

Міністерство освіти і науки України

ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ АВТОМОБІЛЬНО-ДОРОЖНІЙ  
УНІВЕРСИТЕТ

Ю.М. Бороденко

## **МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ**

до курсового проекту  
«Розрахунок електронного регулятора напруги»  
з дисципліни  
«Проектування електрообладнання АТЗ»  
для студентів всіх форм навчання за спеціальністю 141

Харків  
ХНАДУ  
2018

Методичні вказівки складені для студентів спеціалізації «Електричні системи та комплекси транспортних засобів» галузі знань «Електрична інженерія» денної та заочної форм навчання. Виконанням курсового проекту завершується вивчення дисципліни «Проектування електрообладнання АТЗ». Розробка регулятора напруги системи електропостачання пов'язана з теоретичним обґрунтуванням, вибором та використанням методів розрахунку електричних кіл, підбором елементної бази, а також вимагає відомостей з науково-технічної літератури.

Мета виконання проекту – придбання студентами практичних навиків, щодо проектування та розрахунку електронних блоків, які використовуються на автомобілі.

Курсовий проект охоплює питання основних тем теоретичного курсу: теоретичні основи розрахунку електричних пристроїв та систем; аналіз технічних рішень бортових систем електропостачання; аналіз режимів системи електропостачання та оптимізація параметрів її елементів; методи регулювання напруги бортової мережі; загальні принципи розробки електронних пристроїв; розрахунок транзисторного регулятора напруги.

Зміст курсового проекту визначається його завданням. Об'єм пояснювальної записки складає 30...45 листів. Її обов'язкові розділи: аналіз початкових даних та визначення параметрів генератора; синтез схеми електричної принципової; розрахунок елементів схеми та вибір елементної бази; оптимізація параметрів елементів схеми за допомогою машинного моделювання; розрахунок робочих характеристик генераторної установки; енергетичний розрахунок.

Проект виконується з застосуванням програмних засобів, або без використання персонального комп'ютера. Обидва варіанти виконання прокоментовані в методичних вказівках. При оптимізації параметрів схеми використовуються пакети прикладних програм «Electronic Workbench», «Proteus», «Multisim» за вибором студента. Розрахунок та побудування робочих характеристик пропонується виконувати у програмі «MathCAD». Результати моделювання схеми та розрахунку характеристик додаються до пояснювальної записки.

Якщо проект виконується без застосування прикладних програм, графічний матеріал додається у вигляді креслень схеми електричної принципової, переліку елементів схеми та графіків робочих характеристик генераторної установки. Графічний матеріал оформлюється на

листах формату А4. Вимоги до оформлення пояснювальної записки та графічного матеріалу викладені в літературі [3].

Методичними вказівками передбачено 51 варіант завдань на проектування. Варіант до виконання визначається двома останніми цифрами шифру (номера залікової книжки студента). Якщо останні дві цифри більш за 50, то для визначення варіанта треба відняти 50 позицій.

## 1. АНАЛІЗ ВИХІДНИХ ДАНИХ І ВИЗНАЧЕННЯ ПАРАМЕТРІВ ГЕНЕРАТОРА

Генераторна установка складається з генератора і регулятора напруги та зазвичай являє собою конструктивно закінчений агрегат (регулятор монтується у корпусі генератора). Генераторна установка призначена для забезпечення напругою бортових споживачів електроенергії.

Регулятор напруги (РН) виконує широтно-імпульсне регулювання струму в обмотці збудження генератора з метою підтримання постійного рівня напруги бортової мережі при русі транспортного засобу з різною швидкістю та при коливаннях значень струму, що споживається системою електрообладнання. Регулятор напруги є частиною системи автоматичного регулювання напруги бортової мережі та виконує в ній функції від'ємного зворотного зв'язку.

Синтез генераторної установки починають з вибору типу генератора. Потужнісні параметри генератора повинні задовольняти вимогам, що ставляться з боку навантаження (бортових споживачів електроенергії) та узгоджуватися з швидкісними характеристиками ДВЗ. Необхідно також враховувати умови експлуатації АТЗ та додаткові вимоги, що ставляться до схеми регулятора напруги.

Вихідні дані для розрахунку генераторної установки:

- рівень напруги що регулюється  $U_{\text{РН}}$  ;
- номінальний струм навантаження генераторної установки  $I_{\text{н}}$  ;
- максимальне значення струму навантаження  $I_{\text{max}}$  ;
- мінімальна частота обертання двигуна  $n_{\text{min}}$
- максимальна частота обертання двигуна  $n_{\text{max}}$  ;

- допустимий рівень пульсації напруги  $\Delta U$  (%);
- категорія експлуатації транспортного засобу «КЕ»;
- особливості конструкції генератора «З/І» (заземлена чи ізольована обмотка збудження).

Значення вихідних параметрів згідно варіантам наведені в табл.1

Таблиця 1 – Вихідні дані до курсового проекту

№	$U_{рн},(В)$	$I_{н},(А)$	$I_{max},(А)$	$n_{min},(ХВ^{-1})$	$n_{max},(ХВ^{-1})$	$\Delta U, \%$	КЕ	З/І
1	2	3	4	5	6	7	8	9
00	13,4	40	50	600	2820	5	1	3
01	26,0	65	90	900	2340	5	3	3
02	13,8	40	43	960	3530	5	3	3
03	12,4	21	30	900	2700	5	3	3
04	12,2	13	25	1200	3000	5	3	3
05	13,6	65	90	780	3720	5	3	3
06	26,6	50	58	600	5040	5	3	3
07	13,4	30	32	900	2700	5	3	3
08	13,8	32	40	720	2880	5	1	3
09	12,6	30	40	960	2160	5	3	3
10	13,2	42	60	720	3060	5	1	3
11	26,6	94	120	840	3050	3	2	3
12	26,4	90	140	960	2880	3	2	3
13	13,6	55	80	540	3110	3	2	3
14	26,0	28	40	720	2930	3	1	3
15	13,0	18	30	900	2930	3	1	3
16	13,2	30	38	600	3240	3	2	3
17	26,2	22	30	600	3000	3	2	3
18	25,6	130	140	900	3060	3	1	3
19	13,4	40	50	600	2820	3	1	І
20	13,6	62	90	540	2930	3	2	3
21	26,0	65	90	900	2340	3	3	І
22	13,8	40	43	960	3530	3	3	І
23	12,4	21	30	900	2700	3	3	І
24	12,2	13	25	1200	3000	3	3	І
25	13,6	65	90	780	3720	3	3	
26	26,6	50	58	600	5040	3	3	І
27	13,4	30	32	900	2700	3	3	І
28	13,8	32	40	720	2880	3	1	І
29	12,6	30	40	960	2160	3	3	І

30	13,2	42	60	780	3310	3	1	I
31	26,6	94	120	840	3050	5	2	I
32	26,4	90	140	960	2880	5	2	I
33	13,6	55	80	540	3110	5	2	I
34	26,0	28	40	720	2930	5	1	I
35	13,0	18	30	900	2930	5	1	I
36	13,2	30	38	600	3240	5	2	I
37	26,2	22	30	600	3000	5	2	I
38	25,6	130	140	900	3060	5	1	I
39	13,4	40	50	600	2820	5	1	I
40	13,6	62	90	540	2930	5	2	I
41	26,0	65	90	900	2340	5	3	I
42	12,4	21	30	900	2700	5	3	I
43	13,6	65	90	780	3720	5	3	I
44	13,8	32	40	720	2880	5	1	I
45	13,2	42	60	720	3060	5	1	I
46	26,4	90	140	960	2880	3	2	I
47	26,0	28	40	720	2930	3	1	I
48	13,2	30	38	600	3240	3	2	I
49	25,6	130	140	900	3060	3	1	I
50	13,6	62	90	540	2930	3	2	I

На підставі вихідних даних обирають конкретний тип (модель) генератора та визначають структуру провідності виконавчого транзистора РН.

Автотракторний генератор змінного струму з електромагнітним збудженням характеризується такими параметрами:

- номінальною напругою  $U_{гн}$ ;
- номінальним струмом  $I_{гн}$ ;
- максимальним струмом  $I_{г.маx}$ ;
- обертами холостого ходу (початок віддачі потужності)  $n_x$ ;
- номінальною частотою обертання  $n_H$ ;
- максимальною частотою обертання  $n_{г.маx}$ ;
- кількістю фаз  $m$ ;
- кількістю пар полюсів  $p$ , або числом зубців ротора  $z$ ;
- кількістю витків фазної обмотки  $w_\phi$ ;
- кількістю витків обмотки збудження  $w_3$ ;

- опором обмотки збудження  $r_3$ .

Значення параметрів автотракторних генераторів різних типів наведені в табл. А.1, А.2, А.3 додатку А. При виборі генератора необхідно враховувати наведені нижче рекомендації.

Згідно з умовами експлуатації вибирають генератори з дзьобоподібним ротором для першої та другої категорії й генератори індукторного типу - для третьої категорії пересувного составу (показник «КЕ»).

Номінальні значення напруги та струму генератора  $U_{гн}$ ,  $I_{гн}$  можуть відрізнятися від значень напруги, що регулюється  $U_{рн}$  та номінального струму навантаження  $I_{н}$  не більш як на 15%. Максимальний струм генератора повинен бути не менше за струм навантаження від споживачів  $I_{макс} < I_{гмакс}$ . Кратність частоти обертання генератора повинна бути не менша за кратність обертання двигуна  $n_{гмакс}/n_x > n_{макс}/n_{мін}$ .

Особливості конструкції генератора, що пов'язані із способом підключення обмотки збудження, враховуються на етапі синтезу схеми електричної принципової регулятора напруги.

Відповідно до параметрів вибраного генератора визначають його конструктивну сталу:

для генераторів з дзьобоподібним ротором

$$C_e = 4k_f k_s k_v k_\gamma k_o \frac{P}{60} w_\phi, \quad (1)$$

для генераторів індукторного типу

$$C_e = 2,22 \frac{z}{60} w_\phi, \quad (2)$$

де  $k_f = 1,05$  – коефіцієнт форми поля;

$k_s = 2 \sin \frac{90}{m}$  – коефіцієнт схеми випрямлення;

$m$  – кількість фаз генератора;

$k_v = \frac{2m\sqrt{2}}{\pi} \sin \frac{90}{m}$  – коефіцієнт випрямлення;

$k_o = 0,966$  – обмотковий коефіцієнт;

$k_\gamma = 0,935$  – коефіцієнт комутації.

Для розрахунку робочих характеристик генераторної установки, крім статичних параметрів генератора, потрібно визначити його внутрішній опір  $r_e$  та коефіцієнти апроксимації кривої характеристики неробочого ходу  $a, b$ .

Коефіцієнти апроксимації  $a, b$  визначають графоаналітичним способом за допомогою характеристики холостого ходу (рис. 1).

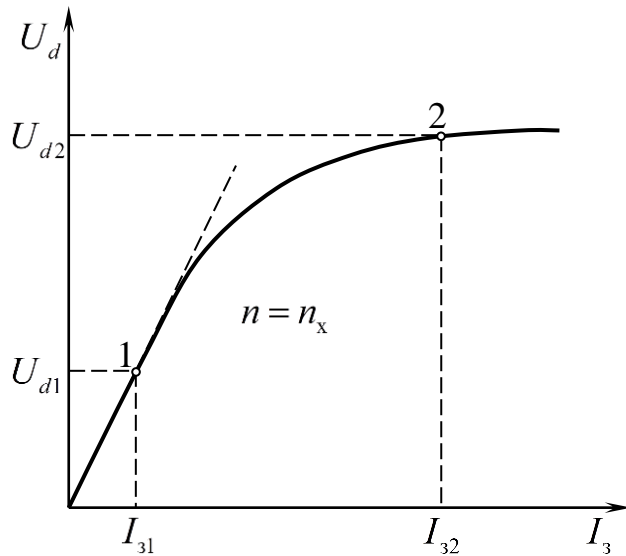


Рисунок 1 – Характеристика холостого ходу генератора

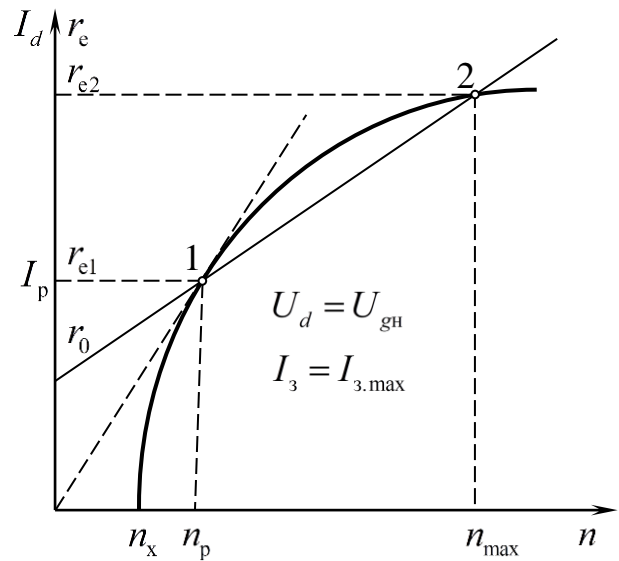


Рисунок 2 – Струмшвидкісна характеристика генератора

Для цього на характеристиці виділяють дві точки: одну на кінці лінійної ділянки, другу – на початку ділянки насичення. Коефіцієнти апроксимації відокремленої ділянки характеристики визначаються аналітично

$$a = C_e n_x \frac{I_{31} I_{32} (U_{d2} - U_{d1})}{(U_{d1} + 2U_0)(U_{d2} + 2U_0)(I_{32} - I_{31})}, \quad (3)$$

$$b = C_e n_x \frac{I_{32} (U_{d1} + 2U_0) - I_{31} (U_{d2} + 2U_0)}{(U_{d1} + 2U_0)(U_{d2} + 2U_0)(I_{32} - I_{31})}, \quad (4)$$

де  $2U_0 = 0,1U_{gh}$  – падіння напруги на вентилях випрямляча.

Характеристики холостого ходу різних типів генераторів наведені в додатку А, рис. А.1, А.2.

Еквівалентний опір якірного кола генератора  $r_e$  лінійно залежить від частоти обертання ротору

$$r_e = r_0 + C_L n, \quad (5)$$

де  $r_0$  – опір генератора при  $n = 0$ ;

$C_L$  – конструктивна стала, яка враховує індуктивний опір обмоток якоря.

Еквівалентний опір генератора в проекті визначають за допомогою струмошвидкісної характеристики (рис. 2), яку апроксимують аналітичним виразом

$$I_d(n) = I_{g \max} \left[ 1 - \exp\left(\frac{n_x - n}{n_x}\right) \right]. \quad (6)$$

Дотична до характеристики визначає точку розрахункового режиму генератора, для якої розраховують значення еквівалентного опору генератора

$$r_{e1} = \frac{U_{gH}}{I_p}. \quad (7)$$

Відповідно з отриманим значенням  $r_{e1}$  на рис. 2 будують рівно поділену вісь еквівалентного опору, по якій визначають опір для режиму максимальної частоти обертання  $r_{e2}$ , та в нерухомому стані генератора  $r_0$ . На підставі отриманих параметрів визначають конструктивну сталу

$$C_L = \frac{r_{e2} - r_{e1}}{n_{\max} - n_p}. \quad (8)$$

Отримані значення коефіцієнтів  $a$ ,  $b$  та еквівалентного опору генератора  $r_e(n)$  використовуються на етапі побудовання робочих характеристик генераторної установки.



## 2. СИНТЕЗ СХЕМИ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ПРИНЦИПОВОЇ РЕГУЛЯТОРА НАПРУГИ

У загальному випадку кінцевий варіант принципової електричної схеми регулятора напруги отримують в процесі розрахунку та підбору елементів. Початковий варіант схеми синтезується на підставі вихідних даних та переважно визначається наявністю елементної бази.

Схема електронного регулятора напруги складається з вимірювальної частини та вихідного каскаду. Якщо потрібно, то схему доповнюють підсилюючими каскадами. При синтезі схеми РН в проекті, транзистори всіх каскадів, включають за схемою з загальним емітером.

Слід зауважити, що для здійснення від'ємного зворотного зв'язку в системі регулювання напруги генератора, вхідний та вихідний транзистори схеми РН повинні функціонувати в протифазному включенні.

