

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ  
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ  
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»

# БЕЗКООНТАКТНІ РЕГУЛЬОВАНІ ЕЛЕКТРИЧНІ МАШИНИ

## ПРАКТИКУМ

*Рекомендовано Методичною радою КПІ ім. Ігоря Сікорського  
як навчальний посібник для студентів,  
які навчаються за спеціальністю 141 «Електроенергетика, електротехніка та  
електромеханіка»,  
освітньою програмою «Електричні машини і апарати»*

Київ  
КПІ ім. Ігоря Сікорського  
2022

Безконтактні регульовані електричні машини: практикум [Електронний ресурс] : навч. посіб. для студ. спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка», освітньої програми «Електричні машини і апарати» / КПІ ім. Ігоря Сікорського ; уклад.: В. В. Чумак, М. А. Коваленко, В. В. Котлярова. – Електронні текстові дані (1 файл: 2,86 Мбайт). – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2022. – 55 с.

*Гриф надано Методичною радою КПІ ім. Ігоря Сікорського (протокол № 6 від 24.06.2022 р.)  
за поданням Вченої ради ФЕА (протокол № 10 від 20.06.2022 р.). Реєстр. № 21/22-821*

Електронне мережне навчальне видання

# БЕЗКОНТАКТНІ РЕГУЛЬОВАНІ ЕЛЕКТРИЧНІ МАШИНИ

## ПРАКТИКУМ

Укладачі: *Чумак Вадим Володимирович*, канд. техн. наук, доц.  
*Коваленко Михайло Анатолійович*, канд. техн. наук, доц.  
*Котлярова Вікторія Володимирівна*, ст. викл.

Відповідальний редактор *Цивінський С.С.*, канд. техн. наук, доц.

Рецензент *Островецький М.Я.*, д-р техн. наук, проф., зав. каф. ТЕ, ФЕА, КПІ ім. Ігоря Сікорського

Дисципліна «Безконтактні регульовані електричні машини» має на меті вивчення системи властивостей безконтактних регульованих електричних машин – їх конструкцію, принцип дії, параметри, характеристики та режими роботи. Метою практичних занять є закріплення теоретичних знань, отриманих з теорії безконтактних регульованих електричних машин при вивченні лекційного курсу, розв'язання розрахункових задач та виконання прикладних практичних робіт, пов'язаних із тематикою курсу та системами регулювання безконтактними електричними машинами.

У практикумі наведена тематика практичних робіт, загальні методичні рекомендації, деякі схемні рішення, що дозволять краще засвоїти матеріал та сприяють успішному виконанню поставлених на практиці завдань.

Навчальний посібник призначений для здобувачів вищої освіти першого (бакалаврського) рівня спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка», освітньої програми «Електричні машини і апарати».

## ЗМІСТ

|  |    |
|--|----|
| ВСТУП.....   | 4  |
| 1. Регулятори швидкості та моменту безконтактних електричних машин (БЕМ) .....   | 6  |
| 2. Засоби для вимірювання швидкості обертання безконтактних електродвигунів .....  | 17 |
| 3. Регулятори потужності, напруги та струму для систем керування БЕМ.....  | 23 |
| 4. Регульовані блоки живлення для дослідження характеристик та параметрів БЕМ.....   | 26 |
| 5. Системи контролю та вимірювання БЕМ.....  | 28 |
| 6. Перетворювачі напруги для регульованих безконтактних електрогенераторів та електродвигунів. Вентильні двигуни та генератори. Регулювання напруги та частоти обертання вентильних машин..... | 39 |
| 7. Розрахунок параметрів схеми заміщення безконтактних машин. Будова частотно-регульованих двигунів .....  | 47 |
| 8. Регулювання частоти обертання асинхронних частотно-регульованих двигунів .....  | 53 |
| Список використаної та рекомендованої літератури .....   | 55 |

## ВСТУП

Навчальна дисципліна «**Безконтактні регульовані електричні машини**» складена відповідно до освітньо-професійної програми підготовки бакалавра в галузі знань 14 «Електрична інженерія» спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка» для студентів освітньої програми «Електричні машини і апарати».

Предметом навчальної дисципліни «Безконтактні регульовані електричні машини» є система властивостей безконтактних регульованих електричних машин – їх конструкція, принцип дії, параметри, характеристики та режими роботи.

Метою практичних занять є закріплення теоретичних знань, отриманих з теорії безконтактних регульованих електричних машин при вивченні лекційного курсу, розв'язання розрахункових задач та виконання прикладних практичних робіт, пов'язаних із тематикою курсу та системами регулювання безконтактними електричними машинами.

В даному практикумі наведена тематика практичних робіт, загальні методичні рекомендації, деякі схемні рішення, що дозволять краще засвоїти матеріал та посприяють успішному виконанню поставлених на практиці завдань.

Для виконання практичних робіт кожна навчальна група має поділитися на 3-4 бригади по 3-5 осіб в кожній. За кожною бригадою закріплюється певний ряд завдань. Кожна тема відповідає проблематиці лекційного курсу і не виходить за його межі. Перелік тем практичних завдань наведено нижче:

1. Регулятори швидкості та моменту крокових двигунів;
2. Системи управління двигунами та генераторами на постійних магнітах на основі широтно-імпульсної модуляції (ШІМ);
3. Засоби для вимірювання швидкості обертання безконтактних електродвигунів;
4. Підсилювачі сигналів (підсилювачі) для дослідження процесів в малопотужних БЕМ;
5. Регулятори потужності, напруги та струму для систем керування БЕМ;

6. Регульовані блоки живлення для дослідження характеристик та параметрів БЕМ;
7. Системи температурного контролю БЕМ (термореле, термодатчики та ін.);
8. Вимірювальні прилади в системах БЕМ;
9. Цифрові стробоскопи для високошвидкісних систем на базі БЕМ;
10. Перетворювачі напруги для регульованих безконтактних електрогенераторів та електродвигунів.
11. Вентильні двигуни та генератори. Регулювання напруги та частоти обертання вентильних машин;
12. Розрахунок параметрів схеми заміщення безконтактних машин;
13. Поліпшення регульовальних властивостей безконтактних електричних машин;
14. Регулювання частоти обертання асинхронних частотно-регульованих двигунів.

Кожен етап роботи завершується звітом за виконаною роботою. Звіт складається у довільній формі, але повинен обов'язково мати наступні частини: титульний лист (виконаний за діючими стандартами), зміст, анотацію, вступ, основні розділи, висновок, список використаних джерел та додатки.

## 1. Регулятори швидкості та моменту безконтактних електричних машин

Вибір схеми керування кроковими двигунами (КД) залежить від типу КД та схеми з'єднання обмоток. За способом з'єднання обмоток крокові двигуни поділяють на:

1. Біполярні (Bipolar Stepper Motors), що мають чотири вивідних кінці (Рис. 1, а);
2. Уніполярні (Unipolar Stepper Motors), що мають п'ять вивідних кінців (із середньою точкою) (Рис. 1, б);
3. Чотирьохобмоткові (Multipolar Stepper Motors), що мають вісім вивідних кінців (може бути середня точка) (Рис. 1, в).

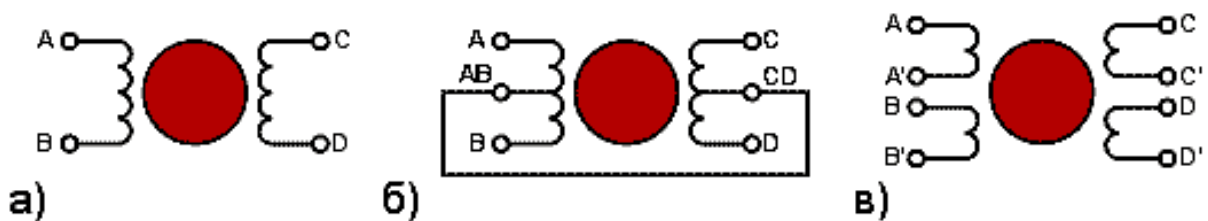


Рис. 1. Біполярний КД (а), уніполярний (б) та чотирьохобмотковий (в)

Крокові двигуни широко використовуються в різних сферах виробництва та побуту, вони мають забезпечувати різні режими роботи. КД працюють при різній швидкості обертання, точності та моменту на валу. Саме для цього потрібні різні способи керування КД. Розрізняють чотири способи керування кроковим двигуном:

- Повнокроковий режим без перекриття фаз;
- Повнокроковий режим з перекриттям фаз;
- Напівкроковий режим;
- Мікрокроковий режим.

Ці способи керування повинна забезпечувати система керування та силова частина (драйвер). З початком використання крокових двигунів почалося і використання спеціальних схем керування ними. Ці схеми дозволяють змінювати як напрямок обертання двигуна, так і швидкість обертання та

кількість кроків. Схема керування КД є статичним перетворювачем частоти, що забезпечує  $m$ -фазну систему імпульсів напруги несинусоїдальної форми (як правило ступінчастої з крутим фронтом). Типова функціональна схема керування кроковим двигуном показана на рис. 2.

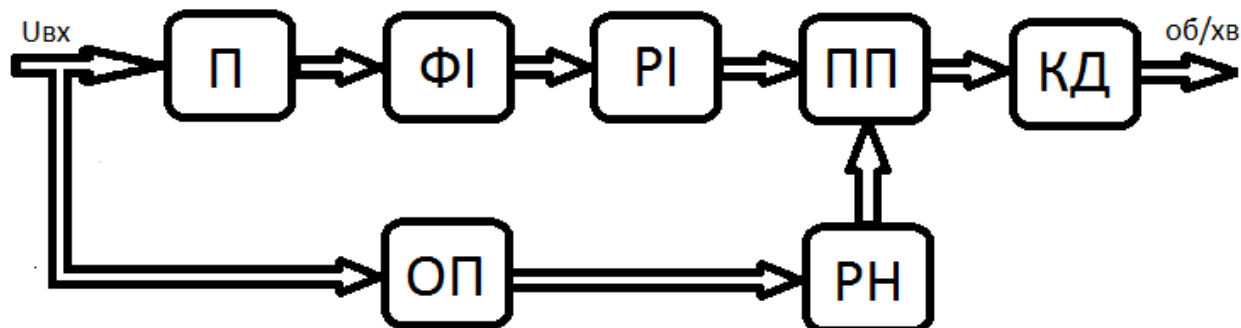


Рис. 2. Загальна функціональна схема керування КД

Перетворювач П безперервного сигналу в частотно-модульовану послідовність імпульсів напруги використовується тільки в тих випадках, коли вхідна інформація задається у вигляді величини, що безперервно змінюється. Формувач імпульсів ФІ перетворює вхідні імпульси довільної форми в прямокутні імпульси необхідної довжини. Розподільник імпульсів перетворює унітарний код в  $m$ -фазну систему прямокутних імпульсів напруги, яка через підсилювач потужності ПП, який складається з однотипних каналів, подається на обмотки крокового двигуна. Ключові елементи ПП працюють в режимі перемикачів. Регулятор напруги РН, який керується через обчислюваний прилад ОП вхідними сигналами  $U_{вх}$ , формує необхідну напругу на фазах КД. В найпростішому випадку кроковий двигун працює з незмінною фазною напругою і регулятор напруги разом з обчислюваним приладом не використовуються в схемі керування. Найбільш широке використання при керуванні кроковим двигуном малої потужності (десятки Вт) знайшли транзистори, а для силових крокових двигунів (сотні Вт) – тиристори.

Розрізняють наступні схемні рішення для керування швидкістю та моментом КД:

- Логічні схеми (на основі логічних елементів);
- Схеми на базі мікроконтролера;

- Схеми на базі мікропроцесорного керування;
- Комп'ютерне керування (за допомогою LPT, COM та USB портів).

*Рекомендації до вибору схеми керування на основі логічних елементів.*

Схема керування на основі логічних елементів активно використовувалася в кінці минулого століття, в той час, коли мікропроцесорна техніка лише набирала оберти. Однак, навіть в наш час на базі логічних елементів розробляються дешеві та надійні рішення для керування автономними КД.

При виборі студентом даного способу керування необхідно проаналізувати загальні недоліки та переваги такого способу.

Переваги схеми керування на базі логічних елементів:

- Простота у створенні та використанні;
- Надійність у роботі;
- Відносно невеликі габарити монтажної плати;
- Доступність елементів;
- Відсутня необхідність у написанні програми керування;
- Висока швидкодія.

Недоліками схеми керування на базі логічних елементів:

- Відносно велике енергоспоживання;
- Невисока перешкодостійкість;
- Відносно велика ціна готової плати.

Зразок рекомендованої схеми на логічних елементах для уніполярного КД наведено на рис. 3 [3-4].

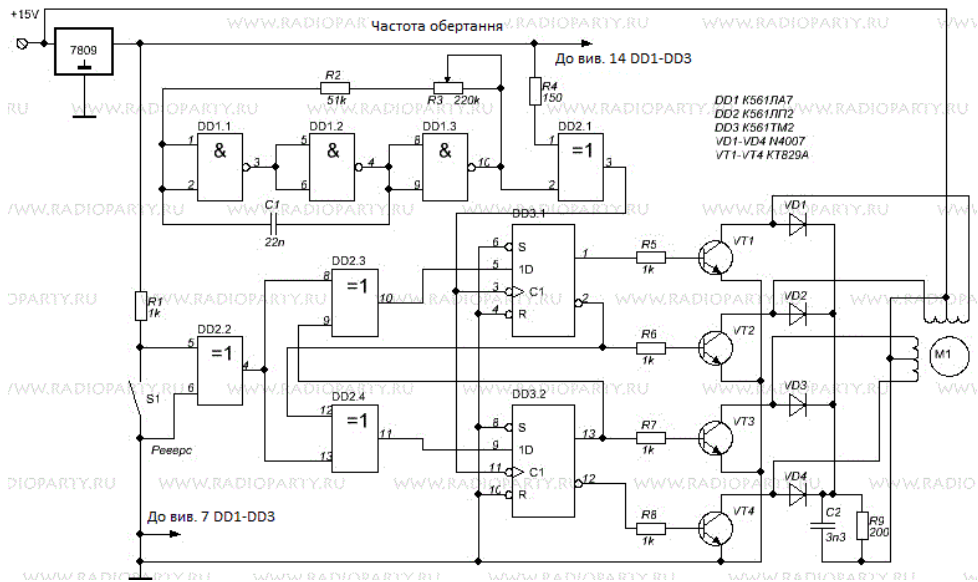


Рис. 3. Схема керування КД на логічних елементах

Специфікація елементів для даної схеми та орієнтовна вартість її елементів наведено в табл. 1.

Таблиця 1

Специфікація елементів схеми керування КД на логічних елементах

| Елемент       | Кількість | Ціна, грн |                          | Кількість | Ціна, грн |
|---------------|-----------|-----------|--------------------------|-----------|-----------|
| Стабілізатор  | 1         | 9         | Мікросхеми:              |           |           |
| Резистори:    |           |           | K651ЛА7<br>(або аналоги) | 3         | 46,8      |
| 51 кОм        | 1         | 0,22      | K651ЛП2<br>(або аналоги) | 4         | 92        |
| 220 кОм       | 1         | 3,96      | K651ТМ2<br>(або аналоги) | 2         | 54        |
| 150 кОм       | 1         | 2,5       | Діоди:                   |           |           |
| 1 кОм         | 5         | 5         | N4007                    | 4         | 1,96      |
| 200 Ом        | 1         | 0,5       | Транзистори:             |           |           |
| Конденсатори: |           |           | КТ829А                   | 4         | 20        |

Загальна вартість схеми керування на логічних елементах:  $\approx 260$  грн.

### Рекомендації до вибору схеми керування на базі мікроконтролера.

Схема на основі мікроконтролера дозволяє керувати будь-якими уніполярними та біполярними кроковими двигунами в різних режимах швидкостей і кроку. Дана схема працює повністю автономно.

На рис. 4 представлено найпростіший варіант схеми управління КД на базі мікроконтролера. Основою рекомендованого рішення є недорогий мікроконтролер від ATMEL типу ATTINY 2313 (або його аналоги) [6, 7]. Дана схема дозволяє реалізовувати плавну зміну швидкості обертання, реверс і декількох режимів управління КД без зміни структури схеми, кількості елементів та принципів побудови. Управління схемою здійснюється за допомогою 5 кнопок.

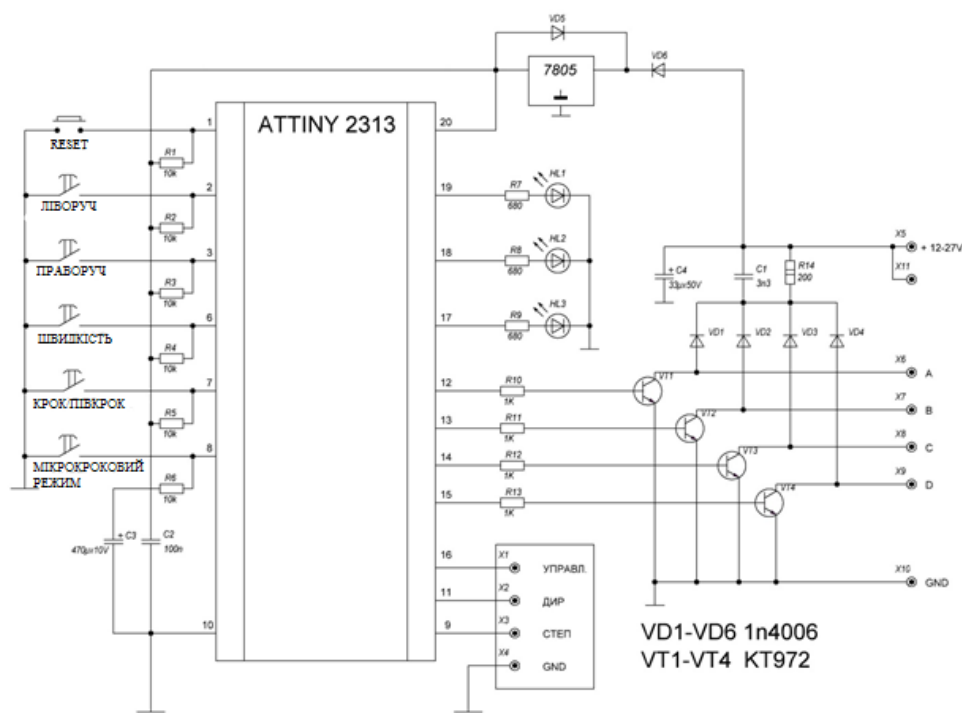


Рис. 4. Схема керування КД на мікроконтролері

Перелік та номінали всіх елементів схеми показані на рис. 4. Загальна вартість даної схеми з урахуванням всіх елементів  $\approx 160$  грн.

