

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ЗАПОРІЗЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ІНЖЕНЕРНИЙ ІНСТИТУТ

ІНСТИТУТ ЕНЕРГЕТИКИ, ЕЛЕКТРОНИКИ ТА ІНФОРМАЦІЙНИХ
ТЕХНОЛОГІЙ

Кафедра мікроелектронних інформаційних систем

(повна назва кафедри)

Кваліфікаційна робота

другий (магістерський)

(рівень вищої освіти)

Розробка та дослідження мікроелектронних
модулів напруги автономних систем живлення

Виконав: студент II курсу, групи МК-18-1мз
спеціальності 153 «Мікро- та наносистемна
техніка»

(код і назва спеціальності)

освітньої програми Мікроелектронні інформаційні
системи

(код і назва освітньої програми)

спеціалізації _____

(код і назва спеціалізації)

Н. Ю. Воронко

(ініціали та прізвище)

Керівник проф. доц. к.т.н. Ніконова З. А.

(посада, вчене звання, науковий ступінь, прізвище та ініціали)

Рецензент Тех. дир. ТОВ «Омега-КТА» Шевченко М. В.

(посада, вчене звання, науковий ступінь, прізвище та ініціали)

Запоріжжя

2020

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ЗАПОРІЗЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ІНЖЕНЕРНИЙ ІНСТИТУТ

Факультет енергетики електроніки та інформаційних технологій
Кафедра мікроелектронних інформаційних систем
Рівень вищої освіти другий (магістерський)
Спеціальність 153 «Мікро- та наносистемна техніка»
(код і назва)
Освітня програма Мікроелектронні інформаційні системи
(код і назва)
Спеціалізація _____

ЗАТВЕРДЖУЮ
в/о Завідувач кафедри Віталько М.В.
«26» грудня 2019 року

ЗАВДАННЯ
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ СТУДЕНТОВІ (СТУДЕНТЦІ)

Лорінко Наталії Юріївні
(прізвище, ім'я, по батькові)

1 Тема роботи (проекту) Розробка та дослідження мікроелектронних регуляторів напруги автономних систем живлення
керівник роботи Ніконова З.А., проф. Е.Т.Н.
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом ЗНУ від «10» 09 2019 року № 1537-С

2 Строк подання студентом роботи 20.12.2019р

3 Вихідні дані до роботи стабілізація $U_{вх}$ при T до -50°C ,
стабілізація U - 12 В

4 Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити) 1. Дослідження пристроїв регулювання та контролю напруги автоном. сист. живл. 2. Розробка цифрового регулятора напруги автоном. сист. живл. 3. Дослідження економічності об'єкту регулювання системи регулятора U . 4. Охорона праці та безпека при розробці цифрового регулятора U .

5 Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень)
Технічні схеми генераторних установок, Структурна

Схема цифрового регулятора напруги. Аналогово-цифровий регулятор напруги. Розрахунок параметрів цифрового регулятора. Схема електричної мережі цифрового регулятора напруги.

6 Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
I	Нікомова З.А., проф.	<i>[Signature]</i>	<i>[Signature]</i>
II	Нікомова З.А., проф.	<i>[Signature]</i>	<i>[Signature]</i>
III	Нікомова З.А., проф.	<i>[Signature]</i>	<i>[Signature]</i>
IV	Нікомова З.А., проф.	<i>[Signature]</i>	<i>[Signature]</i>

7 Дата видачі завдання 2.09.2019р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи магістра	Строк виконання етапів роботи	Прим.
1.	Вивчення пристроїв регулювання та контролю Ч. авток. сист. живл.	30.09.2019р.	
2.	Розробка цифрового регул. Ч. авток. сист. живлення	28.11.2019р.	
3.	Техніко-економічне обґрунтування роботи схеми регулятора напруги	02.10.2019р.	
4.	Відомої праці та технічного завдання при розробці цифрового регул. Ч.	09.10.2019р.	

Студент *[Signature]* Лорішко Н.Ю.
(підпис) (прізвище та ініціали)

Керівник роботи (проєкту) *[Signature]* Нікомова З.А.
(підпис) (прізвище та ініціали)

Нормоконтроль пройдено

Нормоконтролер *[Signature]* Ворожкіє А.А.
(підпис) (прізвище та ініціали)

Реферат

Дипломна робота містить 74 сторінки, 30 рисунків, 19 таблиць, 16 джерел літератури.

Об'єкт дослідження – мікроелектронні регулятори напруги автономних систем живлення.

Мета роботи – розробка цифрового регулятора напруги для автономних систем живлення.

Задачі роботи – розробити схему цифрового регулятора напруги; провести аналіз функціонування розробленого пристрою на відповідність необхідним параметрам.

Методика досліджень – моделювання пристрою за допомогою програмних забезпечень Electronics Workbench 5.12, SPlan 5.0.

Короткий виклад результатів досліджень – спроектовано цифровий регулятор напруги, який дозволяє отримати і візуально контролювати оптимальні параметри для функціонування автономної системи живлення та заряду акумулятора.

Результати впроваджень – електронна версія розробленого приладу пропонується для використання в моделях автономних систем живлення.

Прогнозні пропозиції – рекомендується для подальшого удосконалення та проведення випробування на альтернативних джерелах електроенергії.

НАПРУГА, ОБМОТКА ЗБУДЖЕННЯ, КОМПАРАТОР, ГЕНЕРАТОР, АКУМУЛЯТОР, РЕЛЕ-РЕГУЛЯТОР, ІНДИКАТОР, МІКРОСХЕМА

Дипломну роботу виконано в Інженерному інституті Запорізького національного університету на кафедрі мікроелектронних інформаційних систем, з 02.09.2019 р. по 31.12.2019 р.

Зміст

	Стор.
Вступ	6
1 1 Дослідження пристроїв регулювання та контролю напруги автономних систем живлення	8
1.1 Принципи функціонування регуляторів напруги	9
1.2 Аналіз електричних схем генераторних установок	12
1.3 Аналіз сучасних пристроїв регулювання напруги	15
1.4 Аналіз схем індикаторів напруги мережі автономних систем живлення	21
2 Розробка цифрового регулятора напруги автономної системи живлення	24
2.1 Інтегральний стабілізатор живлення регулятора напруги	26
2.2 Розрахунок дільника напруги	28
2.3 Аналогово-цифровий перетворювач	29
2.4 Розрахунок цифрового компаратора	34
2.5 Індикатор напруги регулятора	38
2.6 Аналіз функціонування розробленого цифрового регулятора напруги автономної системи живлення	45
3 Техніко-економічне обґрунтування розробки схеми регулятора напруги	50
3.1 Обґрунтування вибору технології виготовлення схеми регулятора напруги	50
3.2 Розрахунок витрат на виробництво схеми регулятора напруги	54
4 Охорона праці та техногенна безпека при розробці цифрового регулятора напруги	56
4.1 Характеристика потенційних небезпечних та шкідливих виробничих факторів	56

4.2 Заходи з поліпшення умов праці	58
4.2.1 Техніка безпеки при експлуатації електричних установок в лабораторії	59
4.2.2 Електроустаткування	60
4.2.3 Створення оптимальних умов праці в лабораторії проведення експерименту.....	60
4.2.4 Природне та штучне освітлення	63
4.2.5 Засоби індивідуального захисту	64
4.3 Протипожежна та техногенна безпека	65
Висновки та рекомендації	68
Перелік джерел	69

Вступ

Регулятор напруги дозволяє змінювати величину електричної напруги на виході при дії на органи управління, або сигналу, що управляє станом входу. Використовується як у складі електронної апаратури, так і у вигляді окремого виробу.

З розвитком технічного прогресу, автономні системи живлення потребують постійної модернізації. Сучасна автономна система повинна забезпечувати мережу стабільним електроживленням. Основним джерелом електричної енергії служать альтернативні пристрої. Вони містять у собі пристрій постачання електроенергії, регулятор напруги й акумулятор.

Важливу роль в ресурсі акумуляторної батареї має значення напруги в мережі. При працюючому пристрої постачання електроенергії і зарядженому акумуляторі напруга має бути такою, що б всі споживачі струму працювали за рахунок акумулятора, і не відбувалося перезаряду батареї.

Регулятор напруги забезпечує підтримку напруги в заданих межах (максимальне відхилення напруги повинне бути $\pm 3\%$ від оптимального значення) при всіх можливих режимах роботи пристрою постачання електроенергії: відключених і повністю включених споживачах електроенергії; номінальних і максимальних режимах пристроїв постачання електроенергії, а також при змінах температури й вологості.

У більшості сучасних електронних регуляторів діапазон регульованої напруги коливається в середньому в межах 13,2...14,7 В, що перевищує припустимі норми для стабільної роботи електронних споживачів, розрахованих на напругу живлення 12 В [1, 2]. Регулювання напруги відбувається шляхом включення-вимикання струму в обмотки збудження, із-за чого напруга в мережі електроустаткування постійно пульсує. Це не тільки сильно скорочує термін служби різних пристроїв, але й вносить значні перешкоди в роботу мережі Internet, телебачення, навігаційних систем та ін.

Недоліками електронних регуляторів напруги є: низька завадостійкість і нестабільність параметрів, обумовлені сильною залежністю властивостей їхніх складових від зовнішніх дестабілізуючих впливів, наприклад температури, часу (старіння елементів).

Регулятор напруги повинен працювати при низьких температурах, мати більш високі якісні показники, чим існуючі, і мати убудовані елементи «інтелекту». Цифровий регулятор напруги, що розробляється буде відрізнятися від існуючих аналогів тим, що забезпечить підвищену стабільність вихідної напруги, зможе працювати при температурі до мінус 55°C, буде мати індикацію напруги в мережі. У цифровому варіанті існує безліч способів побудови мікроелектронного регулятора напруги. Остаточний вибір можна зробити тільки після експериментальної перевірки.

Актуальним являється розробка мікроелектронних регуляторів напруги автономних систем живлення, що базуються на постачанні альтернативної електроенергії.

1 Дослідження пристроїв регулювання та контролю напруги автономних систем живлення

Сучасні системи для автономного електропостачання використовують самі різні ресурси для вироблення електроенергії (рис. 1.1).

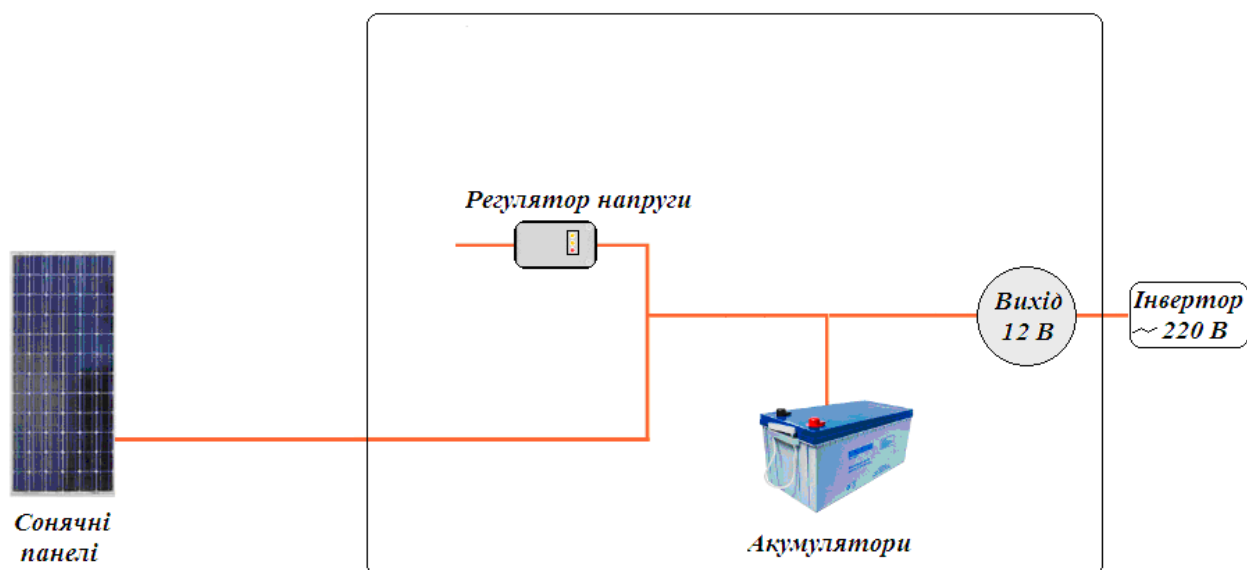


Рисунок 1.1 – Автономне електропостачання від альтернативних джерел живлення

До найпопулярніших і найбільш поширених варіантів альтернативних джерел електроенергії відносяться:

- генератори, що працюють на дизельному паливі або бензині;
- сонячні батареї і колектори;
- аккумулятори великого об'єму і потужності;
- гідро-електросистеми;
- перетворювачі повітряної енергії.

Генератор – це найшвидший і простіший спосіб забезпечення електрикою. Для роботи агрегат використовує бензин або дизельне паливо і в результаті його спалювання видає необхідну кількість енергії.

Головною перевагою є повна незалежність пристрою від сезонних змін і погодних коливань. До недоліків відноситься обов'язкова наявність спеціально обладнаного сховища для палива.

Сонячні батареї (панелі) є набором сполучених разом і ув'язнених в раму напівпровідникових елементів, що переробляють ресурси світла в електричну енергію. Устаткування не споживає палива і не потребує складного високопрофесійного обслуговування.

У тому випадку, коли метеорологічні або які-небудь інші об'єктивні причини не дозволяють встановити сонячні батареї або колектори, актуальною є установка повітряного генератора.

Він уловлює кінетичну енергію вихрового потоку, перетворює її в механічну енергію обертанням ротора генератора і потім перетворює на електроресурс за допомогою спеціальних регуляторів напруги.

1.1 Принципи функціонування регуляторів напруги

Регулятор напруги підтримує напругу мережі в заданих межах у всіх режимах роботи пристроїв постачання електроенергії (ППЕ) при зміні параметрів роботи, електричного навантаження, температури довкілля. Якщо в автономній системі живлення використовується генератор, то регулятор може виконувати додаткові функції – захищати елементи системи від аварійних режимів і перевантажень, автоматично включати в мережу силові кола генераторної установки або обмотку збудження [1].

По своїй конструкції регулятори діляться на безконтактні транзисторні, контактно-транзисторні і вібраційні (реле-регулятори). Різновидом безконтактних транзисторних регуляторів є інтегральні регулятори, що виконуються за спеціальною гібридною технологією, або монолітні на монокристалі кремнію. Не дивлячись на настільки всілякого конструктивного виконання, всі регулятори працюють за єдиним принципом.

Напруга генератора залежить від трьох чинників – частоти обертання його ротора, сили струму навантаження і величини магнітного потоку, створеного обмоткою збудження, який залежить від сили струму в цій обмотці. Будь-який регулятор напруги містить чутливий елемент, що сприймає напругу генератора (звичайно це дільник напруги на вході регулятора), елемент порівняння, в якому напруга генератора порівнюється з еталонною величиною, і регулюючий орган, що змінює силу струму в обмотці збудження, якщо напруга генератора відрізняється від еталонної величини.

У реальних регуляторах еталонною величиною може бути не обов'язкова електрична напруга, але і будь-яка фізична величина, яка досить стабільно зберігає своє значення, наприклад, сила натягнення пружини у вібраційних і контактних-транзисторних регуляторах.

У транзисторних регуляторах еталонною величиною є напруга стабілізації стабілітрона, до якого напруга генератора підводиться через дільник напруги. Управління струмом в обмотці збудження здійснюється електронним або електромагнітним реле. Частота обертання ротора і навантаження генератора змінюються відповідно до режиму роботи автомобіля, а регулятор напруги будь-якого типу компенсує вплив, цієї зміни на напругу генератора дією на струм в обмотці збудження. При цьому вібраційний або контактний-транзисторний регулятор включає в коло і вимикає з кола обмотки збудження послідовно резистор (у двоступінчатих вібраційних регуляторах при роботі на другому рівні замикає цю обмотку на масу), а безконтактний транзисторний регулятор напруги періодично підключає і відключає обмотку збудження від кола живлення. У обох варіантах зміна струму збудження досягається за рахунок перерозподілу часу знаходження перемикального елемента регулятора у включеному і вимкненому станах [1].