Тип провідності вихідного транзистора РН обирають залежно від способу підключення обмотки збудження генератору. Вразі застосування генераторів з заземленою обмоткою збудження (позначено «З» в табл. 1), обирають транзистор *p-n-p* провідності. Якщо використовуються генератори нових конструкцій з ізольованою обмоткою збудження (позначено «І» в табл. 1), вихідний каскад схеми РН реалізують на транзисторах *n-p-n* структури.

Синтез схеми регулятора починають з вибору варіанта вимірювальної частини, виходячи із заданого значення можливих пульсацій напруги, що регулюється –  $\Delta U$ . Якщо величина пульсацій складає 4...5% від рівня напруги, що регулюється –  $U_{рі}$ , рекомендується обрати найпростіший варіант схеми з вимірювальним подільником напруги (рис. 3, а).

Вимірювальна частина наведеного регулятора складається з подільника напруги  $R1, R2$  та стабілітрона  $VD1$ , який виконує функції елемента формування опорного рівня.

Якщо величина пульсацій  $\Delta U$  менша за 4%, рекомендується обрати мостову схему рис. 3, б у вимірювальну діагональ якої включено вхід транзистора  $VT1$ . Перевагою такої схеми є більша динамічна чутливість до вимірювання рівня напруги, що регулюється.

Ключові здатності вихідного каскаду РН, який працює на повний опір навантаження  $Z_H$ , багато в чому визначаються схемою його реалізації (рис. 4).

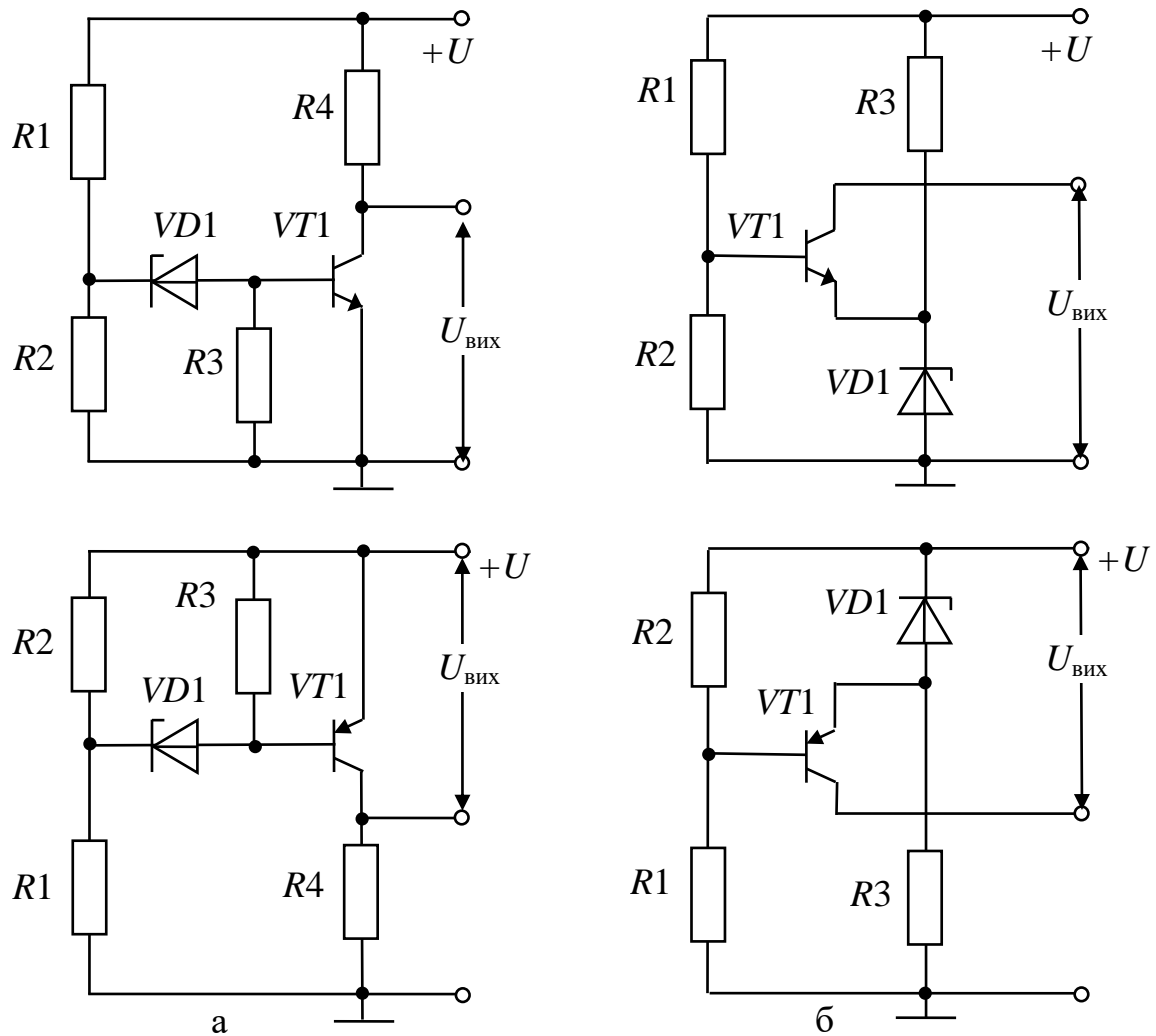


Рисунок 3 – Вимірювальна частина регуляторів напруги на транзисторах різної структури: а) за схемою вимірювального дільника; б) за схемою вимірювального моста

Схема складеного транзистора (рис. 4, а) має високий коефіцієнт передачі струму  $\beta_2 = I_K / I_B = (I'_K + I''_K) / I'_B = \beta'_2 \beta''_2 + \beta'_2$ , та є більш економічною у порівнянні зі схемою каскадного підсилення, де відбуваються втрати потужності на навантаженні  $R_K$  попереднього транзистора. Крім того, складені транзистори можуть мати один технологічний корпус, що підвищує компактність монтажу та температурну стабільність. Недоліком такої схеми є значне падіння напруги на відкритому складеному транзисторі і, як наслідок цього, – підвищення початкової частоти обертання генератора. Даний варіант схеми вихідного каскаду використовують тільки у випадках, коли обирають генератор з частотою обертання холостого ходу  $n_x$  не меншою за  $1200 \text{ хв}^{-1}$ .

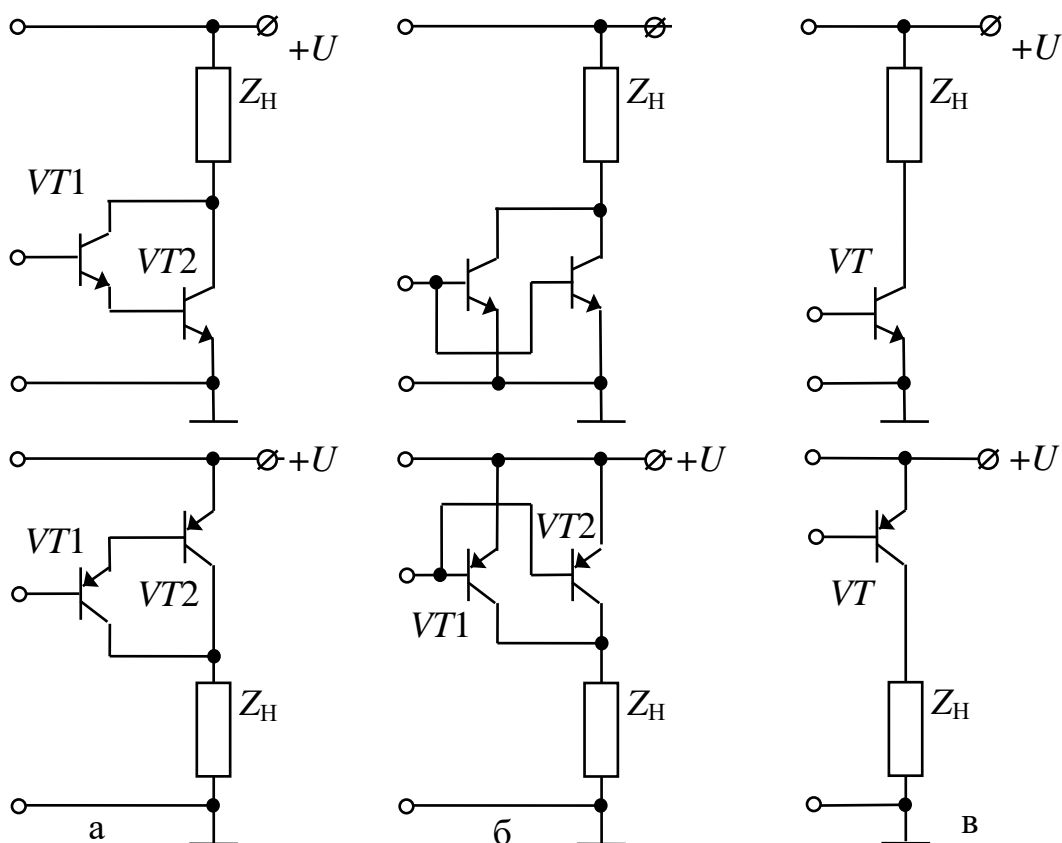


Рисунок 4 – Вихідні каскади регулятора напруги на транзисторах різної структури:

**а** – за схемою складеного транзистора; **б** – паралельне включення транзисторів; **в** – безпосереднє включення

Паралельне включення транзисторів (рис. 4, б) дозволяє знизити опір вихідного каскаду шляхом паралельного ввімкнення колекторних кіл транзисторів. Це приводить до збільшення максимального значення струму в обмотці збудження і дозволяє використовувати транзистори меншої потужності. Разом з цим, таке включення транзисторів призводить до зменшення вхідного опору вихідного каскаду та зростанню ємності спільного колекторного переходу. Цей варіант вихідного каскаду рекомендується використовувати в регуляторах, які працюють з генераторами, опір обмоток збудження яких становить менше за 4 Ом.

Якщо параметри обраного генератора (оберти холостого ходу, опір обмотки збудження) передбачають використання альтернативних схем вихідного каскаду (паралельного включення або складеного транзистора), додержуються таких рекомендацій. В разі використання в РН вимірювальної частини за схемою подільника напруги, обирають вихідний каскад за схемою складеного транзистора. Якщо використовується-

ся схема вимірювального моста, обирають паралельне включення транзисторів вихідного каскаду.

Безпосереднє ввімкнення транзисторів (рис. 4, в) є найбільш універсальним варіантом схеми вихідного каскаду та може використовуватися при будь-яких обмеженнях.

Слід відзначити, що в існуючих схемах РН крім основних елементів є ряд додаткових, які дозволяють покращити роботу РН в режимі дискретного регулювання, знизити потужність, що споживається, та збільшити надійність роботи його елементів.

У вихідних даних на проект вказуються додаткові вимоги до схеми регулятора напруги. Ці вимоги полягають у використанні кіл зворотних зв'язків, елементів захисту і термокомпенсації, фільтрів, що згладжують пульсації напруги та елементів, які змінюють структуру регулювання напруги (рис. 5).

Щоб підвищити ключову здатність транзисторів, у схемі регулятора використовують коло колекторного додатного зворотного зв'язку  $C_Z, R_Z$ . Діод  $VD6$  захищає виконавчий транзистор  $VT2$  від перенапружень, що виникають при комутації струму в обмотці збудження. Резистор  $R5$  поліпшує електричну міцність електронного ключа  $VT2$  в зачиненому стані. Діоди  $VD4, VD5$  захищають напівпровідникові прилади схеми від кондуктивних перешкод інверсної полярності, які виникають в мережі живлення під час експлуатації автомобіля [5].

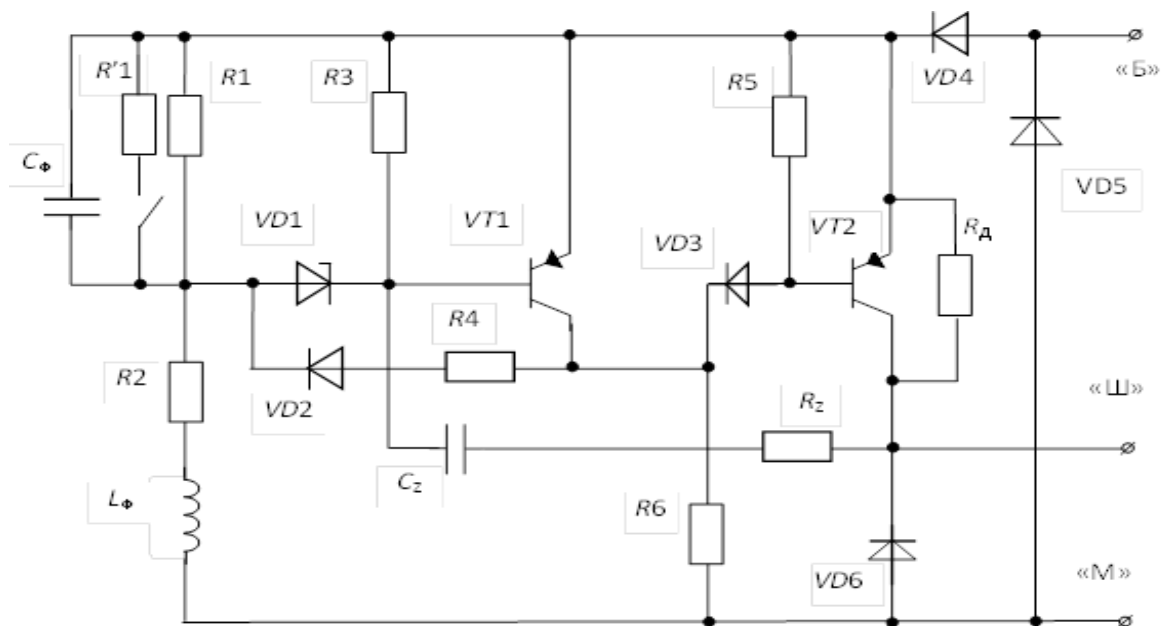


Рисунок 5 – Схема регулятора напруги з додатковими елементами

З метою виключення впливу на процес регулювання пульсацій, що спричинені випрямлячем генератора, до вимірювальної частини регулятора додають індуктивний (дросель  $L_{\Phi}$ ) або ємнісний (конденсатор  $C_{\Phi}$ ) фільтр.

Для зменшення рівня пульсації регулювання  $\Delta U$ , каскад вимірювальної частини охоплюється від'ємним зворотнім зв'язком (коло  $R_4$ ,  $VD_2$ ). Резистор  $R_D$  дозволяє змінювати структуру регулювання струму збудження та підвищити якість регульованої напруги на малих обертах генератора.

З метою підвищення потенційного бар'єру вихідного каскаду та поліпшення його ключової здатності (за умовою протифазного переключення) застосовують діод  $VD_3$  в колі бази транзистора  $VT_2$ .

Зміна температури в зимовий і літній періоди експлуатації автомобіля вимагає зміни режиму підзарядки акумуляторної батареї. В зимовий час напругу бортової мережі необхідно підтримувати на 10...15 % вище, ніж у літній. З цією метою в схемі передбачають «сезонний» резистор  $R'1$ .

На підставі вихідних даних та рекомендацій даного розділу синтезують принципову електричну схему регулятора напруги. В даному розділі пояснювальної записки наводять синтезовану схему регулятора, обґрунтовують вибір схемного рішення, пояснюють призначення елементів схеми і описують процеси, що відбуваються в додаткових колах.

### **3. РОЗРАХУНОК ЕЛЕМЕНТІВ СХЕМИ РЕГУЛЯТОРА НАПРУГИ ТА ВИБІР ЕЛЕМЕНТНОЇ БАЗИ**

Дискретне регулювання струму в обмотці збудження передбачає роботу схеми регулятора в двох ключових станах при яких вихідний транзистор перебуває або в режимі насичення (відчинений стан), або в режимі відсічки (зачинений стан). При цьому, миттєве значення напруги, виробленої генератором, змінюється від напруги спрацьовування  $U$  до напруги повернення  $U'$ . Значення напруг  $U$  і  $U'$  визначають з початкових даних ( $\Delta U$  підставляється в вольтах)

$$U = 0,5\Delta U + U_{\text{рн}}, \quad U' = U - \Delta U. \quad (9)$$

Розрахунок та добір елементів схеми транзисторного регулятора напруги виконують так, як описано нижче.