Переваги схеми керування на базі мікроконтролера:

- Простота у створенні та використанні;
- Надійність у роботі;
- Невеликі габарити монтажною плати;

- Доступність елементів.

Недоліки схеми керування на базі мікроконтролера:

- Необхідність у написанні програми керування;
- Невисока швидкодія;
- Необхідні фахівці, що зможуть його правильно запрограмувати.

*Рекомендації до вибору схеми керування на базі мікропроцесора.*

Схемні рішення на основі мікропроцесорної техніки мають місце в складних системах із зворотнім зв'язком. Робота з такими системами вимагає відповідної кваліфікації, знань, навичок та умінь. Розглянемо схему на базі мікропроцесора AMIS – 30621, що використовується в промислових цілях в таких галузях як текстильна промисловість, легка промисловість, деревообробка, офісна та оргтехніка та ін. (рис. 5) [1, 2].

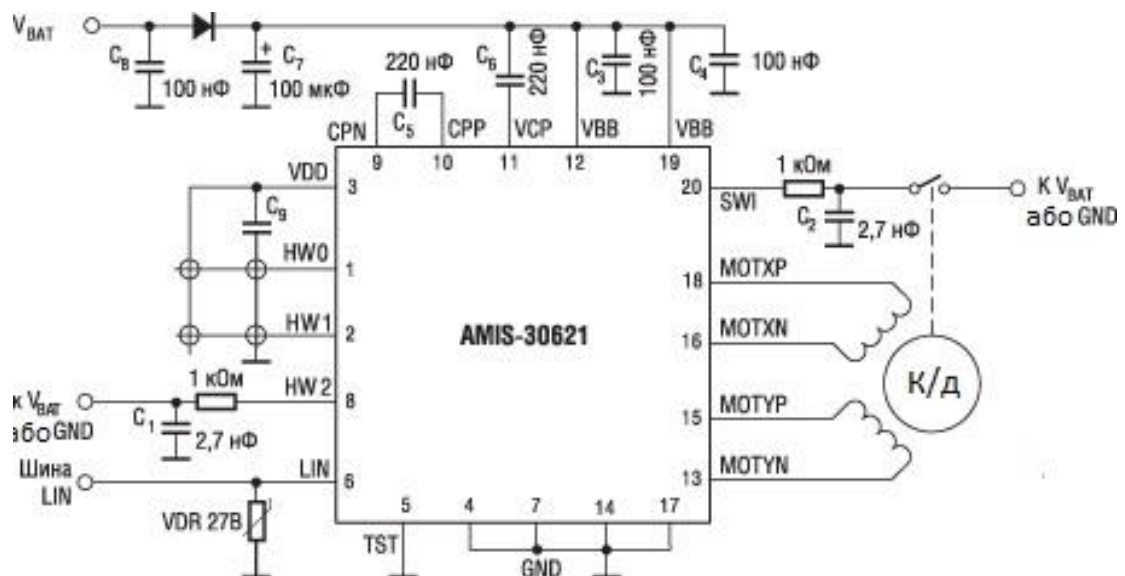


Рис. 5. Схема мікропроцесорного керування КД

В табл. 2 представлено перелік елементів такої схеми керування та їх орієнтовна вартість.

Таблица 2

Вартість схеми керування КД на базі мікропроцесора

| Елемент       | Кількість | Ціна, грн |
|---------------|-----------|-----------|
| AMIS - 30621  | 1         | 860       |
| Конденсатори: |           |           |
| 100 нФ        | 3         | 2,88      |

|                   |   |      |
|-------------------|---|------|
| 100 мкФ           | 1 | 1,4  |
| 220 нФ            | 2 | 2    |
| 2,7 нФ            | 3 | 2,88 |
| Резистори:        |   |      |
| 1 кОм             | 1 | 1    |
| Змінний опір      | 1 | 5    |
| Монтажна плата    | 1 | 50   |
| Загальна вартість |   | 930  |

Переваги виконання схеми керування КД на мікропроцесорі:

- Простота у створенні та використанні;
- Надійність у роботі;
- Відносно невеликі габарити монтажною плати;
- Доступність елементів;
- Відсутня необхідність у написанні програми керування;
- Широкий частотний діапазон оброблюваних і формуючих сигналів;
- Можливість реалізації різноманітних алгоритмів управління без зміни апаратури керуючого блоку.

Недоліки схеми керування КД на мікропроцесорі:

- Необхідність написання алгоритму мікрокоманд;
- Застосування спеціальних методів синтезу алгоритмів керування для цифрових систем;
- Точність обробки інформації обмежується розрядністю представлення даних, розрядністю і швидкодією обчислювача;
- Ускладнення друкованого монтажу на платах, збільшення кількості провідників у шинах зв'язку між блоками обчислювача;
- Вплив надійності та ефективності програмного забезпечення на надійність і якість роботи всієї системи управління.

*Рекомендації до вибору комп'ютеризованої системи керування КД.*

Схеми такого типу дозволяють реалізувати як найпростіші рішення для керування КД, так і складні взаємопов'язані системи. Системи такого типу

рекомендується для ознайомлення у відповідних літературних джерелах. Найпростіші системи можливо реалізувати на основі малопотужного ПК із LPT, COM та USB виходами.

Для найпростішої комп'ютерної системи керування обертанням крокового двигуна необхідний драйвер. Драйвер, в даному випадку – це спеціалізована мікросхема, яка подає постійну напругу до якої з чотирьох котушок КД в залежності від закладеної програми. В цій схемі такою мікросхемою є ULN2003 або її аналог К1109КТ22, який складається з потужних ключів та з захисних діодів. Останні дають можливість підключати різноманітні індуктивні навантаження без додаткового захисту від сплесків зворотної напруги. Схема представлена на рис. 6.

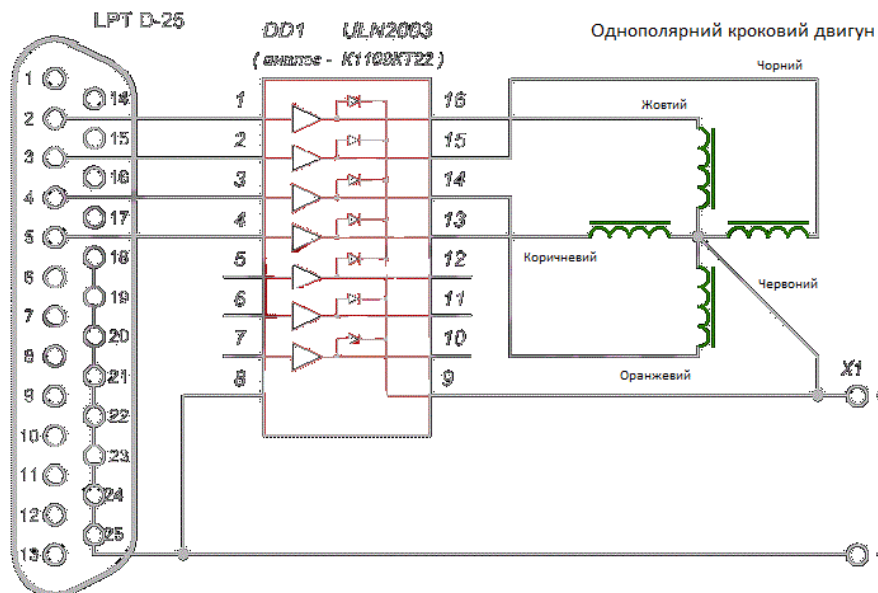


Рис. 6. Схема комп'ютерного керування кроковим двигуном

Оскільки швидкість обертання ротора ДПС залежить, в першу чергу, від величини прикладеної напруги, то першим методом для регулювання його швидкості обертання є використання схем, що мають можливість регулювання вихідної напруги. Такими рішеннями є схеми на основі регульованих стабілізаторів напруги, для цього доцільно використовувати недорогі інтегральні компенсаційні стабілізатори, наприклад, LM317 [8]. Можливі варіанти такої схеми представлені на рис. 7.

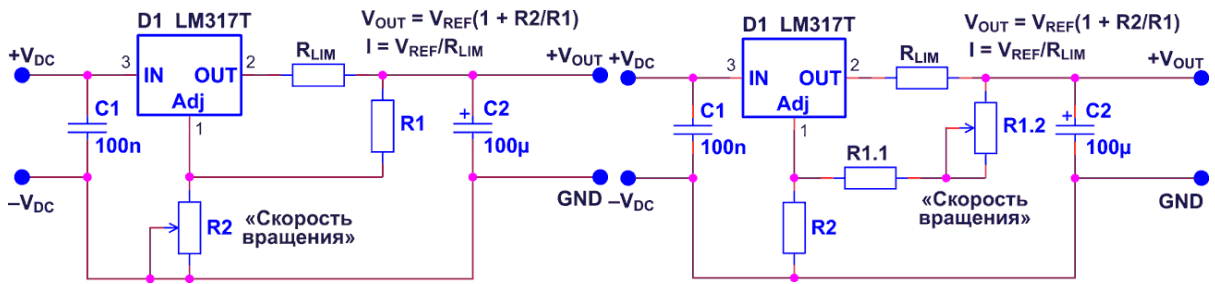


Рис. 7. Схеми керування малопотужними ДПС на основі LM317

Схема відрізняється своєю простотою та недорогою ціною. Для обмеження моменту обертання або струму двигуна додатково встановлюється резистор  $R_{LIM}$  (рис. 7). Дане схемне рішення є простим та доступним, однак відрізняється низьким ККД на низьких та високих швидкостях, що обмежує його використання.

Схема із класичною ШІМ показано на рис. 8.

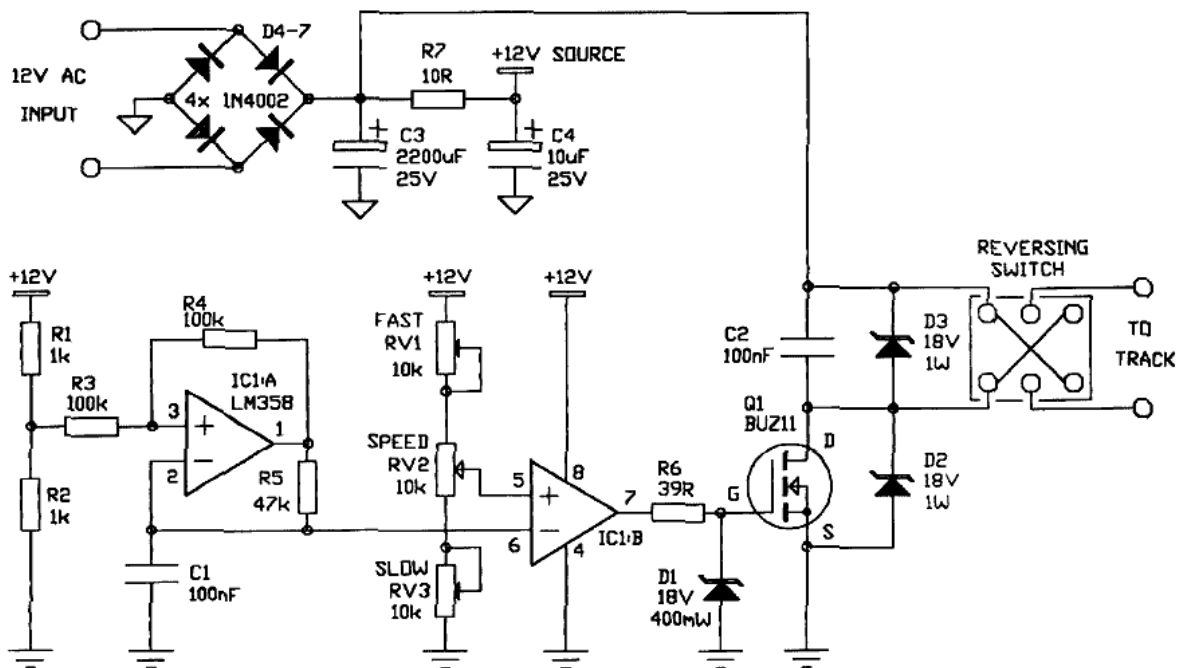


Рис. 8. Класична схема управління на основі ШІМ

Основа роботи ШІМ – подача на двигун промодульованих по тривалості однополярних прямокутних імпульсів. Відповідно до теорії сигналів, в структурі такої послідовності є постійна складова, пропорційна відношенню  $\tau / T$ , де:  $\tau$  – тривалість імпульсу, а  $T$  – період послідовності. Оскільки вихідний каскад регулятора на основі ШІМ працює в ключовому режимі, то він не потребує великих радіаторів для відводу тепла, навіть при відносно великих потужностях

двигуна, і ККД такого регулятора вище попереднього способу. У ряді випадків можна використовувати DC/DC-перетворювачі, але вони мають ряд обмежень, наприклад, по глибині регулювання вихідної напруги і мінімальному навантаженні. Тому, як правило, частіше зустрічаються інші рішення. Така схема використовується в якості регулятора у професійній моделі залізниці.

Діапазон регулювання встановлюється за допомогою резисторів  $R_{V1}$  (швидше) і  $R_{V3}$  (повільніше), а саме регулювання швидкості здійснюється резистором  $R_{V2}$  (швидкість). Управління безпосередньо двигуном здійснюється через ключ на потужному польовому транзисторі типу BUZ11. Особливості цього транзистора типу MOSFET – великий робочий струм (30 А постійного, і до 120 А імпульсного),

Ще одна проблема таких регуляторів – це вихідний каскад або драйвер двигуна. У подібних схемах він може бути виконаний як на польових транзисторах, так і на біполярних; останні набагато дешевші. Але і в першому, і в другому варіанті необхідно враховувати деякі важливі моменти. Для управління польовим транзистором типу MOSFET потрібно забезпечити заряд і розряд його вхідної ємності. Якщо не використовувати послідовний з затвором резистор ( $R_6$  на рис. 8) або його номінал буде занадто малий, то на відносно високих частотах управління операційний підсилювач може вийти з ладу. Якщо ж використовувати  $R_6$  великого номіналу, то транзистор буде довше перебувати в активній зоні своєї передавальної характеристики і, отже, маємо зростання втрат і нагрівання ключа.

Існує ще кілька схем простих ШІМ-регуляторів. Наприклад, дві схеми на одиночному операційному підсилювачі з драйвером опубліковані в [9] (Одна з них наведена на рис. 9, а). Є схеми і на базі популярного таймера серії 555 (рис. 9, б). Обидві схеми формують сигнал ШІМ зі зміною опорної частоти. Так схеми на ОП змінюють частоту управління під час регулювання від 170 Гц до 500 Гц, а схема на таймері – від 150 Гц до 1000 Гц.

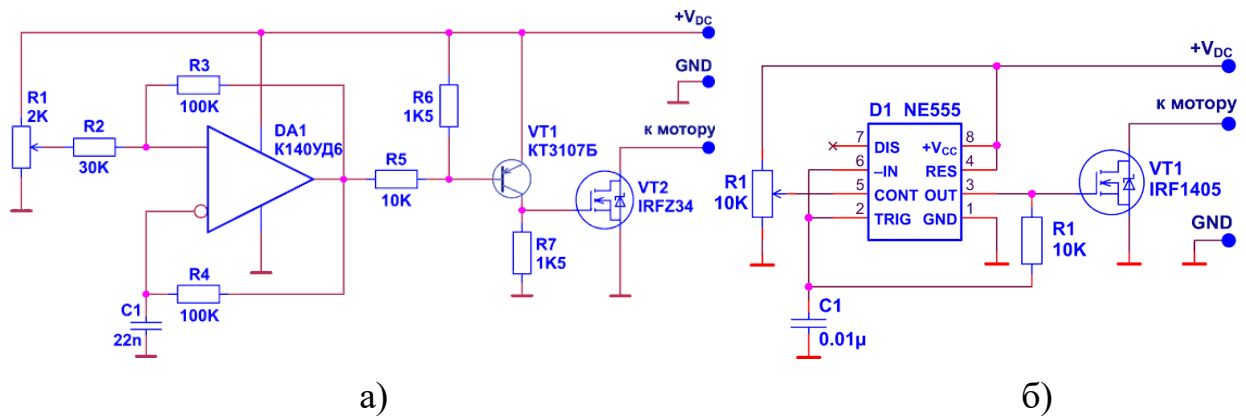


Рис. 9. Приклад схем регуляторів ШІМ зі зміною опорної частоти

Для деяких застосувань це може бути неприпустимо, так як на великих частотах двигун може не запрацювати, або не дати потрібний момент обертання. Це відбувається через те, що струм в обмотці двигуна, яка представляє собою індуктивність, встановлюється не миттєво, а наростає і спадає по експоненті. Більш коректні схеми на базі таймера і одиночного ОП наведені на рис. 10.

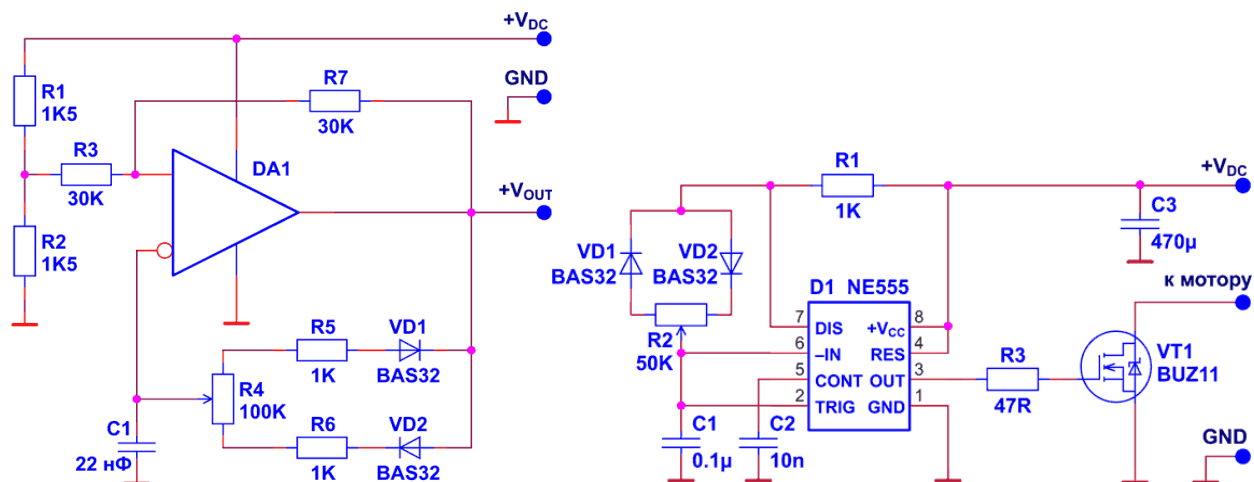


Рис. 10. Схеми регуляторів з ШІМ без зміни опорної частоти

Аналогічні за структурою регулятори можливо побудувати на цифрових логічних елементах, але вони мають малу перевантажувальну здатність і вимагають окремого джерела живлення. Застосування таймера 555 цікаве тим, що частота генератора, виконаного на його базі, практично не залежить від напруги живлення. Близький до таймера 555 аналог – це ІМС (КР) 1006ВІ1. Максимальний вихідний струм для КР1006ВІ1 і КМОП-версій таймера становить 100 мА.

