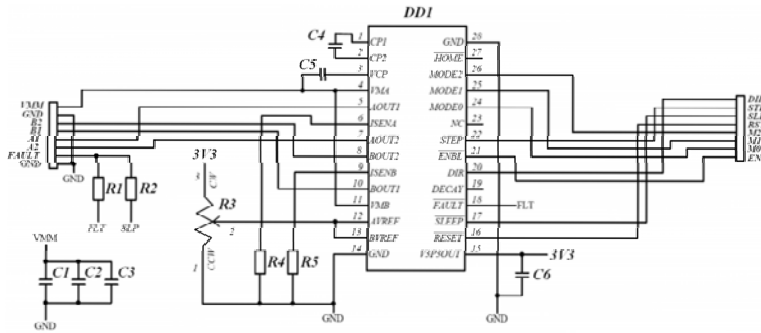


Рис. 7. Зовнішній вигляд стенду для керування кроковим двигуном 28BYJ-48

Стенд для довільного двофазного біполярного двигуна. Як було розглянуто вище, для керування кроковим двигуном у мікрокроковому режимі використовується ШІМ модуляція напруги. Такий режим має вагомні переваги о яких вже було сказано [7]. Для керування кроковим двигуном у мікрокроковому режимі було використано досить поширений драйвер MP8825.

Рис. 8. Схема драйверу MP8825 (DD1 – контролер DRV8825)



Призначення вхідних виводів наведено в табл. 1.

Зрозуміло, що такий спосіб керування вимагає можливості використання ШІМ. В контролері DRV8825 реалізовано повно керований транзисторний міст [11].

Таблиця 1

Призначення вхідних виводів	
Вхідні виводи	Призначення
EN	Дозвіл роботи
DIR	Напрямок обертання
STP	Дозвіл одного кроку
SLP	Сплячий режим
RST	Скидання
M2	Вибір кроку
M1	Вибір кроку
M0	Вибір кроку

Призначення вихідних виводів наведено в табл. 2.

Таблиця 2

Призначення вихідних виводів	
Вихідні виводи	Призначення
VMM	Живлення
GND	Земля
B2	Обмотка B двигуна
B1	Обмотка B двигуна
A2	Обмотка A двигуна
A1	Обмотка A двигуна
FAULT	Несправність

Входи M0, M1, M2 дозволяють реалізувати мікро кроковий режим керування двигуном. Залежність кроку від значень входів M0, M1, M2 наведено в табл. 3.

Залежність величини кроку від значень  $M0$ ,  $M1$ ,  $M2$ 

Крок	$M2$	$M1$	$M0$
1	0	0	0
1/2	0	0	1
1/4	0	1	0
1/8	0	1	1
1/16	1	0	0
1/32	1	0	1
1/32	1	1	0
1/32	1	1	1

Для стенду був використаний двох фазний кроковий двигун з стандартною схемою підключення до драйвера.

Призначення входів ПЛК *ABB AC500 eCo*:

input 0 - дозвіл роботи двигуна;

input 1-  $M0$ ;

input 2-  $M1$ ;

input 3-  $M2$ ;