3.1 Вибирають тип вихідного транзистора за умовами

$$U_{к.маx} > 2U, \quad I_{к.маx} > (1,2...1,5) \frac{U}{r_3}. \quad (10)$$

Допустимі параметри транзисторів, які використовують в автомобільній електроніці, наведені в табл.Б.1, Б.2 додатка Б.

3.2 Визначають параметри транзистора в ключових станах. Якщо проект виконується з використанням програмних засобів (варіант виконання А), звертаються до табл. Б.1 та після вибору типу транзистора моделюють його роботу в пакетах прикладних програм (ППП), згідно схемам рис.6, рис.7.

Зворотний струм колекторного переходу  $I_{к0}$  вимірюється під заданою напругою зворотного напрямку  $U_{кб}$  за умовою відсутності струму емітера (рис. 6).

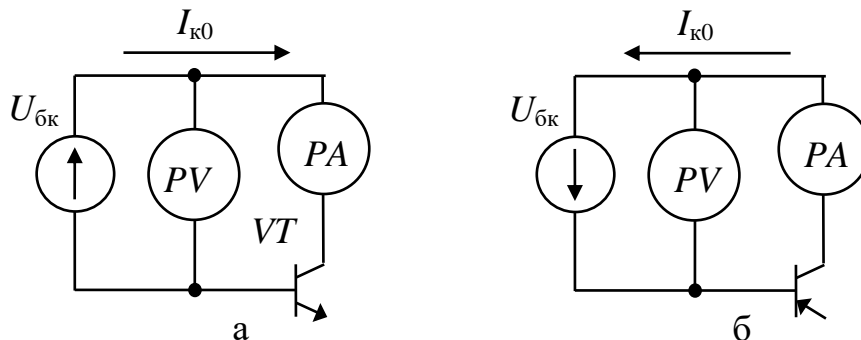


Рисунок 6 – Схеми вимірювання зворотного струму колектора:  
а – транзисторів *n-p-n* структури; б – транзисторів *p-n-p* структури

Вимірювання параметрів великого сигналу транзистора (струмів колектору та бази в стані насичення  $I_{кн}$ ,  $I_{бн}$  та напруги на вході і виході транзистора в стані насичення  $U_{бн}$ ,  $U_{кн}$ ) та напруги потенційного бар'єру емітерного переходу  $U_{б0}$  виконують під обмеженим навантаженням (рис. 7).

Для цього змінюють вхідну напругу  $U_{б}$ , реєструючи показання вимірювальних приладів. За результатами моделювання одержують значення параметрів великого сигналу:  $U_{бн}(PV1)$ ,  $I_{бн}(PA1)$ ,  $U_{кн}(PV2)$ ,  $I_{кн}(PA2)$  та напруги потенційного бар'єру  $U_{б0}(PV1)$ .

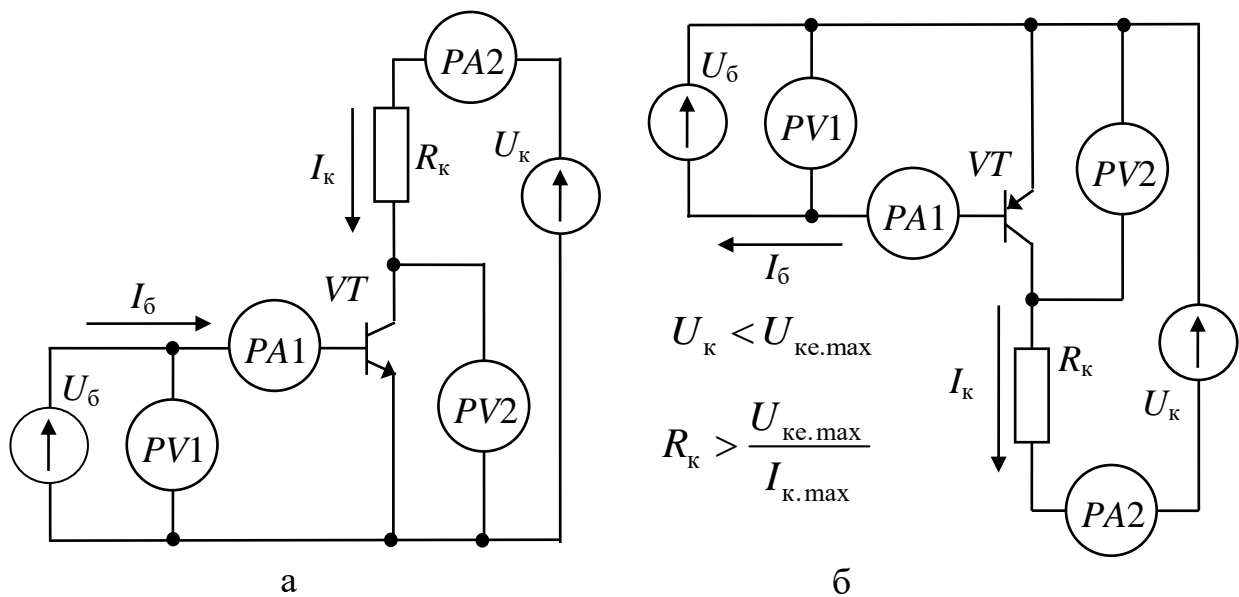


Рисунок 7 – Схеми вимірювання параметрів великого сигналу:  
**а** – транзисторів *n-p-n* структури; **б** – транзисторів *p-n-p* структури

Якщо проект виконується без використання програмних засобів (варіант виконання В), звертаються до табл. Б.2 та після вибору типу транзистора додатково з таблиці виписують його параметри великого сигналу та величину напруги потенційного бар'єру. Значення зворотного струму колекторного переходу, в цьому випадку, приймають рівним  $I_{к0} = I_{к.мах} \cdot 10^{-4}$ . На основі означених параметрів транзисторного ключа, визначають інваріантні параметри транзистора: вихідний  $r_{бн}$  і вхідний  $r_{кн}$  опір в стані насичення та статичний коефіцієнт передачі струму  $\beta$

$$r_{кн} = \frac{U_{кн}}{I_{кн}}, \quad r_{бн} = \frac{U_{бн} - U_{60}}{I_{бн}}, \quad \beta = \frac{I_{кн}}{I_{бн}}. \quad (11)$$

3.3. Для визначення режимних параметрів виконавчого транзистора розглядають схему заміщення вихідного каскаду (рис. 8). Згідно схемі заміщення, вхідні та вихідні параметри транзистора в стані насичення визначають через його інваріантні параметри

$$I_{к} = \frac{U}{r_{кн} + r_3}, \quad I_{б} = \frac{I_{к}s}{\beta}, \quad U_{бe} = U_{60} + I_{б}r_{бн}, \quad U_{ке} = I_{к}r_{кн} \quad (12)$$

де  $s = 1, 2$  – рекомендоване значення коефіцієнту насичення.

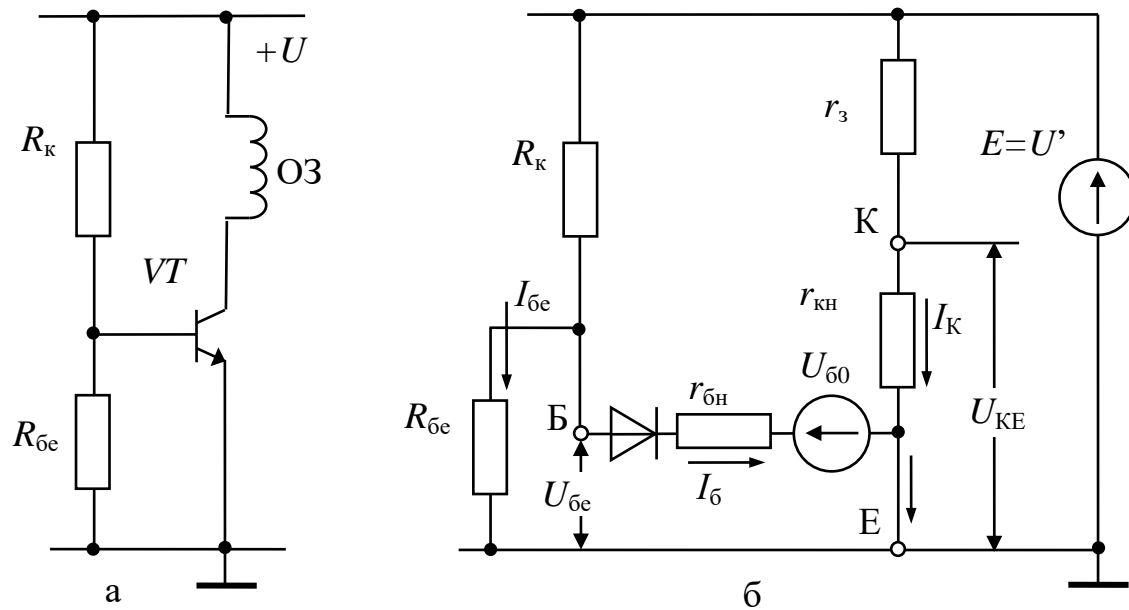


Рисунок 8 – Вихідний каскад регулятора напруги:  
 а – схема електрична принципова;  
 б – схема заміщення в режимі насичення транзистора

При паралельному включенні транзисторів вихідного каскаду, враховують їх еквівалентний вхідний та вихідний опір

$$I_K = \frac{U'}{r_3 + 0,5r_{кн}}; \quad U_{6e} = U_{60} + 0,5r_{6e}I_6. \quad (13)$$

У випадку моделювання вимірювань в ППП, паралельно включені транзистори розглядаються як поєднаний транзистор.

З метою поліпшення термостабільності характеристики (виключення негативного впливу зворотного струму колектору) та підвищення електричної міцності колекторного переходу вихідного транзистора в зачиненому стані при перехідних процесах в реактивному навантаженні (обмотці збудження), емітерний перехід транзистору шунтують опором  $R_6$ . Якщо величина зворотного струму колектору не перевищує допустимих значень  $I_{к0} \leq 5 \cdot 10^{-4} \text{ А}$ , резистор  $R_6$  не встановлюють. Рекомендована величина  $R_6$  визначається через власні параметри транзистора

$$R_6 = U_{60} / 2I_{к0}. \quad (14)$$



Струм через шунтуючий резистор визначають за законом Ома

$$I_{\text{бe}} = U_{\text{бe}} / R_{\text{б}}. \quad (15)$$

Для забезпечення заданого режиму транзистора, визначають величину опору обмежуючого резистора для протифазних каскадів

$$R_{\text{к}} = \frac{U' - U_{\text{бe}}}{I_{\text{б}} + I_{\text{бe}}}. \quad (16)$$

3.4. Вибір стабілітрона  $VD1$  і транзистора вимірювальної частини  $VT1$  виконується одночасно на підставі співвідношень

$$U_{\text{ст}} \approx 0,5U_{\text{рн}}, \quad I_{\text{ст. min}} \geq \frac{I_{\text{к1. max}}}{\beta_1}, \quad U_{\text{к1. max}} > 1,5U_{\text{рн}}, \quad I_{\text{к1. max}} \geq I_{\text{ст. max}}, \quad (17)$$

де  $U_{\text{ст}}$  – напруга стабілізації;

$I_{\text{ст. min}}, I_{\text{ст. max}}$  – мінімальний та максимальний струм стабілізації.

Параметри транзисторів та стабілітронів наведені в таблицях додатка Б.

3.5. Після вибору активних елементів вимірювальної частини регулятора перевіряється необхідність застосування підсилюючих каскадів (рис. 9).

Для схеми з вимірювальним дільником перевіряють умову  $I_{\text{б}} < I_{\text{к1. max}}$ . Якщо умова виконується, підсилювач не потрібен і навантаження транзистора  $VT1$  обирають таким, що дорівнює  $R_{\text{к}}$ . В іншому випадку, до схеми додають синфазний каскад підсилювання (рис. 10, а), який узгоджується з навантаженням вимірювальної частини. Передаточний коефіцієнт підсилюючого каскаду для наведеної схеми визначають за умовою  $\beta_{\text{п}} > I_{\text{б}} / I_{\text{к1. max}}$ .

У схемі з вимірювальним мостом додають протифазний каскад підсилювання (рис. 10, б). Коефіцієнт передачі струму для такої схеми визначають за умовою  $\beta_{\text{п}} > 1,2I_{\text{б}} / I_{\text{ст. max}}$ .

3.6 Інваріантні параметри транзисторів підсилюючого каскаду визначають згідно п. 3.2 та розраховують їх режими наступним чином.

Транзистор  $VT2$  синфазного каскаду (рис. 10, а) розраховують на навантаження  $R_5$ .

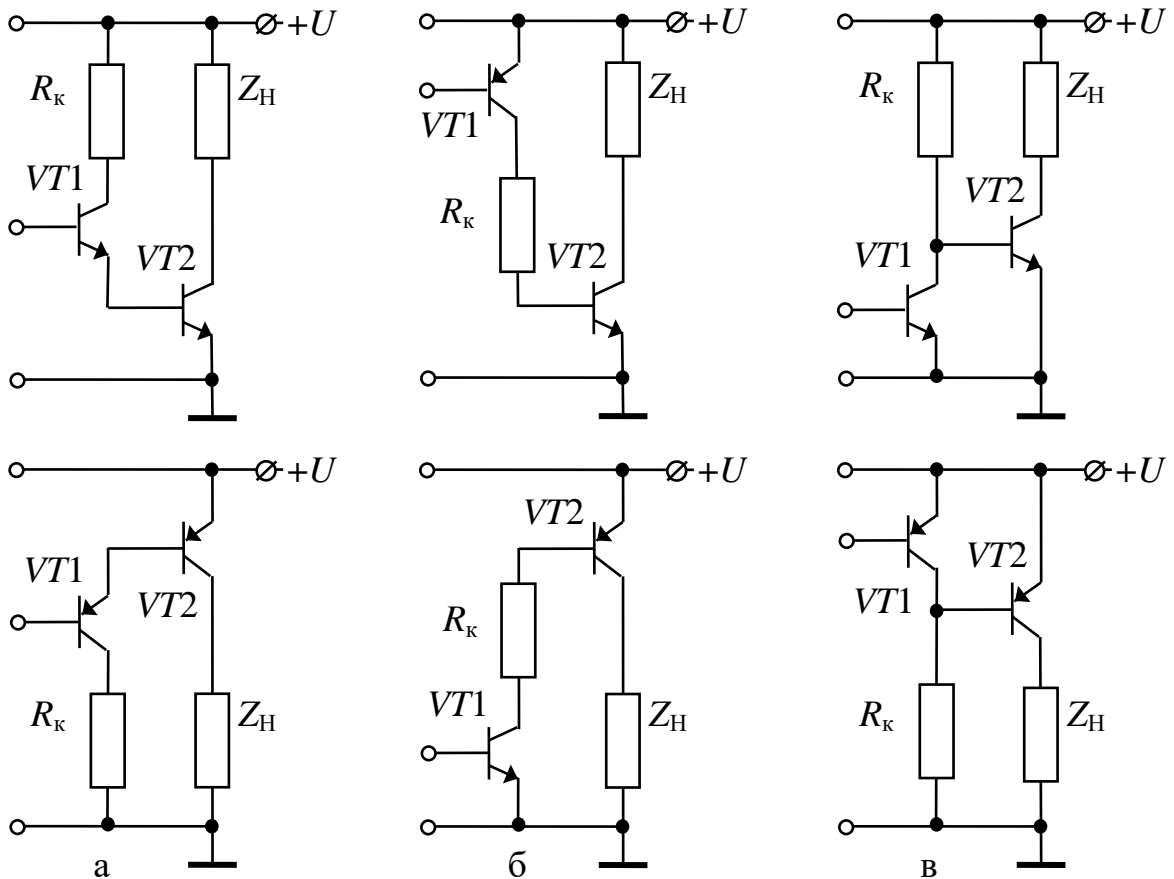


Рисунок 9 – Схеми каскадного підсилювання:  
**а** – синфазне включення транзисторів однакової структури;  
**б** – синфазне включення транзисторів різної структури;  
**в** – протифазне включення транзисторів