## 2. Засоби для вимірювання швидкості обертання безконтактних електродвигунів

До засобів вимірювання швидкості обертання відносяться цифрові та аналогові тахометри та стробоскопи. Вони використовуються для досліджень та випробувань як контактних, так і безконтактних електричних машин.

Тахометри застосовуються для вимірювання швидкості обертання. Сьогодні, в основному, використовуються цифрові прилади, які забезпечують режими контактного і безконтактного вимірювання.

В даний час, при побудові тахометрів використовуються три принципи вимірювань:

- механічний – контактний;
- оптичний – безконтактний;
- стробоскопічний – безконтактний.

Перший спосіб (Mechanical RPM Method) – класичний. Він заснований на механічному впливі обертового вала з приймальною частиною тахометра – тахометричним перетворювачем. Сьогоднішні прилади цієї групи використовують, як правило, цифрові технології. Прилади цієї групи забезпечують вимірювання швидкостей в діапазоні до 10000 ... 20000 обертів за хвилину.

Другий принцип (Optical / Photo RPM Method) – заснований на підрахунку числа відбитих об'єктом імпульсів світлового потоку. Прилади цієї групи дозволяють вимірювати значення швидкостей в широкому діапазоні до 1 000000 об./хв. Крім того вони більш зручні в застосуванні, ніж контактні.

В третьому способі (Stroboscopic RPM Principle) використаний стробоскопічний ефект, що полягає в наступному. Прилад постійно випромінює короткі спалахи світла, частота яких може регулюватися в досить широких межах. Користувач, регулюванням частоти, домагається синхронності спалахів з обертанням досліджуваного об'єкта. Якщо частота збігається (дорівнює або кратна) зі швидкістю (частотою) обертання об'єкта, то спостерігачеві буде здаватися, що об'єкт нерухомий. Мінімальна з усіх подібних частот і буде

характеризувати швидкість обертання. Стробоскопи забезпечують вимір швидкостей в діапазоні від 100 об./хв до 20000 об./хв.

Принципальна схема для механічного тахометра показана на рис. 11.

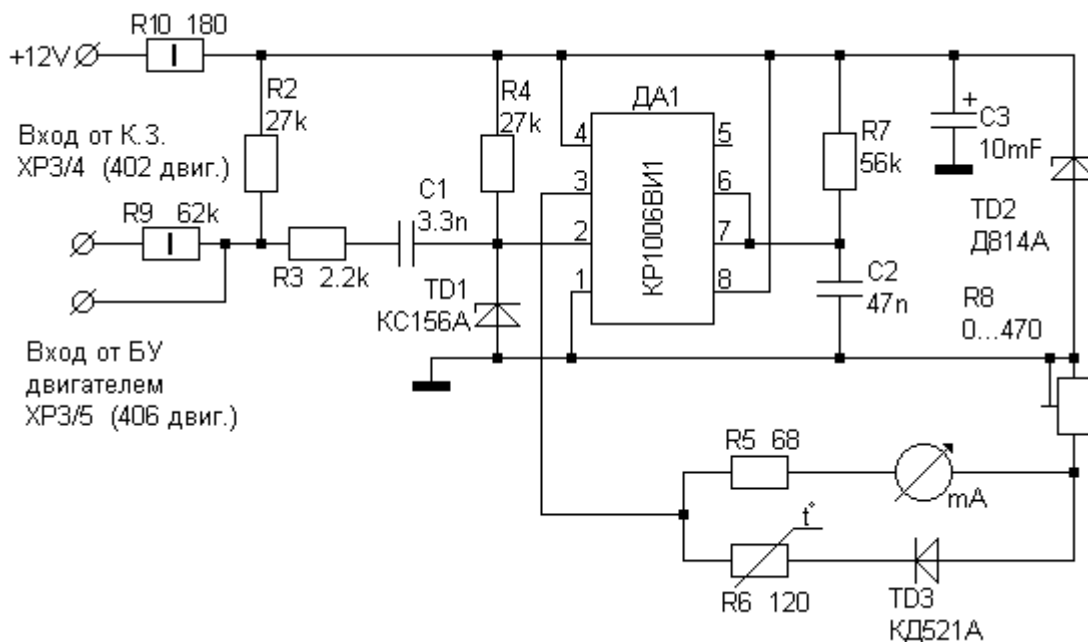


Рис. 11. Принципальна електрична схема для механічного давача швидкості обертання

Робочий діапазон частоти обертання вала двигуна від нуля до максимуму поділений на 16 однакових частин. Для зручності контролю за роботою двигуна шкала тахометра розділена на три сектори, що відповідають низьким, середнім і високим значенням частоти обертання вала. Відповідно в першому секторі використані світлодіоди жовтого свічення, в середньому – зеленого, а в останньому – червоного. Тахометр живиться від мережі напругою 12 В; споживаний струм – близько 120 мА.

Тахометри другого принципу реалізуються як на логічних елементах, так і на мікроконтролерах. Рекомендована схема на логічних елементах показана на рис. 12.

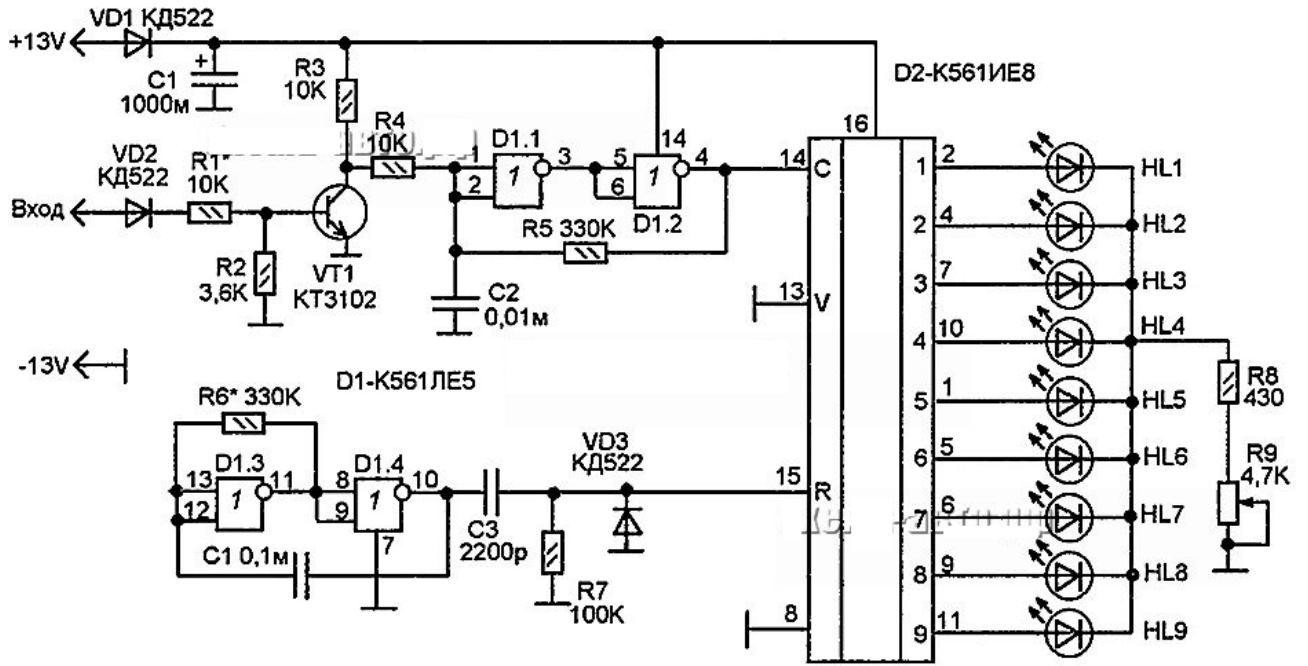


Рис. 12. Схема цифрового індикатора обертів вала двигуна на логічних елементах

Схема на рис. 12 називається квазіаналоговою схемою. Працює схема наступним чином: частота обертання двигуна відповідає лінійній кольоровій шкалі світлодіодів, що розміщуються на панелі приладу.

Схема на базі мікроконтролера наведена на рис. 13.

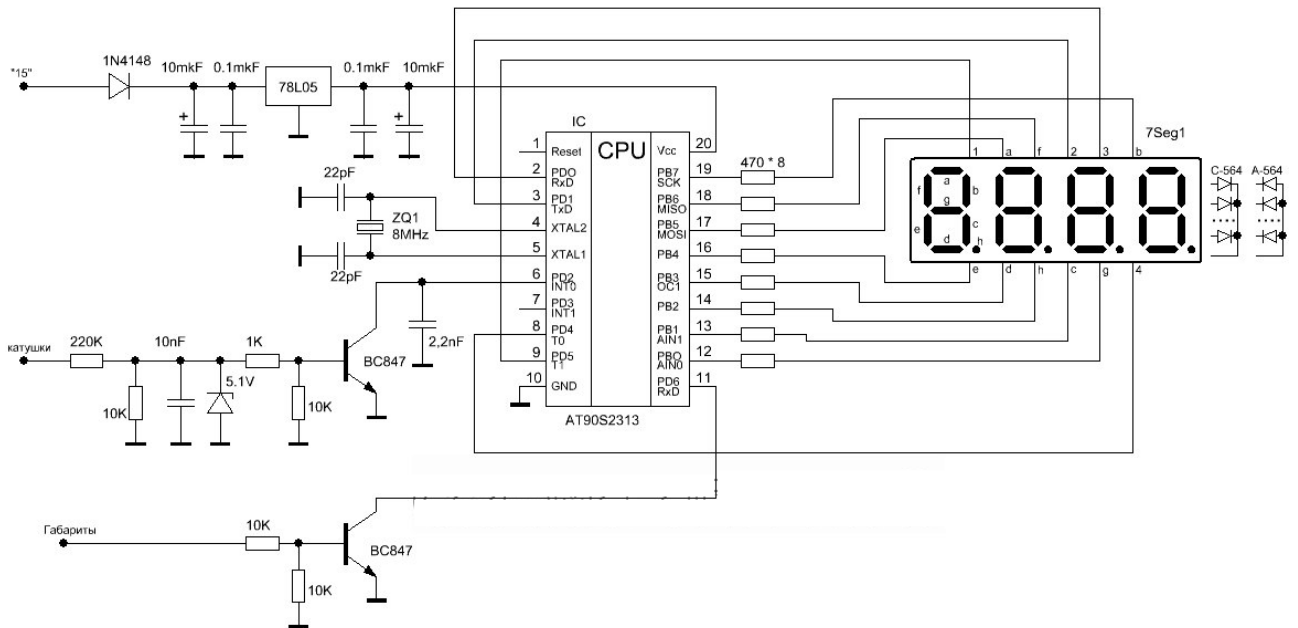


Рис. 13. Схема цифрового індикатора обертів вала двигуна на мікроконтролері

Перелік та номінали елементів для даної схеми наведено на рис. 13. Схема відрізняється своєю низькою ціною та простотою.

Робота стробоскопа заснована на так званому стробоскопічному ефекті. Висвітлюючи, наприклад, колесо, що обертається спалахами, що випливають із частотою, рівній частоті його обертання, можна візуально зупинити колесо, що легко помітити по положенню будь-якою позначкою на ній. Цей принцип використовується для визначення ковзання асинхронних машин та для визначення частоти обертання. Схема найпростішого цифрового стробоскопу показано на рис. 14.

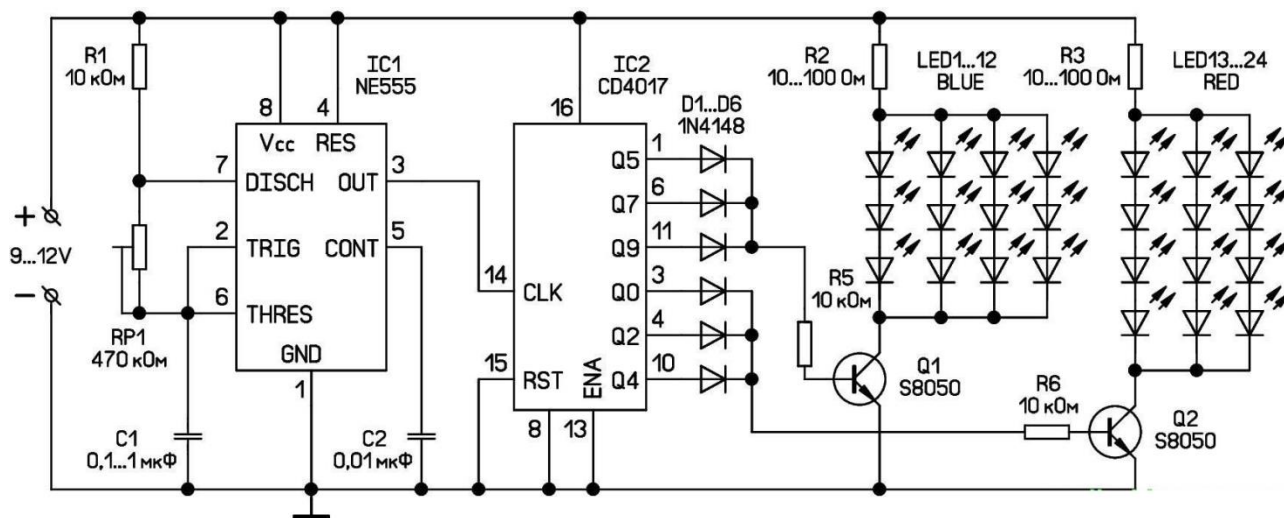


Рис. 14. Схема цифрового стробоскопу на світлодіодах

Схема досить проста, а її елементи є доступними, тому таке рішення рекомендується за основу при розробці цифрових стробоскопів.

Підсилювачем називається пристрій, призначений для посилення потужності вхідного сигналу. Посилення відбувається за допомогою активних елементів за рахунок споживання енергії від джерела живлення. Активними елементами в підсилювачах найчастіше є транзистори; такі підсилювачі прийнято називати напівпровідниковими, або транзисторними. У будь-якому підсилювачі вхідний сигнал керує передачею енергії джерела живлення в навантаження.

Підсилювачі сигналів широко використовуються на практиці при дослідженні параметрів та характеристик БЕМ малої та середньої потужності.

Вони використовуюються в колі живлення обмоток керування, підмагнічуючи обмоток та ін.

Принцип дії підсилювального каскаду пояснюється за допомогою схеми, наведеної на рис. 15. Основою підсилювача є два елементи: резистор  $R$  і керований активний елемент (АЕ) – транзистор, опір якого змінюється під впливом вхідного сигналу  $U_{вх}$ . За рахунок зміни опору АЕ змінюється струм, що протікає від джерела живлення з напругою  $E_{п}$  в колі резистора  $R$  і АЕ. В результаті будуть змінюватися падіння напруги на резисторі, а отже, і вихідна напруга  $U_{вих}$ . Процес посилення заснований на перетворенні енергії джерела живлення  $E_{п}$  в енергію вихідної напруги [10-11].

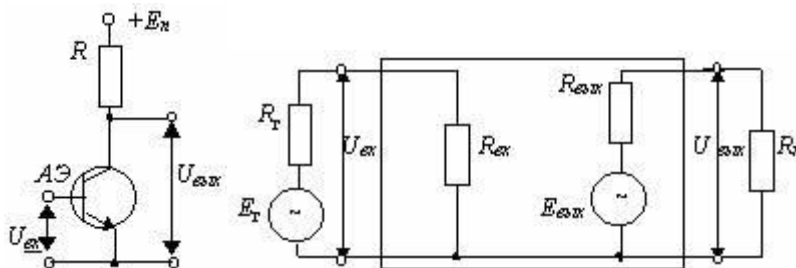


Рис. 15. Схема найпростішого підсилювального каскаду та його структура

В даних методичних вказівках рекомендується схема малопотужного підсилювача потужності, схема якого наведена на рис. 16.

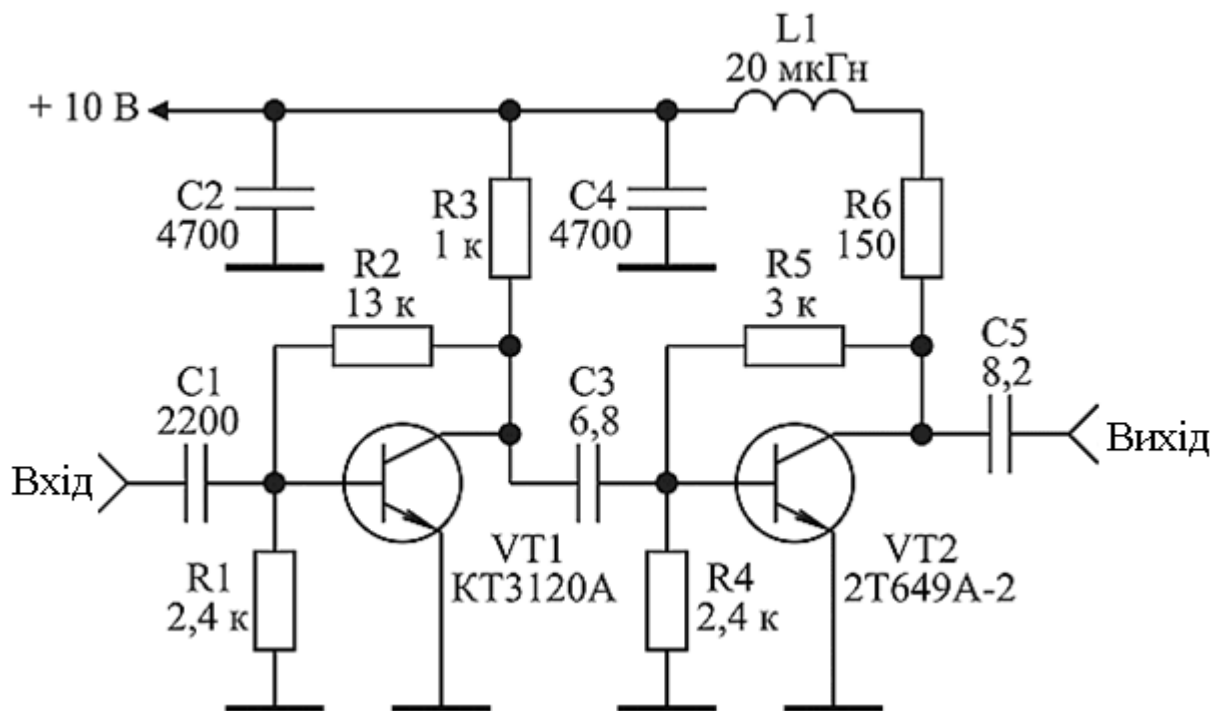


Рис. 16. Принципова схема підсилювача потужності

Перелік та номінальні значення елементів показано на рис. 16.