input 5- напрямок обертання;

```

0001 PROGRAM PLC_PRG
0002 VAR
0003   b1:BI.LINK;
0004   (*tt:TOF;*)
0005   ct:CTU;
0006   s1:BOOL;
0007   s2:BOOL;
0008   f:BOOL:=0;
0009   n:WORD;
0010   st1:BOOL;
0011
0012
0013
0014
0015
0016
0017 END_VAR
0018
0019
0020
0021
0022
0023
0024
0025
0026
0027
0028
0029
0030
0031
0032
0033
0034
0035
0036
0037
0038
0039
0040
0041
0042
0043
0044
0045
0046
0047
0048
0049
0050
0051
0052
0053
0054
0055
0056
0057
0058
0059
0060
0061
0062
0063
0064
0065
0066
0067
0068
0069
0070
0071
0072
0073
0074
0075
0076
0077
0078
0079
0080
0081
0082
0083
0084
0085
0086
0087
0088
0089
0090
0091
0092
0093
0094
0095
0096
0097
0098
0099
0100
0101
0102
0103
0104
0105
0106
0107
0108
0109
0110
0111
0112
0113
0114
0115
0116
0117
0118
0119
0120
0121
0122
0123
0124
0125
0126
0127
0128
0129
0130
0131
0132
0133
0134
0135
0136
0137
0138
0139
0140
0141
0142
0143
0144
0145
0146
0147
0148
0149
0150
0151
0152
0153
0154
0155
0156
0157
0158
0159
0160
0161
0162
0163
0164
0165
0166
0167
0168
0169
0170
0171
0172
0173
0174
0175
0176
0177
0178
0179
0180
0181
0182
0183
0184
0185
0186
0187
0188
0189
0190
0191
0192
0193
0194
0195
0196
0197
0198
0199
0200
0201
0202
0203
0204
0205
0206
0207
0208
0209
0210
0211
0212
0213
0214
0215
0216
0217
0218
0219
0220
0221
0222
0223
0224
0225
0226
0227
0228
0229
0230
0231
0232
0233
0234
0235
0236
0237
0238
0239
0240
0241
0242
0243
0244
0245
0246
0247
0248
0249
0250
0251
0252
0253
0254
0255
0256
0257
0258
0259
0260
0261
0262
0263
0264
0265
0266
0267
0268
0269
0270
0271
0272
0273
0274
0275
0276
0277
0278
0279
0280
0281
0282
0283
0284
0285
0286
0287
0288
0289
0290
0291
0292
0293
0294
0295
0296
0297
0298
0299
0300
0301
0302
0303
0304
0305
0306
0307
0308
0309
0310
0311
0312
0313
0314
0315
0316
0317
0318
0319
0320
0321
0322
0323
0324
0325
0326
0327
0328
0329
0330
0331
0332
0333
0334
0335
0336
0337
0338
0339
0340
0341
0342
0343
0344
0345
0346
0347
0348
0349
0350
0351
0352
0353
0354
0355
0356
0357
0358
0359
0360
0361
0362
0363
0364
0365
0366
0367
0368
0369
0370
0371
0372
0373
0374
0375
0376
0377
0378
0379
0380
0381
0382
0383
0384
0385
0386
0387
0388
0389
0390
0391
0392
0393
0394
0395
0396
0397
0398
0399
0400
0401
0402
0403
0404
0405
0406
0407
0408
0409
0410
0411
0412
0413
0414
0415
0416
0417
0418
0419
0420
0421
0422
0423
0424
0425
0426
0427
0428
0429
0430
0431
0432
0433
0434
0435
0436
0437
0438
0439
0440
0441
0442
0443
0444
0445
0446
0447
0448
0449
0450
0451
0452
0453
0454
0455
0456
0457
0458
0459
0460
0461
0462
0463
0464
0465
0466
0467
0468
0469
0470
0471
0472
0473
0474
0475
0476
0477
0478
0479
0480
0481
0482
0483
0484
0485
0486
0487
0488
0489
0490
0491
0492
0493
0494
0495
0496
0497
0498
0499
0500
0501
0502
0503
0504
0505
0506
0507
0508
0509
0510
0511
0512
0513
0514
0515
0516
0517
0518
0519
0520
0521
0522
0523
0524
0525
0526
0527
0528
0529
0530
0531
0532
0533
0534
0535
0536
0537
0538
0539
0540
0541
0542
0543
0544
0545
0546
0547
0548
0549
0550
0551
0552
0553
0554
0555
0556
0557
0558
0559
0560
0561
0562
0563
0564
0565
0566
0567
0568
0569
0570
0571
0572
0573
0574
0575
0576
0577
0578
0579
0580
0581
0582
0583
0584
0585
0586
0587
0588
0589
0590
0591
0592
0593
0594
0595
0596
0597
0598
0599
0600
0601
0602
0603
0604
0605
0606
0607
0608
0609
0610
0611
0612
0613
0614
0615
0616
0617
0618
0619
0620
0621
0622
0623
0624
0625
0626
0627
0628
0629
0630
0631
0632
0633
0634
0635
0636
0637
0638
0639
0640
0641
0642
0643
0644
0645
0646
0647
0648
0649
0650
0651
0652
0653
0654
0655
0656
0657
0658
0659
0660
0661
0662
0663
0664
0665
0666
0667
0668
0669
0670
0671
0672
0673
0674
0675
0676
0677
0678
0679
0680
0681
0682
0683
0684
0685
0686
0687
0688
0689
0690
0691
0692
0693
0694
0695
0696
0697
0698
0699
0700
0701
0702
0703
0704
0705
0706
0707
0708
0709
0710
0711
0712
0713
0714
0715
0716
0717
0718
0719
0720
0721
0722
0723
0724
0725
0726
0727
0728
0729
0730
0731
0732
0733
0734
0735
0736
0737
0738
0739
0740
0741
0742
0743
0744
0745
0746
0747
0748
0749
0750
0751
0752
0753
0754
0755
0756
0757
0758
0759
0760
0761
0762
0763
0764
0765
0766
0767
0768
0769
0770
0771
0772
0773
0774
0775
0776
0777
0778
0779
0780
0781
0782
0783
0784
0785
0786
0787
0788
0789
0790
0791
0792
0793
0794
0795
0796
0797
0798
0799
0800
0801
0802
0803
0804
0805
0806
0807
0808
0809
0810
0811
0812
0813
0814
0815
0816
0817
0818
0819
0820
0821
0822
0823
0824
0825
0826
0827
0828
0829
0830
0831
0832
0833
0834
0835
0836
0837
0838
0839
0840
0841
0842
0843
0844
0845
0846
0847
0848
0849
0850
0851
0852
0853
0854
0855
0856
0857
0858
0859
0860
0861
0862
0863
0864
0865
0866
0867
0868
0869
0870
0871
0872
0873
0874
0875
0876
0877
0878
0879
0880
0881
0882
0883
0884
0885
0886
0887
0888
0889
0890
0891
0892
0893
0894
0895
0896
0897
0898
0899
0900
0901
0902
0903
0904
0905
0906
0907
0908
0909
0910
0911
0912
0913
0914
0915
0916
0917
0918
0919
0920
0921
0922
0923
0924
0925
0926
0927
0928
0929
0930
0931
0932
0933
0934
0935
0936
0937
0938
0939
0940
0941
0942
0943
0944
0945
0946
0947
0948
0949
0950
0951
0952
0953
0954
0955
0956
0957
0958
0959
0960
0961
0962
0963
0964
0965
0966
0967
0968
0969
0970
0971
0972
0973
0974
0975
0976
0977
0978
0979
0980
0981
0982
0983
0984
0985
0986
0987
0988
0989
0990
0991
0992
0993
0994
0995
0996
0997
0998
0999
1000