Якщо сила струму збудження має бути, наприклад, для стабілізації напруги, збільшена, то у вібраційному і контактному-транзисторному регуляторах час включення резистора зменшується в порівнянні з часом його відключення.

ня, а в транзисторному регуляторі час включення обмотки збудження в коло живлення збільшується по відношенню до часу її відключення.

На рисунку 1.2 показаний вплив роботи регулятора на силу струму в обмотці збудження для двох частот обертання ротора генератора n_1 і n_2 , причому частота обертання n_2 більша, ніж n_1 . При більшій частоті обертання відносний час включення обмотки збудження в коло живлення транзисторним регулятором напруги зменшується, середнє значення сили струму збудження зменшується, чим і досягається стабілізація напруги.

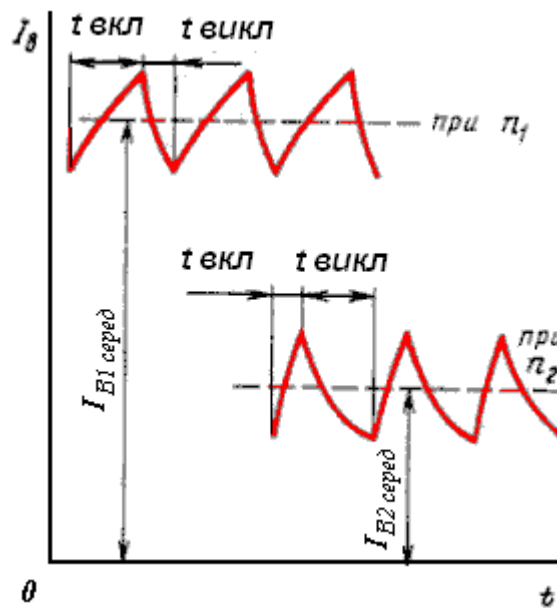


Рисунок 1.2 – Зміна струму в обмотці збудження при різній частоті обертання ротора n ($n_2 > n_1$); $t_{\text{вкл}}$ і $t_{\text{викл}}$ – час знаходження реле у включеному і вимкненому стані

Із зростанням навантаження напруга зменшується, відносний час включення обмотки збільшується, середнє значення сили струму зростає таким чином, що напруга генераторної установки залишається практично незмінною.

На рисунку 1.3 представлені типові регульовальні характеристики генераторної установки, що показують, як змінюється сила струму в обмотці збудження при незмінній напрузі і зміні частоти обертання або сили струму на-

вантаження. Нижня межа частоти перемикання регулятора складає 25...30 Гц.

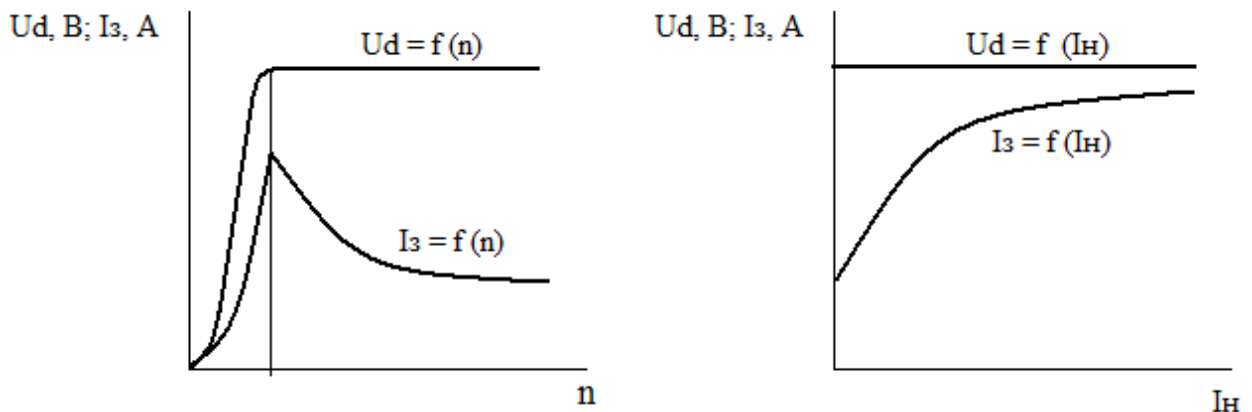


Рисунок 1.3 – Залежності напруги генератора і сили струму в обмотці збудження від частоти обертання (а) і сили струму навантаження (б)

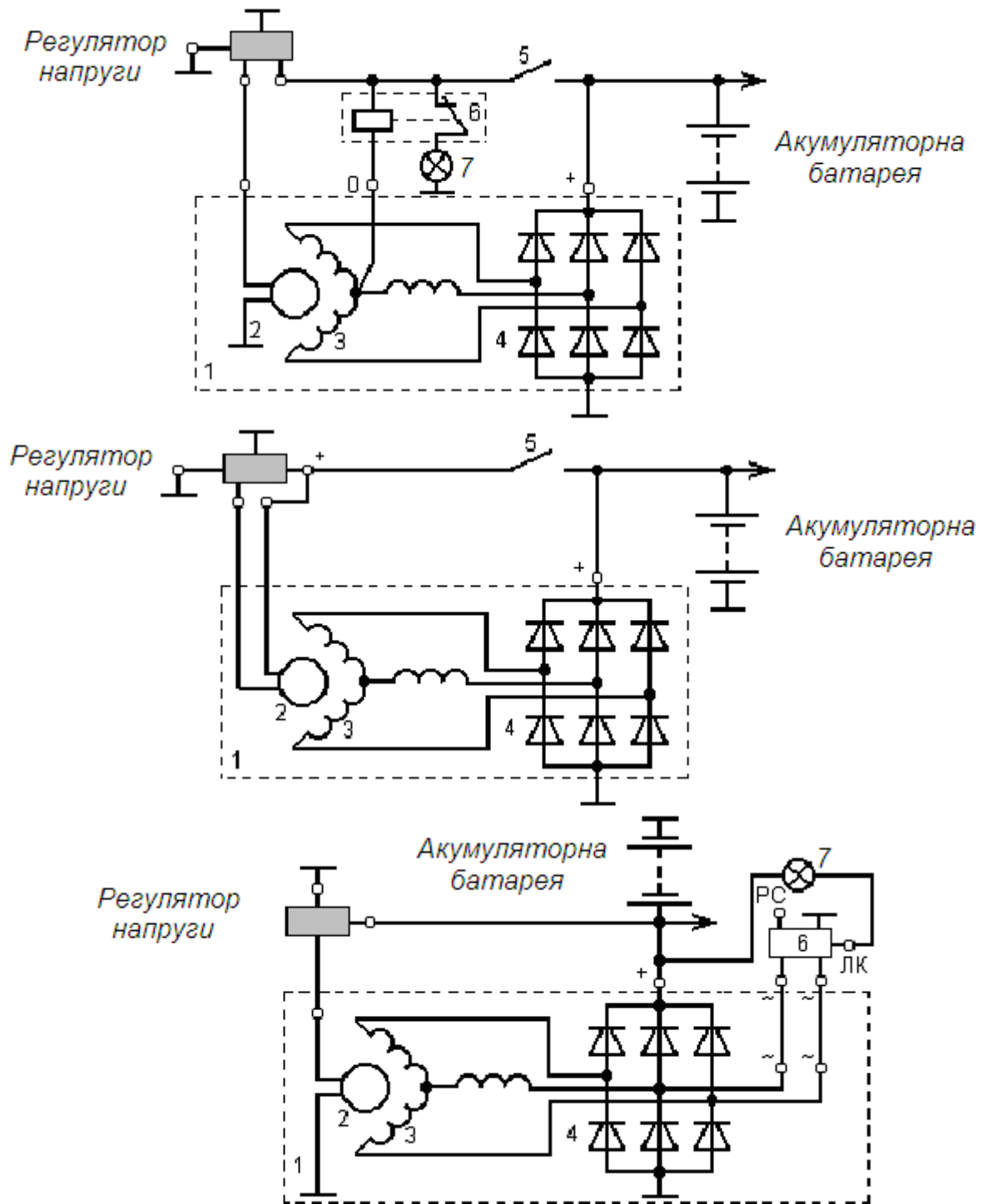
1.2 Аналіз електричних схем генераторних установок

Генераторні установки з вентильними генераторами не використовують яких-небудь вмикаючих пристроїв в силовому колі [2]. Для нормального функціонування їх регулятора напруги до нього мають бути підведена напруга мережі (напруга генератора) і виводи кола обмотки збудження генератора.

На рисунку 1.4 представлені принципові схеми генераторних установок.

Розрізняють два типи не взаємозамінних регуляторів напруги. У першому типі (рис. 1.34, а) вихідний комутуючий елемент регулятора напруги сполучає виведення обмотки збудження генератора з "+" мережі, в другому типі (рис. 1.4, б, в) – з "-" мережі. Транзисторні регулятори напруги другого типу є поширенішими [2].

Аби в режимі паузи акумуляторна батарея не розряджалася, коло обмотки збудження генератора (рис. 1.4, а, б) замикається через вимикач.



1 - генератор; 2 - обмотка збудження; 3 - обмотка статора; 4 - випрямляч з вентиляним генератором; 5 - вимикач; 6 - реле контрольної лампи; 7 - контрольна лампа

Рисунок 1.4 - Принципові схеми генераторних установок

Проте, при цьому контакти вимикача комутують силу струму до 5 А, що несприятливо позначається на їх терміні служби. Тому через вимикач за-

микається лише коло управління регулятора напруги (рис. 1.4, в), споживаючий струм в долі ампера.

Переривання струму в колі управління переводить електронне реле регулятора у вимкнений стан, що не дозволяє струму протікати в обмотку збудження. Проте, вживання вимикача в колі генераторної установки знижує її надійність.

Крім того, падіння напруги у вимикачі і інших комутуючих або захисних елементах, включених в коло регулятора (штекерні з'єднання, запобіжники), впливає на рівень підтримуваної регулятором напруги і частоту перемикання його вихідного транзистора (рис. 1.4, а – в).

З метою контролю працездатності (рис. 1.4, а) введені реле з нормально замкнутими контактами, через які отримує живлення контрольна лампа 8. Ця лампа спалахує після включення і згасає після виходу на режим роботи, оскільки під дією напруги генератора, до середньої точки обмотки статора якого підключено реле, воно розриває свої нормально замкнуті контакти і відключає контрольну лампу 8 від кола живлення. Якщо лампа при працюючому генераторі горить, це означає що генераторна установка несправна.

У деяких генераторних установках зарубіжного і вітчизняного виробництва регулятор напруги підтримує напругу не на силовому виводі генератора "+", а на виведенні його додаткового випрямляча (рис. 1.4, в).

У схемі на рисунку 1.4, в лампа контролю працездатності генераторної установки включена на реле, що живиться від генератора з боку змінного струму. Виводи змінного струму генератора підключаються і на виводи тахометра. Реле-регулятори, що працюють в комплекті з генераторами постійного струму, окрім стабілізації напруги, здійснюють автоматичне включення генератора, коли напруга генератора більше напруги батареї, і відключення його, коли напруга генератора менше напруги батареї, а також захист генератора від перевантаження. Отже, струм генератора повинен поступати споживачам через схему реле-регулятора – обмотку обмежувача струму і реле зворотного струму.

В даний час на комплектацію автономних систем живлення поступають, в основному, генераторні установки з безконтактними транзисторними регуляторами, кількість вібраційних і контактних-транзисторних регуляторів, що знаходяться в експлуатації, скорочується.

1.3 Аналіз сучасних пристроїв регулювання напруги

Безконтактний транзисторний регулятор напруги 121.3702 (рис. 1.5) застосовується з генератором Г221А замість вібраційного регулятора напруги РР380.

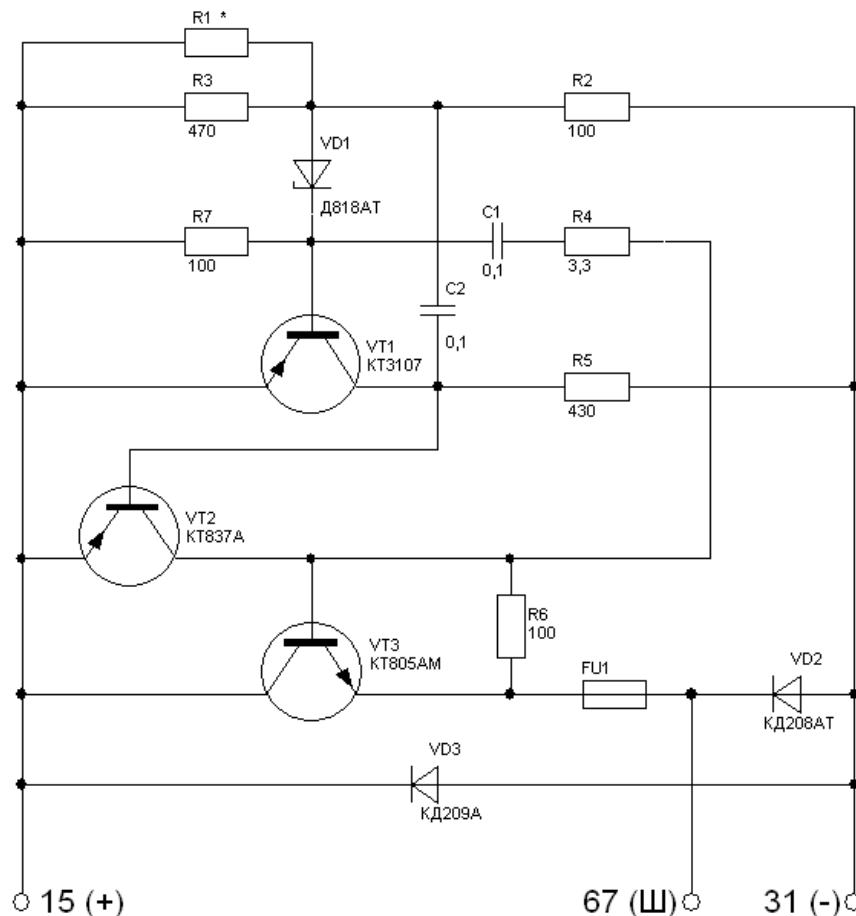


Рисунок 1.5 – Схема транзисторного регулятора напруги 121.3702

Схема регулятора досить проста і типова, що дозволяє використовувати її для ілюстрації принципу роботи транзисторних регуляторів [1].

Еталонною величиною в регуляторі є напруга стабілізації стабілітрона VD1. Характерною особливістю стабілітрона є те, що якщо напруга між його катодом і анодом по величині менше напруги стабілізації, струм через нього практично не протікає. Якщо напруга між катодом і анодом досягає величини напруги стабілізації, струм через стабілітрон різко зростає, відбувається "пробій" стабілітрона. При цьому напруга між його катодом і анодом залишається практично незмінною.

Вимірювальним органом в регуляторі є дільник напруги, що складається з резистора R2 і двох паралельно включених резисторів R1 і R3. До стабілітрона VD1 через перехід емітер-база транзистора VT1 підводиться та частина напруги генератора, яка виділяється на паралельно включених резисторах R1, R3. Стабілітрон є органом порівняння в регуляторі напруги. Регулюючим органом в схемі є електронне реле на трьох транзисторах VT1...VT3. Ці транзистори при роботі регулятора напруги можуть знаходитися в одному з двох станів – відкритому (струм в колі емітер-колектор транзистора протікає) і закритому – струм в колі емітер-колектор відсутній. Коло між емітером і колектором в цьому сенсі аналогічний контактам реле. Для переходу транзистора із закритого у відкрите полягання в колі емітер-база повинен з'явитися струм, для чого до переходу емітер-база слід прикласти напругу відповідної полярності, тобто перехід емітер-база має бути зміщений в прямому напрямі.