Підсилювач складається з двох каскадів підсилення на транзисторах VT1 і VT2 і два ланцюги корекції першого порядку (елементи C3 і C5).

Вхідний і вихідний каскади підсилювача працюють в режимі класу А з струмами споживання 5 мА і 33 мА відповідно, які встановлюються підбором номіналів резисторів R2 і R5.

### 3. Регулятори потужності, напруги та струму для систем керування БЕМ

Регулятори потужності, напруги та струму використовуються в системах автоматики, в наукових та прикладних дослідженнях, промислових та побутових приладах. Вони відрізняються простотою конструкції та доступністю всіх елементів. Схеми таких регуляторів реалізуються на логічних елементах, мікроконтролерах, мікропроцесорах та напівпровідникових елементах (симісторах, транзисторах, тиристорах) [12].

Схема регулятора потужності постійного струму на логічних елементах наведена на рис. 17.

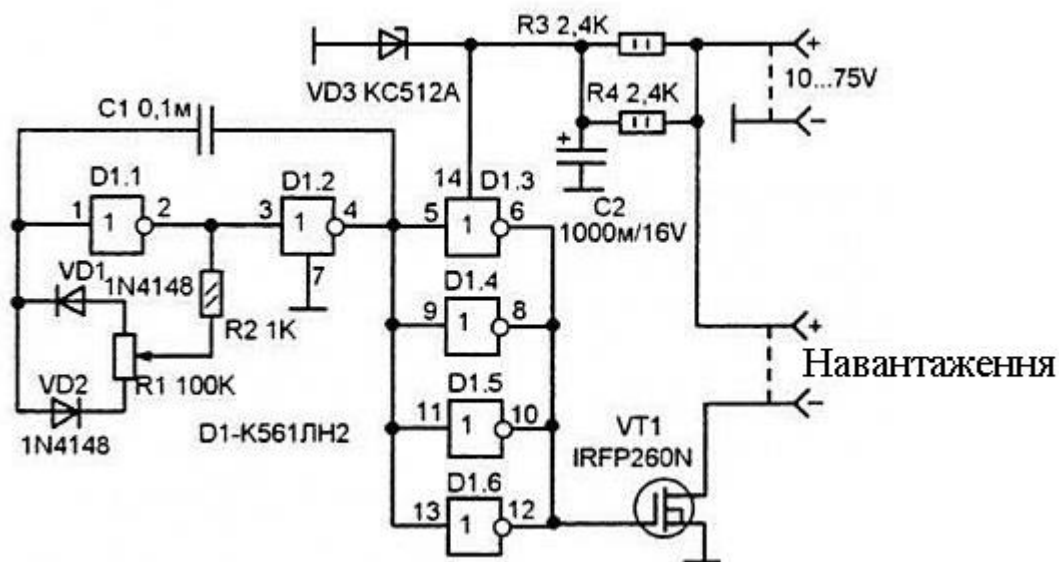


Рис. 17. Схема регулятора потужності постійного струму

Даний регулятор використовується для регулювання потужності навантаження постійного струму напругою від 10 до 75V струмом не більше 150 А. Дане рішення може використовуватись в якості альтернативи реостатам для електродвигунів постійного струму.

Регулятор побудований на основі принципу широтно-імпульсної модуляції. Він складається з мультивібратора з регулюванням скважності імпульсів, буферного і вихідного каскадів.

Схема цифрового регулятора потужності, виконаного на базі мікроконтролера наведено на рис. 18.

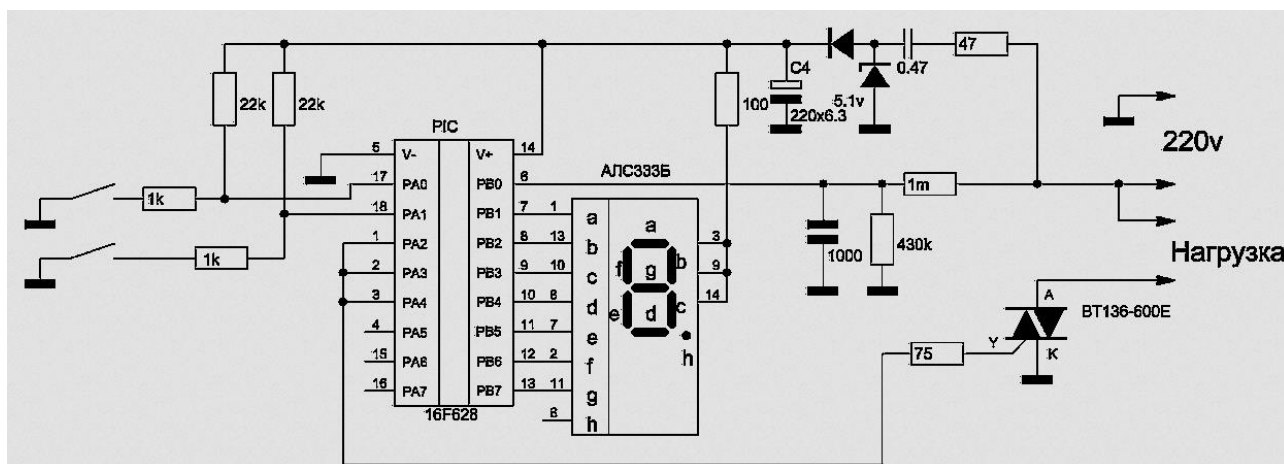


Рис. 18.Схема регулятора потужності на базі мікроконтролера

Дане рішення дозволяє дискретно змінювати потужність будь-якого навантаження. Регулятор зібраний на мікроконтролері PIC 16F628.

Регулювання відбувається за рахунок пропуску частини періодів напруги. Оскільки перемикання симістора відбувається в момент переходу мережевої напруги через «0», рівень перешкод створюваних регулятором мінімальний. Встановлений рівень потужності відображається на цифровому світлодіодному індикаторі у вигляді цифр від 0 до 9 і букв ABCDEF. Для реалізації роботи схеми необхідно завантажити програму в мікроконтролер.

Схема найпростішого симісторного регулятора потужності показано на рис. 19.

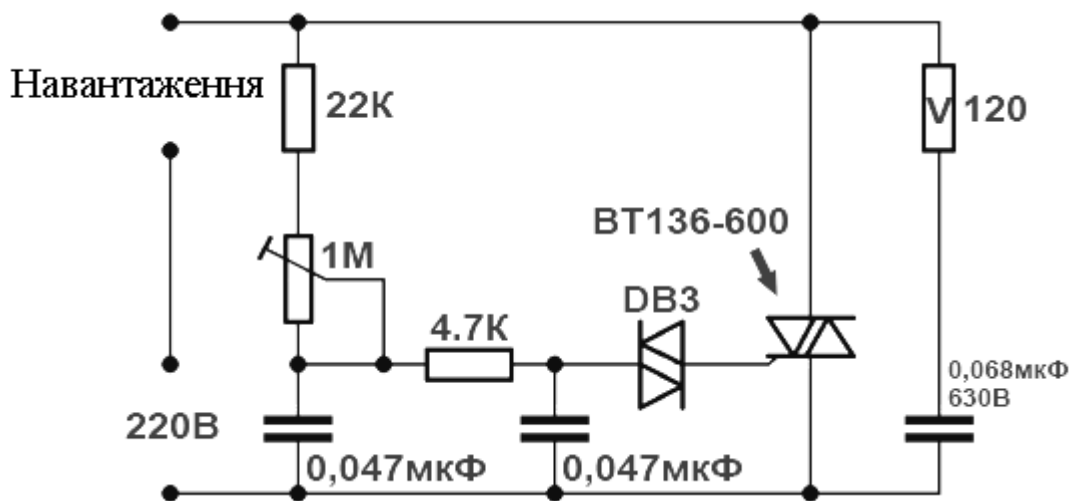


Рис. 19. Схема найпростішого регулятора потужності

За принципом роботи пристрій відноситься до фазового регулятора і працює за принципом зміни моменту включення симістора щодо переходу напруги через нуль.

На рис. 20 наведено схему регулятора потужності змінного струму, який практично не створює радіоперешкод. Пристрій може використовуватися як регулятор для чисто активних споживачів, і в якості регулятора потужності двигунів змінного струму.

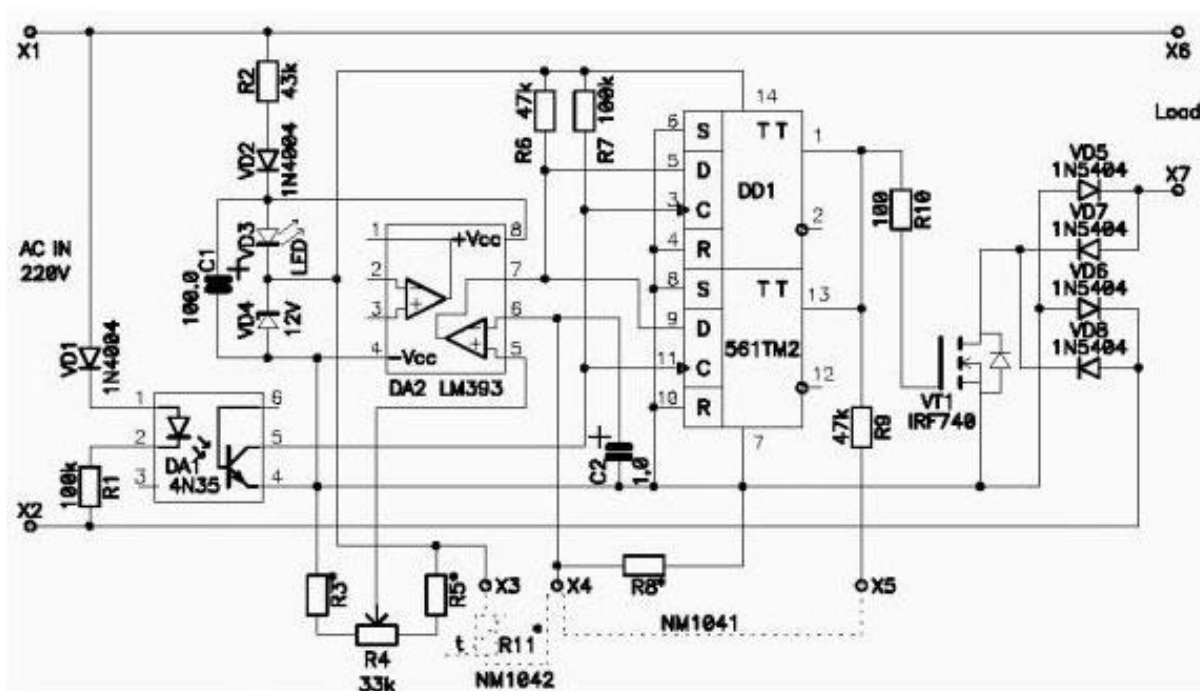


Рис. 20. Принципова схема регулятора потужності з низьким рівнем радіоперешкод

В якості регулюючого елементу використовується потужний польовий транзистор. У порівнянні з тиристорами сучасні потужні польові транзистори забезпечують менше значення прямого падіння напруги і, як наслідок, менше виділення тепла. Крім того, вони вимагають значно меншої потужності управління. Додатково в даній схемі усунутий ефект динамічної вхідної ємності.

#### 4. Регульовані блоки живлення для дослідження характеристик та параметрів БЕМ

Регульовані блоки живлення рекомендується до вибору бригадам, які мають певний досвід роботи із радіотехнічними елементами. Найпростішим варіантом є створення блока живлення для низької напруги до 100 В. На рис. 21 наведено принципову електричну схему блока живлення напругою від 0...30 В [13].

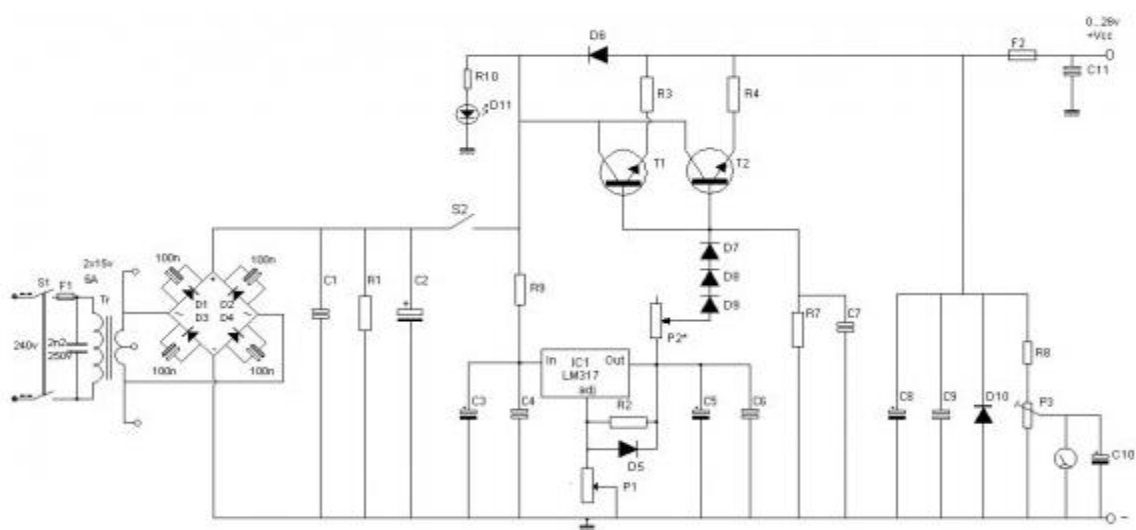


Рис. 21. Потужний регульований блок живлення 0-30 В

Дана схема забезпечує стабільну напругу на виході і регулювання від 0 до 30 В. Її основою є дешевий та поширений радіоелемент LM317, посилена за допомогою двох транзисторів 2N3055. У такому схемному виконанні потужність схеми збільшується в 2 рази. Дана конструкція дозволяє отримувати на виході струм до 20 А (але з підсиленим трансформатором і радіатором та з вентилятором).

В табл. 3 наведено перелік та номінали радіоелементів, що використовуються в даному підсилювачі.

## Перелік радіоелементів для блока живлення

| Елемент       | Позначення                | Елемент      | Позначення   |
|---------------|---------------------------|--------------|--|
| Трансформатор | 2*15 В 10 А               | Діоди        | D1...D4<br>4*MR750<br>(MR7510) або 2 x<br>4 1N5401<br>(1N5408) |
| Резистор      | R1 2k2 2,5Вт              | Запобіжник   | F1, 1А   |
| Резистор      | R2 240 Ом                 | Запобіжник   | F2, 10А  |
| Резистор      | R3, R4 0,1 Ом 10 Вт       | Конденсатор  | C1, C7, C9<br>47nF   |
| Резистор      | R7 6k8                    | Конденсатор  | C2<br>4700mF/50V   |
| Резистор      | R8 10k                    | Конденсатор  | C3,C5<br>10uF/50v  |
| Резистор      | R9 47 Ом 0,5 Вт           | Конденсатор  | C4,C6<br>100nF   |
| Резистор      | R10 8k2                   | Конденсатор  | C8<br>330uF/50v  |
| Діод          | D5 1N4148, 1N4448, 1N4151 | Конденсатор  | C10 1uF/16v  |
| Діод          | D6 1N4001                 | Діод         | D7, D8, D9<br>1N4001   |
| Діод          | D10 1N5401                | Стабілізатор | IC1 LM317  |
| Світлодіод    | D11                       | Транзистор   | 2*2N3055   |

Дане рішення необхідно використовувати в лабораторних роботах при дослідженні низьковольтних електричних мікромашин та безконтактних електричних машин. Це, як правило, низьковольтні агрегати, що використовуються для нетрадиційних та відновлювальних джерел енергії.

## 5. Системи контролю та вимірювання БЕМ

Термореле та терморегулятори використовуються як при дослідженні БЕМ будь-якої потужності, так і при експлуатації в якості захисного механізму. Термозахист буває зовнішній та внутрішній. Зовнішній базується на контролі та визначенні величини температури на поверхні ЕМ та не потребує втручання в конструкцію. Внутрішній захист, хоча є більш надійним, потребує втручання в конструкцію ЕМ і є дорожчим.

На рис. 22 представлена найпростіша схема термореле для автоматичного відключення від мережі 220 В (шляхом відповідного підбору радіоелементів можливе відключення від мережі будь-якої напруги) будь-якого навантаження при досягненні необхідної температури. Схема не критична до застосовуваних деталей, регулювання порогу спрацьовування в залежності від використаних елементів і температури спрацьовування [14].

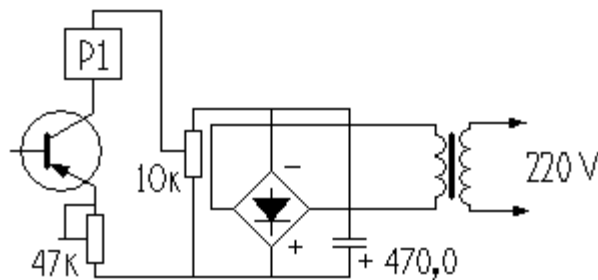


Рис. 22. Принципова електрична схема найпростішого термореле

Транзистор використовується в якості термодатчика, він може бути типу МП39 – МП42. Слід вибрати транзистор з максимальним опором емітер-колектор. Вивід бази транзистора не використовується. Реле Р1 – будь-яке на 12-24 В, з відповідною контактною групою для комутації необхідного по величині навантаження (наприклад, РЕК-53 на 24 В). Трансформатор будь-який малогабаритний з напругою вторинної обмотки 12-20 В. Діоди випрямляча – також будь-які випрямні, можна використовувати діодний міст типу КЦ-402, 405 та ін.

В табл. 4 наведено перелік радіоелементів для термореле.

## Перелік радіоелементів для найпростішого термореле

| Тип                         | Номінал      | Кількість |
|-----------------------------|--------------|-----------|
| Біполярний транзистор       | МП42         | 1         |
| Діодний міст                | КЦ405А       | 1         |
| Електролітичний конденсатор | 470 мкФ      | 1         |
| Підлаштовувальний резистор  | 10 кОм       | 1         |
| Підлаштовувальний резистор  | 47 кОм       | 1         |
| Реле                        | РЭК-53       | 1         |
| Трансформатор               | 12-20 Вольт. | 1         |

Транзистор розташовується в верхній частині або всередині корпусу в спеціально зробленому отворі так, щоб верхня частина його корпусу мала безпосередній контакт з гарячою поверхнею.