Враховуючи, що згідно (15)  $I_{e2} = I_{б3} + I_{бe}$

$$I_{б2} = \frac{I_{e2}}{\beta_2 + 1}, \quad U_{бe2} = U_{б02} + I_{б2} r_{бн2}, \quad (18)$$

$$I_{к2} = I_{e2} - I_{б2}, \quad U_{кe2} = I_{к2} r_{кн2}, \quad R_5 = \frac{U' - U_{кe2} - U_{бe3}}{I_{к2}}.$$

Режим транзистора  $VT2$  протифазного каскаду (рис. 10, б) визначають в припущенні, що він повністю відчинений, під час коли  $VT3$  – зачинений

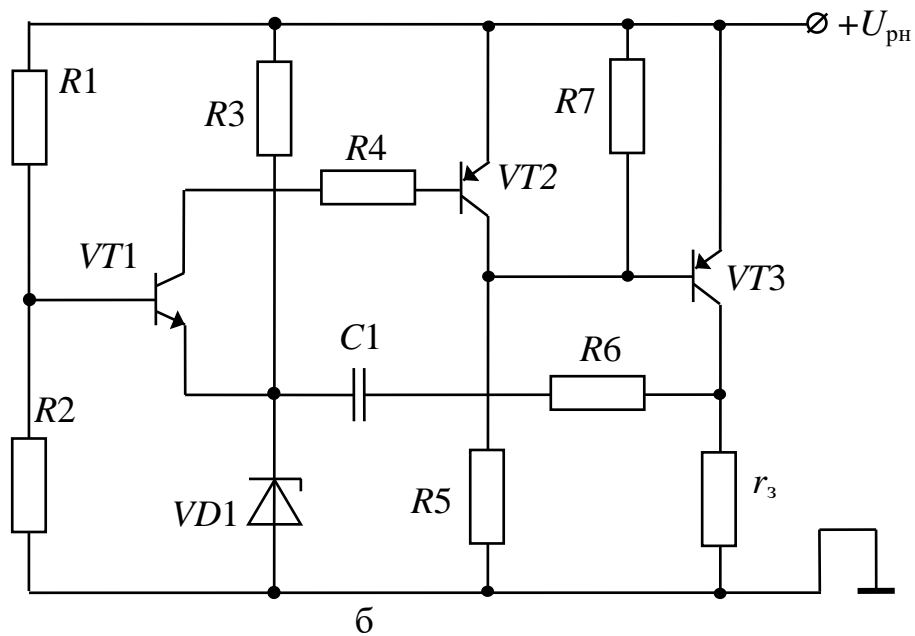
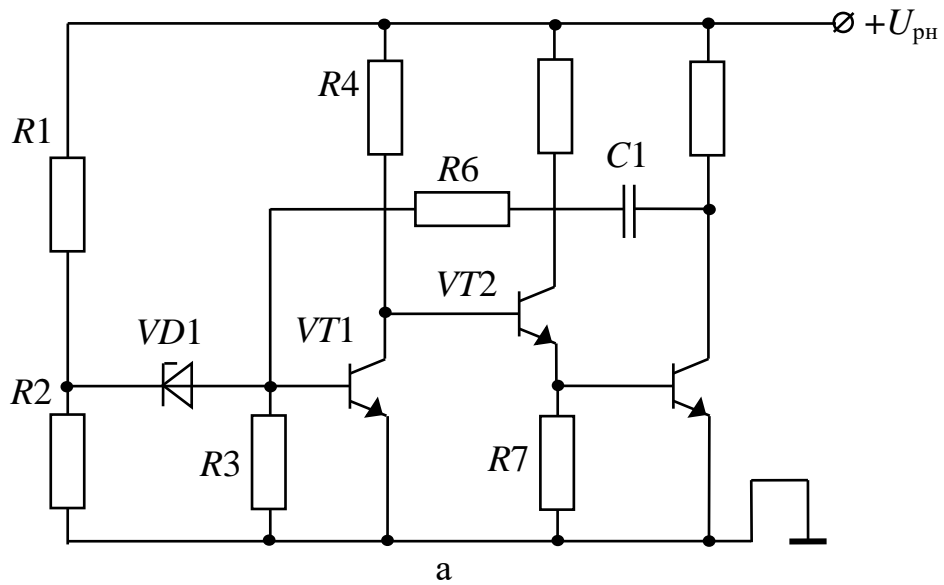


Рисунок 10 – Синтезовані схеми регуляторів напруги:  
 а – з вимірювальним дільником; б – з вимірювальним мостом

$$I_{к2} = \frac{U}{R_5 + \frac{R_7 r_{кн2}}{R_7 + r_{кн2}}}; \quad I_{б2} = \frac{I_{к2}}{\beta_2};$$

$$U_{б\epsilon 2} = U_{б02} + I_{б2} r_{бн2}; \quad U_{к\epsilon 2} = I_{к2} r_{кн2}.$$

(19)

Опори резисторів, які обмежують вхідні струми транзисторів підсилюючих каскадів, розраховують згідно з наведеними схемами

$$R_4 = \frac{U' - U_{\text{бе}2} - U_{\text{бе}3}}{I_{\text{б}2}} \quad - \text{ для схеми (рис. 10, а),} \quad (20)$$

$$R_4 = \frac{U - U_{\text{бе}2} - I_{\text{б}2} r_{\text{кн}1} - U_{\text{ст}}}{I_{\text{б}2}} \quad - \text{ для схеми (рис. 10, б).}$$

Після розрахунку режимів транзисторів, каскади перевіряються за умовами переключення транзисторів. Для синфазного включення (рис. 10, а) повинна виконуватися умова зачиненого стану попереднього транзистора  $VT2$  залежно від наявності  $R_7$

$$I_{\text{к}02} R_7 < U_{\text{б}03} \quad \text{або} \quad I_{\text{к}02} r_{\text{бн}3} < U_{\text{б}03} \quad (21)$$

Для протифазного включення (рис. 10,б), перевіряється умова зачиненого стану наступного транзистора  $VT3$  в разі відчиненого стану попереднього  $VT2$

$$U_{\text{ке}2} < U_{\text{б}03}. \quad (22)$$

Якщо умови не виконуються, обирають транзистори з задовільними параметрами або додають в коло бази виконавчого транзистора діод (додатковий потенційний бар'єр).

Вразі необхідності, до схеми РН можна додавати декілька підсилюючих каскадів для забезпечення необхідного коефіцієнту передачі струму  $\beta_{\text{п}}$ . Для поліпшення динамічних якостей (ключової здатності) транзисторів при синтезуванні схеми регулятора необхідно передбачити додатній зворотний зв'язок (коло  $R6, C1$ ), який охоплює весь тракт ключового підсилення сигналу (див. рис. 10).

3.7 Вимірювальні частини РН розраховують згідно схемам заміщення (рис. 11), які складені для двох станів схеми: при напрузі спрацьовування  $U$ , коли стабілітрон  $VD1$  знаходиться на межі відпирання і при напрузі повернення  $U'$ , коли стабілітрон перебуває на робочій ділянці вольт-амперної характеристики під максимальним навантаженням.

На основі законів Кірхгофа та Ома для одержаних схем заміщення складають розв'язуючі системи рівнянь. Для схеми вимірювального дільника (рис. 11, а) задають струм дільника напруги  $I_2 = 4I_{\text{ст.мін}}$ , та розв'язують систему рівнянь відносно невідомих опорів  $R_1, R_2, R_3$

$$\begin{cases} U = I_2 R_2 + (I_{\text{ст.мін}} + I_2) R_1, \\ U = U_{\text{ст}} + I_{\text{ст.мін}} R_3 + R_1 (I_{\text{ст.мін}} + I_2), \\ U_{\text{б01}} = I_{\text{ст.мін}} R_3. \end{cases} \quad (23)$$

Інваріантні параметри вхідного транзистора VT1 визначають згідно п.п. 3.2, режимні – аналогічно п.п. 3.6.

Друга група рівнянь складається для відчиненого стану VT1 коли підтримується напруга повернення  $U'$

$$\begin{cases} I'_1 = I'_2 + I_{\text{ст}}, \\ U' = I'_1 R_1 + I'_2 R_2, \\ I'_3 = U_{\text{бел}} / R_3, \\ I_{\text{ст}} = I'_3 + I_{\text{б1}}. \end{cases} \quad (24)$$

Система рівнянь (24) дозволяє визначити струми у колах вимірювальної частини РН  $I'_1, I'_2, I'_3$  та перевірити придатність стабілітрону за допустимим значенням струму  $I_{\text{ст}} \leq I_{\text{ст.макс}}$ . Опір резистора зворотного зв'язку  $R_6$  для схеми (рис. 10, а) розраховують виходячи з величини струму в резисторі  $R_3$

$$R_6 = \frac{U' - U_{\text{бел}}}{I'_3}. \quad (25)$$

Для схеми вимірювального моста (рис. 11, б) аналогічно складають рівняння, на підставі яких, визначають опори резисторів пліч моста  $R_1, R_2, R_3$ , струмові режими кіл  $I'_1, I'_2, I'_3$  та перевіряють придатність стабілітрону за допустимим значенням струму

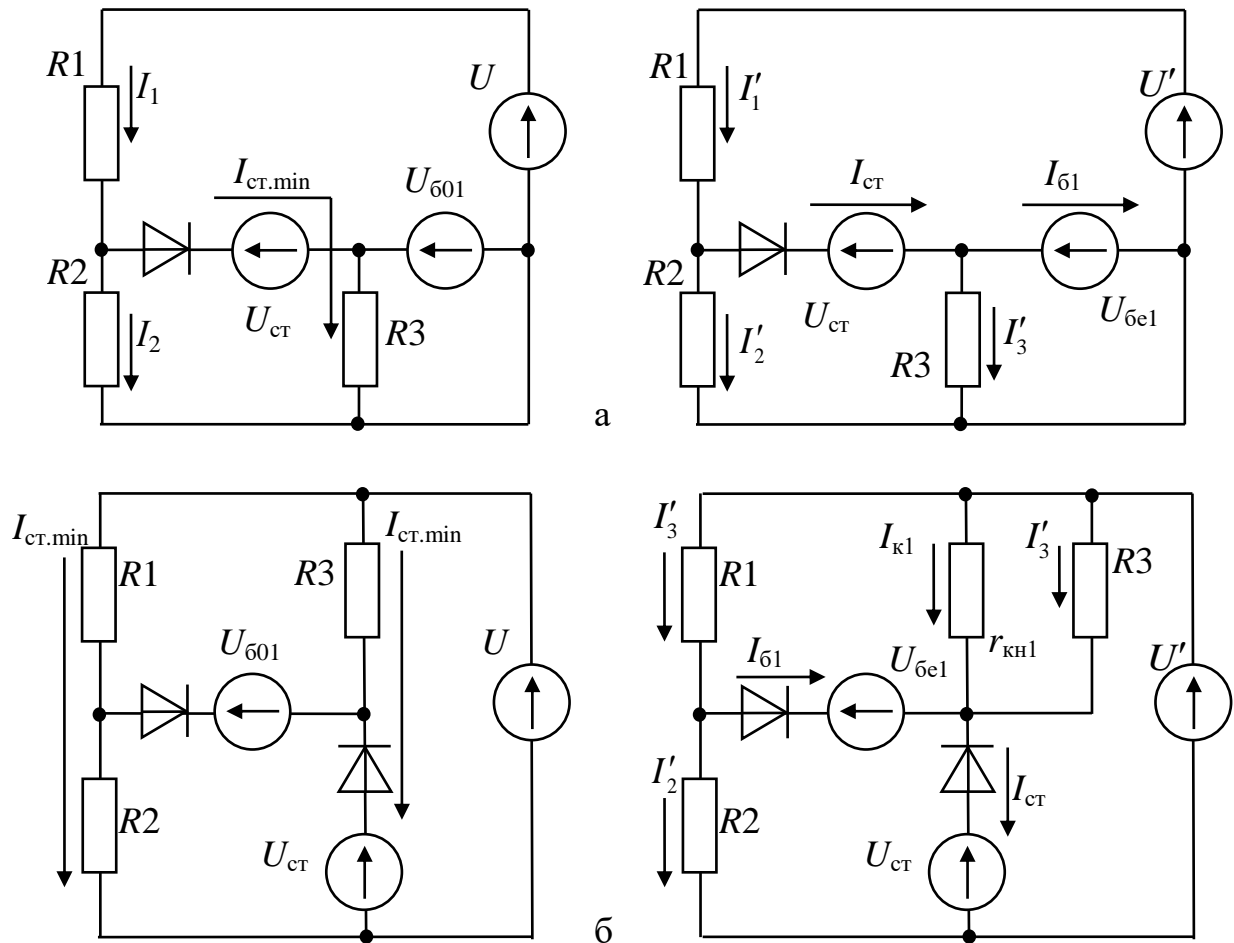


Рисунок 11 – Схеми заміщення вимірювальної частини регулятора напруги: а – з вимірювальним ділянком; б – з вимірювальним мостом

$$\begin{cases} U_{601} = I_{\text{ст.мін}} (R_3 - R_1), \\ U = I_{\text{ст.мін}} (R_1 + R_2), \\ U = U_{\text{ст}} + I_{\text{ст.мін}} R_3. \end{cases} \quad (26)$$

$$\begin{cases} U_{6e1} = I'_2 R_2 - U_{\text{ст}}, \\ U' = I'_3 R_3 + U_{\text{ст}}, \\ I_{\text{ст}} = I'_3 + I_{\text{кн1}} + I_{61}, \\ I_{61} = I'_1 - I'_2, \\ U' = I'_2 R_2 + I'_1 R_1. \end{cases} \quad (27)$$

Опір резистора зворотного зв'язку  $R_6$  для схеми (рис. 10, б) розраховують на підставі параметрів стабілітрону

$$R_6 = 2R_3 \frac{U_{ст}}{U_{рн}}, \quad (28)$$

3.8 Щоб визначити номінальні параметри резисторів схеми, використовують шкали номінальних опорів і потужностей. Шкала опорів резисторів типу МЛТ (ряд E24) має кратності номіналів: 1; 1.1; 1.2; 1.3; 1.5; 1.6; 1.8; 2.0; 2.2; 2.4; 2.7; 3.0; 3.3; 3.6; 3.9; 4.3; 4.7; 5.1; 6.2; 6.8; 7.5; 8.2; 9.1. Номінали опорів резисторів обирають найближчими меншими до розрахованого значення.

Шкала потужностей резисторів типу МЛТ містить значення номінальних потужностей резисторів (Вт): 0.05; 0.125; 0.25; 0.5; 1.0; 2.0. Потужність, яка розсіюється резисторами, визначається за найбільшим значенням струму, що проходить через них за формулою  $P_i = I_i^2 R_i$ . Номінали потужностей резисторів обирають найближчими більшими до розрахованого значення. Якщо розрахункова потужність резистора перевищує 2 Вт (найбільшу для резисторів типу МЛТ) необхідний опір та потужність одержують шляхом набору декількох резисторів при їх комбінованому з'єднанні.

Ємність конденсатора зворотного зв'язку  $C_1$  визначають для найбільш несприятливого режиму переключення вихідного транзистора. Цей режим має місце під час мінімальної шпаруватості  $\gamma = 0,9$  та частоти регулювання напруги  $f_{\min} = 20$  Гц. Враховуючи ці міркування, ємність конденсатора визначають з виразу

$$C_1 = \frac{1 - \gamma}{f_{\min} (R_1 + R_2)}. \quad (29)$$

Номінальні значення ємності конденсатору вибирають найближчими меншими до розрахованих значень  $C_1$  за шкалою ряду номіналів E12: 1; 1.2; 1.5; 1.8; 2.2; 2.7; 3.3; 3.9; 4.7; 6.2; 7.5; 9.1.

#### 4. РОЗРАХУНОК ЗГЛАДЖУЮЧИХ ФІЛЬТРІВ

Згладжуючи фільтри в регуляторах напруги використовуються для пониження рівня пульсацій, які утворюються багатофазним випрямлячем генератору. Ці пульсації (пульсації випрямлення), частота яких досягає декількох кілогерц, заважають чіткому спрацьовуванню стабілітрона вимірювального кола регулятора при коливаннях напруги бортової мережі в межах пульсацій регулювання  $\Delta U$ . Як наслідок, в транзисторах регулятора не забезпечується ключовий режим, що в свою чергу викликає втрати потужності на транзисторах та зниження ККД регулятора в цілому.