Струм, що відкриває транзистори типа p-n-p, протікає від емітера до бази (емітер має вищий потенціал, ніж база), а типа n-p-n – від бази до емітера (позитивний потенціал на базі відносний емітера). Якщо перехід емітер-база зміщений у зворотному напрямі, то транзистор закритий.

Регулювання напруги транзисторним регулятором відбувається таким чином. До пуску ППЕ при включенні вимикача 5 (рис. 3, а) напруга акумуляторної батареї підводиться до дільника напруги R1...R3. При цьому до стабілітрона VD1 поступає та частина цієї напруги, яка виділяється на плечі дільника, утвореному паралельно включеними резисторами R1, R3. Резистор R1

налаштування регулятора підбирається так, щоб напруга на резисторах R1, R3 при включенні лише акумуляторної батареї було менше, ніж напруга стабілізації стабілітрона VD1, т. е недостатньо для його пробою. При цьому стабілітрон перешкоджає протіканню струму в колі бази транзистора VT1, який знаходиться в закритому стані. Транзистори VT2 і VT3 відкриті, оскільки в колах їх баз протікають струми – в транзистора VT2 через резистор R5, а в транзистора VT3 – через перехід емітер-колектор транзистора VT2. Транзистори VT1 і VT2 мають тип р-п-р, а транзистори VT3 - п-р-п. Отже, при включенні акумуляторної батареї електронне реле регулятора напруги знаходиться у включеному стані, його вихідний транзистор VT3 відкритий і струм від акумуляторної батареї поступає в обмотку збудження, забезпечуючи збудження генератора. Після пуску ППЕ генератор вступає в роботу, його напруга зростає до тих пір, поки напруга на плечі дільника R1, R3 не стане рівним напрузі стабілізації стабілітрона VD1. При цьому стабілітрон пробивається, виникає струм в базі транзистора VT1 і він відкривається. Оскільки опір переходу емітер-колектор відкритого транзистора малий, то цей перехід транзистора VT1 практично закортко сполучає базу з емітером транзистора VT2, шунтує цей його перехід, струм в базі транзистора VT2 припиняється і він закривається. Якщо закритий транзистор VT2, то закривається і транзистор VT3, оскільки струм в його базовому колі уривається. Електронне реле регулятора переходить у вимкнений стан, струм в обмотці збудження зменшується, відповідно зменшується і напруга генератора. При цьому зменшується напруга на резисторах R1, R3. Як тільки вона стає менше напруги стабілізації стабілітрона VD1, транзистор VT1 закривається, VT2 і VT3 відкриваються, напруга генератора зростає, тобто процес повторюється.

Транзистор VT2 грає в схемі роль підсилювача. Вживання в схемах декількох транзисторів пов'язане з тим, що на вході регулятора зазвичай комується струм в десятки міліампер в той час, як на виході струм сучасних регуляторів напруги досягає 5 А. При цьому коефіцієнт посилення схеми регу-

лятора по струму лежить в межах 300...800. Такого посилення на одному транзисторі досягти неможливо.

Таким образом, регулювання напруги генератора виконується ступінчасто. Електронне реле регулятора напруги переходить від включеного до вимкненого стану і назад, то підключаючи обмотку збудження до джерела живлення, то її відключаючи. Залежно від режиму роботи генератора міняється відносний час знаходження реле у включеному або вимкненому стані, чим і забезпечується автоматична підтримка напруги генератора на заданому рівні. Діод VD2, що гасить, запобігає появі небезпечних імпульсів напруги при замиканні транзистора VT3 і перериванні струму в обмотці збудження.

Поява імпульсу високої напруги запобігає тим, що при замиканні транзистора VT3 струм обмотки збудження має можливість протікати через діод, що гасить, обмотка збудження цим діодом виявляється замкнута практично закортко і небезпечних наслідків переривання струму не відбувається.

Зворотні зв'язки в схемі регулятора підвищують якісні показники його роботи, збільшують частоту перемикання його електронного реле, знижують втрати в транзисторах при перемиканні, забезпечують різницю між напругою включення і виключення електронного реле регулятора і так далі. Через зворотні зв'язки здійснюється дія сигналу на виході елемента на вхід цього ж або іншого елемента. У цьому сенсі вимірювальний елемент регулятора, його вхідний дільник напруги, є головним зворотним зв'язком в системі автоматичного регулювання напруги генератора – він подає вихідну напругу генератора на вхід регулятора напруги.

Через резистори в регуляторі здійснюється жорсткий зворотний зв'язок, через коло з конденсатором – гнучкий. Жорсткий зворотний зв'язок відрізняється від гнучкої тим, що передає сигнал без затримки за часом.

У приведеній на рисунку схемі є два елементи зворотного зв'язку – коло, що складається з конденсатора C1 і резистора R4, а також конденсатор C2. Коло R4, C1 пов'язує колектор транзистора VT2 з базою транзистора VT1, тобто вихід транзистора VT2 з входом VT1. Цей коло знижує втрати в

транзисторах VT1...VT3 при їх перемиканні. До пробою стабілітрона VD1 конденсатор C1 розряджається через перехід емітер-колектор транзистора VT2 і резистори R4, R7. С переходом транзистора VT1 у відкритий стан, а VT2 і VT3 в закритий конденсатор C1 заряджає через емітер базовий перехід транзистора VT1, резистори R4, R6, запобіжник. При цьому перехід база-емітер VT1 отримує по колу R4, C1 додатковий імпульс струму, що скорочує час переходу транзистора VT1 у відкритий стан, а транзисторів VT2 і VT3 в закритий стан, що знижує втрати потужності в транзисторах при їх перемиканні. Конденсатор C2 зв'язує вхід і вихід транзистора VT1, що робить цей транзистор інтегруючою ланкою, основною особливістю якої є подавлення високочастотних коливань при їх проходженні. Наявність інтегруючої ланки виключає самозбудження схеми, вплив на регулятор сторонніх електромагнітних перешкод. Резистори R5...R7 забезпечують потрібний режим роботи транзисторів у відкритому і закритому станах. Так, резистор R5 обмежує на необхідному рівні струм бази транзистора VT2, резистор R6 дозволяє транзистору VT3 закритися повністю.

Схема має два елементи захисту – запобіжник FU1, який розриває коло при струмовому перевантаженні вихідного транзистора, і діод VD3, що захищає регулятора від імпульсів напруги зворотної полярності.

Багатофункціональний регулятор напруги 5132.3702 (рис. 1.6) призначений для підтримки напруги мережі в заданих межах у всіх режимах роботи системи електроустаткування при зміні частоти обертання ротора генератора, електричного навантаження, температури довкілля.

Регулятор напруги 5132.3702 забезпечує повне відключення обмотки збудження генератора від мережі, що підвищує надійність і безпеку системи електропостачання [1].

Завдяки вживанню потужного сучасного польового транзистора як вихідний ключ досягнуті високі параметри струмошвидкісної характеристики, різко знижені втрати потужності, що виділяються у вигляді тепла.

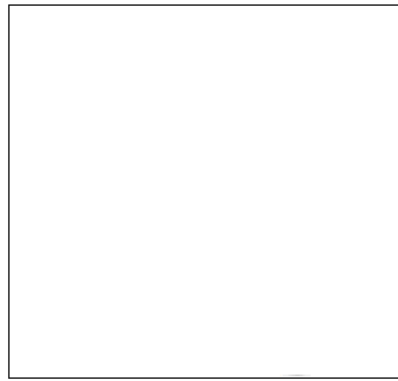
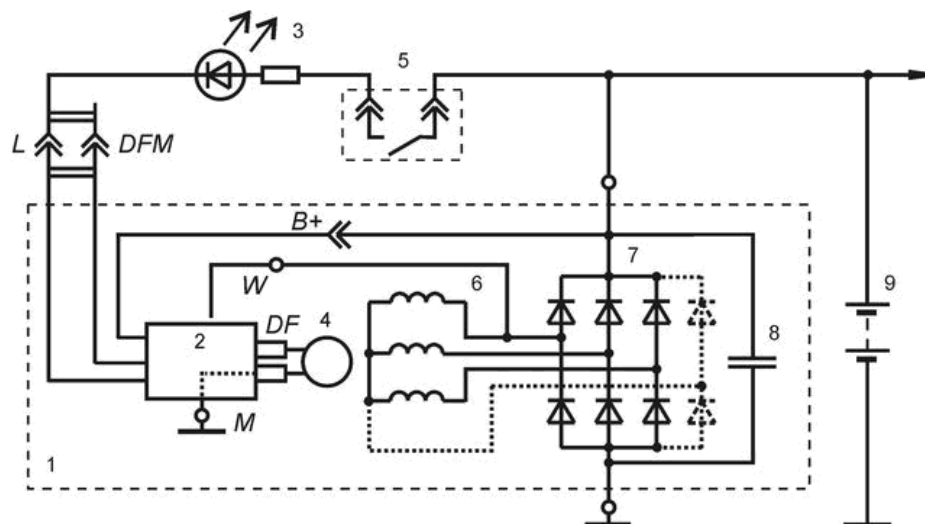


Рисунок 1.6 - Регулятор напруги 5132.3702

Регулятор володіє функцією індикації підвищеної і зниженої напруги мережі, а також низької фазної напруги генератора. Індикація здійснюється свіченням індикаторної лампи або світлодіода контролю заряду акумуляторної батареї. Прилад забезпечує виконання функції плавного наростання струму навантаження. Регулятор володіє функцією захисту від короткого замикання у вихідному і в індикаторному колі.

Схема включення у складі генераторної установки представлена на рисунку 1.7.



1 – генератор; 2 – регулятор напруги; 3 – контрольна лампа або світлодіод; 4 – обмотка збудження; 5 – контакти замка запалювання; 6 – обмотка статора; 7 – блок, що випрямляє; 8 – конденсатор; 9 – акумуляторна батарея.

Рисунок 1.7 – Схема включення регулятора напруги 5132.3702

1.4 Аналіз схем індикаторів напруги мережі автономних систем живлення

Перспективними є багаторівневі індикатори напруги мережі а автономних систем живлення. Це пристрої, призначені для контролю за станом мережі і дозволяють істотно продовжити термін служби акумуляторної батареї, не допускаючи її розряд більш ніж на 50% [3].

Пристрій з високою точністю контролює рівень напруги акумулятора і інформує про його стан, а також дозволяє вчасно відмітити несправність електромеханічного регулятора напруги автомобіля. О стані акумулятора можна судити по щільності електроліту в кожному елементі (банці). Для середньої географічної широти щільність електроліту в повністю розрядженого, розрядженого наполовину і повністю зарядженого акумулятора відповідає 1,11, 1,19 і 1,27 г/см³. Для цих станів напруга акумуляторної батареї буде 11,7, 12,18 і 12,66 В.

Періодичний контроль щільності електроліту вимагає багато часу, а для виміру напруги з необхідною точністю потрібний або цифровий вольтметр, або стрілочний з розтягнутою шкалою. Описуваний нижче пристрій дозволяє обійтися без цих приладів і зручніше в експлуатації, оскільки може здійснювати безперервний контроль за станом бортової мережі [4].

Схема пристрою (рис. 1.8) зібрана мікросхемі DA1 (K1401УД2А) і складається з чотирьох компараторів, виконаних на операційних підсилювачах, які за допомогою світлодіодів VD2...VD5 дозволяють інформувати про знаходження рівня напруги в одному з п'яти інтервалів (рис. 1.9) по свіченню відповідного індикатора. По свіченню відразу двох світлодіодів (або їх "переморгуванню") можна точно визначити момент знаходження напруги на кордоні між відповідними інтервалами. Якщо жоден зі світлодіодів не світиться, то це означає, що напруга нижче рівня 11,7В. Свічення індикатора VD2 інформує водія про несправність в роботі системи регулятор-генератор. Якщо світиться індикатор VD5, це означає, що акумулятор розряджений більш ніж на 50%.

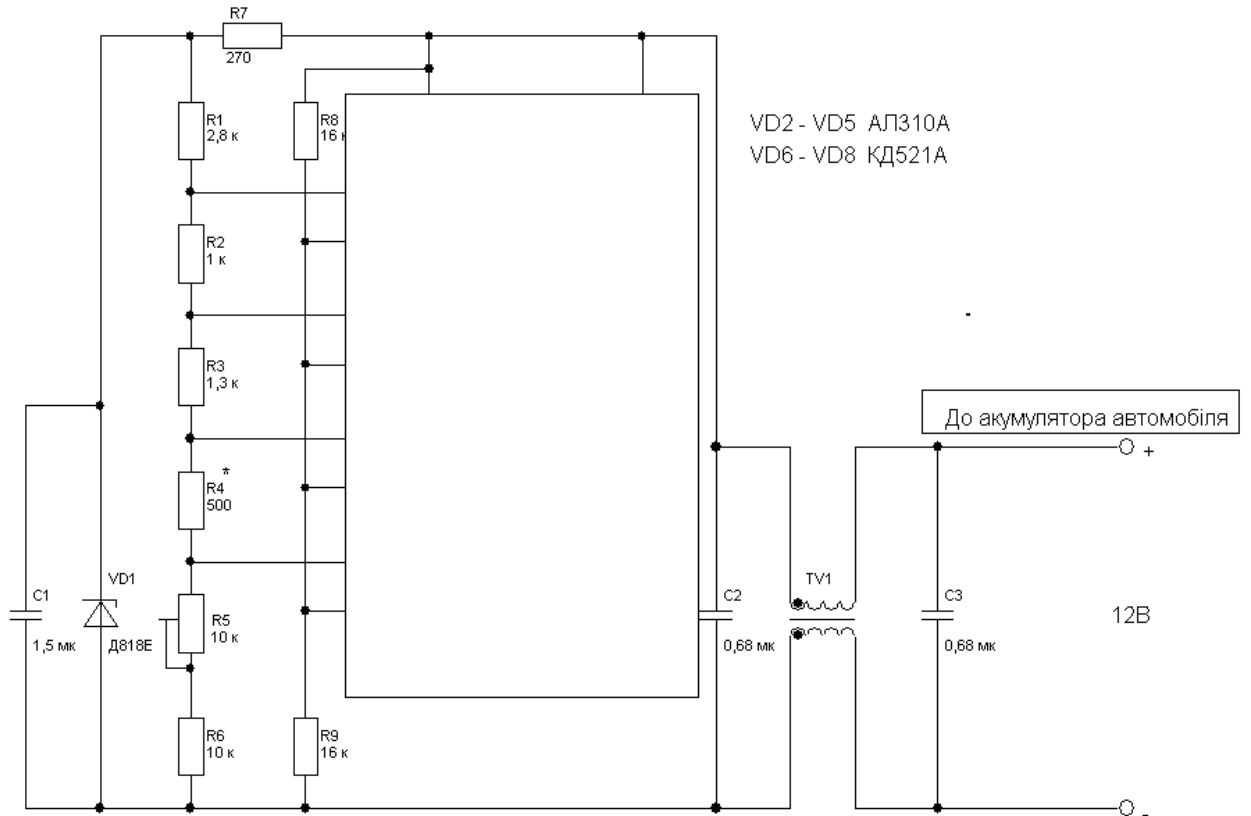


Рисунок 1.8 - Багаторівневий індикатор напруги мережі автономної системи живлення

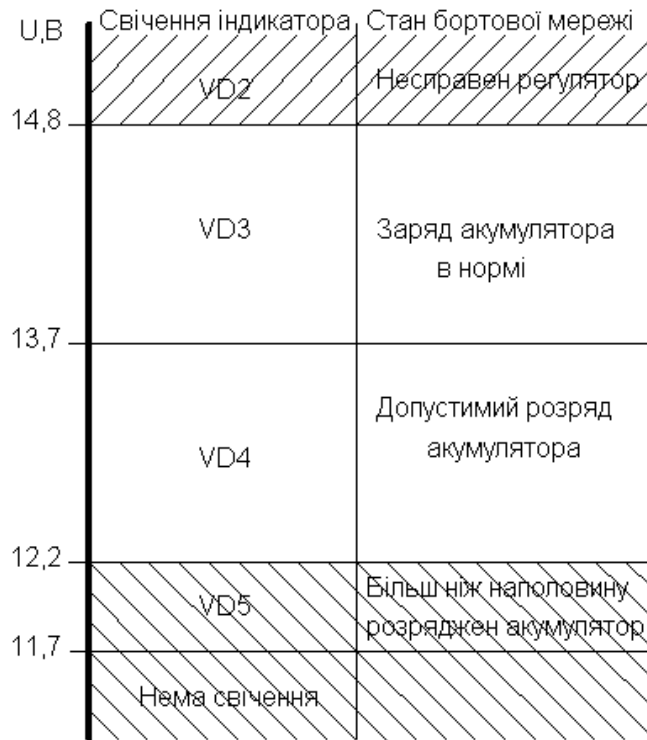


Рисунок 1.9 – Інтервали рівнів напруги

У індикаторі напруги на двох компараторах (рис. 1.10), як випромінювачі світла світлодіоди встановлюються трьох кольорів: жовтий - низька напруга, зелений - норма і червоний - підвищена напруга. Стабілітрон в схемі служить для створення опорної напруги [5].