Залежно від використовуваних екземплярів транзистора, реле і трансформатора проводиться регулювання напруги живлення схеми резистором 10 кОм таким чином, щоб при нагріванні транзистора до потрібної температури відбувалося надійне спрацьовування реле, яке при цьому своїми контактами розірве ланцюг живлення навантаження від мережі. Резистор номіналом 47 кОм в ланцюзі емітера використовується для більш точного налаштування.

Приклад термореле на логічних елементах наведено на рис. 23.

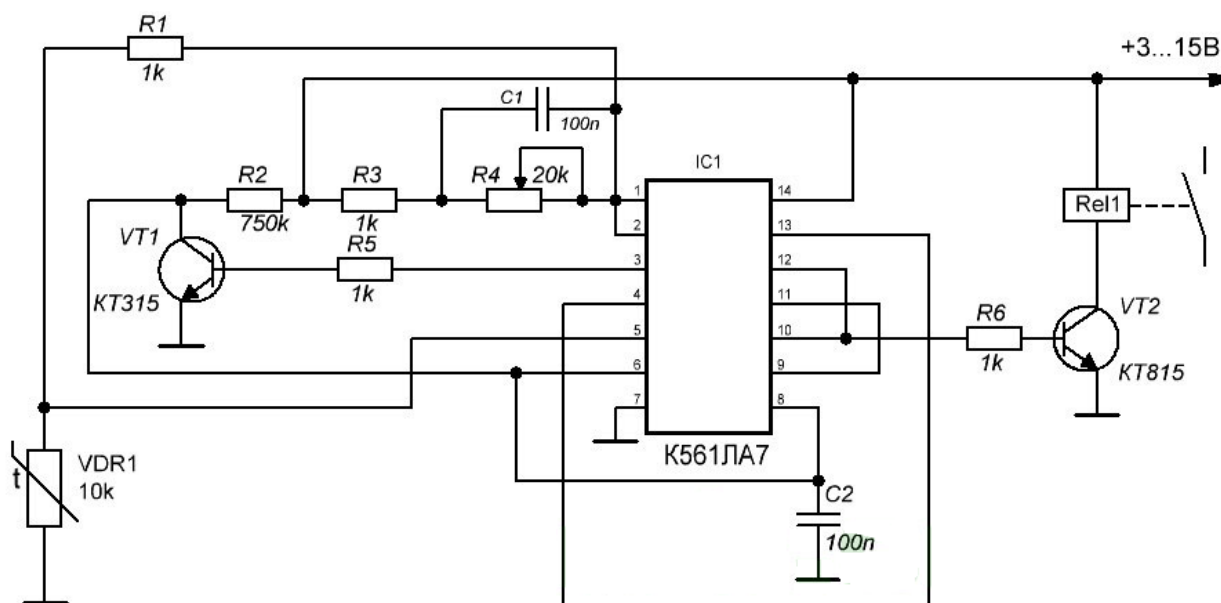


Рис. 23. Термореле на логічних елементах

Дана на рис. 23 схема терморегулятора враховує наступні особливості:

- схильність автоматичних пристроїв до автогенерації. Якщо зворотний зв'язок між датчиком термореле і виконавчим пристроєм занадто сильний, то відразу після спрацьовування реле воно відразу вимикається, а потім знову вмикається і так далі. Тобто почнеться процес генерування на певній частоті. Це відбувається, якщо розташувати датчик температури в безпосередній близькості до поверхні;

- всі датчики та електронні пристрої мають певну точність. Можливо, наприклад (простими способами), відстежити зміну температури на  $1\text{ }^{\circ}\text{C}$ . А на  $0,001\text{ }^{\circ}\text{C}$  вже набагато складніше. Але оскільки температура змінюється на нескінченно малі величини за нескінченно малий час, то виникає проблема неоднозначності. Як дізнатися, чи досягла температура значення спрацьовування? В цьому випадку проста електроніка починає «помилитися», постійно приймаючи взаємовиключні рішення, особливо якщо температура майже дорівнює встановленій температурі спрацьовування. Контакти реле починають «вібрувати».

Датчик являє собою терморезистор, який зменшує свій опір при нагріванні. Терморезистор включений в коло дільника напруги. У цьому колі знаходиться і змінний резистор R4, за допомогою якого встановлюється температура спрацьовування терморегулятора. Живиться схема напругою від +3 до +15 В. Відповідно до цього слід підбирати і реле.

Щоб переробити термореле на спрацьовування при зниженні температури необхідно підключити резистор R6 не до виходу 10 мікросхеми, а до виходу 11. Точність установки температури і її діапазон визначається підбором резисторів дільника (R1, R3, R4). При правильному монтажу терморегулятор не вимагає додаткових налаштувань і починає працювати відразу.

Вимірювальні прилади в системах БЕМ виконуються роль контролю, захисту та діагностування. В окремих випадках вони використовуються для лабораторних досліджень та експериментальних випробувань. Від класу точності приладів залежить достовірність отриманих результатів, перевіряється адекватність розроблених моделей та систем.

Вимірювальні прилади повинні відповідати цілому ряду вимог: точність, надійність, простота в користуванні, легкості та доступності в монтажі, інформативність, доступна вартість та ін. На сучасному етапі розвитку техніки розрізняють цифрові та аналогові вимірювальні прилади. Принцип вибору того чи іншого варіанту обґрунтовується конкретними вимогами та обставинами в тій чи іншій ситуації.

В даному розділі методичних вказівок розглядаються схемні рішення для цифрових вимірювальних приладів, що використовуються як заміна аналогових стрілочних приладів в лабораторних дослідженнях БЕМ та мікроелектродвигунів [12, 14, 15].

Рекомендована схема цифрового ватметра змінного струму на базі мікроконтролера наведена на рис. 24.

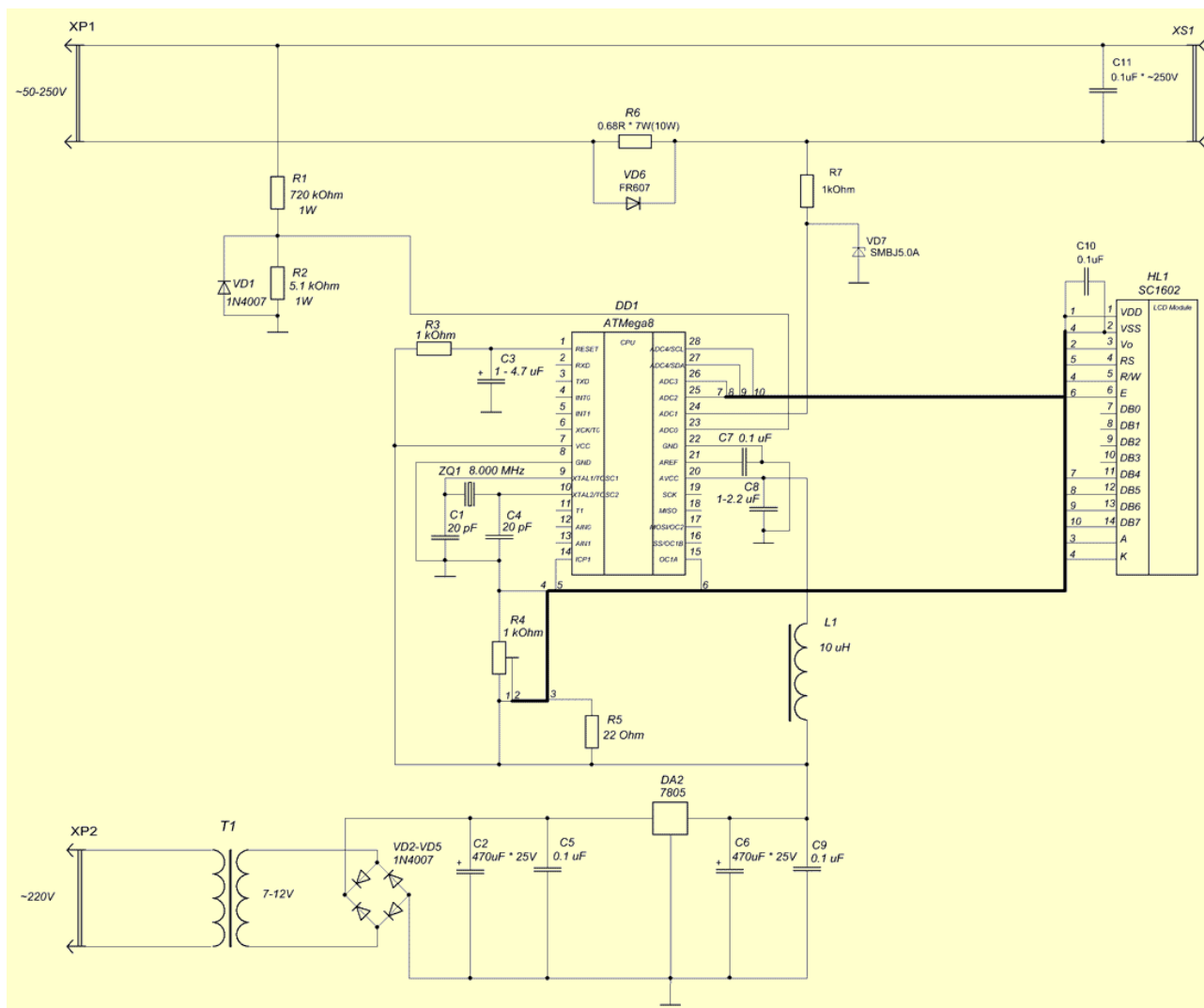


Рис. 24. Принципова схема цифрового ватметра змінної напруги

Дане схемне рішення являє собою невеликий прилад на дешевій елементній базі, який дозволяє визначити споживані навантаженням потужності на змінному струмі частотою 50 Гц, тобто від мережі або трансформаторів. Вимірювальних потужностей три – повна, активна і реактивна.

Принципова схема цифрового ватметра постійного струму на базі мікроконтролера наведена на рис. 25.

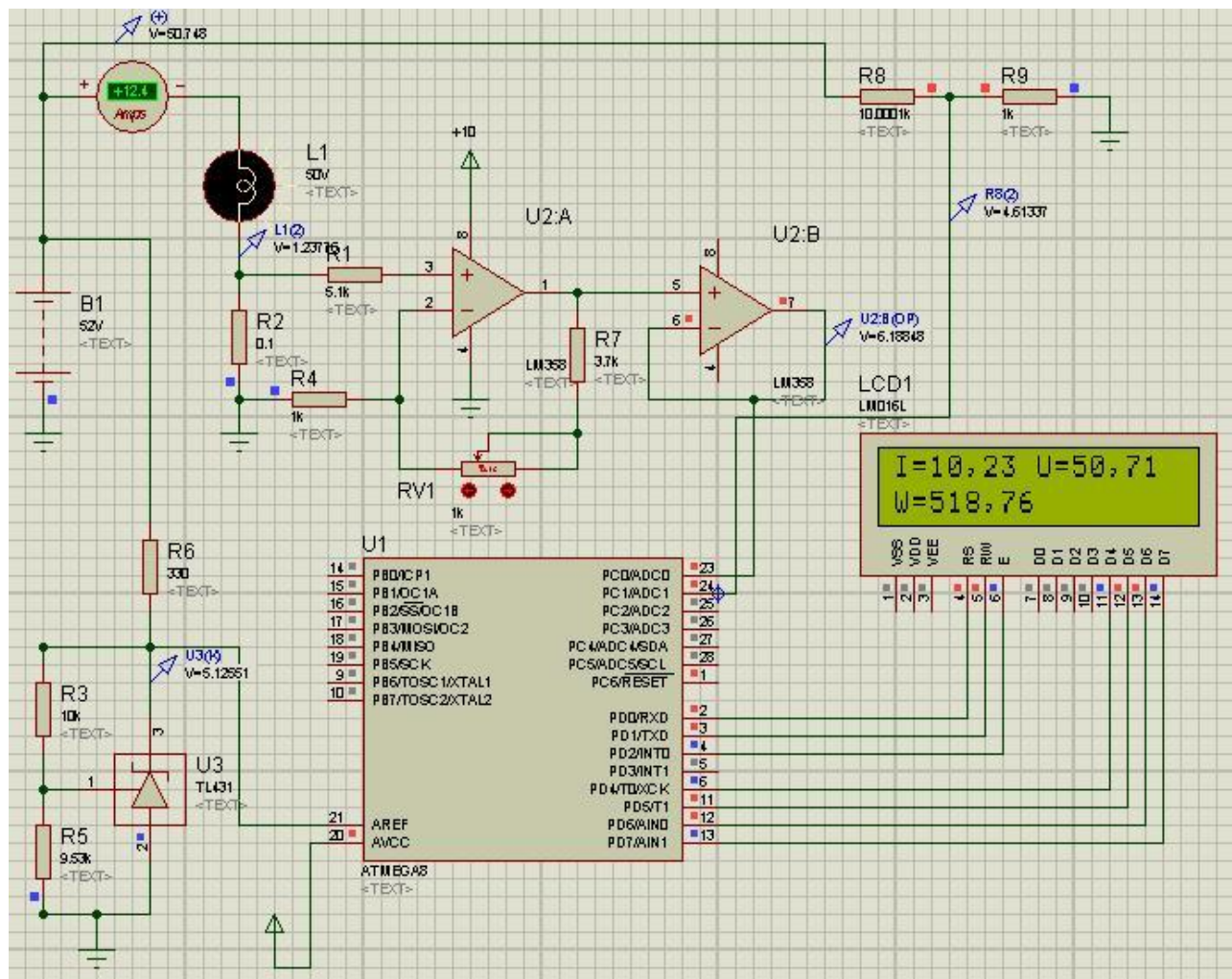


Рис. 25. Принципова електрична схема ватметра постійного струму

Ватметр побудований на базі популярного та недорогого мікроконтролера atmega8. Струм, напруга і потужність виводяться на Lcd-дисплей 16x2. На резисторах R8, R9 побудований дільник напруги з розрахованим коефіцієнтом ділення 11, джерело опорної напруги виконано на регульованому стабілітроні TL431 і налаштований на напругу 5,12 В. Струм вимірюється шляхом вимірювання падіння напруги на шунті R2, далі напруга на шунт посилюється операційним підсилювачем Lm358 і надходить на вхід АЦП.

Слід зазначити, що виготовлення цифрових ватметрів передбачає одночасний вимір миттєвих значень споживаного струму та напруги. Тому таке рішення реалізувати на логічних елементах дорого, складно та недоцільно. Виходячи з цього доцільно виконувати вищезгадані пристрої лише на основі мікроконтролерів.

На рис. 26 наведено схему для цифрового вольтметра постійної напруги із діапазоном вимірювань від 0...1000 В.

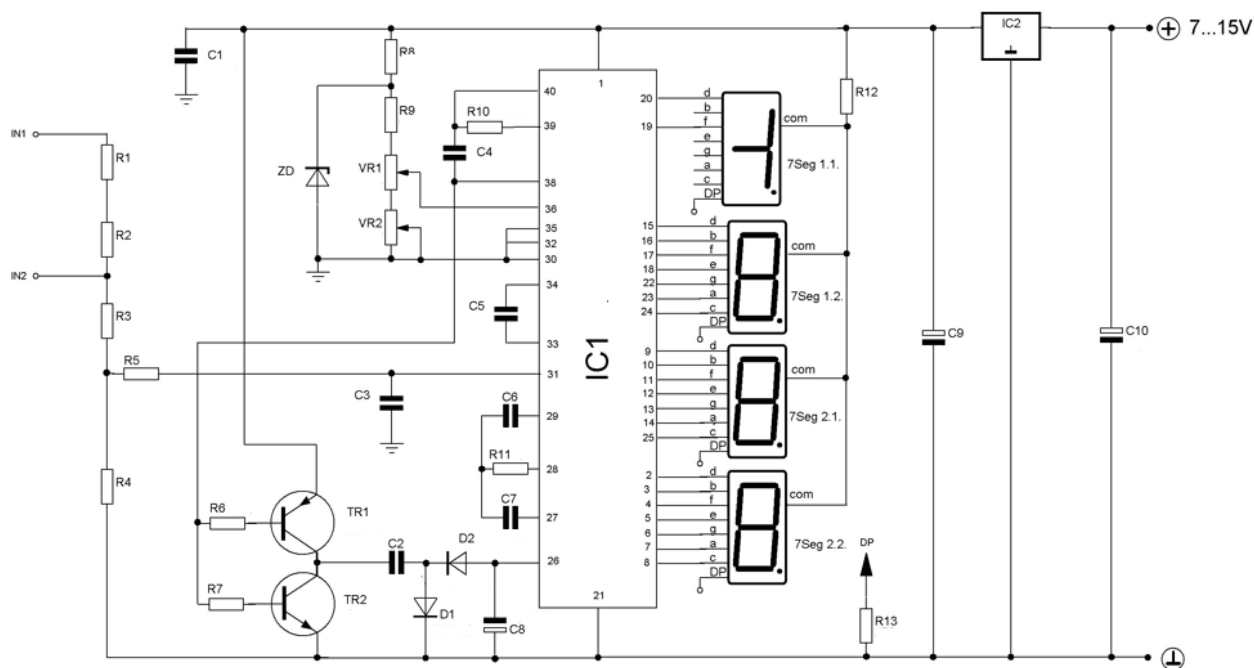


Рис. 26. Принципова електрична схема цифрового вольтметра постійної напруги

Запропоноване схемне рішення дозволяє змонтувати цифровий вольтметр. Даний вольтметр дозволяє вимірювати постійну напругу від 0 до 1000 В з дискретністю 0,1 В.

Основою конструкції є спеціалізована мікросхема аналого-цифрового перетворювача (АЦП) 7107. Висновки 2-25 мікросхеми підключені до індикаторів, які і відображають значення вимірюваної напруги. На транзисторах TR1 і TR2, а також діодах D1 і D2 виконано джерело опорної напруги (приблизно 12 В), який подається на вивід 26 АЦП. Через струмообмежуючі резистори R1, R2, R3 вимірювальна напруга подається на вивід 31 АЦП. Налаштувальні резистори VR1 і VR2 використовуються для налаштування точності вольтметра.

Завдяки застосуванню трьохвивідного інтегрального стабілізатора 7805, що забезпечує стабільну напругу +5 В, схема може працювати в широкому діапазоні напруги живлення: 8-15 В.

Вольтметри та амперметри змінного струму є складнішими, ніж постійного струму, адже цифрова техніка працює з дискретними сигналами, а не з аналоговими.