Згладжуючи фільтри застосовують лише для вимірювальної частини, виконаної за схемою подільника напруги. Для мостових вимірювальних схем напруга у вимірювальній діагоналі мало залежить від динамічної зміни напруги у діагоналі живлення і тому застосовувати фільтри не є доцільним.

У вентильних генераторах змінного струму, частота пульсації випрямленої напруги залежить від числа фаз  $m$  та пар полюсів  $p$  синхронної машини. На середніх обертах генератора частота пульсацій напруги дорівнює

$$f_{\Pi} = \frac{mk_{cx}p(n_x + n_n)}{30}, \quad (30)$$

де  $k_{cx}$  – коефіцієнт схеми випрямлення (для однонапівперіодних  $k_{cx} = 1$  для двонапівперіодних  $k_{cx} = 2$ )

Величина пульсації випрямлення при цьому складає

$$\delta U = 0,023mk_{cx}U. \quad (31)$$

Якщо величина пульсації випрямлення  $\delta U$  спільномірна з пульсаціями напруги, що викликані перемиканнями схеми регулятора (пульсації управління)  $\Delta U$ , тоді стабілітрон реагуватиме на пульсації випрямлення і регулятор буде переключатися з частотою пульсації  $f_{\Pi}$ . Через велику частоту, малу амплітуду і крутизну пульсації випрямлення транзистори регулятора не будуть входити в режим достатнього насичення і відсічки. Частково цей недолік усувається введенням пози-



тивних зворотних зв'язків. Разом з тим використовуються пасивні фільтри в вигляді дроселів або конденсаторів, що згладжують. Для виключення впливу пульсації  $\delta U$  на роботу стабілітрона необхідно дотримуватися умови

$$\delta U < \Delta U. \quad (32)$$

Якщо ця умова не задовольняється, у вимірювальному колі регулятора підбирають дросель або конденсатор, що забезпечує коефіцієнт фільтрування  $k_\phi = \delta U / \Delta U$ .

Відповідно до параметрів вибраного генератора розраховують частоту пульсацій випрямлення для середніх обертів генератора (30). Згідно (31) визначають величину пульсації випрямлення  $\delta U$ . Якщо умова (32) виконується, фільтр, що згладжує, не потрібний. В іншому випадку у вимірювальну частину вводять індуктивний або ємнісний фільтр.

Індуктивність фільтра визначається на основі розрахованого значення частоти пульсації для середньої частоти обертання генератора

$$L_\phi = (R_1 + R_2) 10^{-3} \sqrt{K_\phi^2 - \frac{1}{f_\Pi}}. \quad (33)$$

Якщо за результатами розрахунків індуктивність дроселя складає  $L_\phi > 0,01$  Гн, то використовувати дросель як фільтр недоцільно через його значні масогабаритні параметри. В цьому випадку обирають ємнісний фільтр. Величину ємності конденсатора, що згладжує  $C_\phi$ , обирають за умовою

$$C_\phi \geq \frac{1,5 \cdot 10^6 k_\phi}{R_1 m f_\Pi}. \quad (34)$$

Номінальне значення ємності конденсатора вибирають за шкалою номіналів (ряд Е6): 1.0 , 1.5 , 2.2, 3.3 , 4.7 , 6.8. Елемент фільтру додають до схеми регулятора.

## 5. ОПТИМІЗАЦІЯ ПАРАМЕТРІВ ЕЛЕМЕНТІВ СХЕМИ ЗА ДОПОМОГОЮ МАШИННОГО МОДЕЛЮВАННЯ

Цей розділ проекту виконується тільки в разі застосування програмних засобів (варіант виконання А).

За результатами оціночного розрахунку та вибору активних і пасивних елементів, які забезпечують необхідні ключові режими схеми регулятора, переходять до перевірного розрахунку схеми. Перевірочний розрахунок реалізується за допомогою пакетів прикладних програми наступним чином.

5.1. У програмі моделюють електричну принципову схему регулятора. З схеми виключають коло зворотного зв'язку  $C1$ ,  $R6$  а з вимірювальної частини схеми – елемент фільтру. Активні елементи схеми обирають з каталогів програми. Пасивним елементам надають значення параметрів відповідно до обраних номіналів за шкалами стандартизованих рядів. В коло вихідного транзистора включають контрольний амперметр.

5.2. Бортову мережу задають джерелом напруги постійного струму з напругою, що дорівнює регульованому значенню  $U_{\text{рн}}$ . В якості обмотки збудження (навантаження РН) підключають резистивний еквівалент з опором, що дорівнює  $r_3$ .

5.3. Змінюють величину напруги живлення в межах пульсації регулювання  $U'..U$ , реєструючи показання амперметра, що свідчить про перехід схеми регулятора з одного ключового стану до іншого.

5.4. У випадку непрацездатності схеми коректують опори резисторів  $R1$ ,  $R2$ ,  $R3$  та вибирають їх нові значення за шкалами номіналів або шляхом комбінації підключень декількох резисторів з необхідним еквівалентним опором.

5.5. Якщо не вдається досягти ключових станів схеми за допомогою підбору опорів  $R1$ ,  $R2$ , переходять до каскадної оптимізації параметрів резистивних елементів схеми. Для цього вмикають контрольні амперметри в базові та колекторні кола транзисторів всіх каскадів. Послідовним корегуванням номіналів резисторів, починаючи з вихідного каскаду, добиваються ключової роботи кожного транзистора.

5.6. Результатом статичного розрахунку є визначення дійсних значень напруги спрацьовування  $U$  та повернення  $U'$ , що забезпечують роботу схеми з поновленими значеннями опорів резисторів вимі-

рювального кола. Результати статичного розрахунку відобразити у заключній частині пояснювальної записки проекту. Зразок оформлення результатів наведений на рис. В.1. додатку В.

5.7. Моделюють роботу регулятора в динамічному режимі. Для цього відновлюють коло зворотного зв'язку  $C1, R6$ , додають до кола збудження індуктивну складову  $L_3 = w_3 \cdot 10^{-7}$  Гн, а до кола живлення – змінну складову напруги пульсацій  $\sim U_{\Pi} = 2\Delta U$  з частотою 20 Гц. Підключають осцилограф  $OSC$ , як показано на рис. 12 та спостерігають за періодичною зміною напруги на колекторі вихідного транзистора.

5.8. За допомогою осцилографа переконаються в працездатності регулятора та вимірюють амплітуду викидів напруги  $u_K$  що спричинені перехідними процесами в індуктивному навантаженні.

Якщо значення  $u_K > U_{K.max}$ , обмотку збудження треба зашунтувати діодом  $VD2$  (рис. 12).

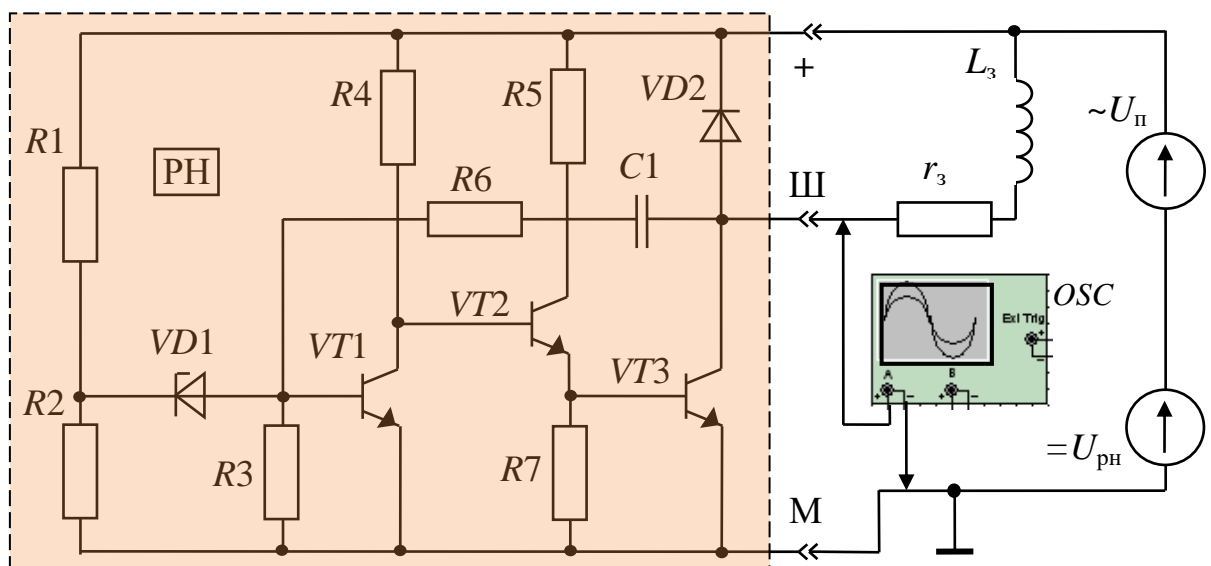


Рисунок 12 – Моделювання схеми регулятора напруги в динамічному режимі

Параметри діода підбирають за умовами:  $U_{VD} > 0,5u_K$ ,  $I_{VD} > 0,25I_{3.max}$ . Параметри діодів наведені в табл. Б.5 додатка Б. Після підключення діода впевнюються, що викиди  $u_K$  зникли.

5.9. За допомогою осцилографа оцінюють ефективність введення кола додатного зворотного зв'язку.

За результатами виконання даного розділу у пояснювальній запи-

сці проекту наводять схеми вимірювань і осцилограми електричних процесів у всіх перелічених випадках. Зразок оформлення графічної частини показано на рис. В.1...В.5 додатка В.

## 6. РОЗРАХУНОК РОБОЧИХ ХАРАКТЕРИСТИК ГЕНЕРАТОРНОЇ УСТАНОВКИ

Робочими характеристиками генераторного установки є залежність зміни середніх значень напруги, що виробляється, і струму в обмотці збудження від частоти обертання генератора. Щоб оцінити динамічні характеристики схеми регулятора розраховують її частотно-швидкісну характеристику, яка визначає залежність частоти переключення регулятора, при комутації струму збудження, від швидкості обертання ротора генератора.

Розрахунок робочих і частотно-швидкісних характеристик виконується для двох режимів генераторної установки. Перший режим – режим холостого ходу, коли споживачі енергії відімкнені і струм генератора  $I_g = 0$ . Другий – номінальний режим при струмі генератора, який дорівнює номінальному значенню  $I_g = I_H$ .

Для обох режимів на характеристиках генераторної установки розрізняють робочу ділянку при  $n_x < n < n_{\max}$  і ділянку розгону при  $0 < n < n_{\max}$ .

Граничні оберти робочої ділянки визначають на основі виразу для ЕРС, що виробляється генератором

$$n_x = \frac{(U - 2U_0) \left[ ar_3 + b(U - \Delta U_{\text{пер}}) \right]}{C_e (U - \Delta U_{\text{пер}})},$$

$$n_H = \frac{U + 2U_0 + r_0 I_H}{C_e \frac{U - \Delta U_{\text{пер}}}{ar_3 + b(U - \Delta U_{\text{пер}})} - C_L I_H}.$$
(35)

де  $U$  – напруга спрацьовування регулятора;

$\Delta U_{\text{пер}}$  – падіння напруги на комутуючому елементі регулятора.

Побудування ділянки розгону виконується за умовою збудження генератора під напругою акумуляторної батареї  $U_{\text{АКБ}}$  і відключених споживачах. У цьому діапазоні зміни обертів  $n$ , комутуючий транзистор постійно відкритий, шпаруватість імпульсів струму  $\gamma = 1$ , частота переключення регулятора  $f = 0$ . Для цих умов, стум збудження не змінюється і дорівнює своєму максимальному значенню

$$I_3 = \frac{U_{\text{АКБ}}}{r_3 + r_{\text{кн}}}. \quad (36)$$

Середнє значення напруги генераторної установки із зростанням обертів буде збільшуватися за лінійним законом

$$U_{\text{ср}}(n) = \frac{C_e n I_3}{a + b I_3}. \quad (37)$$

На робочих ділянках характеристики задаються незмінним рівнем регульованої напруги та визначають шпаруватість імпульсів струму збудження, яка забезпечує виконання цієї умови при зміні швидкості обертання генератора

$$\gamma(n) = \frac{a r_3 [U_{\text{рн}} + 2U_0 + (r_0 + C_L n) I_{\text{н}}]}{U_{\text{рн}} [C_e n - b (U_{\text{рн}} + 2U_0 + (r_0 + C_L n) I_{\text{н}})]}. \quad (38)$$

При розрахунку значень  $\gamma(n)$  для режиму холостого ходу в виразах вважати  $I_{\text{н}} = 0$ .

Середнє значення струму збудження на робочій ділянці характеристик визначають через одержані значення шпаруватості

$$I_{3,\text{ср}}(n) = \frac{U_{\text{рн}}}{r_3} \gamma. \quad (39)$$

Частота переключення регулятора визначається за відношенням шпаруватості імпульсів струму збудження до їх тривалості  $t_i$  через миттєві значення струму збудження  $i_3$

$$f(n) = \frac{\gamma}{t_3}, \quad t_i(n) = \frac{\Delta U}{\frac{U'}{r_3} - i_3(n)} - \frac{k_L}{n}, \quad i_3(n) = \frac{a(U + 2U_0)}{C_e n - b(U + 2U_0)}, \quad (40)$$

де  $k_L = p\sigma W_3 / C_e r_3$  – конструктивний коефіцієнт, який враховує вплив реактивного опору обмотки збудження;

$\sigma = 1, 2 \dots 1, 6$  – коефіцієнт розсіювання магнітного потоку;

Розрахунок залежностей згідно з наведеними в розділі формулами  $U_{cp} = f_1(n)$ ,  $I_{3,cp} = f_2(n)$ ,  $\gamma = f_3(n)$ ,  $f = f_4(n)$  пропонується виконувати за допомогою комп'ютера. Результати розрахунків оформлюється у вигляді таблиць та графічних побудовань. Приклад оформлення графіків наведено на рис. В.6, В.7 додатка В. Результати розрахунків робочих характеристик генераторної установки проаналізувати в висновках пояснювальної записки проекту.

## 7. ЕНЕРГЕТИЧНИЙ РОЗРАХУНОК РЕГУЛЯТОРА НАПРУГИ

Енергетичний розрахунок регулятора напруги полягає у визначенні його коефіцієнта корисної дії (ККД). Максимальні втрати та мінімальний ККД мають місце при обертах холостого ходу, коли вихідний транзистор знаходиться у відчиненому стані. Корисна потужність на виході регулятора, яка виділяється в обмотці збудження

$$P_3 = \frac{(U_{рн} - \Delta U_{рег})^2}{r_3} = \frac{(U - U_{кез})^2}{r_3}, \quad (41)$$

де  $\Delta U_{рег} = I_{к}^2 r_{кн}$  – падіння напруги на виконавчому транзисторі регулятора напруги.

Втрати потужності в елементах схеми регулятора визначають при нарузі спрацьовування (потужність розсіюється тільки в елементах через які утворюється струм за обраним станом)

$$\Delta P_{рн} = \sum P_{VD} + \sum P_R + \sum P_{VT}, \quad (42)$$

де  $P_{VT}$ ,  $P_{VD}$ ,  $P_R$  – розсіювання потужності відповідно транзисторами, стабілітронами, резисторами.

На приклад, для схеми (рис. 10) сумарні втрати потужності на елементах під струмом визначають так

$$\begin{aligned} \sum P_R &= I_1^2 R_1 + I_2^2 R_2 + I_3^2 R_3 + I_{a2}^2 R_{\epsilon} + I_{\epsilon 2}^2 R_4 + I_7^2 R_7, \\ \sum P_{VT} &= I_{\epsilon 2}^2 r_{\text{бн}2} + I_{\text{к}2}^2 r_{\text{кн}2} + I_{\epsilon 3}^2 r_{\text{бн}3} + I_{\text{к}3}^2 r_{\text{кн}3}, \\ \sum P_{VD} &= I_{\text{ст.мін}}^2 r_{\text{ст}}. \end{aligned} \quad (43)$$

Коефіцієнт корисної дії регулятора напруги визначається відношенням корисної потужності, що витрачається на створення магнітного потоку обмоткою збудження, до загальної потужності, яка потребується

$$\eta_{\text{PH}} = \frac{P_3}{(P_3 + \Delta P_{\text{пер}})} \cdot 100\%. \quad (44)$$

В разі синтезу схеми в ППП (варіант А) вихідну потужність обмотки збудження та потужність, що споживається, визначають шляхом віртуального експерименту на схемі імітаційної моделі (рис. 13).