```

analog input 0 –кількість заданих кроків.

**Рис. 9.** Структурна програма керування

В секції опису змінних створено два екземпляри об'єктів:

b1 - генератор імпульсів;

ct - інкрементний лічильник.

Створені наступні змінні:

$f$ ,  $s1$ ,  $s2$ ,  $st1$  – логічні змінні, які використовуються в системі керування двигуном;

$n$  – 16 бітова змінна, яка використовується для узгодження величини аналогового входу з розподільчою здатністю двигуна (максимальне значення аналогового входу – це один оберт двигуна).

Імпульси з генератора  $b1$  передаються в інверсному вигляді на вхід драйвера *STP*, тобто по кожному імпульсу формується завдання на один крок.

Ці ж імпульси подаються на вхід лічильника  $ct$ . Вихід лічильника порівнюється з заданою кількістю кроків. Після

досягнення заданого значення генератор зупиняється.

Змінюючи значення  $M0$ ,  $M1$ ,  $M2$ , можливо змінити кут повороту двигуна у відповідне число разів.



**Рис. 10.** Зовнішній вигляд стенду для керування кроковим двигуном з драйвером *MP8825*

Відповідно обраним способам керування розроблені алгоритми управління двигунами та створенні відповідні програми [9].

**Висновки та напрямок подальших досліджень.** Розглянуті питання сприяють покращенню професійної підготовки студентів, та дозволяють їм набути необхідних навичок.

### Список літератури

1. **Емельянов А.В.** Шаговые двигатели: учеб. пособие/ А.В. Емельянов, А.Н. Шилин/ВолгГТУ. - Волгоград, 2005. - 48 с.

2. **Tony R. Kuphaldt.** Lessons In Electric Circuits, Volume II – AC, Sixth Edition, 2007. - 561 с.
3. **Брускин Д.Э., Зорохович А.Е., Хвостов В.С.** Электрические машины и микромашины: Учеб. для электротехн. спец. вузов. - 3-е изд., перераб. и доп. - М.: Высш. шк., 1990. - 528 с.
4. Дискретный электропривод с шаговыми двигателями. Подобр. ред. **М.Г. Чиликина.** М., «Энергия», 1971. - 624 с.
5. **Ion Boldea.** Electric drives. — Lexington, KY, USA — 2005, - 549 с.
6. **Чиликин М.Г., Сандлер А.С.** Общий курс электропривода: Учебник для вузов. - 6-е изд., доп. и перераб. - М.: Энергоиздат, 1981. - 576 с.
7. Теория электропривода, ч.1: учебное пособие / Сост.: А.Б. **Зеленов** – Алчевск, ДонГТУ, 2005. – 382 с.
8. LM2675 SIMPLE SWITCHER Power Converter High Efficiency 1A Step-Down Voltage Regulator, Texas Instruments Inc., Rev. June 2005
9. L293, L293D PUSH-PULL FOUR CHANNEL DRIVER WITH DIODES STMicroelectronics, July 2003.
10. **Rentyuk Vladimir** «Control stepper motors in both directions» EDN March 18, 2010.
11. **Кенио Такаши.** Шаговые двигатели и их микропроцессорные системы управления: Пер. с англ., М.: Энергоатомиздат, 1987 – 199 с.
12. **Белов М.П., Новіков В.А., Розсудів Л. Н.** Автоматизований електропривод типових виробничих механізмів і технологічних комплексів. - 3-е изд., Испр .. - М.: Видавничий центр "Академія", 2007.
13. Мала гірнича енциклопедія. В 3-х т. / За ред. **В. С. Білецького.** — Донецьк: Донбас, 2004.