На рис. 27 представлено принципову електричну схему для цифрового вольтметра змінної напруги.

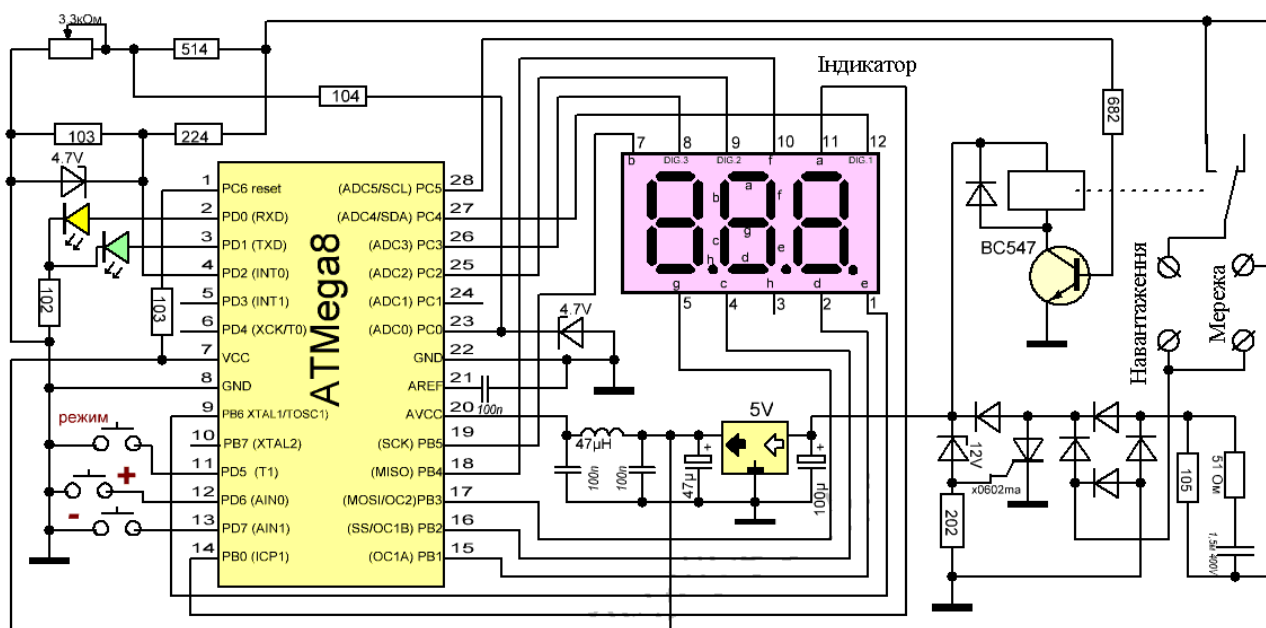


Рис. 27. Принципова електрична схема вольтметра змінної напруги

Пристрій відображає значення напруги мережі на світлодіодному семи-сегментному трьохрозрядному індикаторі. При виникненні аварійної ситуації, коли напруга мережі вийде за допустимі межі, пристрій захисту відключає навантаження. Номенклатура та номінальні значення елементів в схемі наведено на рис. 27.

Для вимірювання струму можливо використовувати два способи:

- 1) Вимірювати падіння напруги на шунті (резистор відносно невеликого опору, рис. 28):

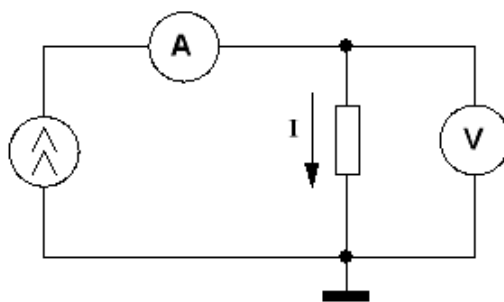


Рис. 28. Вимірювання напруги на шунті

- 2) Використовувати датчик Хола для вимірювання магнітного поля (рис. 29):

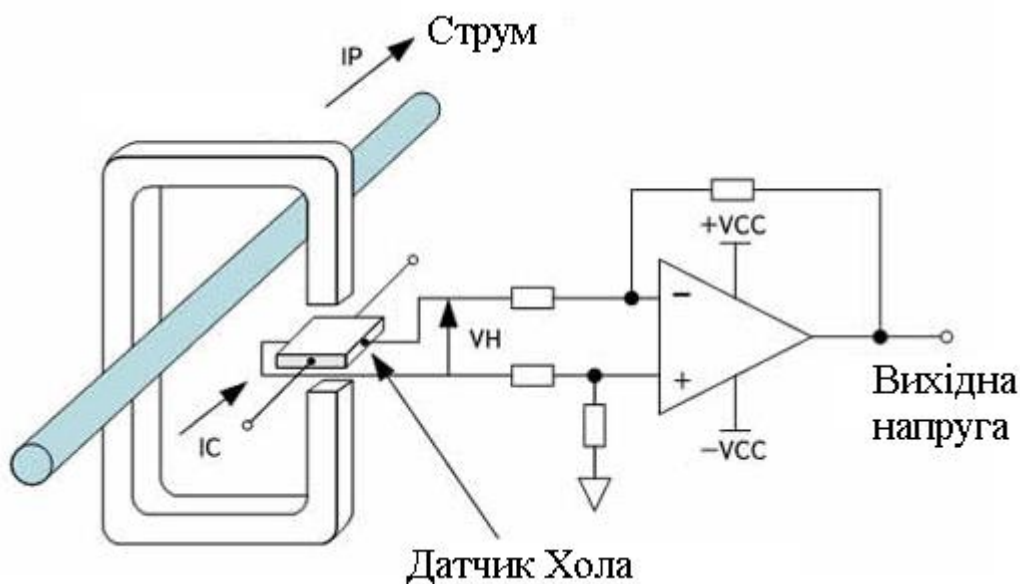


Рис. 29. Вимірювання струму на основі датчика Хола

Магнітне поле, що створюється навколо провідника, пропорційна струму, який через нього протікає. Датчик струму на ефекті Хола має датчик магнітного поля напруга на виході якого пропорційна величині магнітного поля. Безсумнівною перевагою датчика струму на ефекті Хола є оптична розв'язка кола вимірювання та навантаження.

Перший варіант простіший, але має свої особливості. Оскільки опір шунта невеликий, відповідно падіння напруги на ньому теж буде невеликим. Збільшивши опір шунта, щоб падіння напруги було достатнім для вимірювання АЦП збільшуються втрати на шунті. Наприклад, якщо напруга змінюється в діапазоні 0-0,1 Вольт, то пропустивши через ОП з коефіцієнтом посилення 50,

ми отримаємо діапазон 0-5 Вольт). Схема включення ОП як підсилювач шунта показана нижче (рис. 30):

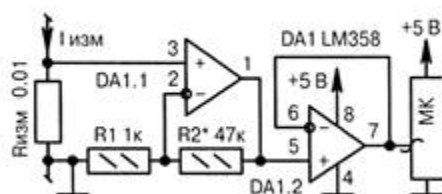


Рис. 30. Схема операційного підсилювача (ОП)

Сигнал від датчика посилюється підсилювачем DA1.1, буферизується повторювачем DA1.2 (може бути відсутнім). Резистором R2 регулюється коефіцієнт підсилення ОПУ (чутливість датчика) розраховується за формулою  $U_{out} = U_{inp} * (1 + R1 / R2)$ .

На рис. 31 представлено принципову електричну схему цифрового вимірювального амперметра постійного струму на базі мікроконтролера.

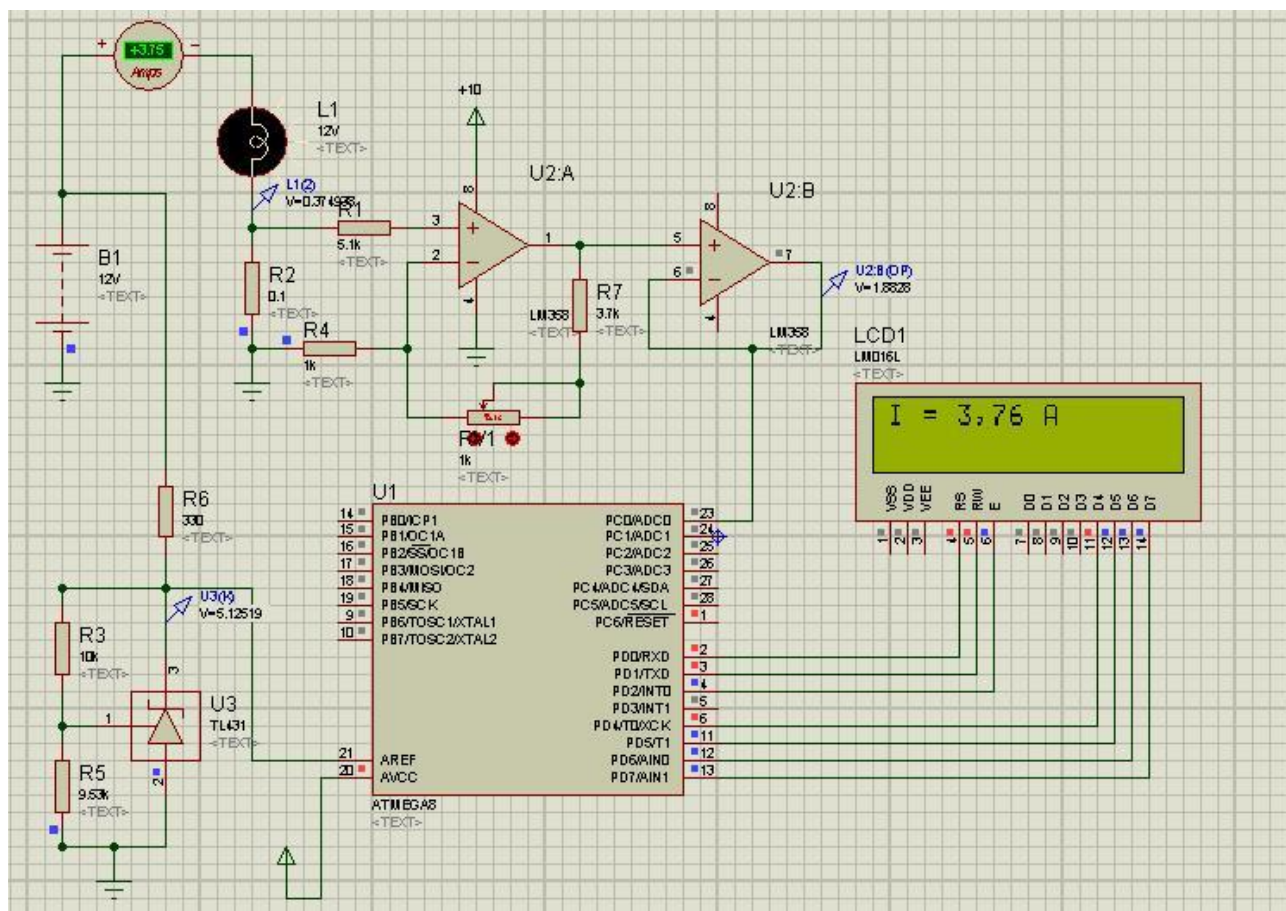


Рис. 31. Принципова електрична схема амперметра

На схемі напруга з шунта R2 посилюється операційним підсилювачем Іm358. Коефіцієнт посилення регулюється резистором RV1. Далі посилений сигнал потрапляє на ніжку АЦП adc0. На регульованому стабілітроні t1431 побудовано джерело опорної напруги на 5,12 Вольт.

*Цифрові стробоскопи для високошвидкісних систем на базі БЕМ.* Стробоскопи широко використовуються при лабораторних та експериментальних дослідженнях ЕМ, в тому числі БЕМ. За принципом побудови вони виконуються аналоговими та цифровими. На сьогоднішній день існують багато конструктивних виконань стробоскопів на логічних елементах та мікроконтролерах. Вони відрізняються своєю простотою, доступністю комплектуючих та надійністю [13].

На рис. 32 наведено принципову електричну схему цифрового стробоскопа, що виконана на доступних логічних елементах.

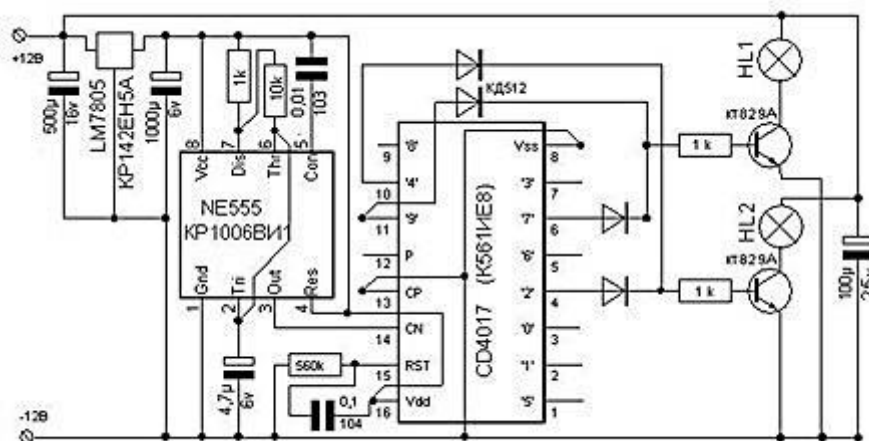


Рис. 32. Принципова електрична схема цифрового стробоскопа

Основою даної схеми є мікротаймер серії 555, він працює в якості генератора прямокутних імпульсів. В схемі також використаний лічильник K561IE8 (можливо використовувати імпортований аналог). Мікросхема представляє собою десятковий лічильник-дільник, тобто має 10 дешифрованих виходів. Вона складається з високошвидкісних лічильників і дешифраторів. Для того, щоб отримати ефект миготіння, де кожен світлодіод блимає певну кількість разів, необхідно використовувати два виходи лічильника, що розташовані поруч. При подачі сигналу на лічильник, на виходах по черзі утворюються імпульси. Спочатку імпульс утворюється на першому виході, потім перемикається на

другий, третій і так до кінця, потім процес повторюється спочатку. Частоту і інтенсивність спалахів можливо регулювати, це регулюється номіналом резистора між 6 і 7 виводами таймера. У вихідному каскаді можна використовувати практично будь-які потужні транзистори зі зворотною провідністю. Перелік елементів та їх номінали наведено на рис. 32.

## 6. Перетворювачі напруги для регульованих безконтактних електрогенераторів та електродвигунів. Вентильні двигуни та генератори. Регулювання напруги та частоти обертання вентильних машин

Перетворювачі напруги – це пристрої, що перетворюють напругу однієї величини та типу в напругу іншої величини та типу. Наприклад, відбувається перетворення постійної напруги 12...15 В в змінну напругу 220 В частотою 50 Гц. Вони використовуються як в побуті, так і в промисловості, в відновлювальній енергетиці та при лабораторних і експериментальних дослідженнях електрогенераторів та електродвигунів [15-16].

На рис. 33 наведено принципову електричну схему для перетворювача постійної напруги в змінну 220 В, 50 Гц. Даний пристрій використовується для лабораторних досліджень малопотужних низьковольтних генераторів із постійними магнітами.

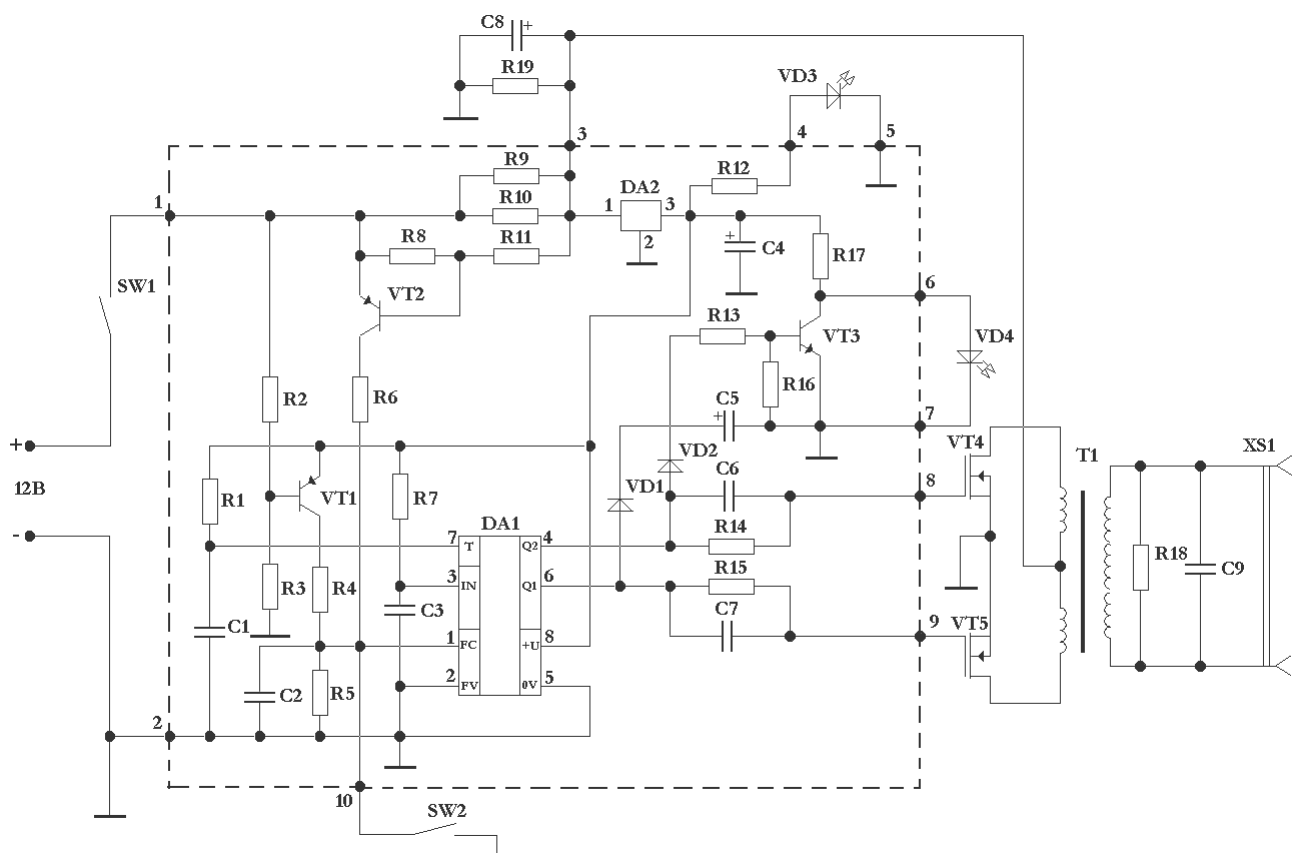


Рис.33. Принципова електрична схема перетворювача

Даний пристрій дозволяє отримати змінну напругу 220 В частотою 50 Гц від джерела постійної напруги 10,5-14 В. Форма генерованих коливань – прямокутна. В якості джерела живлення перетворювача використовується джерело постійної напруги – електрогенератор із вихідною напругою 10,5-14 В. Перетворювач має захист від перевантаження. Технічні характеристики: напруга живлення: 10,5 – 14 В; напруга на виході: 190 – 240 В; частота напруги на виході: 48 – 52 Гц; потужність навантаження: до 100 Вт.