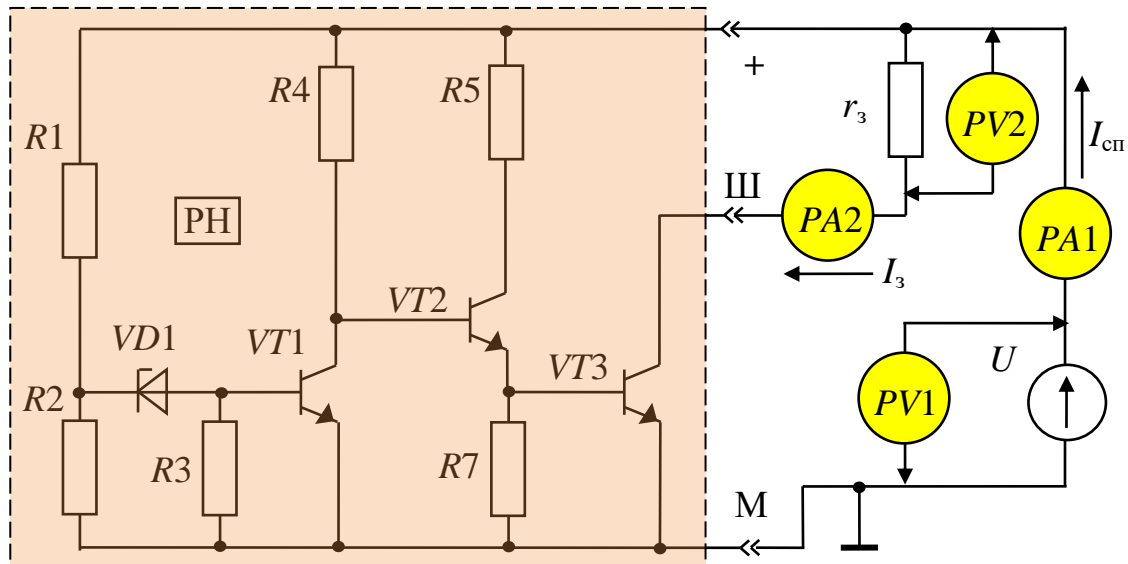


Рисунок 13 – Схема вимірювання потужностей

Згідно наведеної схеми, потужність розраховується через пока-

зання вимірювальних приладів

$$\eta_{\text{рн}} = \frac{P_3}{P_{\text{сп}}} = \frac{I_3 U_3}{I_{\text{сп}} U_{\text{сп}}} = \frac{I_{PA2} U_{PV2}}{I_{PA1} U_{PV1}} \cdot 100\% . \quad (45)$$

Результати енергетичного розрахунку проаналізувати в підсумковій частині пояснювальної записки проекту.

### СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Бороденко Ю.М. Проектування та розрахунок електрообладнання АТЗ. Навчальний посібник./ Ю.М. Бороденко, С.А. Серіков. Харків: ХНАДУ, 2010. - 444 с.
2. Бороденко Ю.М. Проектування та розрахунок систем електропостачання АТЗ. Навч.-метод. посібник. / Ю.М. Бороденко, С.А. Серіков, О.А. Дзюбенко. Харків: ХНАДУ, 2009. - 150 с.
3. Воробьев Н.И. Проектирование электронных устройств./Н.И. Воробьев. - М.: "Высшая школа". - 1989. - 221с.
4. Поляк Д.Г., Есеновский-Лашко Ю.К. Электроника автомобильных систем управления. / Д.Г. Поляк, Ю.К. Есеновский-Лашко. - М.: "Машиностроение". - 1987. - 200с.
5. Автотракторное электрооборудование и приборы. Галузевий каталог. Частина 1. Генераторные установки. - М.: "НИИАТОПРОМ".- 1986. - 135с.

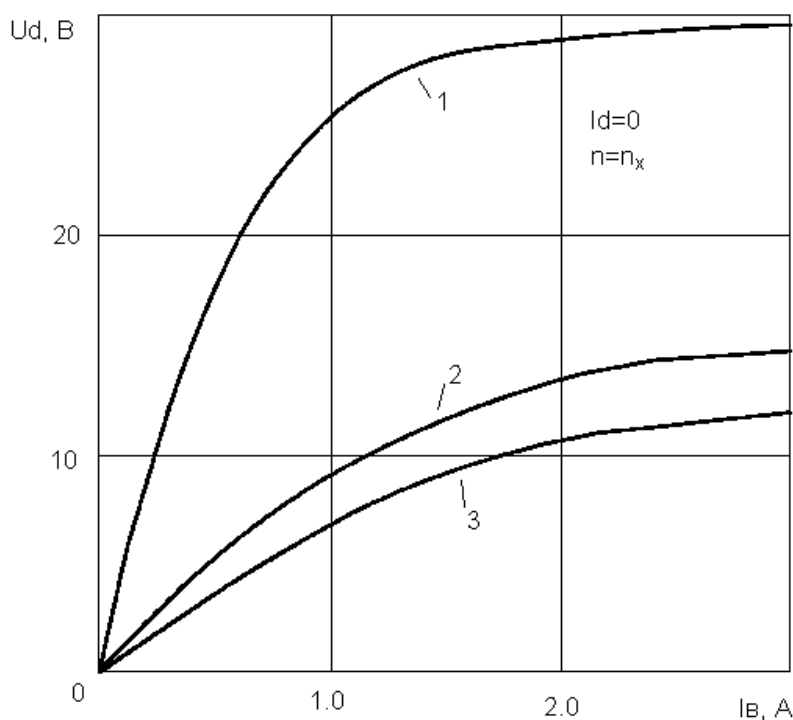


**Довідкові дані по автомобільним  
генераторам**

**Таблиця А.1 – Параметри автотракторних вентильних генераторів індукторного типу**

Параметри	Тип генератора							
	*	**	**	13.	15.	11.	21.	46.
	Г302-Б	Г304	Г305	3701	3701	3701	3701	3701
$U_{гн}, В$	12	12	12	14	14	28	28	14
$I_{гн}, А$	15	20	32	28.6	72	72	54	43
$I_{г.маx}, А$	30	31	42	32	92	95	60	43
$n_x, ХВ.^{-1}$	2000	1500	1550	1500	1250	1500	950	1600
$n_H, ХВ.^{-1}$	4200	2500	3300	3600	4500	3000	5000	4500
$n_{г.маx}, ХВ.^{-1}$	5100	4700	3600	4700	6000	4000	8000	6000
$w_\phi$	84	72	39	82	46	61	88	63
$z/m$	6/3	6/3	6/3	6/3	6/5	6/5	9/7	10/3
$w_3$	570	820	1000	480	510	1350	900	480
$r_3, Ом$	3,4	7,6	7,6	3,6	3,8	16,5	16	3,6
Рис. А.1	3	3	3	2	2	1	1	2

- \* – однонапівперіодна схема випрямлення;  
 \*\* – паралельне з'єднання двох обмоток збудження.



**Рисунок А.1 – Характеристики холостого ходу генераторів індукторного типу**

Таблиця А.2 – Параметри автомобільних генераторів змінного струму з дзюбоподібним ротором

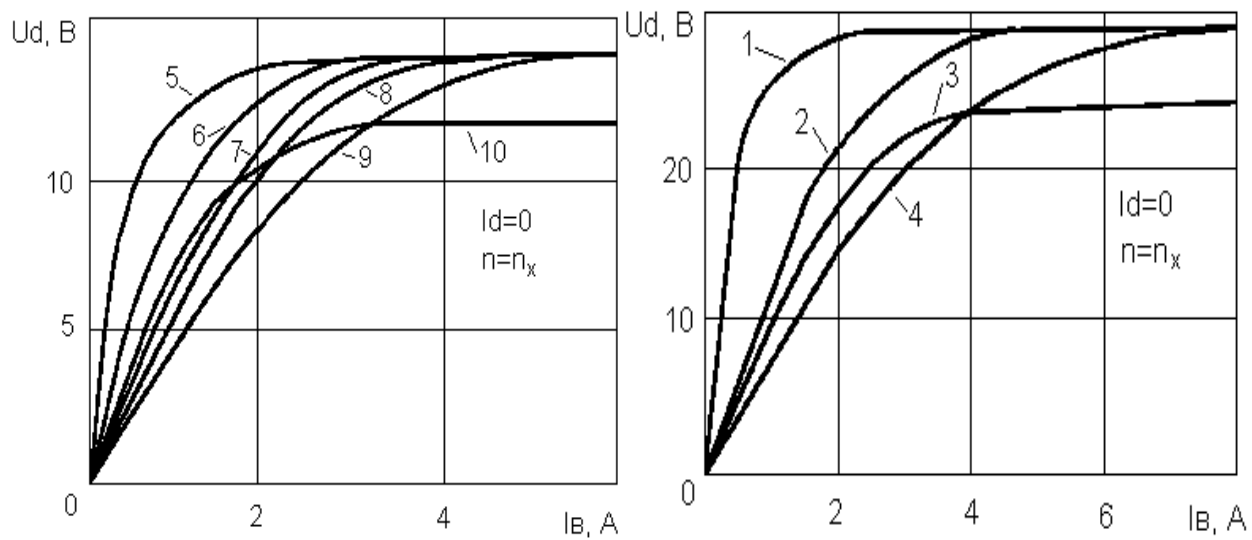
Параметри	Тип генератора					
	Г221	Г250	*Г263	Г272	*Г287	Г288
$U_{гн}, В$	14	12	28	28	14	28
$I_{гн}, А$	35	28	100	20	60	30
$I_{г.маx}, А$	42	38	125	30	90	40
$n_x, хв.^{-1}$	1200	920	1350	1000	850	1200
$n_H, хв.^{-1}$	3000	2000	3000	2050	2000	2100
$w_\phi$	60	78	66	120	48	132
$w_3$	520	535	560	1160	560	1230
$r_3, Ом$	4,3	3,7	3,4	16,5	3,2	16,7
Рис.А.2	6	10	4	1	8	4

для всіх типів генераторів  $n_{g.маx}=5000 \text{ хв}^{-1}$ ;  $m=3$ ;  $P=6$ ; \* –  $P=3$ .

Таблиця А.3 – Параметри автомобільних генераторів змінного струму з дзюбоподібним ротором

Параметри	Тип генератора					
	Г290	Г290-В	Г502-А	16.3701	32.3701	38.3701
$U_{гн}, В$	24	28	14	14	14	14
$I_{гн}, А$	150	100	20	45	40	60
$I_{гмаx}, А$	150	150	30	64	55	95
$n_x, хв.^{-1}$	1450	1600	1500	1150	1050	900
$n_H, хв.^{-1}$	2450	2100	3200	2550	2200	1800
$w_\phi$	24	24	84	54	108	78
$w_3$	710	710	680	480	550	511
$r_3, Ом$	7,0	7,0	7,2	2,5	3,7	3,2
Рис.А.2	3	2	5	9	7	7

для всіх типів генераторів  $n_{g.маx}=5000 \text{ хв}^{-1}$ ;  $m=3$ ;  $P=6$ .



**Рисунок А.2 – Характеристики неробочого ходу генераторів з дзьобоподібним ротором**

**Довідкові дані по напівпровідниковим при-  
ладам**

**Таблиця Б.1 – Параметри транзисторів закордонного виробництва (варіант А)**

Тип транзистора ( <i>n-p-n</i> )	Параметри			Тип транзистора ( <i>p-n-p</i> )	Параметри		
	$U_{к.маx}$ , (В)	$I_{к.маx}$ , (А)	$\beta_{ст}$		$U_{к.маx}$ , (В)	$I_{к.маx}$ , (А)	$\beta_{ст}$
BC107	120	0,12	100	BC178	90	0,1	30
2N3011	60	0,095	50	BCY71	120	0,1	60
2N3605	70	0,095	15	2N2894A	60	0,3	65
2N4401	110	0,25	25	2N3250A	60	0,3	15
2N5179	60	0,4	20	BC327	120	0,35	8
2N4141	100	0,3	15	2N2907	110	0,5	10
BC367	80	1,5	50	BC636	120	0,5	7
BC141-10	140	0,5	30	2N3467	110	1,3	20
BLV10	70	2,9	12	D41D1	100	1,6	25
BLV30	100	3,0	18	BC369	80	3,0	9
BLV21	100	4,4	22	BDX78	160	5,0	19
2N1711	50	0,5	20	2N3251	40	0,2	30
2N2218	30	0,5	20	2N3485	40	0,6	40
2N2218A	40	0,8	30	2N3494	80	0,1	35
2N2369	15	0,2	20	2N3634	140	1,0	25
2N3707	30	0,3	100	2N3635	140	1,0	50
2N3858A	60	0,3	45	2N3702	25	0,5	60
2N3903	40	0,2	15	2N3703	30	0,5	30
2N4014	40	1,0	20	2N3792	80	10,0	30
2N4400	40	0,6	20	2N3905	40	0,2	15
2N5058	300	0,15	10	2N3906	40	0,2	30
2N5088	30	0,1	100	2N4058	30	0,02	100
2N5191	60	4,0	10	EP2015ACN	40	0,05	75
Транзистори Дарлінгтона ( <i>n-p-n</i> )				Транзистори Дарлінгтона ( <i>p-n-p</i> )			
2N6038	60	4,0	100	FZT705	120	4,0	3000
2N6351	150	5,0	200	MJD117	100	2,0	200
25D947	40	2,0	1000	MJD127	100	5,0	1000
BC372	100	1,0	1000	TIP105	60	8,0	200
MJ122	100	8,0	100	ZTX704	100	1,0	3000

Таблиця Б.2 – Параметри транзисторів вітчизняного виробництва  
(варіант В)

Тип тран- зистора	$U_{к.мах}, В$	$I_{к.мах}, А$	$U_{к.н}, В$	$I_{к.н}, А$	$U_{б.н}, В$	$I_{б.н}, А$	$U_{60}, В$	$\beta_{ст}$
<i>n-p-n</i>								
КТ3102	50	0,1	0,1	0,01	0,9	0,001	0,54	10
КТ342А	30	0,05	0,1	0,01	0,9	0,001	0,6	10
КТ315Б	20	0,1	0,4	0,02	1,1	0,002	0,62	10
КТ619А	250	0,1	0,3	0,15	1,1	0,01	0,9	15
КТ604	250	0,2	2,4	0,18	2,6	0,015	0,7	13
КТ608Б	60	0,4	1,0	0,4	2,0	0,08	0,6	5
ГТ323	20	0,5	1,5	0,5	2,0	0,05	0,75	10
П701	40	0,5	2,4	0,5	2,6	0,05	0,75	10
КТ630А	120	1,0	0,3	0,15	1,1	0,015	0,8	10
КТ815В	70	1,5	0,6	0,5	1,2	0,05	0,95	10
П702	60	2,0	2,5	1,0	2,5	0,2	0,75	10
КТ801А	80	2,0	2,0	1,0	2,0	0,2	0,75	10
КТ817В	60	3,0	0,6	1,0	1,5	0,1	1,05	10
КТ805В	160	5,0	2,5	5,0	2,5	0,5	0,7	10
КТ803А	60	10	2,5	5,0	4,0	1,0	1,2	5
КТ827А*	100	20	2,4	20	3,0	0,2	1,5	200
КТ829А*	100	8,0	2,0	3,5	2,5	0,014	1,5	250
<i>p-n-p</i>								
КТ3107К	30	0,1	0,5	0,1	1,0	0,005	0,65	20
КТ3107Б	50	0,1	0,5	0,1	1,0	0,005	0,7	20
КТ361Б	20	0,05	0,3	0,02	0,85	0,002	0,69	10
КТ345Б	20	0,2	0,3	0,1	1,1	0,01	0,75	10
КТ503А	40	0,15	0,6	0,01	1,2	0,001	0,82	10
КТ502А	40	0,15	0,6	0,01	1,2	0,001	0,8	10
КТ501Б	15	0,3	0,4	0,3	1,5	0,06	0,72	5
КТ209Б	15	0,3	0,4	0,3	1,5	0,03	0,65	10
ГТ403В	45	1,25	0,8	0,5	0,8	0,05	0,75	10
КТ814В	70	1,5	0,6	0,5	1,2	0,05	0,5	10
КТ816В	60	3,0	1,0	3,0	1,5	0,3	0,85	10
П214А	50	5,0	0,9	3,0	1,0	0,3	0,75	10
КТ837Д	45	7,5	0,9	3,0	1,5	0,37	0,82	8
КТ825Д*	60	20	2,0	10	3,0	0,04	1,5	250

\* -Транзистори Дарлінгтона

**Таблиця Б.3 – Параметри стабілітронів закордонного виробництва  
(варіант А)**

Тип стабілітронів	Значення параметрів			Тип стабілітронів	Значення параметрів		
	$U_{ст}, В$	$I_{ст}, мА$	$r_{ст}, Ом$		$U_{ст}, В$	$I_{ст}, мА$	$r_{ст}, Ом$
1N753	6,0	8/40	5,7	1N756	8,0	10/40	6,7
ZPD62	6,2	5/80	10,0	ZPD12	12,0	5/42	20,0
1N3785	6,6	24/110	2,2	1N4736	6,7	24/74	2,8
1N4737	7,4	23/68	3,23	1N4742	11,8	14/42	7,7
ZPD68	6,8	5/73	8,0	ZPD13	13,0	5/38	25,0
1N4743	12,8	15/38	8,6	1N4744	14,8	13/34	12,4
ZPD75	7,5	5/66	7,0	ZPD15	15,0	5/33_	30,0

в числівнику наведені значення мінімального струму стабілізації, в знаменнику – максимального.