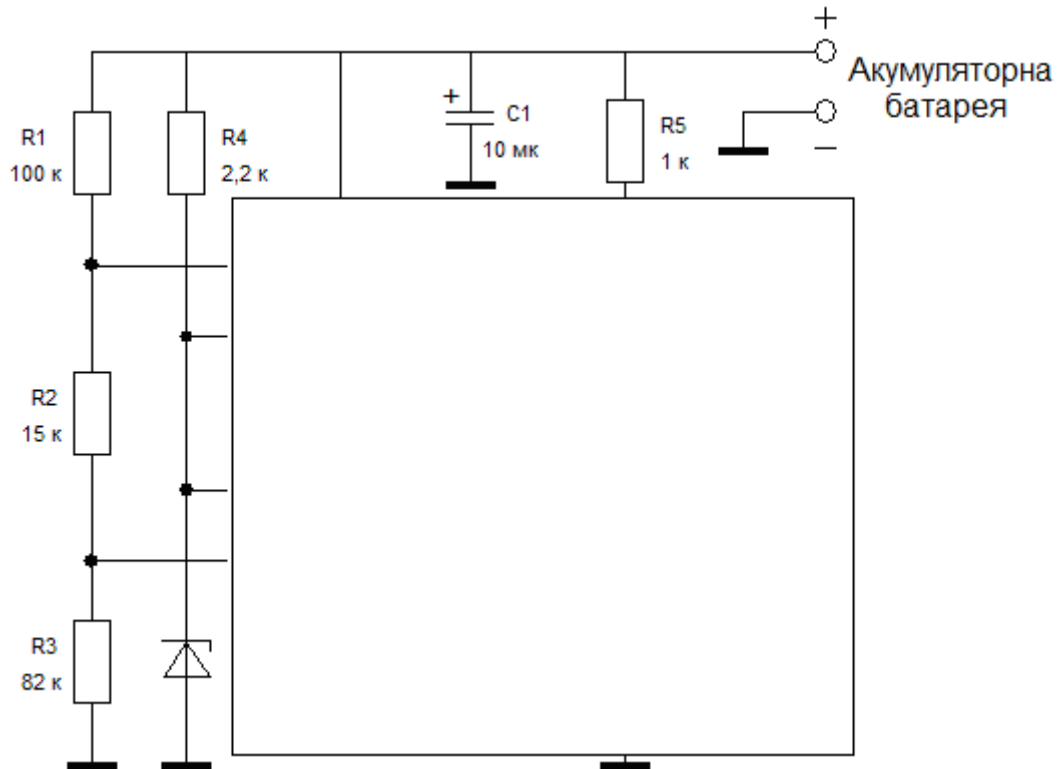


Рисунок 1.10 – Індикатор напруги на двох компараторах

Метою роботи являється розробка цифрового регулятора напруги для автономних систем живлення.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити наступні завдання:

- розробити схему цифрового регулятора напруги;
- провести аналіз функціонування розробленого пристрою на відповідність необхідним параметрам;
- провести конструктивний аналіз компоновки автономної системи живлення

2 Розробка цифрового регулятора напруги автономної системи живлення

Останнім часом виконання генераторних установок все рідше обходиться без застосування мікроконтролерів. Завдяки цьому добиваються мінімальних втрат у вузлах генераторної установки, а також стабілізації напруги генератора включаючи ряд таких факторів, як температура електроліту, де в акумуляторну батарею вмонтовується датчик температури, температура навколишнього середовища та стан електронних пристроїв споживачів.

Враховуючи вимоги до роботи електрообладнання, а також умови, в яких експлуатуються прилади, до регулятора ставляться наступні вимоги [3 - 4].

1. Регулятор напруги має підтримувати напругу мережі в заданих межах у всіх режимах роботи, при зміні частоти обертання ротора генератора, електричного навантаження.

2. Залежно від температури навколишнього середовища, регулятор напруги має регулювати струм зарядки акумуляторної батареї. Тобто при мінусових температурах повітря струм зарядки має бути більшим ніж при плюсовій температурі.

3. Виконувати додаткові функції – захищати елементи генераторної установки від аварійних режимів і перевантажень: автоматично вимикати живлення з обмотки збудження, відмикати електропостачання від мережі.

Таким чином, актуальною є задача формування моделі автономної генераторної установки з електронним регулятором напруги, яка дозволить провести аналіз значень напруги генератора і напруги в обмотці збудження і тим самим забезпечить потрібні показники надійності і довговічності електричних приладів.

Розробляємий регулятор напруги повинен містити більш високі якісні показники, чим існуючі, і повинен мати убудовані елементи «інтелекту». Він повинен відрізнитися від існуючих тим, що забезпечить підвищену стабіль-

ність вихідної напруги, зможе працювати при температурі до мінус 55°C. Але навіть у цифровому варіанті існує безліч способів побудови регулятора напруги, остаточний же вибір можна зробити тільки після експериментальної перевірки.

Для перетворення вихідної напруги генераторної установки в цифровий еквівалент потрібен аналого-цифровий перетворювач (АЦП). Вихідний код АЦП порівнюється із цифровим еквівалентом еталонної напруги за допомогою цифрового компаратора. У випадку якщо код на виході цифрового еталона більше, ніж на виході АЦП, вихідний сигнал компаратора через схему сполучення збільшить струм збудження генератора, а у випадку, якщо цифровий код АЦП більше цифрового коду еталона, зменшить струм збудження.

Для роботи АЦП, цифрового компаратора й цифрового еталона потрібна напруга живлення. Як джерело такої напруги найдоцільніше взяти акумулятор, але напруга акумулятора занадто велика (12В при звичайній напрузі живлення для мікросхем 5В) і нестабільна. Для усунення цих недоліків необхідно використовувати стабілізатор живлення.

Структурна схема розробляемого цифрового регулятора напруги наведена на рисунку 2.1.

У результаті проведених досліджень обрана елементна база цифрового регулятора, розроблена принципова схема, випробувана робота АЦП і цифрового компаратора в програмному застосуванні Electronics Workbench.

Уточнені варіанти побудови схем сполучення генераторних пристроїв систем для автономного електропостачання (генераторів, які працюють на дизельному паливі або бензині, сонячних батарей і колекторів, гідроелектросистем, перетворювачів повітряної енергії, акумуляторів великого об'єму і потужності).

Виготовлені рекомендації для випробування регулятора на реальних генераторах, для аналітичних досліджень забезпечення підвищеної стабільності вихідної напруги при температурі до мінус 55°C [3 - 4].

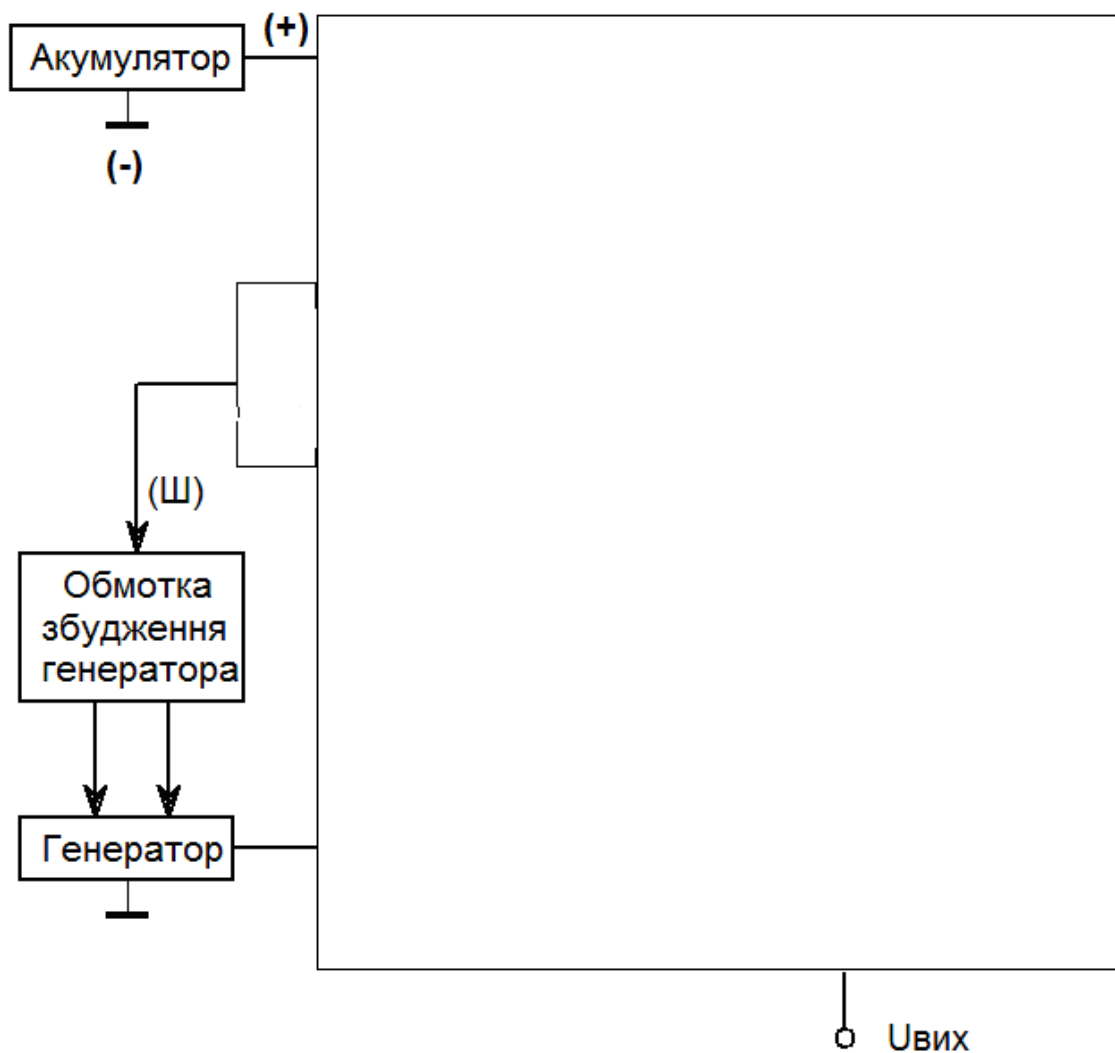


Рисунок 2.1 - Структурна схема цифрового регулятора напруги

2.1 Інтегральний стабілізатор живлення регулятора напруги

78xx – сімейство трьох вивідних лінійних інтегральних стабілізаторів позитивної напруги першого покоління. Базове сімейство 78xx включає мікросхеми на дев'ять фіксованих вихідних напруг від +5 В до +24 В, що позначаються чотиризначними кодами 7805, 7806, 7824 (третій і четвертий знаки – вихідна напруга) [5].

Усі ІС сімейства будуються за однією і тією ж схемою компенсаційного стабілізатора (рис. 2.2).

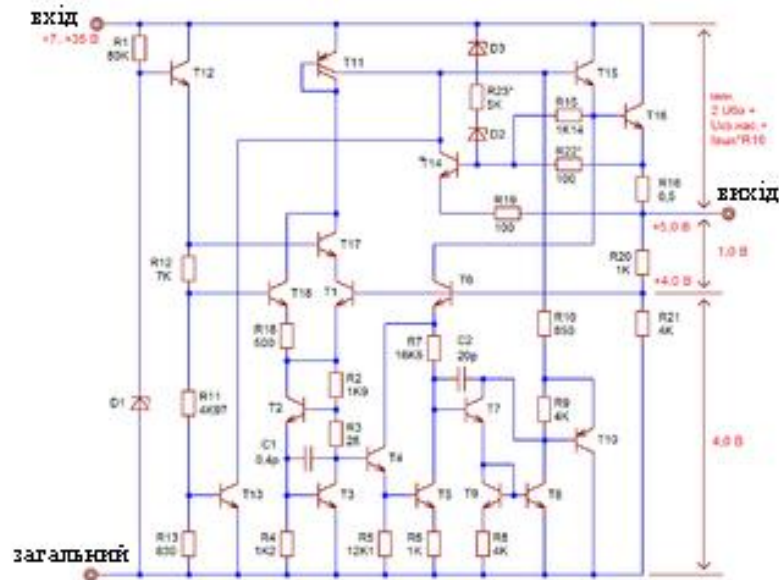


Рисунок 2.2 - Схема компенсаційного стабілізатора

Принципові схеми ІС на різну напругу розрізняються величиною верхнього резистора в ділянці вихідної напруги, принципові схеми ІС на різні вихідні струми – опором датчика вихідного струму (від 0,2 до 2 Ом). Величини інших опорів в ІС різних підродин різних виробників можуть неістотно розрізнятися. Графічне представлення принципів схем гранично спрощено. Один транзистор схеми може складатися з безлічі паралельно включених транзисторних структур, один резистор – з декількох послідовно включених резисторів і включених паралельно з ними технологічних стабілітронних перемичок. На схемах не вказується найважливіші параметри «аналогових» транзисторів – відносні площі їх емітерних переходів.

У стабілізаторі реалізована можливість управління змінною напругою (позитивна імпульсна напруга) в межах від 10Гц до 100кГц з малим коефіцієнтом шумів – 40 мкВ.

Стабілізатор має внутрішній обмежувач струму при короткому замиканні, а також захист при тепловому перевантаженні. Це дозволяє створити стабілізований блок живлення на напругу 5В для автомобільного цифрового регулятора напруги. Типова схема підключення відображена на рисунку 2.3.

C1 100н первинний фільтр - компенсує імпульсні скачки напруги від генератора.

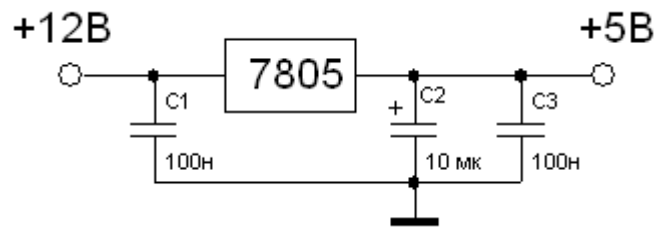


Рисунок 2.3 – Схема стабілізатора живлення регулятора напруги

2.2 Розрахунок дільника напруги

З типових регулювальних характеристик генераторної установки, що показують, як змінюється сила струму в обмотці збудження при незмінній напрузі і зміні частоти обертання або сили струму навантаження слідує, що нижня межа частоти перемикавання регулятора складає 25 – 30 Гц.