В якості задаючого генератора DA1 в даному перетворювачі використовується спеціалізована мікросхема КР1211ЕУ1. Мікросхема містить внутрішній тактовий генератор, частота генерації якого визначається постійною часу ланцюга, яка підключається до виводу 7 мікросхеми. На виводах 4 і 6 формуються вихідні імпульси відповідно до діаграми, наведеної на рис. 34.

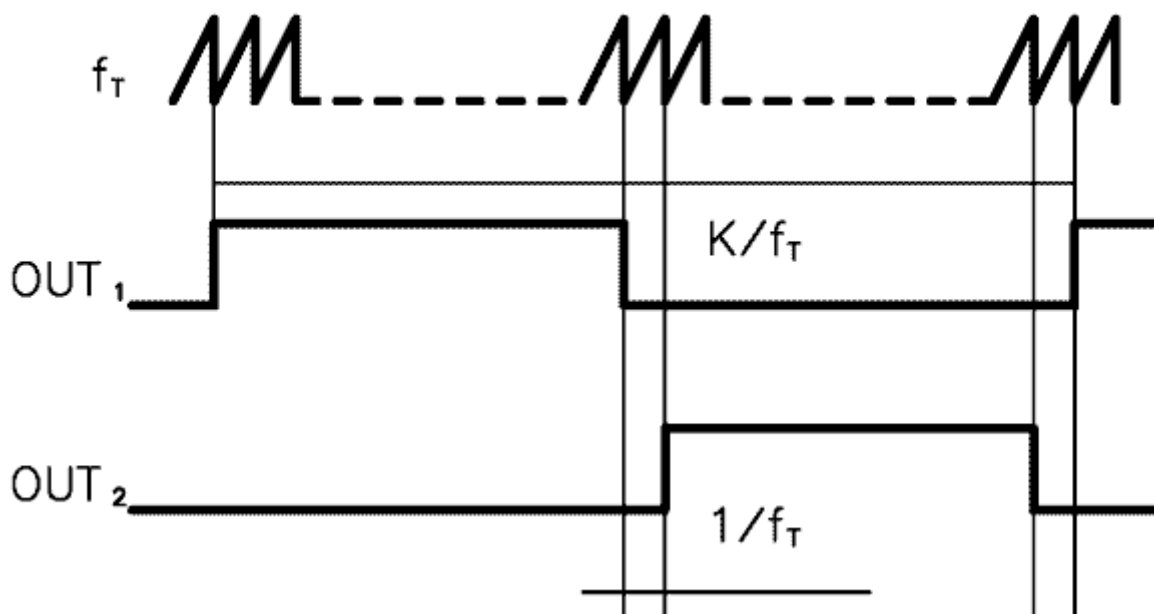


Рис. 34. Діаграма роботи мікросхеми КР1211ЕУ1

З діаграми видно, що частота вихідних імпульсів в  $K$  разів менше частоти внутрішнього тактового генератора. Значення  $K$  залежить від рівня напруги на виводі 3: при високому рівні –  $K=18$ , а при низькому –  $K=14$ . З діаграми також видно, що вихідні сигнали мають захисний інтервал, рівний одному періоду тактової частоти, протягом якого обидва вихідних сигнали мають низький рівень напруги. Для роботи системи захисту використовується вивід 1 мікросхеми. При подачі на нього високого рівня напруги робота мікросхеми блокується і на

виходах встановлюється низький рівень напруги. У робочий режим мікросхема переводиться або вимкненням та ввімкненням живлення, або короткочасною подачею низького рівня напруги на вивід 3 мікросхеми. Вихідні імпульси DA1 по черзі відкривають польові транзистори VT4, VT5, які створюють в первинній обмотці трансформатора T1 змінний електричний струм. При цьому на виводах вторинної обмотки T1 формується вихідна змінна напруга.

Живлення мікросхеми DA1 здійснюється від малопотужного інтегрального стабілізатора DA2. Наявність напруги живлення відображається світлодіодом VD3. Частота формованої змінної напруги визначається номіналами R1, C1. Датчиком перевантаження служать паралельно з'єднані резистори R9 і R10. При перевантаженні транзистор VT2 відкривається і через ділянку R6, R5 на вивід 1 мікросхеми надходить напруга високого рівня. Порогова величина струму спрацьовування захисту визначається номіналами R8, R11 і для даної схеми складає 10 А. При зниженій напрузі живлення відкривається транзистор VT1. Струм, що протікає через відкритий транзистор VT1 і резистори R4, R5 створює на виводах 1 мікросхеми DA1 напругу високого рівня.

Гранична напруга переходу в режим захисту визначається номіналами R2, R3 і для даної схеми складає 10 В. Діоди VD1, VD2, VD4, резистори R13, R16, R17, транзистор VT3 і конденсатор C5 утворюють вузол індикації режиму блокування. При наявності коливань на виході мікросхеми DA1 конденсатор C5 заряджається через діоди VD1, VD2 напругою високого рівня, транзистор VT3 відкривається і шунтує світлодіод VD4. При відсутності коливань на виході мікросхеми DA1 транзистор VT3 закритий і світлодіод VD4 горить. Блокування знімається після відключення перетворювача і повторного включення через 10-15 секунд, необхідних для розрядки конденсатора C8 через резистор R19. Захист можна відключити замиканням виводу 10 плати на «мінус» джерела живлення за допомогою перемикача SW1.

Перелік елементів наведено в табл. 5.

## Перелік елементів перетворювача напруги

| Позиція | Назва                  | Примітка                        | Кіл. |
|---------|------------------------|---------------------------------|------|
| DA1     | KP1211EY1              | -                               | 1    |
| DA2     | 78L06                  | Інтегральний стабілізатор       | 2    |
| VT1,VT2 | KT3107A                | -                               | 1    |
| VT3     | KT3102A                | -                               | 1    |
| VT4,VT5 | IRZ44                  | Польовий транзистор             | 2    |
| VD1,VD2 | КД522А                 | -                               | 2    |
| VD3     | LED 5мм,G              | Світлодіод зелений              | 1    |
| VD4     | LED 5мм,R              | Світлодіод червоний             | 1    |
| R1      | 1,1МОм; 1,2МОм; 1,3МОм | Необхідно підбирати             | 3    |
| R2,R4   | 3,9 кОм                | Оранж., білий, червоний         | 1    |
| R3,R13  | 6,2 кОм                | Блакитний, червоний, червоний   | 1    |
| R5      | 10 кОм                 | Коричн., чорний, оранж.         | 1    |
| R6      | 9,1 кОм                | Білий, коричн., червоний        | 1    |
| R7      | 100 кОм                | Коричн., чорний, жовтий         | 1    |
| R8      | 2,2 кОм                | Червоний, червоний, червоний    | 1    |
| R16     | 1,8 кОм                | Коричн, сірий, червоний         | 2    |
| R9,R10  | 0,1 Ом                 | 5 Вт                            | 2    |
| R11     | 1,0 кОм                | Коричн., чорний, червоний       | 1    |
| R12,R17 | 620 Ом                 | Блакитний, червоний, коричн.    | 2    |
| R18     | 82 кОм                 | 2 Вт сірий, червоний, оранжевий | 1    |
| R14,R15 | 100 Ом                 | Коричн., чорний, коричн.        | 2    |
| R19     | 1,2 кОм                | Коричн, червоний, червоний      | 1    |
| C1      | 1000 пФ                | -                               | 1    |
| C2,C3   | 0,1 мкФ                | -                               | 2    |
| C4      | 1000мкФ 16В            | -                               | 1    |
| C5      | 10 мкФ 16В             | -                               | 1    |
| C6,C7   | 0,047 мкФ              | -                               | 2    |
| C8      | 10000 мкФ 16В          | -                               | 1    |
| C9      | 0,047 мкФ 400В         | -                               | 1    |

Транзистори VT4, VT5 повинні бути встановлені на радіатори площею 30-50 кв. см. кожен. При цьому необхідно забезпечити електричну ізоляцію між радіатором і корпусом транзистора. Рекомендується використовувати прокладки з слюди або кераміки, а також діелектричні шайби під гвинти і теплопровідну пасту. Як Т1 підійде понижуючий трансформатор 220 / (10,5 + 10,5) В потужністю не менше 150 Вт. Рекомендується використовувати трансформатор ТП-190 після його нескладної доробки. Доопрацювання трансформатора полягає в тому, щоб, не вдаючись до його розбирання, відмотати 10 витків кожної секції вторинної обмотки. Для самостійного виготовлення трансформатора рекомендується осердя ПЛМ27-40-58. Первинна обмотка повинна містити дві

секції по 32 витка дроту діаметром 2 мм, а вторинна (що підвищує) – 700 витків дроту діаметром 0,6 мм.

З'єднання в колі витоків транзисторів VT4, VT5 первинної обмотки трансформатора T1, а також конденсатора C8 повинні бути виконані проводом перерізом не менше 1,5 кв. мм. Провід, що з'єднують перетворювач з джерелом живлення повинні мати переріз не менше 2,5 кв. мм. Резистор R19 встановлюється безпосередньо на виводах конденсатора C8, а елементи R19, C9 встановлюються на клеммах трансформатора T1. В якості вимикача SW1 рекомендується використовувати рубильник-автомат на струм 10-16 А.

Використовувані в перетворювачі польові транзистори мають опір відкритого каналу близько 25 МОм, вони розраховані на досить великий допустимий струм стоку 40 А, тому потужність перетворювача може бути збільшена до 250 Вт шляхом зміни номіналів схеми блокування і використання відповідного трансформатора.

*Вентильні двигуни та генератори. Регулювання напруги та частоти обертання вентильних машин.*

Машини постійного струму мають більш високі техніко-економічні показники (лінійність характеристик, високий ККД, малі габарити) ніж машини змінного струму. Істотний недолік – наявність щіткового апарату, який знижує надійність, збільшує момент інерції, створює радіоперешкоди, вибухонебезпечність та ін. Тому актуальним є завдання створення безконтактного (безколекторного) двигуна постійного струму [11, 15].

Вирішення цього завдання виявилось можливим з появою напівпровідникових приладів. У безконтактній машині постійного струму, що називається вентильною машиною постійного струму, щітковий апарат замінений напівпровідниковим комутатором, якір нерухомий, ротор являє собою постійний магніт або систему із електромагнітним збудженням.

Вентильною машиною називають систему регульованого електроприводу, що складається з електродвигуна змінного струму, конструктивно подібного синхронній машині, вентильного перетворювача і пристроїв управління, які забезпечують комутацію обмоток машини залежно від положення ротора

двигуна. В даному випадку вентильний двигун подібний за параметрами та характеристиками до двигуна постійного струму, в якому за допомогою колекторного комутатора підключається той виток обмотки якоря, який знаходиться під полюсами збудження.

Вентильний двигун постійного струму являє собою складний електромеханічний пристрій, в якому поєднуються найпростіша електрична машина і електронна система управління.

Двигуни постійного струму мають суттєві недоліки, обумовлені, головним чином, наявністю щітково-колекторного апарату:

1. Недостатня надійність колекторного апарату, необхідність його періодичного обслуговування;

2. Обмежені величини напруги на якорі а, отже, потужності машин постійного струму, що обмежує їх застосування для високошвидкісних приводів великої потужності;

3. Обмежена перевантажувальна здатність двигунів постійного струму, обмеження швидкості зміни струму якоря, що характерно для високодинамічних електроприводів.

Вентильні електричні машини позбавлені зазначених недоліків, оскільки щітково-колекторний комутатор замінений безконтактним комутатором, виконаним на тиристорах (для приводів великої потужності) або на транзисторах (для приводів потужністю до 200 кВт). Виходячи з цього, вентильна машина, яка конструктивно виконується на базі синхронної машини, називають безконтактною машиною постійного струму.

По керованості вентильний двигун також подібний до двигуна постійного струму – його швидкість регулюється зміною величини напруги живлення. Завдяки своїм хорошим регулювальним якостям вентильні двигуни отримали широке застосування для приводу різних роботів, металорізальних верстатів, промислових машин і механізмів, транспорту.

Приклад вентильного двигуна із транзисторною комутаторно-вентильною системою показано на рис. 35. Він виконаний на базі трифазної синхронної машини з постійними магнітами на роторі. Трифазні обмотки статора живляться

постійним струмом, що подається через дві послідовно з'єднані обмотки фази. Перемикання обмоток проводиться транзисторним комутатором, виконаним за трифазною мостовою схемою. Транзисторні ключі відкриваються і закриваються залежно від положення ротора двигуна.

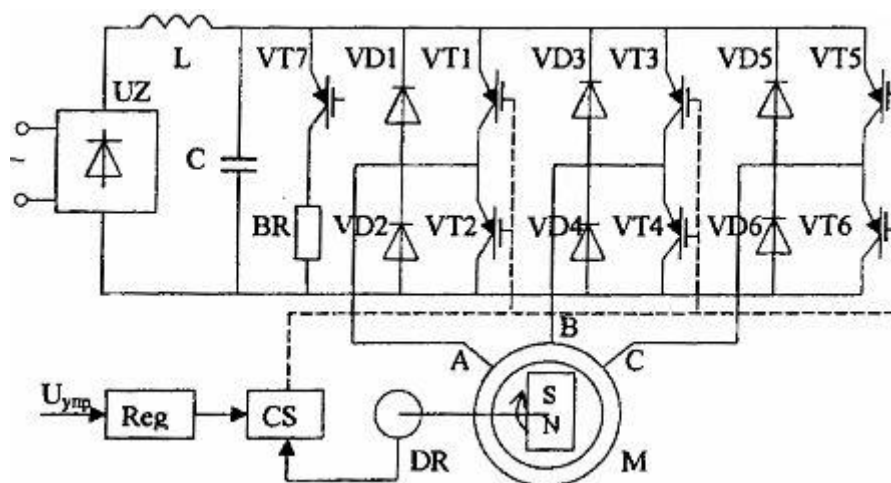


Рис. 35. Схема вентильного двигуна із транзисторним комутатором

Для регулювання напруги безконтактних вентильних генераторів із постійними магнітами застосовуються наступні методи:

1. Зміна частоти обертання генератора;
2. Застосування в зовнішньому колі генератора ємнісних елементів;
3. За допомогою резонансного контуру, що складається із ємності  $C$  та дроселя насичення  $L$ ;
4. Використання дроселів насичення із системою підмагнічування постійним струмом;
5. За допомогою напівпровідникових перетворювачів;
6. За допомогою підмагнічуючої обмотки, що живиться постійним струмом та змінює ступінь насичення сталених ділянок магнітопроводу.

Більш глибоко дані методи розглядаються зі студентами на лекційних заняттях.

На рис. 36 представлено найпростіше рішення для регулювання швидкості обертання вентильних двигунів малої потужності.

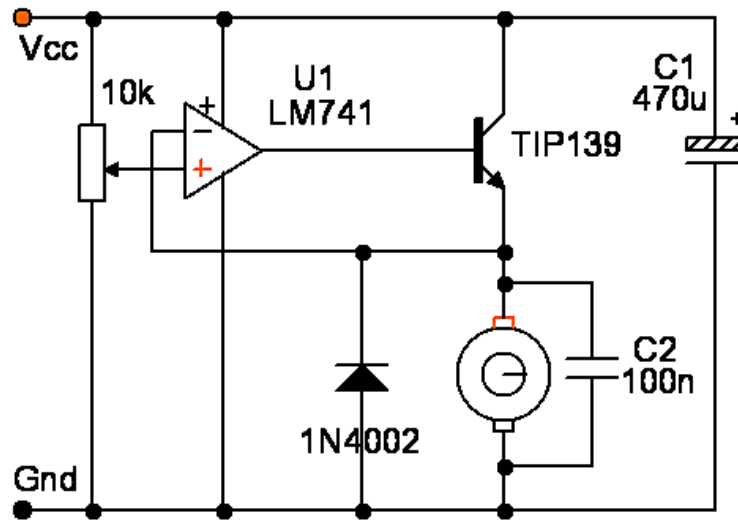


Рис. 36. Найпростіший регулятор обертів вентильного двигуна

Напруга управління подається з потенціометра 10 кОм на операційний підсилювач LM741, який регулює напругу на базі транзистора TIP139, що є силовим для двигуна. Сигнал з емітера транзистора TIP139 подається не тільки на двигун, а й на вхід операційного підсилювача – це зворотній зв'язок, призначений для стабілізації швидкості двигуна в незалежності від того, чи двигун працює під навантаженням, чи в режимі холостого ходу. Максимальна вхідна напруга схеми дорівнює 30 Вольт.

## 7. Розрахунок параметрів схеми заміщення безконтактних машин.

### Будова частотно-регульованих двигунів

Для закріплення теоретичного матеріалу в рамках даного підрозділу методичних вказівок рекомендуються до розв'язання наступні задачі.

#### Задача № 1

Визначити необхідну величину ЕРС  $E_z$  вентильного генератора із напівпровідниковим випрямлячем мостового типу в номінальному режимі, якщо відомі параметри наведено в табл. 6.

Таблиця 6

Варіанти завдань та дані до розрахунку

| Параметр                     | Варіанти |       |       |       |       |
|------------------------------|----------|-------|-------|-------|-------|
|                              | 1        | 2     | 3     | 4     | 5     |
| $\alpha, ^\circ$             | 20       | 25    | 18    | 12    | 14    |
| $K_i, \text{в.о.}$           | 0,8      | 0,8   | 0,8   | 0,8   | 0,8   |
| $\dot{U}_d, \text{в.о.}$     | 1        | 0,97  | 0,95  | 1,05  | 1,07  |
| $\dot{I}_d, \text{в.о.}$     | 1        | 1     | 1     | 1     | 1     |
| $x_{\sigma a}, \text{в.о.}$  | 0,163    | 0,151 | 0,172 | 0,185 | 0,121 |
| $x_{ad}, \text{в.о.}$        | 1,2      | 1,12  | 1,31  | 1,07  | 1,27  |
| $x_{aq}, \text{в.о.}$        | 0,8      | 0,71  | 0,84  | 0,93  | 0,75  |
| $x_{\sigma zd}, \text{в.о.}$ | 0,13     | 0,124 | 0,11  | 0,137 | 0,143 |
| $x_{\sigma f}, \text{в.о.}$  | 0,2      | 0,24  | 0,37  | 0,17  | 0,11  |

#### Задача № 2

Визначити частоту обертання вентильного двигуна при  $\dot{U}_d = 1$ , граничному струмі навантаження  $\dot{I}_d = 1,2$ , при якому відбувається опрокидування тиристора, якщо відомі параметри наведено у табл. 7.