**Таблиця Б.4 – Параметри стабілітронів вітчизняного виробництва  
(варіант В)**

Тип стабілітронів	Значення параметрів			Тип стабілітронів	Значення параметрів		
	$U_{ст}, В$	$I_{ст}, мА$	$r_{ст}, Ом$		$U_{ст}, В$	$I_{ст}, мА$	$r_{ст}, Ом$
Д814А	8,0	3,0 / 40	6,0	КС210Ж	10	0,5 / 13	40
Д814Б	9,0	3,0 / 36	10	КС211Б	11	5,0 / 33	15
Д814В	10	3,0 / 32	12	КС211В	9,5	5,0 / 33	15
Д814Г	11	3,0 / 29	15	КС211Г	10,5	5,0 / 33	15
Д814Д	13	3,0 / 24	18	КС211Ж	11	0,5 / 12	40
Д818А	9,5	3,0 / 33	25	КС212Ж	12	0,5 / 11	40
Д818Б	8	3,0 / 33	25	КС213Ж	13	0,5 / 10	40
Д818В	8,5	3,0 / 33	25	КС842А	8,2	1,0 / 96	25
Д818Г	9	3,0 / 33	25	КС510А	10	1,0 / 79	25
КС133А	3,3	3,0 / 81	65	КС512А	12	1,0 / 67	25
КС147А	4,7	3,0 / 58	56	КС515А	15	1,0 / 53	25
КС156А	5,6	3,0 / 55	46	КС522А	22	1,0 / 37	25
КС168А	6,8	3,0 / 45	28	КС162А	6,2	3,0 / 22	35
КС175Ж	7,5	0,5 / 17	40	КС168В	6,8	3,0 / 20	28
КС182Ж	8,2	0,5 / 15	40	КС175А	7,5	3,0 / 18	16
КС191Ж	9,1	0,5 / 14	40	КС182А	8,2	3,0 / 17	14
КС213Б	13	3,0 / 10	25	КС191А	9,1	3,0 / 15	18
КС170А	7	3,0 / 20	20	КС210Б	10	3,0 / 14	22

в числівнику наведені значення мінімального струму стабілізації, в знаменнику максимального.



**Таблиця Б.5 – Параметри діодів закордонного виробництва  
(варіант А)**

Тип діоду	Значення параметрів		Тип діоду	Значення параметрів	
	$U_{зв}$ , В	$I_{пр}$ , мА		$U_{зв}$ , В	$I_{пр}$ , мА
1N3492	100	0,1	1N3881	200	0,3
1N3903	400	1,0	1N3493	200	1,0
1N4005	600	1,5	1N4006	800	3,0
1N5404	250	2,0	1N3889	50	0,5

**Таблиця Б.6 – Параметри діодів вітчизняного виробництва  
(варіант В)**

Тип діоду	Значення параметрів			Тип діоду	Значення параметрів		
	$U_{зв}$ , В	$U_{пр}$ , В	$I_{пр}$ , мА		$U_{зв}$ , В	$U_{пр}$ , В	$I_{пр}$ , мА
Д245	300	1,25	10	КД202Д	200	1,0	5,0
КД208А	100	1,0	1,5	КД212А	200	1,0	1,0
КД213А	200	1,0	10	КД105Б	300	1,0	0,3
КД209А	400	1,0	0,7	КД229А	200	1,0	0,4
КД229Ж	100	1,0	0,7	КД106А	100	1,0	0,3
КД102А	250	1,0	0,1	КД103А	50	1,0	0,1
КД503А	30	1,0	0,02	КД509А	50	1,1	0,1

**Зразки оформлення пояснювальної  
записки та графічного матеріалу**

Міністерство освіти і науки України  
ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ АВТОМОБІЛЬНО-ДОРОЖНИЙ  
УНІВЕРСИТЕТ

Автомобільний факультет  
Кафедра автомобільної електроніки

## ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА

до курсового проекту  
з дисципліни: Проектування електрообладнання АТЗ  
на тему: Розрахунок електронного регулятора напруги

Перевірив к.ф.-м.н., доц.  
Виконав ст. гр. АЕз-51

Ю. Бороденко  
С. Степанюк

2018

# ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ АВТОМОБІЛЬНО-ДОРОЖНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет Автомобільний Кафедра автомобільної електроніки  
Напрям підготовки – 141 Електротехніка, електроенергетика та електромеханіка

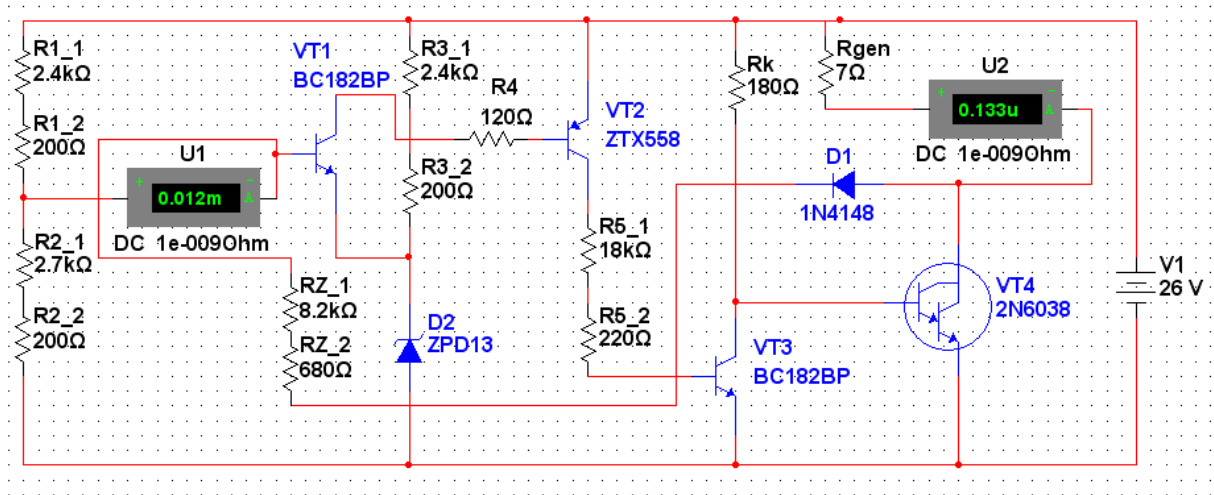
## ЗАТВЕРДЖУЮ:

Зав. кафедрою АЕ  
Проф. Бажинов О.В.  
" \_\_\_\_\_ " \_\_\_\_\_ 2018 р.

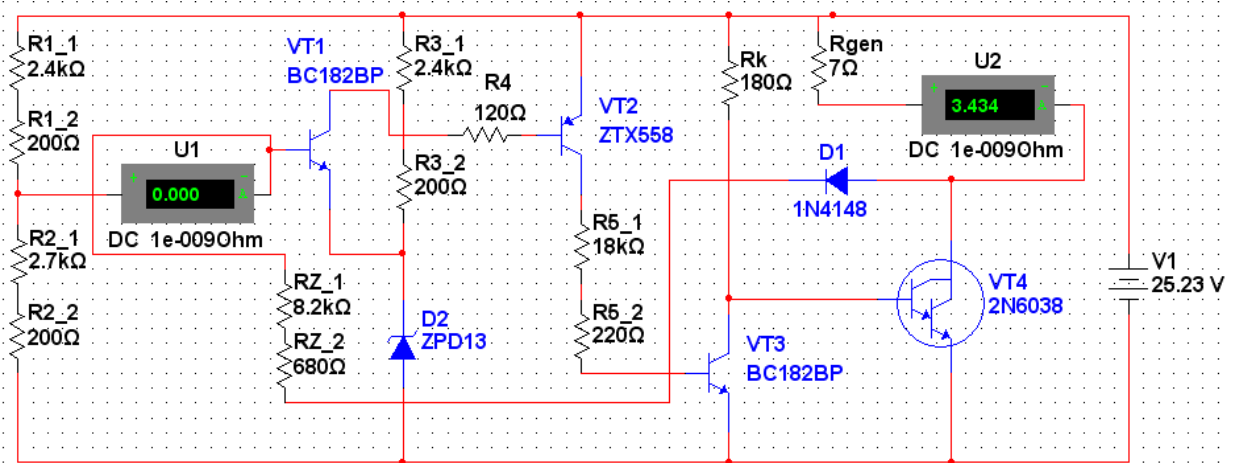
## ЗАВДАННЯ на курсовий проект студентів

Степанюку Сергію Михайловичу

1. Тема проекту Проектування та розрахунок електронного регулятора напруги
2. Термін здачі студентом закінченого проекту 15 жовтня 2018 р.
3. Вихідні дані до проекту:
  - 3.1 рівень напруги що регулюється  $U_{\text{рн}} = 13,8\text{В}$ ;
  - 3.2 номінальний струм навантаження генераторної установки  $I_{\text{н}} = 40\text{ А}$  ;
  - 3.3 максимальне значення струму навантаження  $I_{\text{max}} = 43\text{ А}$ ;
  - 3.4 мінімальна частота обертання двигуна  $n_{\text{min}} = 160\text{ хв}^{-1}$
  - 3.5 максимальна частота обертання двигуна  $n_{\text{max}} = 6000\text{ хв}^{-1}$ ;
  - 3.6 допустимий рівень пульсації напруги що регулюється  $\Delta U = 5\%$  .
4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки:
  - 4.1 Аналіз початкових даних і визначення параметрів генератора;
  - 4.2 Синтез схеми електричної принципової регулятора напруги;
  - 4.3 Розрахунок елементів схеми регулятора напруги та вибір елементної бази;
  - 4.4 Розрахунок згладжуючих фільтрів;
  - 4.5 Оптимізація параметрів елементів схеми за допомогою машинного моделювання;
  - 4.6 Розрахунок робочих характеристик генераторного пристрою;
  - 4.7 Енергетичний розрахунок регулятора напруги;
5. Висновки.
6. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень):
  - 6.1 Схема визначення параметрів великого сигналу вихідних транзисторів (режими насичення та відсічки);
  - 6.2 Схема визначення параметрів великого сигналу вимірювальної частини (режими насичення та відсічки);
  - 6.3 Схема регулятора напруги в динамічному режимі;
  - 6.4 Результати моделювання роботи регулятора напруги (осцилограми колекторної напруги вихідних транзисторів);
  - 6.5 Графіки залежностей  $U_{\text{cp}} = f(n)$ ;  $\gamma = f(n)$ ;  $I_3 = f(n)$ ;  $f = f(n)$  .



a



б

Рисунок В.1 – Моделювання схеми регулятора у статичних режимах: а - при напрузі спрацьовування; б – при напрузі повернення

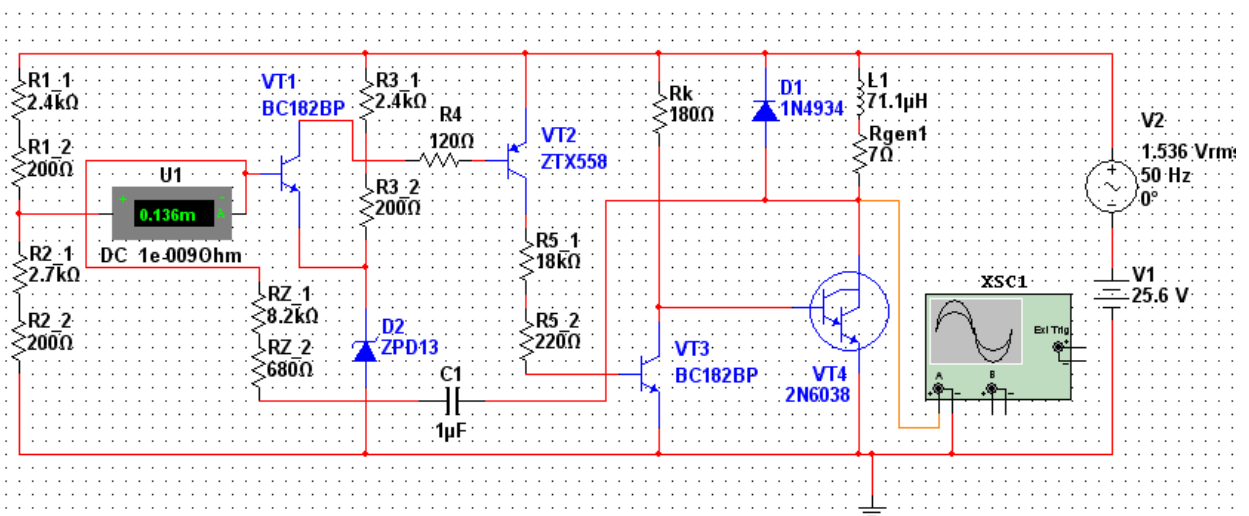
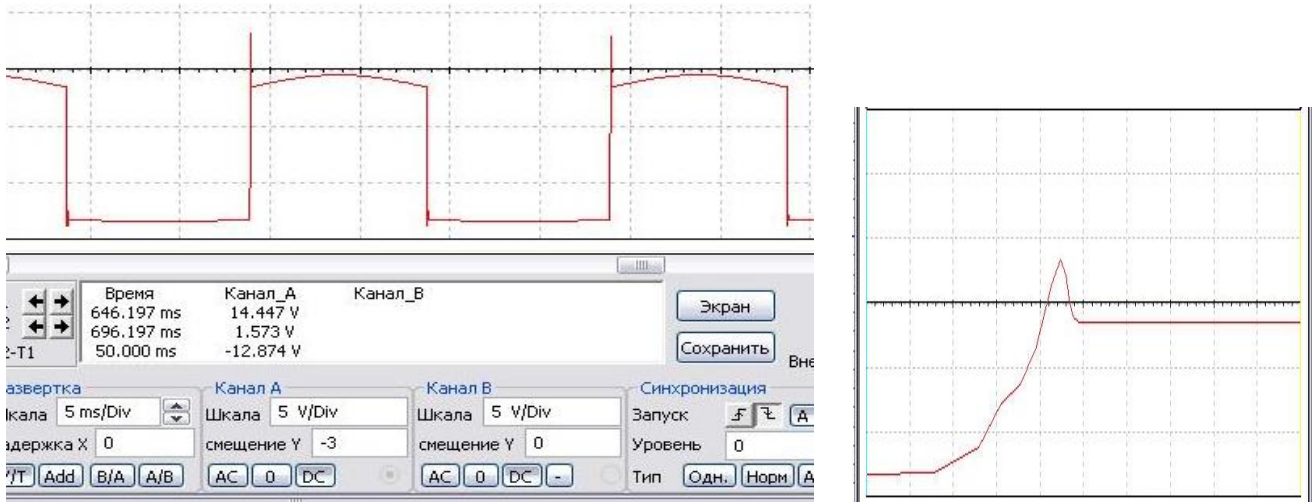
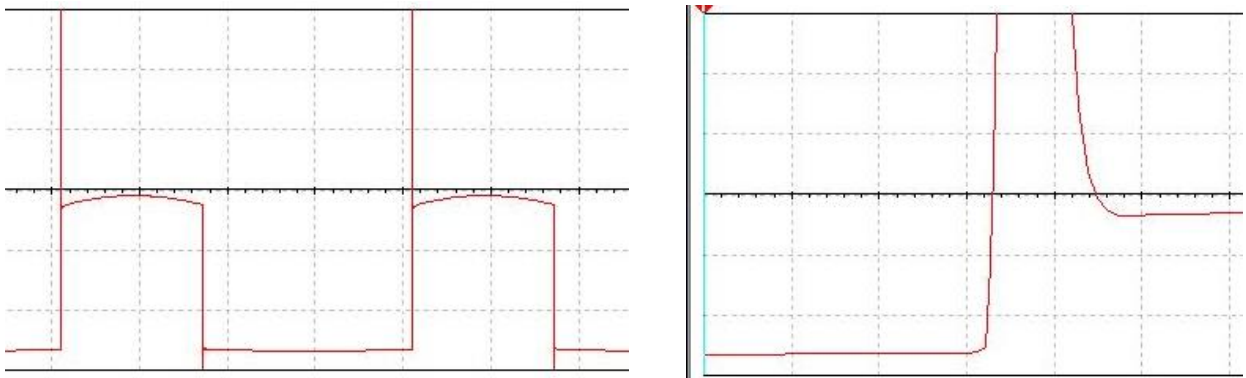