Найпростіший резистивний дільник напруги (рис. 2.4) являє собою два послідовно включених [резистора](#) R1 і R2, підключених до джерела напруги $U_{вх}$ [6]. Оскільки [резистори](#) з'єднані послідовно, то струм через них буде постійний. Падіння напруги на кожному [резисторі](#) буде пропорційно його опору (згідно закону Ома). Опір навантаження дільника напруги повинен бути багато більше власного опору дільника, щоб у розрахунках цим опором можна було б знехтувати.

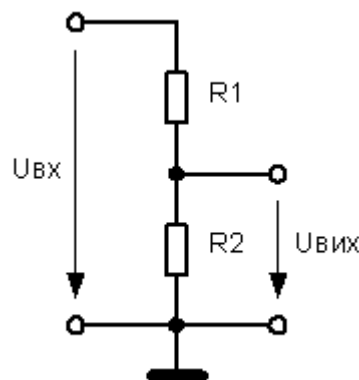


Рисунок 2.4 – Резистивний дільник напруги

$$U_{\text{вих}} = U_{\text{вх}} \cdot \frac{R2}{R1 + R2}$$

При розрахунку опорів необхідно визначити величину струму подільника, що працює при відключеному навантаженні. Цей струм повинен бути значно більше струму споживаного навантаженням (зазвичай беруть перевищення від 10 раз за величиною), але при цьому зазначений струм не повинен створювати зайве навантаження на джерело напруги U . Виходячи з величини струму, за законом Ома визначають значення сумарного опору $R = R1 + R2$. Залишається взяти конкретні значення опорів зі стандартного ряду, співвідношення величин яких близько необхідному відношенню напруг, а сума величин близька розрахункової. При розрахунку реального дільника необхідно враховувати температурний коефіцієнт опору, допуски на номінальні значення опорів, діапазон зміни вхідного напруги і можливі зміни властивостей навантаження дільника [7]. $R1 = 180 \text{ Ом}$, $R2 = 1 \text{ кОм}$.

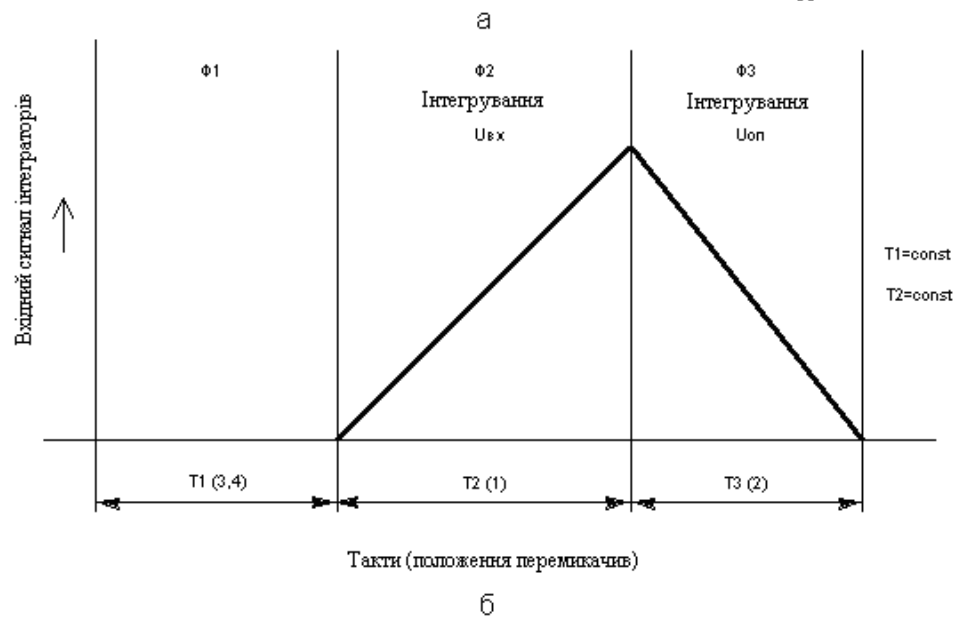
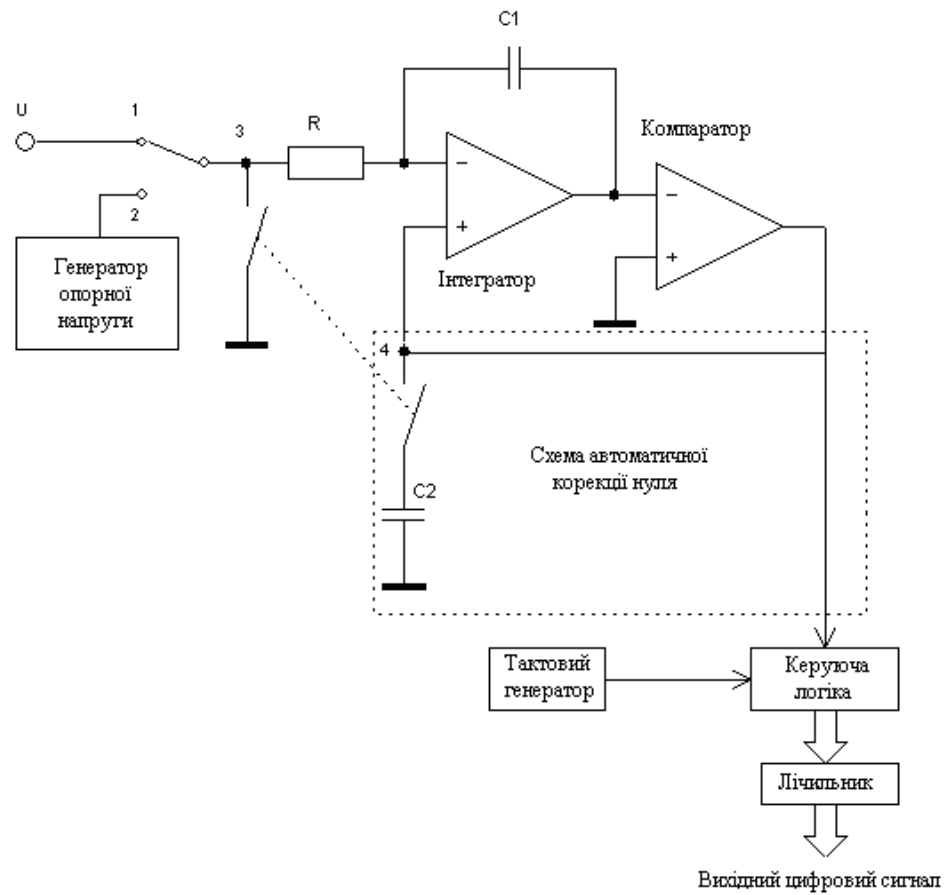
2.3 Аналогово-цифровий перетворювач

Вибравши як аналогово-цифрове перетворення метод з інтеграцією і варіант з двома нахилами інтеграції (з подвійною інтеграцією), отримуємо хорошу лінійність характеристики, малі шуми і низьку вартість (рис. 2.5).

Реальний вихідний сигнал може містити шумові високочастотні складові, тому перед схемою АЦП формується фільтр нижніх частот, що подавляє шуми [5].

АЦП паралельного типу здійснюють квантування сигналу одночасно за допомогою набору компараторів, включених паралельно джерелу вхідного сигналу [8]. На рисунку 2.6 показана реалізація паралельного методу АЦ-перетворення для 3-розрядного числа.

За допомогою трьох двійкових розрядів можна представити вісім різних чисел, включаючи нуль. Необхідно сім компараторів.



(а) - схема;

(б) - часова діаграма

Рисунок 2.4 - АЦП з подвійною інтеграцією

Сім відповідних еквідистантних опорних напруг утворюються за допомогою резистивного дільника.

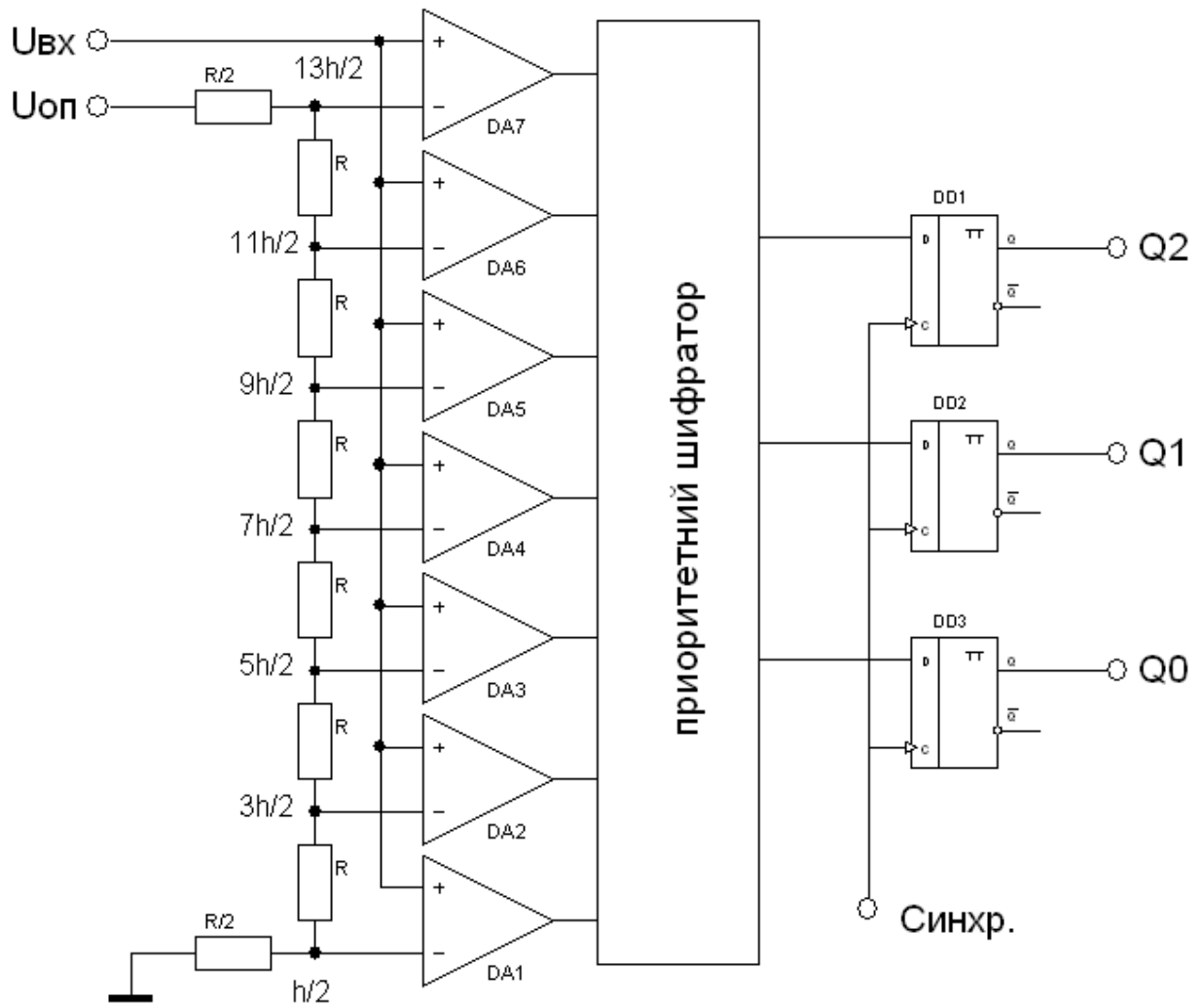


Рисунок 2.5 – АЦП паралельного типу

Якщо прикладена вхідна напруга не виходить за межі діапазону від $5/2h$ до $7/2h$, ($h = U_{оп}/7$ - квант вхідної напруги, який відповідає одиниці молодшого розряду АЦП) то компаратори з 1-го по 3-ій встановлюються в стан 1, а компаратори з 4-го по 7-ий - в стан 0. Перетворення цієї групи коду в трьохзначне двійкове число виконує логічний пристрій – пріоритетний шифратор, діаграма станів якого приведена в таблиці 2.1.

У шифраторі з пріоритетом (пріоритетному шифраторі) здійснюється перетворення максимального десяткового номера активного входу в двійковий еквівалент цього номера. У таких шифраторах код двійкового числа відповідає найвищому номеру входу, на який поданий активний сигнал. Тобто, на пріоритетний шифратор допускається подавати сигнали на декілька входів, а він формує на виході код числа, відповідного старшому входу.

Таблиця 2.1 – Діаграма станів пріоритетного шифратора

Вихідна напруга $U_{\text{вх}}/h$	Стан компараторів							Виходи		
	X1	X2	X3	X4	X5	X6	X7	A2	A1	A0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
2	0	1	0	0	0	0	0	0	1	0
3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Згідно таблиці функціонування пріоритетного шифратора для виходів A2, A1, A0:

$$A2 = (X7 + X6\overline{X7} + X5\overline{X6}\overline{X7} + X4);$$

$$A1 = (X7 + X6\overline{X7} + X3 + X2\overline{X3}\overline{X4}\overline{X5}\overline{X6}\overline{X7});$$

$$A0 = (\overline{X7} + \overline{X5}\overline{X6}\overline{X7} + \overline{X3}\overline{X4}\overline{X5}\overline{X6}\overline{X7} + \overline{X1}\overline{X2}\overline{X3}\overline{X4}\overline{X5}\overline{X6}\overline{X7});$$

Повторним застосуванням до кожної функції A_i ($i = 2, 1, 0$) співвідношення алгебри логіки:

$$A + F\overline{A} = (A + F)(A + \overline{A}) = (A + F) \cdot 1 = A + F,$$

можна спростити їх і отримати вирази, які визначають внутрішню структуру пріоритетного шифратора в його основній частині:

$$A2 = (X7 + X6 + X5 + X4);$$

$$A1 = X7 + X6 + X3\overline{X4}\overline{X5};$$

.

Схема пріоритетного шифратора згідно рівнянням функціонування представлена на рисунку 2.6. Для такого шифратора вхідні сигнали, які зна-

ходяться знизу від одиничної діагоналі, за визначенням, не відомі ("×" може бути 0 або 1). Комбінація – усі нулі на входах не визначена.

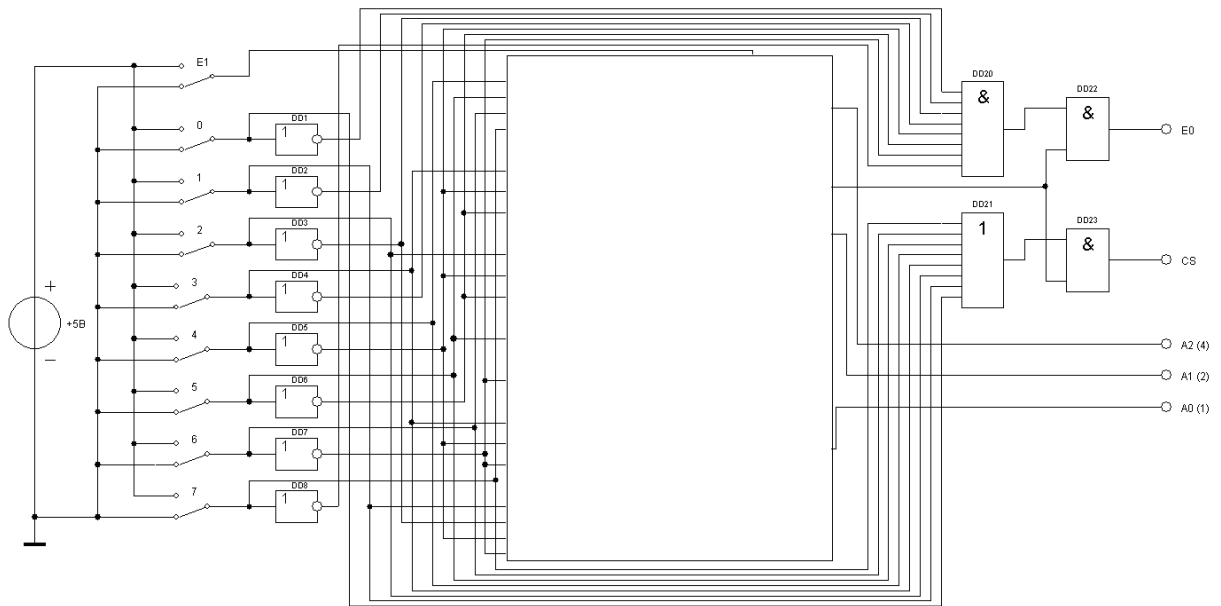


Рисунок 2.6 - Схема пріоритетного шифратора 8×3

Підключення пріоритетного шифратора безпосередньо до виходу АЦП може привести до помилкового результату при прочитуванні вихідного коду [8 - 10]. Розглянемо, наприклад перехід від трьох до чотирьох, або в двійковому коді від 011 до 100. Якщо старший розряд унаслідок меншого часу затримки змінить свій стан раніше інших розрядів, то тимчасово на виході виникне число 111, тобто сім. Величина помилки у цьому випадку складе половину вимірюваного діапазону.