## Вихідні дані та варіанти завдання

| Параметр                     | Варіанти |       |       |       |       |
|------------------------------|----------|-------|-------|-------|-------|
|                              | 1        | 2     | 3     | 4     | 5     |
| $\beta, ^\circ$              | 18       | 13    | 20    | 27    | 14    |
| $t_{п}, \text{мкс.}$         | 20       | 15    | 27    | 18    | 31    |
| $2p$                         | 6        | 4     | 8     | 12    | 14    |
| $x_{\sigma a}, \text{в.о.}$  | 0,157    | 0,141 | 0,172 | 0,185 | 0,121 |
| $x_{ad}, \text{в.о.}$        | 1,2      | 1,12  | 1,31  | 1,07  | 1,27  |
| $x_{aq}, \text{в.о.}$        | 0,8      | 0,71  | 0,84  | 0,93  | 0,75  |
| $x_{\sigma zd}, \text{в.о.}$ | 0,13     | 0,124 | 0,11  | 0,137 | 0,143 |
| $x_{\sigma f}, \text{в.о.}$  | 0,2      | 0,24  | 0,37  | 0,17  | 0,11  |

$t_{п}$  – час паузи струму, необхідної для надійного закривання тиристора.

**Задача № 3**

Визначити кут керування  $\alpha$  вентильного генератора із постійними магнітами, для того щоб отримати задану величину  $\dot{U}_d$  та  $\dot{I}_d$ , якщо відомі дані наведено в табл. 8.

## Дані для розрахунку завдання

| Параметр                          | Варіанти |       |       |       |       |
|-----------------------------------|----------|-------|-------|-------|-------|
|                                   | 1        | 2     | 3     | 4     | 5     |
| $\dot{E}_f = \dot{U}_0$ ,<br>в.о. | 1,2      | 1,31  | 1,12  | 1,27  | 1,14  |
| $\dot{U}_d$ , в.о.                | 1        | 0,95  | 0,9   | 1,05  | 1,03  |
| $\dot{I}_d$ , в.о.                | 1        | 1,1   | 0,95  | 0,92  | 0,97  |
| $\dot{x}_{\sigma a}$ , в.о.       | 0,157    | 0,141 | 0,172 | 0,185 | 0,121 |
| $\dot{x}_{ad}$ , в.о.             | 1,2      | 1,12  | 1,31  | 1,07  | 1,27  |
| $\dot{x}_{aq}$ , в.о.             | 0,8      | 0,71  | 0,84  | 0,93  | 0,75  |
| $\dot{x}_{\sigma zd}$ , в.о.      | 0,13     | 0,124 | 0,11  | 0,137 | 0,143 |
| $\dot{x}_{\sigma f}$ , в.о.       | 0,2      | 0,24  | 0,37  | 0,17  | 0,11  |
| $K_i$ , в.о.                      | 0,8      | 0,8   | 0,8   | 0,8   | 0,8   |

**Задача № 4**

Вентильний генератор із постійними магнітами з номінальною напругою  $U_n$  та номінальною частотою обертання  $n_n$  при номінальному навантаженні має на якорі просту хвильову обмотку. Необхідно визначити ЕРС якоря, струм навантаження, корисну потужність, електромагнітну потужність та електромагнітний момент. Дані для розрахунку та варіанти вказано в табл. 9.

## Дані для розрахунку завдання

| Параметр            | Варіанти |      |      |      |      |      |      |      |      |      |
|---------------------|----------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
|                     | 1        | 2    | 3    | 4    | 5    | 6    | 7    | 8    | 9    | 10   |
| $U_H, В$            | 230      | 230  | 460  | 460  | 460  | 115  | 230  | 230  | 230  | 460  |
| $n_H, об/хв$        | 1500     | 2300 | 3000 | 2300 | 1500 | 1000 | 2300 | 1000 | 3000 | 2300 |
| $\sum r, Ом$        | 0,175    | 0,08 | 0,17 | 0,3  | 0,7  | 0,09 | 0,27 | 0,25 | 0,08 | 0,14 |
| $N$                 | 100      | 118  | 280  | 240  | 200  | 80   | 270  | 114  | 100  | 138  |
| $\Phi, 10^{-2}, Вб$ | 4,8      | 2,6  | 1,7  | 2,6  | 4,8  | 4,5  | 2,4  | 6,1  | 2,4  | 2,3  |
| $K_{вик}, в.о.$     | 0,68     | 0,91 | 0,85 | 0,57 | 0,61 | 0,73 | 0,92 | 0,95 | 0,81 | 0,74 |
| $K_i, в.о.$         | 0,8      | 0,8  | 0,8  | 0,8  | 0,8  | 0,8  | 0,8  | 0,8  | 0,8  | 0,8  |

*Поліпшення регулювальних властивостей безконтактних електричних машин.*

При постійній частоті напруги живлення асинхронні двигуни мають відносно погані регулювальні властивості, а синхронні двигуни є практично нерегульованими. Один із засобів, за допомогою якого можна здійснити регулювання в заданих межах швидкості і поліпшити коефіцієнт потужності, полягає в тому, що у вторинну обмотку асинхронної машини вводиться додаткова ЕРС. При цьому додаткова ЕРС повинна мати в будь-яких умовах роботи ту ж частоту, що і вторинна ЕРС, оскільки тільки в цьому разі обидва струми у вторинній обмотці можуть вступити у взаємодію відповідно до умови односпрямованого перетворення енергії. Цей принцип лежить в основі роботи деяких типів колекторних машин змінного струму.

Щоб створити додаткову ЕРС частоти ковзання, можна скористатися властивістю колектора перетворювати частоту. При цьому величина напруги на

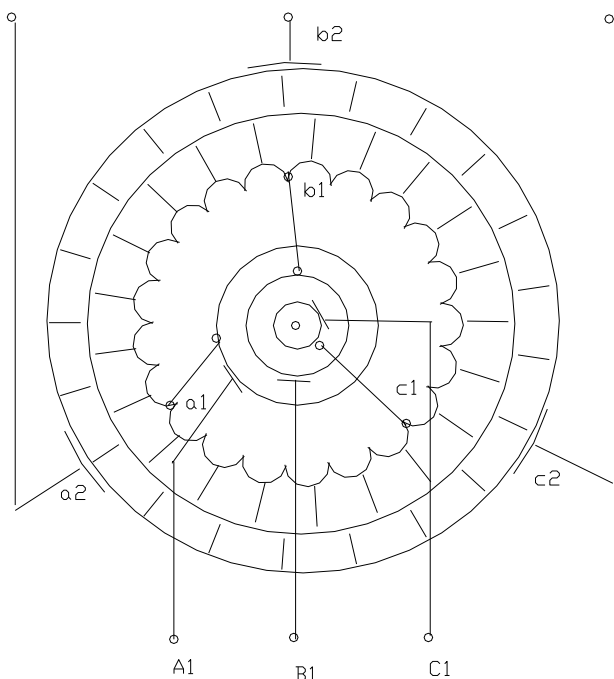


Рис. 37

щітках залишається незмінною. На рисунку 37 показана принципова конструкція ротора колекторного перетворювача частоти (ПЧ).

Його обмотка з одного боку приєднана в трьох точках  $a_1 - b_1 - c_1$  до системи трифазного струму через кільця і накладені на них щітки, а з іншого боку – виведена на колектор. На ньому розташовані на відстані  $120^\circ$  один від одного 3 щітки  $a_2 - b_2 - c_2$ . Сторону кільця називатимемо первинною стороною ПЧ, а сторону колектора –

його вторинною стороною. Статор на схемі не показано.

Нехай частота обертання ротора дорівнює нулю, а щітки  $a_2 - b_2 - c_2$  розташовані на колекторі так, як показано на рис. 37, тобто проти точок  $a_1 - b_1 - c_1$ . Це положення щіток вважатимемо початковим і від нього ведеться відлік кутів повороту ротора  $\alpha$ . 3-фазний струм, що протікає по обмотці ротора, створює магнітний потік, який обертається щодо ротора з частотою обертання  $n_1 = f_1/p$ . Цей потік індукуює у обмотці ротора синусоїдальну ЕРС  $E_2$ .

Оскільки кожна секція обмотки виводиться на колекторну пластину, то на колекторі напруга буде також розподілена по синусоїдальній залежності. Ця крива напруги на колекторі називається потенційною хвилею. Вона обертається з тією ж частотою обертання, що і магнітне поле. Отже, на щітках, накладених на колектор, буде система 3-фазної напруги з частотою  $f_2 = f_1 = pn_1$ . Нехтуючи падінням напруги, можна вважати, що

$$U_2 \approx E_2 = U_1. \quad (1.1)$$

При зрушенні щіток з початкового положення на деякий кут  $\alpha$  напруга  $U_2$  залишаючись постійною по величині, змінюється по фазі:

$$U_2 = U_1 e^{j\pm\alpha}.$$

Знак «+» відповідає зрушенню проти напрямку потоку, що обертається, знак « - » по напрямку потоку.

Приведемо тепер ротор в обертання з частотою  $n$  у будь-якому напрямі, наприклад, назустріч потенційній хвилі. Оскільки напруга  $U_1$  і частота  $f_1$  напруги мережі не змінилися, то потенційна хвиля на колекторі, постійна по величині, продовжує обертатися щодо колектора з частотою обертання  $n_1 = f_1/p$ . Але в просторі, щодо нерухомих щіток  $a_2 - b_2 - c_2$  хвиля переміщається з частотою  $n_2 = n_1 - n$ . При обертанні ротора по напрямку хвилі – з частотою  $n_2 = n_1 + n$ . Відповідно цьому частота ЕДС на щітках  $a_2 - b_2 - c_2$  може бути в загальному вигляді написана таким чином:

$$f_2 = pn_2 = p(n_1 \pm n) = pn_1 \frac{n_1 \pm n}{n_1} = f_1 s$$

Тобто, величина  $U_2$  не залежить від швидкості обертання ротора. Таким чином, дана система дозволяє регулювати частоту  $f_2$  і фазу напруги на щітках при  $U_2 = \text{const}$ . Ця властивість широко використовується для регулювання швидкості в колекторних машинах змінного струму. Наприклад, в трифазному колекторному двигуні з паралельним збудженням (двигуні Шраге-Ріхтера). Від асинхронного двигуна цей двигун відрізняється тим, що на роторі в пазах розміщуються дві обмотки, секції однієї з яких сполучені з колекторними пластинами. Трифазна обмотка ротора є первинною, а обмотка статора – вторинною. ЕРС частоти ковзання з колектора через щітки вводиться у вторинну обмотку статора. Щітки, розташовані на колекторі, можна зміщувати, що призводить до зміни ЕРС у вторинному колі, струму, електромагнітного моменту і швидкості двигуна.

Від способу з'єднання обмоток можна набути різних регульовальних властивостей колекторних електричних машин, чим і пояснюється їх різноманітність. Незадовільна комутація цих машин і низька надійність, обумовлена наявністю колектора і щіткового апарату, привели до витіснення їх із області регульованого електроприводу. Але представляє безперечний інтерес реалізація цього принципу в ЕМ з напівпровідниковими комутаторами.

## **8. Регулювання частоти обертання асинхронних частотно-регульованих двигунів**

### ***Задача № 1***

Нехтуючи активним опором обмотки статора на величину пускового моменту визначити зміну пускового струму та моменту, якщо частота напруги живлення зміниться в  $K$ -разів, при постійній та незмінній по величині та фазі нарузі живлення.

### ***Задача № 2***

Напруга на затискачах частотно-керованого асинхронного двигуна виросла в 1,41 рази. Регулювання виконується при умові постійної потужності на валу  $P_2 = \text{const}$ . Визначити величину частоти струму статора.

### ***Задача № 3***

Трифазний асинхронний двигун обертає вентилятор. Змінюючи частоту струму статора частоту обертання ротора зменшили в два рази. Як зміниться прикладена до двигуна напруга?

### ***Задача № 4***

Визначити значення ЕРС, індуковану обертовим магнітним потоком в обмотці статора, в нерухомому і роторі, частоту обертання ротора і частоту струму в роторі, якщо відомо: табл. 10.

Таблиця 10

| Параметр                               | Варіант |      |      |      |      |      |      |      |      |      |
|--|---------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
|  | 1       | 2    | 3    | 4    | 5    | 6    | 7    | 8    | 9    | 10   |
| $\Phi$ ,<br>$\text{Вб} \times 10^{-3}$ | 45      | 34   | 28   | 82   | 55   | 45   | 58   | 48   | 40   | 750  |
| $W_1$                                  | 96      | 100  | 128  | 48   | 66   | 46   | 60   | 80   | 84   | 40   |
| $k_{об1}$                              | 0,96    | 0,90 | 0,94 | 0,86 | 0,90 | 0,96 | 0,84 | 0,90 | 0,96 | 0,90 |
| $s_H$                                  | 0,02    | 0,03 | 0,02 | 0,04 | 0,06 | 0,01 | 0,04 | 0,03 | 0,03 | 0,02 |
| $2p$                                   | 4       | 6    | 8    | 12   | 2    | 4    | 8    | 8    | 6    | 10   |
| $f_1$ , Гц                             | 50      | 45   | 20   | 60   | 65   | 55   | 30   | 25   | 40   | 45   |

### Задача № 5

Трифазний асинхронний двигун з короткозамкненим ротором працює від мережі з заданою частотою і має дані, наведені в табл. 11. Потрібно побудувати графік залежності коефіцієнта корисної дії від відносного значення корисної потужності. Прийняти, що додаткові втрати  $P_d = 0,005 \cdot P_2$ , а коефіцієнт потужності змінюється в функції  $P_2/P_H$  відповідно до даних табл. 11.

Таблиця 11

| Параметр     | Варіант |      |      |      |      |      |      |      |      |      |
|--------------|---------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
|              | 1       | 2    | 3    | 4    | 5    | 6    | 7    | 8    | 9    | 10   |
| $P_H$ , кВт  | 4,0     | 15   | 45   | 5,5  | 11   | 30   | 4,0  | 15   | 110  | 250  |
| $\cos\phi_H$ | 0,89    | 0,91 | 0,90 | 0,86 | 0,87 | 0,89 | 0,84 | 0,88 | 0,90 | 0,92 |
| $U_1$ , В    | 220     | 220  | 220  | 220  | 220  | 380  | 220  | 380  | 380  | 380  |
| $r_1$ , Ом   | 1,62    | 1,15 | 1,97 | 1,53 | 1,01 | 1,75 | 1,69 | 1,24 | 1,37 | 1,41 |

## Список використаної та рекомендованої літератури

1. J.R. Hendershot & T.J.E. Miller Design of Brushless Permanent-Magnet Machines. – Motor Design Books LLC; Second Edition (March 30, 2010). – 882 p.
2. Jacek F. Gieras, Rong-Jie Wang, Maarten J. Kamper Axial Flux Permanent Magnet Brushless Machines. Springer; 2nd ed. 2008 edition (November 21, 2014). – 373 p.
3. Ahmed F. Zobaa, Shady H.E. Abdel Aleem Brushless Electric Machines with Axial Magnetic Flux: Analysis and Synthesis. 2021. – 118 p.
4. Takashi Kenjo, S. Permanent-Magnet and Brushless DC Motors. Oxford University Press (February 20, 1986). – 200 p.
5. Chang-liang Xia Permanent Magnet Brushless DC Motor Drives and Controls. – Wiley; 1st edition (April 24, 2012). – 485 p.
6. Ramu Krishnan Permanent Magnet Synchronous and Brushless DC Motor Drives. – CRC Press, 2009. – 612 p.
7. P.C. Sen Principles of Electric Machines and Power Electronics, 3rd Edition. – Wiley, 2013. – 640 p.
8. Lon Boldea, Lucian Tutelea Reluctance Electric Machines Design and Control. CRC Press, 2020. – 432 p.
9. Steve C. Cripps RF Power Amplifiers for Wireless Communications – ARTECH HOUSE, INC., 2006 (підсилювачі).
10. Marian K. Kazimierczuk RF Power Amplifiers – John Wiley & Sons, Ltd 2008 (підсилювачі).
11. Kastha Debaprasad, Bose Bimal K. Fault mode single-phase operation of a variable frequency induction motor drive and improvement of pulsating torque characteristics // IEEE Trans. Ind. Electron. – 1994. – V. 41. – № 5. – С. 426-433.
12. Douglas W. Jones Control of Stepping Motors / W. H. Yeadon and A. W. Yeadon // A Tutorial. – McGraw-Hill, 2001. – 256 p.
13. Безрученко В. М., Варченко В. К., Чумак В. В. Тягові електричні машини електрорухомого складу – Дніпропетровськ, ДНУЗТ, 2003. – 253 с.
14. Дистанційний курс «Безконтактні регульовані електричні машини»: <https://do.ipk.kpi.ua/course/view.php?id=4431>.
15. Методичні вказівки до практичних занять з дисципліни «Вентильні електричні машини». – К.: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2017. – 55 с.
16. Методичні вказівки до виконання лабораторних робіт з дисципліни «Електричні машини систем автоматики». Розділ: «Безконтактні електричні мікромашини». – К.: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2017. – 55 с.
17. Математичне моделювання електричних машин з постійними магнітами: навчальний посібник. Навчально-методичний посібник / Васьковський Ю.М., Гайденко Ю.А., Коваленко М.А. // Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2017. – 193 с.
18. Безконтактні магнітоелектричні машини із постійними магнітами [Електронний ресурс] : монографія / Чумак В. В., Островерхов М. Я., Тимошук О. Л., Коваленко М. А., Цивінський С. С., Коваленко І.Я. ; КПІ ім. Ігоря Сікорського. – Електронні текстові дані (1 файл: 8,31 Мбайт). – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2022. – 210 с. <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/48455>.
19. Моделювання електромеханічних систем [Електронний ресурс] : підручник для студентів спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка», спеціалізації «Електричні машини і апарати» / В. Ф. Шинкаренко, А. А. Шиманська, В. В. Котлярова ; КПІ ім. Ігоря Сікорського. – Електронні текстові дані (1 файл: 10,7 Мбайт). – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2019. – 253 с. Гриф надано Вченою радою КПІ ім. Ігоря Сікорського (протокол № 3 від 04.11.19). <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/38793>.