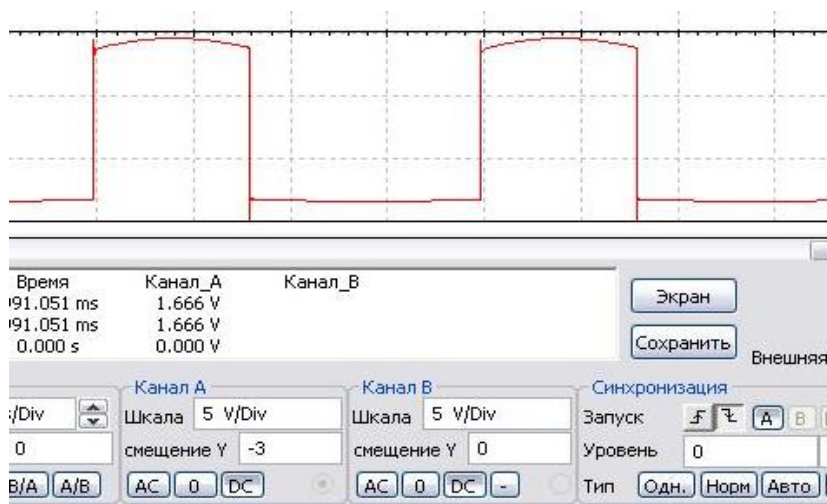
Рисунок В.2 – Моделювання схеми регулятора у динамічному режимі



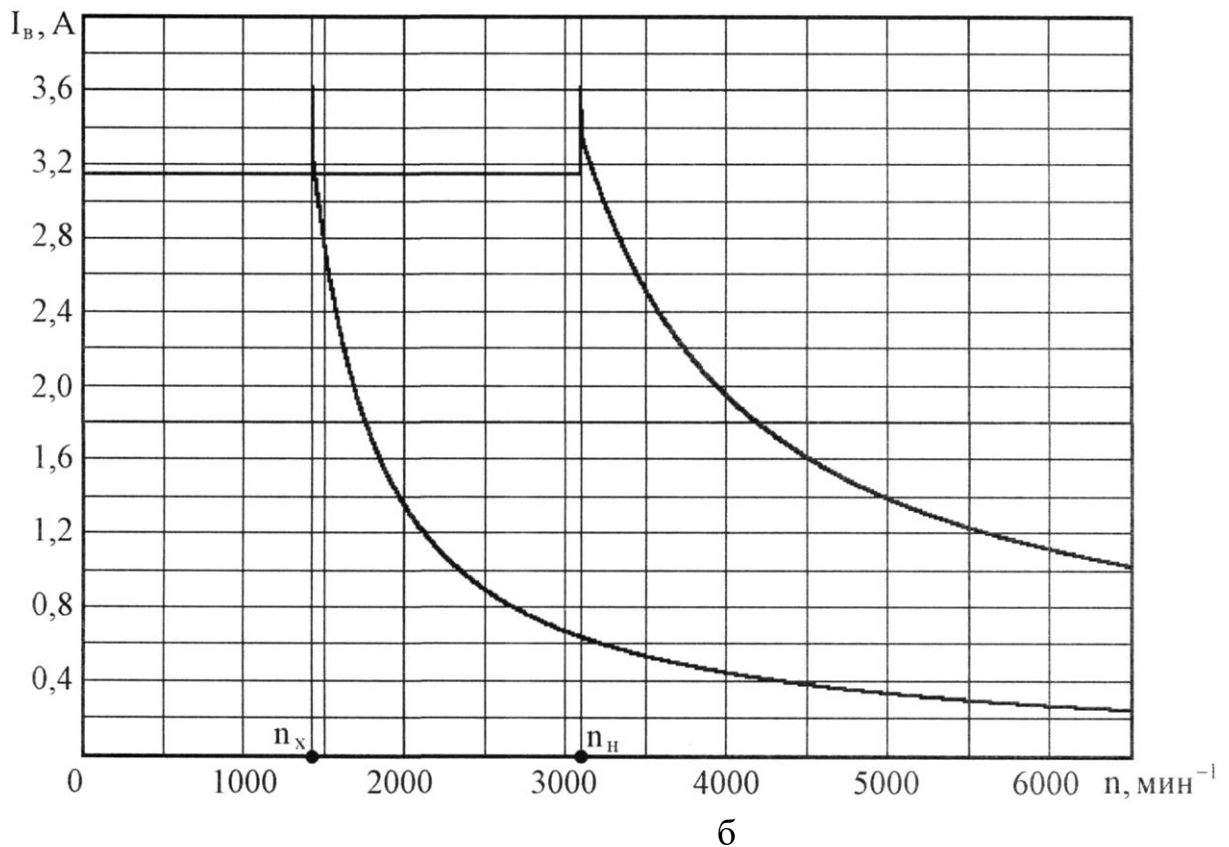
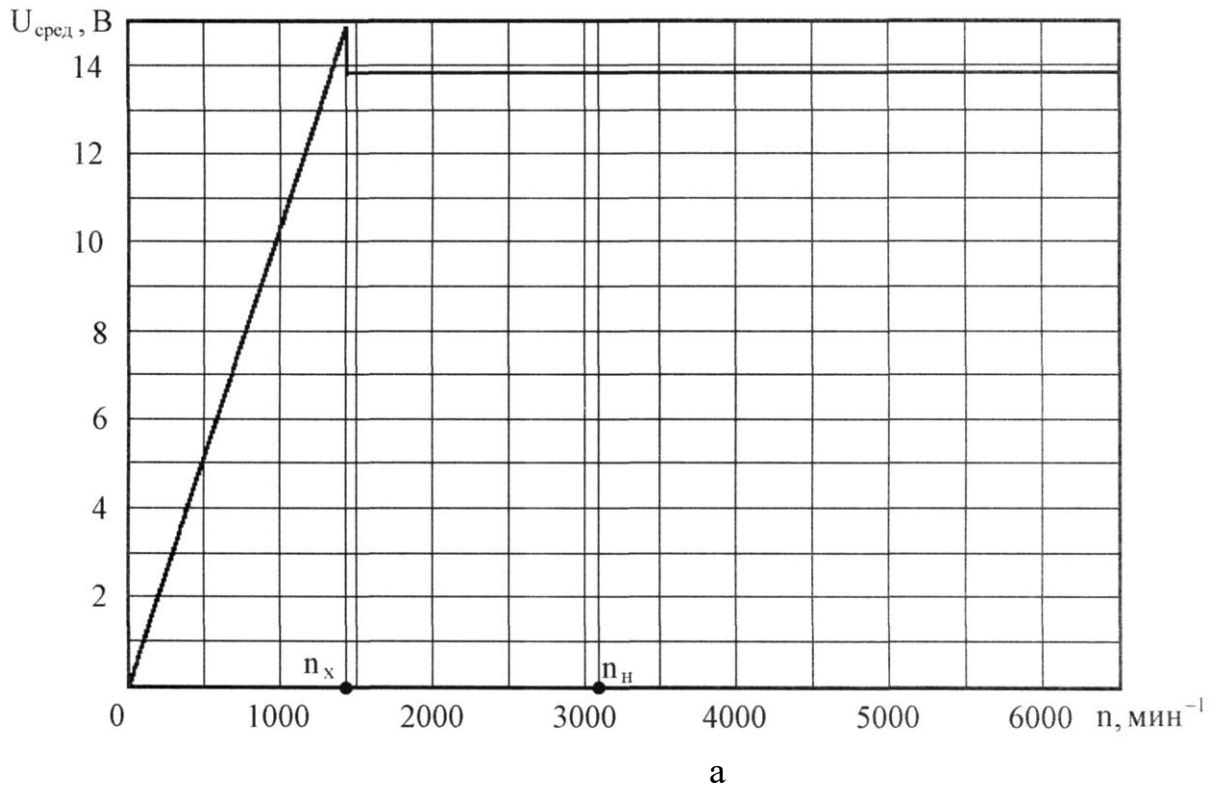
**Рисунок В.3 – Результати моделювання динамічного режиму схеми РН без кола зворотного зв'язку**



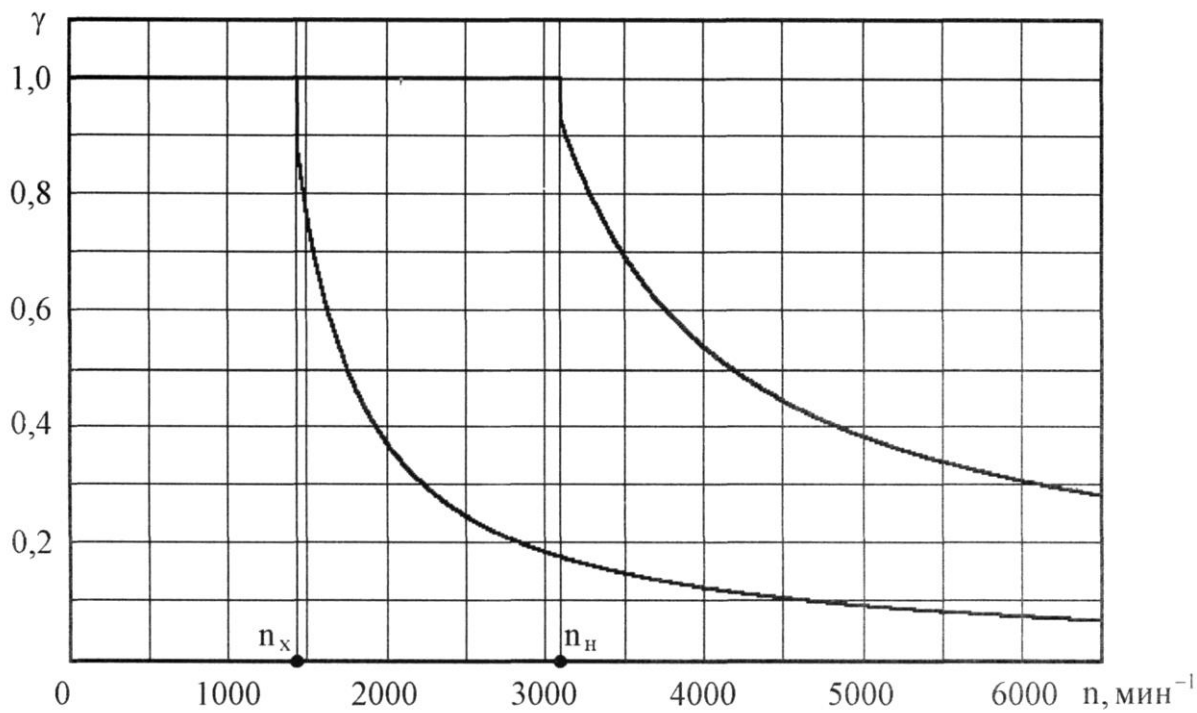
**Рисунок В.4 – Результати моделювання динамічного режиму схеми РН зі зворотним зв'язком**



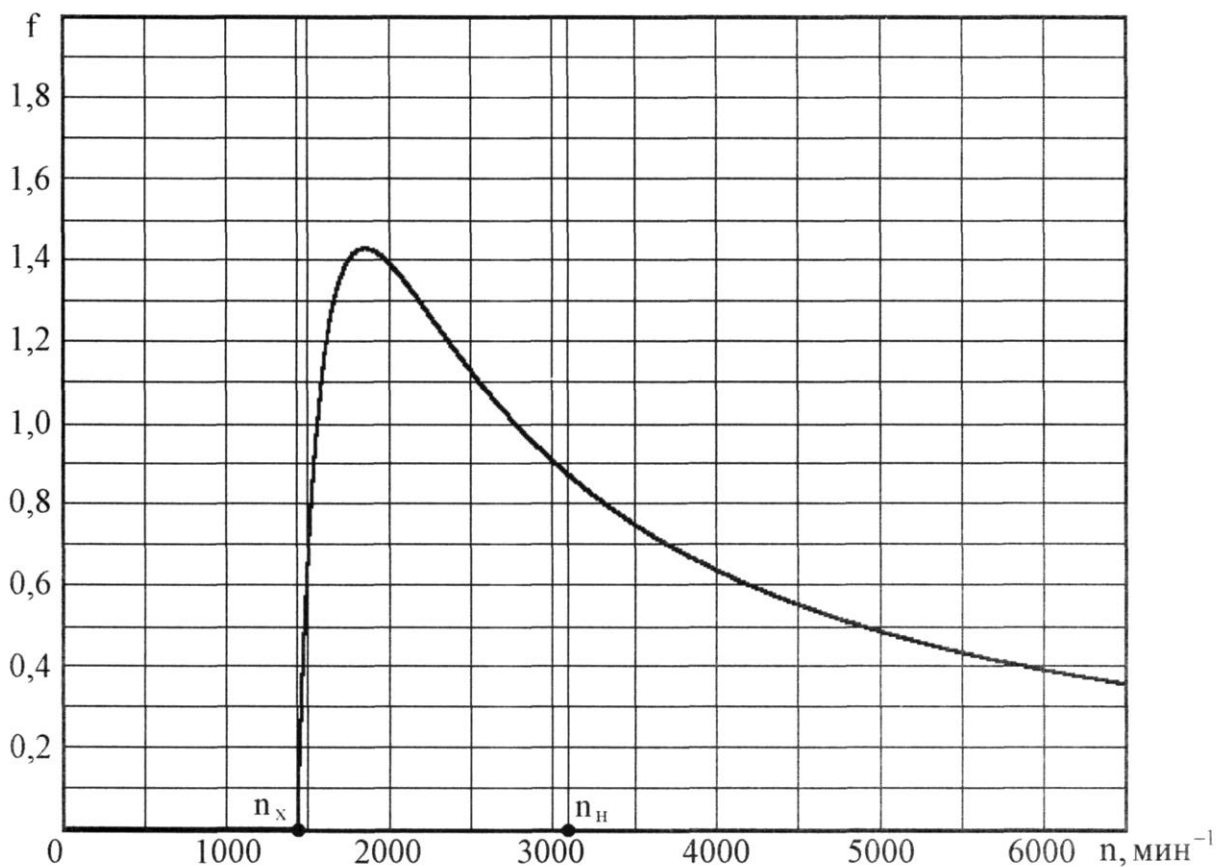
**Рисунок В.5 – Результати моделювання динамічного режиму схеми РН зі зворотним зв'язком та захисним діодом**



**Рисунок В.6 – Робочі характеристики генераторної установки:  
 а – підтримка середнього значення напруги; б – зміна середнього значення  
 струму збудження в робочому діапазоні частоти обертання**



а



б

**Рисунок В.7 – Частотно-швидкісні характеристики генераторної установки:  
а – зміна шпаруватості імпульсів струму збудження; б – зміна частоти  
перемикання кола збудження**