Оскільки результати АЦ-перетворення записуються, як правило, в пристрій, який запам'ятовує, існує вірогідність отримати повністю невірну величину. Вирішити цю проблему можна, наприклад, за допомогою пристрою вибірки-зберігання (ПВЗ). Деякі інтегральні мікросхеми (ІМС) паралельних АЦП, наприклад МАХ100, забезпечуються надшвидкісними ПВЗ, які мають час вибірки порядку 0,1 нс. Інший шлях полягає у використанні коду Грея, характерною особливістю якого є зміна лише однієї кодової позиції при переході від одного кодового значення до іншого. Нарешті, в деяких АЦП (наприклад, МАХ1151) для зниження вірогідності збоїв при паралельному АЦ-

перетворюванні використовується двотактний цикл, коли спочатку стани виходів компараторів фіксуються, а потім, після встановлення стану пріоритетного шифратора, подачею активного фронту на синхровхід вихідного регістра в нього записують вихідне слово АЦП.

Як видно з таблиці 2.1, при збільшенні вхідного сигналу компаратори встановлюються в стан 1 по черзі - від низу до верху. Така черговість не гарантується при швидкому наростанні вхідного сигналу, оскільки із-за відмінності в часах затримки, компаратори можуть перемикатися в іншому порядку. Пріоритетне кодування дозволяє уникнути помилки, можливої у цьому випадку завдяки тому, що одиниці в молодших розрядах не беруться до уваги пріоритетним шифратором.

Завдяки одночасній роботі компараторів паралельний АЦП є найшвидшим. Наприклад, восьмирозрядний перетворювач типа MAX104 дозволяє отримати 10^9 відліків в секунду при часі затримки проходження сигналу не більше 1,2 нс. Недоліком цієї схеми є висока складність. Дійсно, N-розрядний паралельний АЦП має $2N-1$ компараторів і $2N$ погоджених резисторів. Наслідком цього є висока вартість (сотні доларів США) і значна споживана потужність. MAX104 споживає близько 4 Вт.

Застосуємо в схемі регулятора напруги чотирьох розрядний аналогово-цифровий перетворювач SAA7166, з паралельним перетворенням аналогового сигналу, схема підключення якого представлена на рисунку 2.7.

2.4 Розрахунок цифрового компаратора

Відповідно до завдання цифровим компаратором є схема порівняння багаторозрядних чисел. У даному випадку порівнюється цифровий код на виході АЦП (A3A2A1A0) з кодом заданим цифровим еталоном (B3B2B1B0) [11].

Порівняння виробляється із старших розрядів. Якщо вони різні, то ці розряди і визначають результат порівняння, якщо вони рівні – виробляється порівняння подальших молодших розрядів [12].

Розглянемо випадок порівняння одного і-розряду (табл. 2.3).

Таблиця 2.3 – Порівняння і-розряду

0	0	0	0
0	0	0	0
0	0	0	0
0	0	0	0
0	0	0	0

Згідно з таблицею 2.3 рівняння функціонування схеми порівняння і-розряду:

$$F_{A>B} = \overline{A}B;$$

$$F_{A<B} = A\overline{B};$$

$$F_{A=B} = AB + \overline{A}\overline{B} = A \oplus B.$$

Згідно з рівняннями і таблицею 2.2 складемо рівняння функціонування чотирьох розрядного цифрового компаратора [12].

$$F_{A=B} = \overline{(A3 \oplus B3)} \overline{(A2 \oplus B2)} \overline{(A1 \oplus B1)} \overline{(A0 \oplus B0)};$$

$$\begin{aligned} F_{A<B} &= \overline{A3}B3 + \overline{(A3 \oplus B3)}A2\overline{B2} + \overline{(A3 \oplus B3)}\overline{(A2 \oplus B2)}A1\overline{B1} + \overline{(A3 \oplus B3)}\overline{(A2 \oplus B2)}\overline{(A1 \oplus B1)}A0\overline{B0} = \\ &= \overline{A3}B3 + (\overline{A3}B3 + A3\overline{B3}) \left[\overline{A2}B2 + \overline{(A2 \oplus B2)}A1\overline{B1} + \overline{(A2 \oplus B2)}\overline{(A1 \oplus B1)}A0\overline{B0} \right] = \\ &= \left[\overline{A3}B3 + (\overline{A3}B3 + A3\overline{B3}) \right] \cdot \left[\overline{A2}B2 + \overline{(A2 \oplus B2)}A1\overline{B1} + \overline{(A2 \oplus B2)}\overline{(A1 \oplus B1)}A0\overline{B0} \right] = \\ &= (A3 + \overline{B3}) \left[\overline{A3}B3 + \overline{(A2 + B2)}(A2\overline{B2} + A1\overline{B1} + (A1 + \overline{B1})A0\overline{B0}) \right]; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} F_{A>B} &= A3\overline{B3} + \overline{(A3 \oplus B3)}A2\overline{B2} + \overline{(A3 \oplus B3)}\overline{(A2 \oplus B2)}A1\overline{B1} + \overline{(A3 \oplus B3)}\overline{(A2 \oplus B2)}\overline{(A1 \oplus B1)}A0\overline{B0} = \\ &= \overline{A3}B3 + (\overline{A3}B3 + A3\overline{B3}) \left[\overline{A2}B2 + \overline{(A2 \oplus B2)}A1\overline{B1} + \overline{(A2 \oplus B2)}\overline{(A1 \oplus B1)}A0\overline{B0} \right] = \\ &= \left[\overline{A3}B3 + (\overline{A3}B3 + A3\overline{B3}) \right] \cdot \left[\overline{A2}B2 + \overline{(A2 \oplus B2)}A1\overline{B1} + \overline{(A2 \oplus B2)}\overline{(A1 \oplus B1)}A0\overline{B0} \right] = \\ &= (A3 + \overline{B3}) \left[\overline{A3}B3 + \overline{(A2 + B2)}(A2\overline{B2} + A1\overline{B1} + (A1 + \overline{B1})A0\overline{B0}) \right]; \end{aligned}$$

Розрахована структурна схема цифрового компаратора представлена на рисунку 2.8. Їй повністю відповідає мікросхема К555СП1.

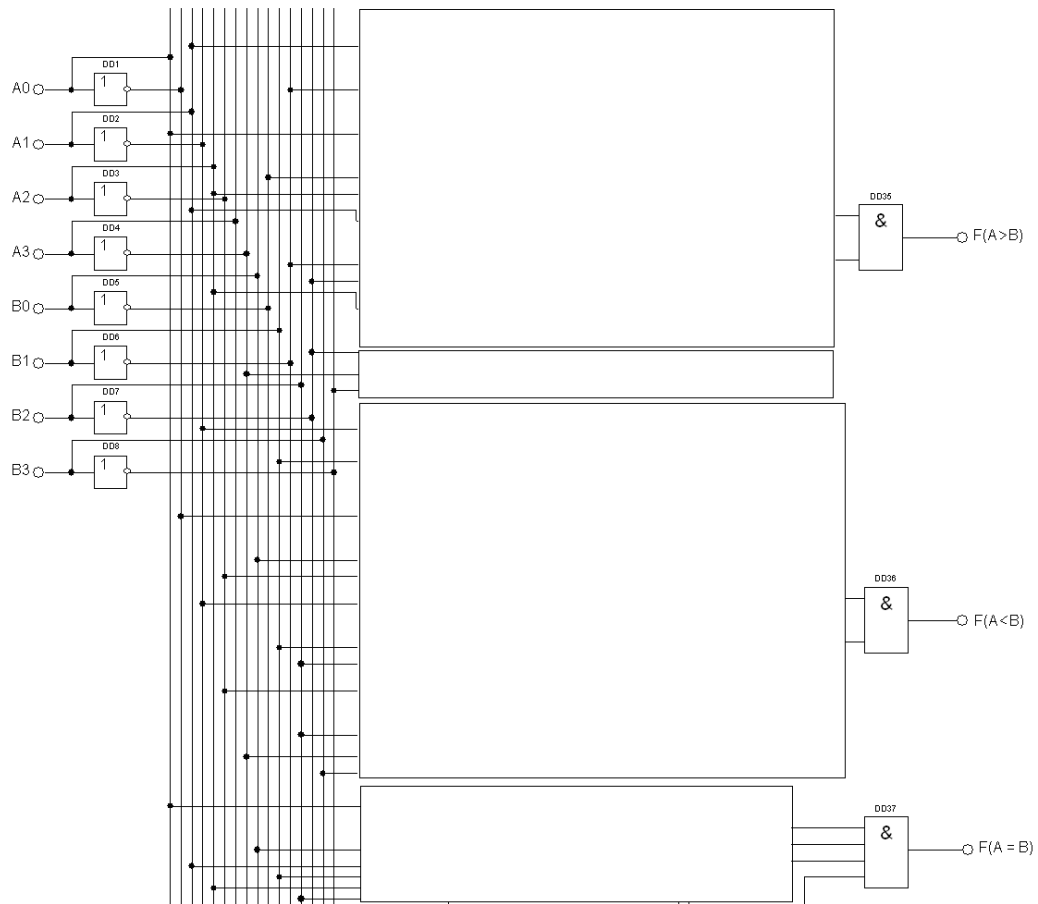


Рисунок 2.8 – Розрахована структурна схема цифрового компаратора

Мікросхема призначена для порівняння чотирьохрозрядних двійкових чисел, представлених в прямому коді. Мікросхема має засоби для нарощування розрядності порівнюваних чисел. На вхід $Y=X$ при порівнянні самих молодших розрядів має бути поданий високий рівень напруги.

У якості цифрового еталону використовуємо цифрову схему на логічних елементах яка постійно видає код 1010, який в десятинному еквіваленті відповідає цифрі 12. Використання логічних елементів згладжує кидки напруги при різних обертах вала генератора і таким чином імітація коду який відповідає нарузі 12В являється еталонною [12].

Схема включення цифрового комутатора для порівняння цифрового коду аналогово-цифрового перетворювача з кодом цифрового еталону представлена на рисунку 2.9.

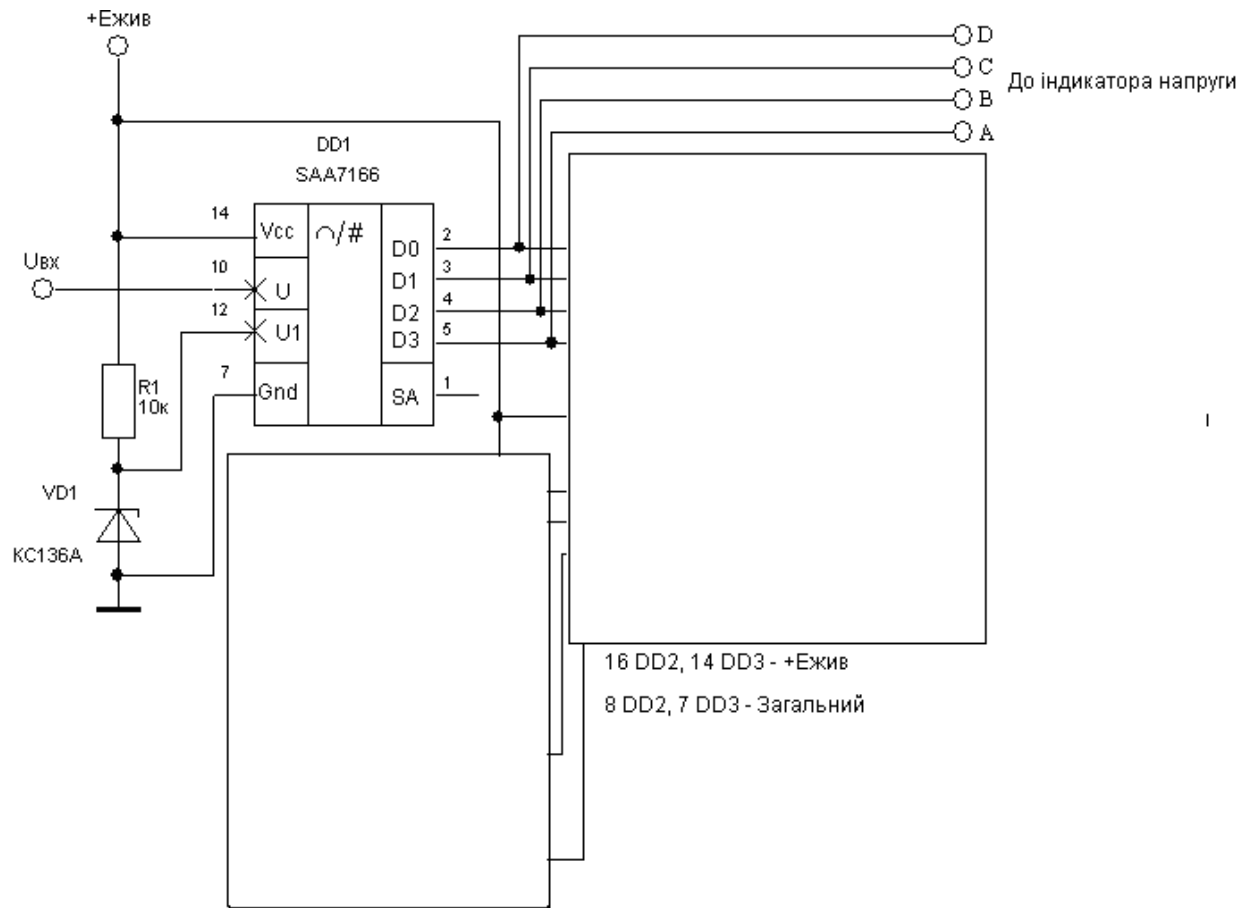


Рисунок 2.9 - Схема включення цифрового компаратора

2.5 Індикатор напруги регулятора

Результати обчислень необхідно представити на двох семисегментних світлодіодних індикаторах (рис. 2.10).