Рукопись поступила в редакцию 14.04.17

УДК 621.316.001.57

М.Л. БАРАНОВСЬКА, канд. техн. наук, доц., А.С. КУЗЬМЕНКО, старший викладач  
Криворізький національний університет

## АНАЛІЗ ТЕОРІЙ РІВНІВ ПЕРЕНАПРУГ ПРИ ЗАМИКАННІ ФАЗИ НА ЗЕМЛЮ ТА ЇХ ДОСЛІДЖЕННЯ НА ФІЗИЧНІЙ МОДЕЛІ

**Мета.** Метою даної роботи є виконання аналізу теорій і механізмів розвитку перенапруг при однофазних дугових замиканнях на землю (ОДЗ). Проаналізовано відомі теорії перенапруги Петерсена, Петерса і Слепяна, Белякова. Однофазні замикання на землю (ОЗЗ), що виникають у розподільчих мережах 6-10 кВ з ізолюваною нейтраллю, є переважним видом uszkodжень і складають більше 75% від загального числа uszkodжень. Перенапруги, що виникають при ОЗЗ, знижують електричну міцність ізоляції живильних кабелів, приводять до їхнього пробоя та руйнування, багатомісним uszkodженням, подвійним замиканням на землю, дво- і трифазним коротким замиканням. Це пов'язано з відмовами в роботі електрообладнання, тривалими простоями технологічного устаткування, додатковими витратами на його відновлення та, в кінцевому рахунку, до зменшення продуктивності підприємства.

**Методи.** При виконанні теоретичних досліджень прийнято метод математичного моделювання розподільчих мереж напругою 6-10 кВ з ізолюваною нейтраллю при ОЗЗ. Розроблено і вдосконалено математичні моделі розподільчих мереж та обґрунтовано основні і малозначимі параметри, що впливають на перенапруги при замиканні фази на землю. При виконанні експериментальних досліджень прийнято метод замикання на землю однієї з штучно пошкоджених фаз зразка кар'єрного кабелю. Вимірювались навантажувальні параметри: рівні напруг в фазах, нейтралі і струм в пошкодженій фазі.

**Наукова новизна.** Докладно вивчено питання теорії дуги, зроблено висновок про те, що на розвиток перехідних процесів при ОЗЗ впливають умови виникнення дуги, середовище, в якому вона горить, швидкість зміни струму при переході через нуль, індуктивність фази мережі  $L$ , ємності фаз відносно землі  $C$  та величина опору кола замикання на землю. При ОЗЗ величина опору кола замикання на землю змінюється в широких межах.

**Практична значимість.** Розглянуто залежність рівнів перенапруг від величини опору кола замикання на землю. Виконано дослідження рівнів перенапруг, що виникають в розподільчих мережах 6-10 кВ з ізолюваною нейтраллю, на фізичній моделі.

**Результати.** З результатів експеримента видно, що комплексне використання в розподільчій мережі струмообмежувального резистора в нейтралі і нелінійних обмежувачів перенапруг (ОПН) дозволило знизити перенапруги до нормованих значень в межах 1,7-1,8 від номінальної напруги.

**Ключові слова:** розподільча мережа, дуга, однофазні замикання на землю (ОЗЗ), опір кола замикання на землю, рівень перенапруг, нелінійний обмежувач перенапруг (ОПН).

**Проблема та її зв'язок з науковими та практичними завданнями.** Однофазні замикання на землю (ОЗЗ) в розподільчих мережах 6-10 кВ - переважний вид uszkodжень, який становить понад 75 % від загального числа uszkodжень. ОЗЗ представляють значну небезпеку для людей, установок і розподільчих мереж. При дугових замиканнях на землю (ОДЗ) виникають перенап-