Проведемо аналітичне моделювання пристрою перетворення двійкового коду чисел в код семисегментних індикаторів [12]. Алгоритм функціонування такого пристрою представлена в таблиці. 2.4

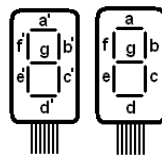


Рисунок 2.10 – Семисегментні світлодіодні індикатори

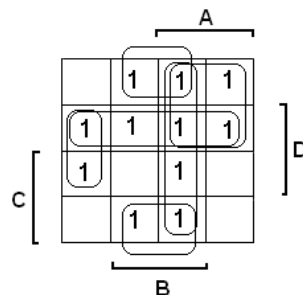
Таблиця 2.4 - Таблиця функціонування перетворювача двійкового коду чисел в код семисегментних індикаторів

№	A	B	C	D	a'	b'	c'	d'	e'	f'	g'	a	b	c	d	e	f	g
0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	0
1	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	0	0	1	1	0	0	0	0
2	0	0	1	0	1	1	1	1	1	1	0	1	1	0	1	1	0	1
3	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	0	0	1
4	0	1	0	0	1	1	1	1	1	1	0	0	1	1	0	0	1	1
5	0	1	0	1	1	1	1	1	1	1	0	1	0	1	1	0	1	1
6	0	1	1	0	1	1	1	1	1	1	0	1	0	1	1	1	1	1
7	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1	0	0	0	0
8	1	0	0	0	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1
9	1	0	0	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	0	1	1
10	1	0	1	0	0	1	1	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	0
11	1	0	1	1	0	1	1	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0
12	1	1	0	0	0	1	1	0	0	0	0	1	1	0	1	1	0	1
13	1	1	0	1	0	1	1	0	0	0	0	1	1	1	1	0	0	1
14	1	1	1	0	0	1	1	0	0	0	0	0	1	1	0	0	1	1
15	1	1	1	1	0	1	1	0	0	0	0	1	0	1	1	0	1	1

З таблиці виводимо рівняння функціонування пристрою перетворення двійкового коду чисел в код семисегментних індикаторів.

$$g = \overline{A}\overline{B}\overline{C}\overline{D} + \overline{A}\overline{B}C\overline{D} + \overline{A}B\overline{C}\overline{D} + \overline{A}B\overline{C}D + \overline{A}BC\overline{D} + \overline{A}BCD + A\overline{B}\overline{C}\overline{D} + A\overline{B}C\overline{D} + AB\overline{C}\overline{D} + AB\overline{C}D + ABC\overline{D} + ABCD$$

Карта Карно:

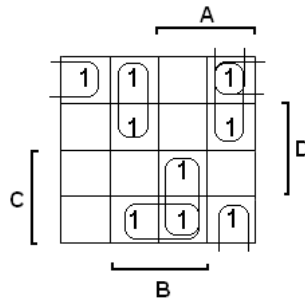


Спрощене рівняння:

$$g = \overline{C}\overline{D} + A\overline{C} + AB + B\overline{D} + \overline{A}B\overline{D}$$

$$f = \overline{A}\overline{B}\overline{C}\overline{D} + \overline{A}\overline{B}C\overline{D} + \overline{A}B\overline{C}\overline{D} + \overline{A}B\overline{C}D + \overline{A}BC\overline{D} + \overline{A}BCD + A\overline{B}\overline{C}\overline{D} + A\overline{B}C\overline{D} + AB\overline{C}\overline{D} + ABCD$$

Карта Карно:

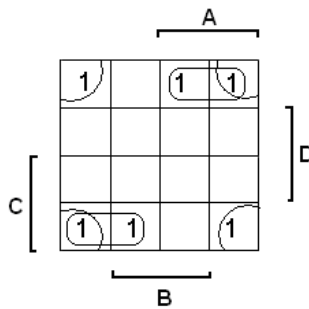


Спрощене рівняння:

$$f = \overline{B}\overline{C}\overline{D} + \overline{A}\overline{B}\overline{C} + \overline{A}\overline{B}\overline{C} + \overline{A}B\overline{C} + B\overline{C}\overline{D} + A\overline{B}\overline{D}$$

$$e = \overline{A}\overline{B}\overline{C}\overline{D} + \overline{A}\overline{B}C\overline{D} + \overline{A}B\overline{C}\overline{D} + \overline{A}B\overline{C}D + \overline{A}B\overline{C}D + \overline{A}B\overline{C}D$$

Карта Карно:

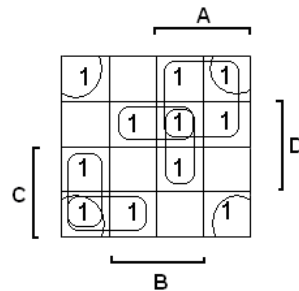


Спрощене рівняння:

$$e = \overline{B}\overline{D} + A\overline{C}\overline{D} + \overline{A}C\overline{D}$$

$$d = \overline{A}\overline{B}\overline{C}\overline{D} + \overline{A}\overline{B}C\overline{D} + \overline{A}B\overline{C}\overline{D} + \overline{A}B\overline{C}D + \overline{A}B\overline{C}D + \\ + \overline{A}B\overline{C}\overline{D} + \overline{A}B\overline{C}D + \overline{A}B\overline{C}\overline{D} + \overline{A}B\overline{C}D + \overline{A}B\overline{C}D + \\ + \overline{A}B\overline{C}D$$

Карта Карно:

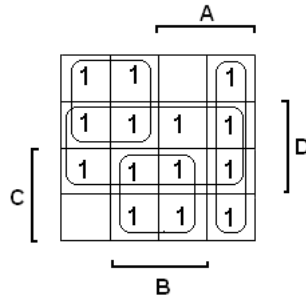


Спрощене рівняння:

$$d = A\overline{C} + \overline{B}\overline{D} + \overline{B}\overline{C}\overline{D} + \overline{A}B\overline{D} + \overline{A}\overline{B}\overline{C} + \overline{A}\overline{C}\overline{D}$$

$$c = \overline{A}\overline{B}\overline{C}\overline{D} + \overline{A}\overline{B}C\overline{D} + \overline{A}B\overline{C}\overline{D} + \overline{A}B\overline{C}D + \overline{A}B\overline{C}D + \\ + \overline{A}B\overline{C}\overline{D} + \overline{A}B\overline{C}D + \overline{A}B\overline{C}\overline{D} + \overline{A}B\overline{C}D + \\ + \overline{A}B\overline{C}\overline{D} + \overline{A}B\overline{C}D + \overline{A}B\overline{C}\overline{D} + \overline{A}B\overline{C}D + \overline{A}B\overline{C}D$$

Карта Карно:

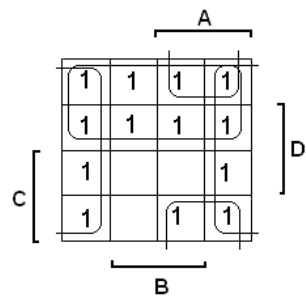


Спрощене рівняння:

$$c = D + \overline{A}\overline{C} + BC + A\overline{B}$$

$$b = \overline{A}\overline{B}\overline{C}\overline{D} + \overline{A}\overline{B}\overline{C}D + \overline{A}\overline{B}C\overline{D} + \overline{A}\overline{B}CD + \overline{A}B\overline{C}\overline{D} + \overline{A}B\overline{C}D + \overline{A}BC\overline{D} + \overline{A}BCD + A\overline{B}\overline{C}\overline{D} + A\overline{B}\overline{C}D + A\overline{B}C\overline{D} + A\overline{B}CD + AB\overline{C}\overline{D} + AB\overline{C}D + ABC\overline{D} + ABCD$$

Карта Карно



Спрощене рівняння:

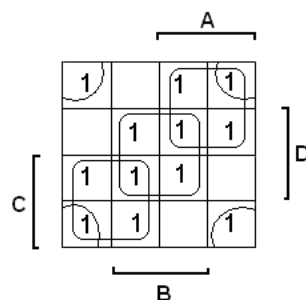
$$b = \overline{C} + \overline{B} + A\overline{D}$$

$$a = \overline{A}\overline{B}\overline{C}\overline{D} + \overline{A}\overline{B}\overline{C}D + \overline{A}\overline{B}C\overline{D} + \overline{A}\overline{B}CD + \overline{A}B\overline{C}\overline{D} + \overline{A}B\overline{C}D + \overline{A}BC\overline{D} + \overline{A}BCD + A\overline{B}\overline{C}\overline{D} + A\overline{B}\overline{C}D + A\overline{B}C\overline{D} + A\overline{B}CD + AB\overline{C}\overline{D} + AB\overline{C}D + ABC\overline{D} + ABCD$$

Спрощене рівняння:

$$a = A\overline{C} + BD + \overline{A}\overline{C} + \overline{B}\overline{D}$$

Карта Карно:



$$g' = 0$$

$$f' = \overline{A}\overline{B}\overline{C}\overline{D} + \overline{A}\overline{B}C\overline{D} + \overline{A}B\overline{C}\overline{D} + \overline{A}BC\overline{D} + \overline{A}\overline{B}\overline{C}D + \\ + \overline{A}\overline{B}CD + \overline{A}B\overline{C}D + \overline{A}BCD + A\overline{B}\overline{C}\overline{D} + A\overline{B}\overline{C}D + A\overline{B}C\overline{D} + A\overline{B}CD + AB\overline{C}\overline{D} + AB\overline{C}D + ABC\overline{D} + ABCD$$

Карта Карно:

		A		
	1	1		1
	1	1		1
c	1	1		
1	1			
		B		
				D

Спрощені рівняння:

$$f' = \overline{A} + \overline{B}\overline{C}$$

$$e' = \overline{A} + \overline{B}\overline{C}$$

$$d' = \overline{A} + \overline{B}\overline{C}$$

$$c' = 1$$

$$b' = 1$$

$$a' = \overline{A} + \overline{B}\overline{C}$$

Функціональна схема перетворювача двійкового коду чисел в код семи сегментних індикаторів представлена на рисунку 2.11.

Мікросхема перетворювача двійкового коду чисел в код семисегментного індикатора представлена на рисунку 2.12. Проведемо моделювання дешифратора 8-4-2-1 в код семисегментного індикатора в програмному забезпеченні Electronics Workbench.

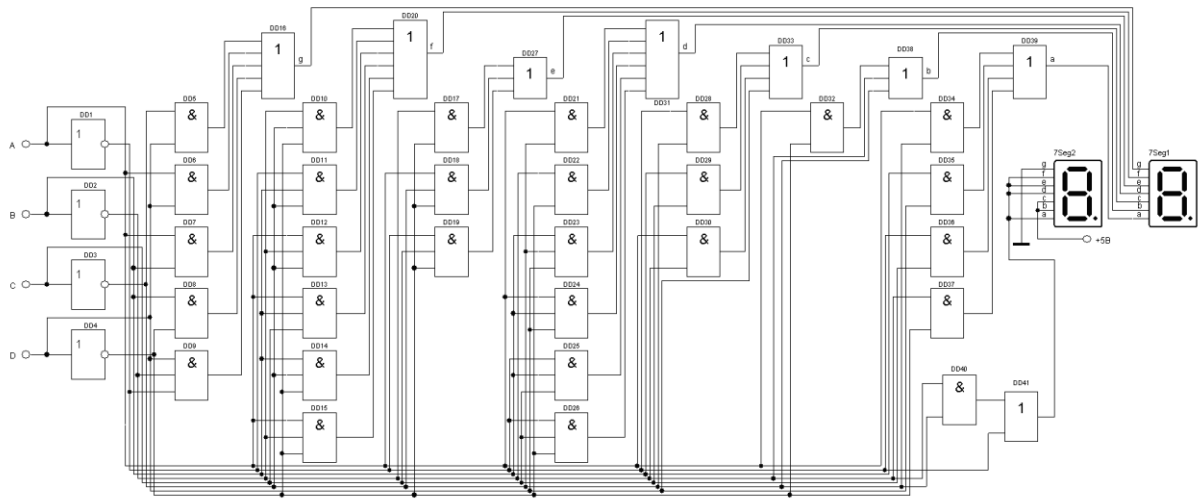


Рисунок 2.11 - Функціональна схема перетворювача двійкового коду чисел в код семи сегментних індикаторів

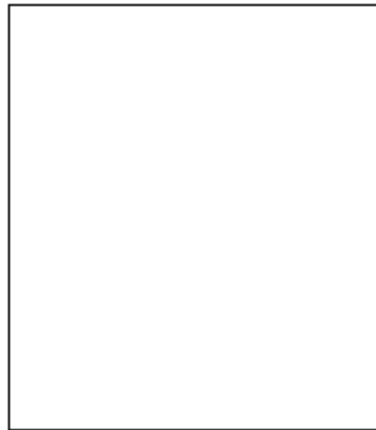


Рисунок 2.12 – Мікросхема перетворювача двійкового коду чисел в код семи сегментного індикатора

Мікросхема має виходи з відкритим колектором і підвищеною навантаженою здатністю. Призначення виводів представлено в таблиці 2.5. Схема знаходиться в працездатному стані, коли на виводі управління присутній високий рівень. Для перевірки робоздатності мікросхеми на вивід LT подається низький рівень сигналу. При цьому на усіх вихідах з'являється логічний 0. Складемо таблицю функціонування перетворювача двійкового коду 8-4-2-1 в код семисегментного індикатора на мікросхемі 7 (табл. 2.6). Активний рівень сигналу на виходах мікросхеми логічний 0, так як схема з відкритим колектором. В програмному забезпеченні Electronics Workbench використо-

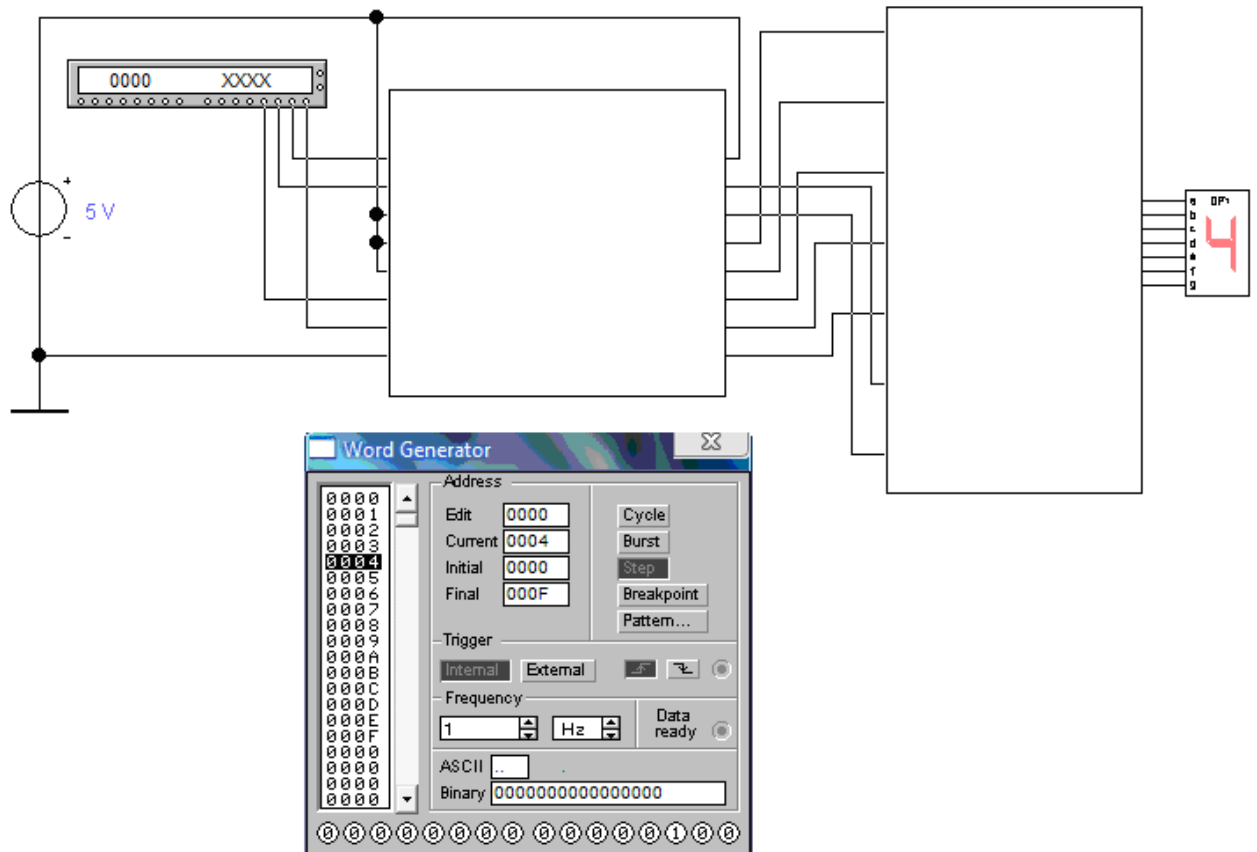


Рисунок 2.13 - Аналіз функціонування перетворювача двійкового коду 8-4-2-1 в код семисегментного індикатора

2.6 Аналіз функціонування розробленого цифрового регулятора напруги автономної системи живлення

Для моделювання роботи регулятора напруги використано програмне застосування Electronics Workbench фірми Interactive Image Technologies. Програма призначена для моделювання аналогових і цифрових радіоелектронних пристроїв та засобів різного призначення. Під час моделювання, за вихідною напругою генератора слідкували за допомогою осцилографа, який є в наборі контрольно-вимірювальних приладів Electronics Workbench. Для моделювання генератора обрано модель генератора незалежного збудження, в якого обмотка збудження під'єднується до виводів регулятора напруги. На

валу генератора встановлюється тахометр, який контролює оберти генератора. Щоб відтворити реальний режим роботи генераторної установки, до її клемми “+” під’єднано опір. Цей опір імітує споживачів в бортовій мережі. Оскільки в контрольно-вимірювальних приладах пакету Electronics Workbench такого приладу як тахометр немає, то в його якості використано вольтметр, плюсовий вихід якого під’єднується до вала двигуна. В такому випадку вольтметр працює як тахометр. При моделюванні регуляторів напруги, генератор оберталося з швидкістю від 0 до 5000 об/хв.

На рисунку 2.14 показана модель регулятора для дослідження в програмі Electronics Workbench. Вона складається з моделі регулятора напруги – 1. В схемі модель генератора реалізована машиною постійного струму – 2, де “плюсовий” вивід обмотки збудження приєднується до виводу регулятора напруги. Акумуляторну батарею в схемі реалізовано джерелом постійної напруги – 3. Щоб відтворити реальну модель акумуляторної батареї, послідовно з батареєю поставлено опір, тобто це буде внутрішній опір акумуляторної батареї. Паралельно до генератора приєднано опір – 4. Даний опір імітує споживачів електроенергії бортової мережі. Існує методика розрахунку струмового навантаження генератора [8]. За даними розрахунку вибирається опір, який приблизно рівний внутрішнім опорам споживачів. Спостерігали за напругою генератора і напругою в обмотці збудження за допомогою осцилографа – 5. До двигуна під’єднаний вольтметр, який виконує функції тахометра, де 1В напруги відповідає 1 об/хв. Схема сполучення реалізована на транзисторі 2N2222 [7].

На рисунках 2.15, 2.16 показано залежності вихідної напруги генератора та напруги обмотки збудження генератора від часу, з розробленим регулятором.

Загальна розрахована схема регулятора напруги представлена на рисунку 2.17.

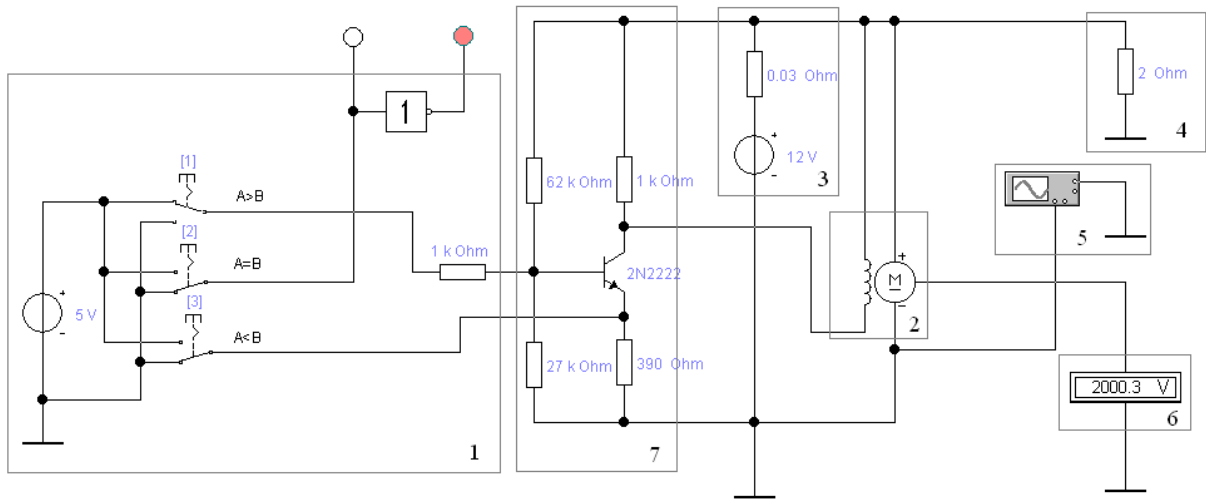


Рисунок 2.14 - Модель регулятора в програмному забезпеченні Electronics Workbench

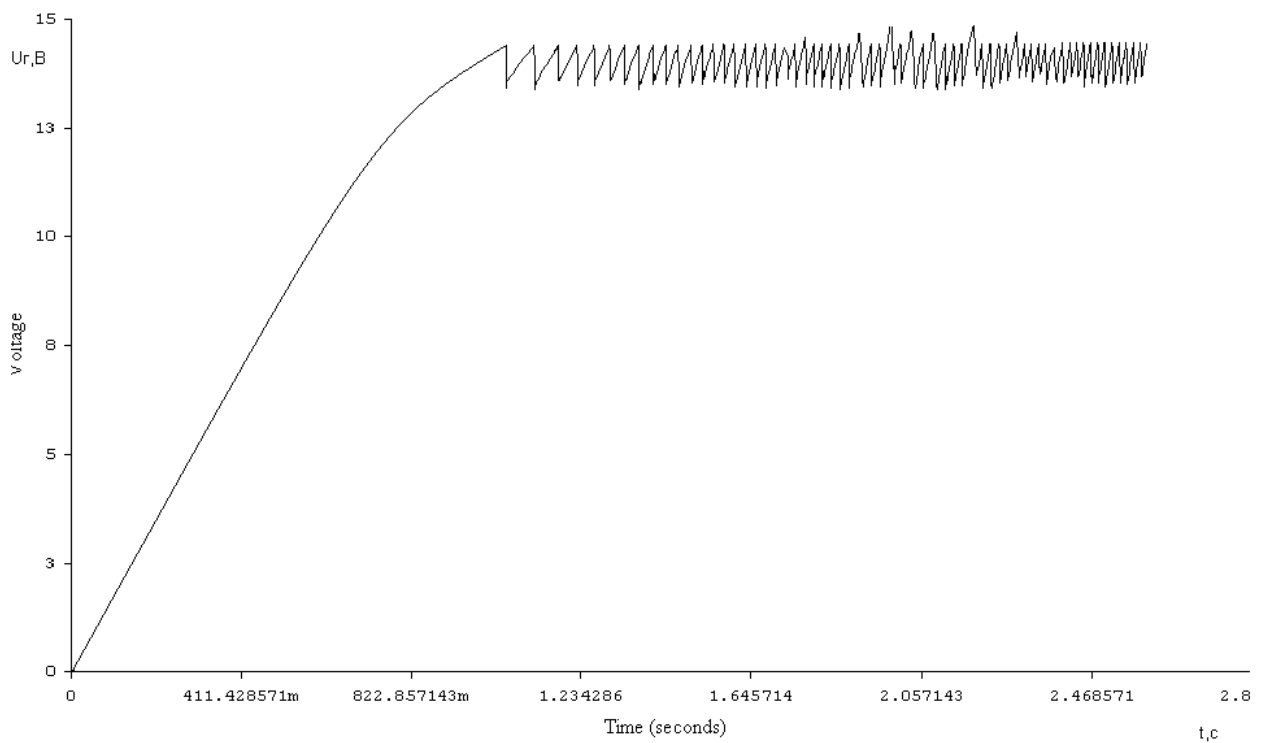


Рисунок 2.15 - Залежність вихідної напруги генератора з розробленим регулятором від часу

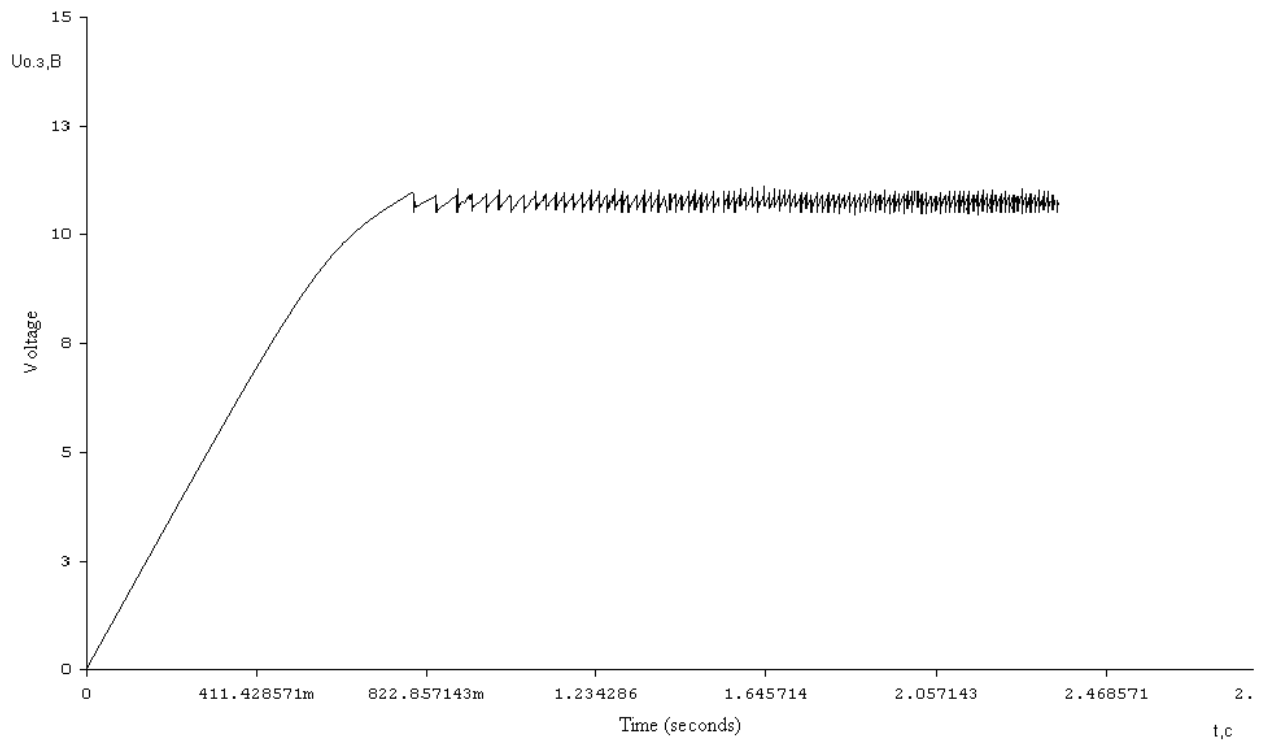


Рисунок 2.16 - Залежність напруги обмотки збудження генератора з зробленим регулятором від часу

Як видно з графіків, амплітуда напруги практично не змінюється на всьому діапазоні зміни швидкості генератора. Це позитивно позначиться на надійності і довговічності електричних приладів.

Перевищення напруги за допустимі межі є причиною перезаряду акумуляторної батареї, що супроводжується виходом з ладу батареї. Збільшення напруги на 10% від номінальної понижує термін служби ламп приблизно на 50%.

При розробці регулятора напруги необхідно врахувати частотні властивості елементної бази та температурні характеристики.

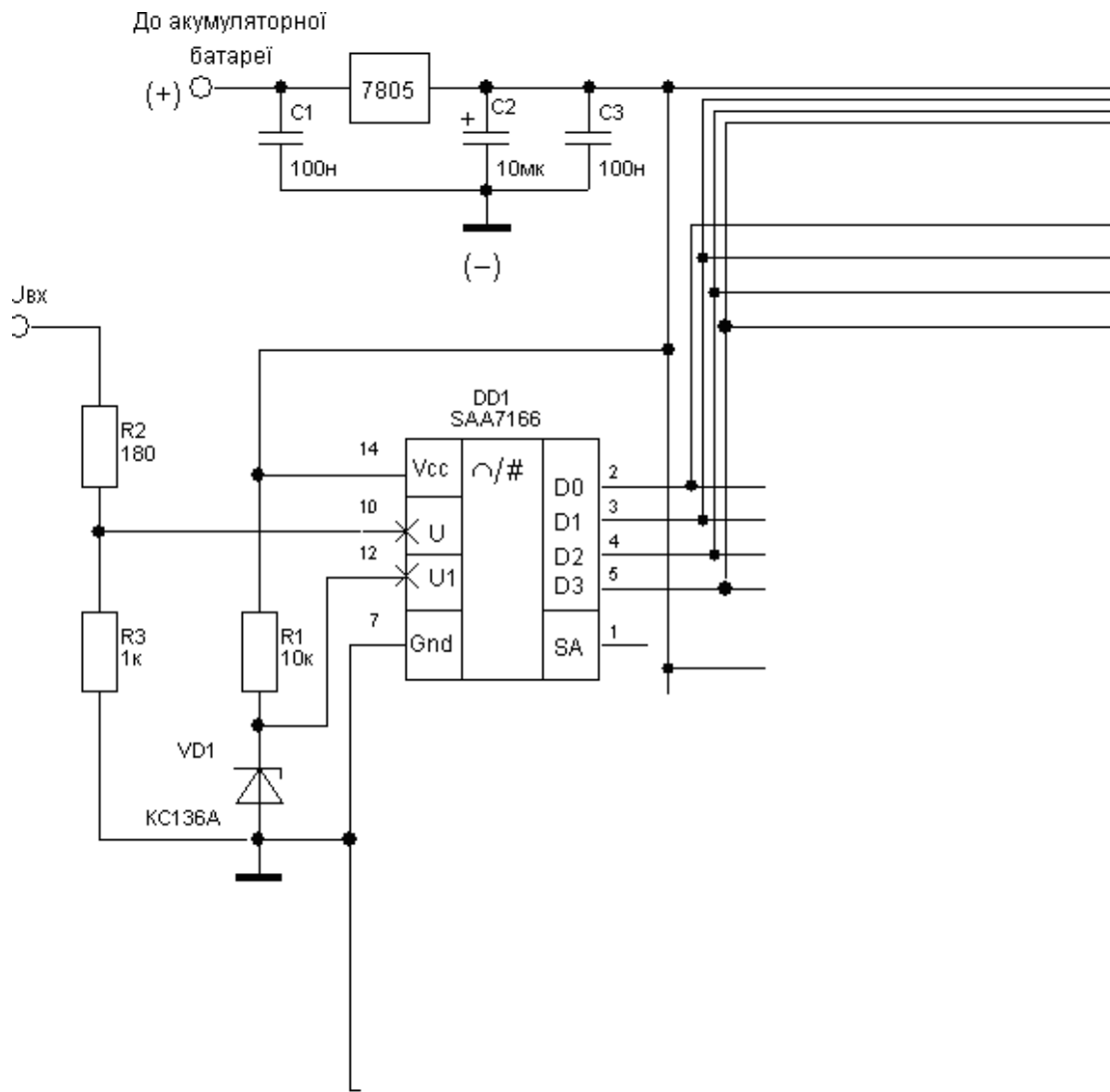


Рисунок 2.17 – Схема електрична принципова цифрового регулятора напруги