

Розділ 3. АНАЛІЗ ТА СИНТЕЗ СИСТЕМ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ АТЗ

3.1. Аналіз технічних рішень бортових систем електропостачання

3.1.1. Загальні відомості

Система бортового електропостачання забезпечує живлення енергією електричних споживачів, які функціонують на борту транспортного засобу під час його експлуатації. До складу системи входять: генератор, регулятор напруги, електрична мережа, засоби комутації, захисту і контролю (реле, запобіжники, сигналізатори, амперметри, вольтметри).

Більшість споживачів борта живляться від пониженої напруги постійного струму (12В, 24В) по однопровідній схемі підключення. Це дозволяє удвічі зменшити обсяг мережі живлення (витрати проводів) та спростити монтаж електрообладнання. Однак, монтаж за однопровідною схемою підвищує ймовірність коротких замкнень в мережі при експлуатації транспортного засобу.

Використання пониженої напруги борта обумовлено електробезпекою водія. Однак забезпечення необхідної потужності в мережі живлення при мінімізації витрат на мідь (зниження діаметру проводів) досягають за рахунок підвищення напруги борта. Крім того, окремі споживачі додаткових електричних систем та енергетичних установок автомобіля живляться від підвищеної напруги. Щоб поєднати такі протилежні вимоги застосовують вторинні джерела напруги (нерезидентне живлення). Як первинні джерела напруги (резидентне живлення) в такому разі розглядаються АКБ або генераторна установка з номінальною напругою борта.

При працюючому ДВЗ основним джерелом напруги є генераторна установка яка забезпечує потужність необхідну для функціонування основних систем електрообладнання в робочому діапазоні частот обертання двигуна. Тому передаточне співвідношення шківів приводу генератора від ДВЗ обирається таким, щоб на обертах холостого ходу ДВЗ напруга генератора досягала номінальних значень.

Якість напруги, що виробляється генераторною установкою оцінюється рівнем пульсацій які виникають при випрямленні напруги генераторів змінного струму та при дискретному регулюванні струму збудження. Додатково проводиться аналіз кодуктивних перешкод які утворюються по колах живлення при перехідних електричних процесах в реактивних навантаженнях.

При дискретному регулюванні середнього значення струму збудження, миттєве значення напруги генератора періодично змінюється від рівня напруги спрацьовування до рівня напруги повернення. Вимоги до бортової системи електропостачання з позицій якості напруги визначаються якісним складом споживачів (електромеханічні, електронні, мікропроцесорні, радіочастотні).

Синтез системи електропостачання зазвичай починають з вибору типу генератора. Потужнісні параметри генератора повинні задовольняти вимогам, що ставляться з боку навантаження (споживачів електроенергії) та узгоджуватися з швидкісними характеристиками ДВЗ. Необхідно також враховувати умови експлуатації за категорією рухливого складу, додаткові вимоги, що ставляться до схеми регулятора напруги. Як вихідні данні для синтезу та розрахунку генераторної установки розглядаються наступні параметри:

- рівень напруги що регулюється U_{PH} , виходячи з номінальної напруги АКБ та напруги живлення споживачів;

- номінальний струм навантаження генераторної установки I_H , виходячи з переліку, потужності та режимів роботи основних споживачів борта;

- максимальне значення струму навантаження I_{max} , виходячи з потужності всіх споживачів борта (окрім стартера), що можуть працювати одночасно на максимальній швидкості обертання ДВЗ;

- мінімальна n_{min} та максимальна n_{max} частоти обертання двигуна, які визначаються швидкісними характеристиками ДВЗ;

- допустимий рівень пульсації напруги що регулюється ΔU , виходячи з якісного складу споживачів.

3.1.2. Структурний аналіз та критерії вибору автотракторних генераторів

Автотракторні генератори можна класифікувати за кількома ознаками (рис. 3.1.1). Головною ознакою є род напруги, що виробляється (машини постійного та змінного струму). Синхронні генератори змінного струму в порівнянні з машинами постійного струму мають переваги, що пояснюються особливістю їх улаштування.

По-перше, якірна обмотка 2 з якої знімається струм навантаження (десятки ампер) розташована на статорі 1 (стаціонарне підключення), а обмотка збудження 4, на роторі 5 (див. рис. 3.1.2). Струм обмотки збудження (одиниці ампер) подається через контактні кільця 6 за допомогою щіткового вузлу 7 без комутаційних процесів. Завдяки таким особливостям значно розширюється швидкісний діапазон, підвищується надійність та термін експлуатації генераторів змінного струму. Високі допустимі оберти ротору генератора дозволяють застосовувати більші передаточні співвідношення шківів приводу та отримувати віддачу потужності в мережу (при номінальній напрузі) на обертах холостого ходу ДВЗ.

По-друге, синхронні генератори мають більш високу питому потужність (до 150Вт/кг) та відповідно менші масогабаритні параметри при однаковій номінальній потужності.

По-третє, спрощення конструкції (поліпшення технологічності виготовлення) та менші витрати міді обумовлюють невисоку ціну електричної машини змінного струму.

По-четверте, при застосуванні генераторів змінного струму в системі не потрібно передбачати реле зворотного струму (завдяки наявності вмонтованого випрямляча) та реле обмеження максимального значення струму (завдяки властивості самообмеження струму в обмотці якоря).

Слід зауважити, що поряд з означеними недоліками, машини постійного струму мають важливу перевагу – працювати як в режимі генератора так і в режимі двигуна. Така властивість може стати доречною при розробці комбінованих електромеханічних агрегатів концептуальних автомобілів (діностартери, гібридні силові та енергетичні установки).

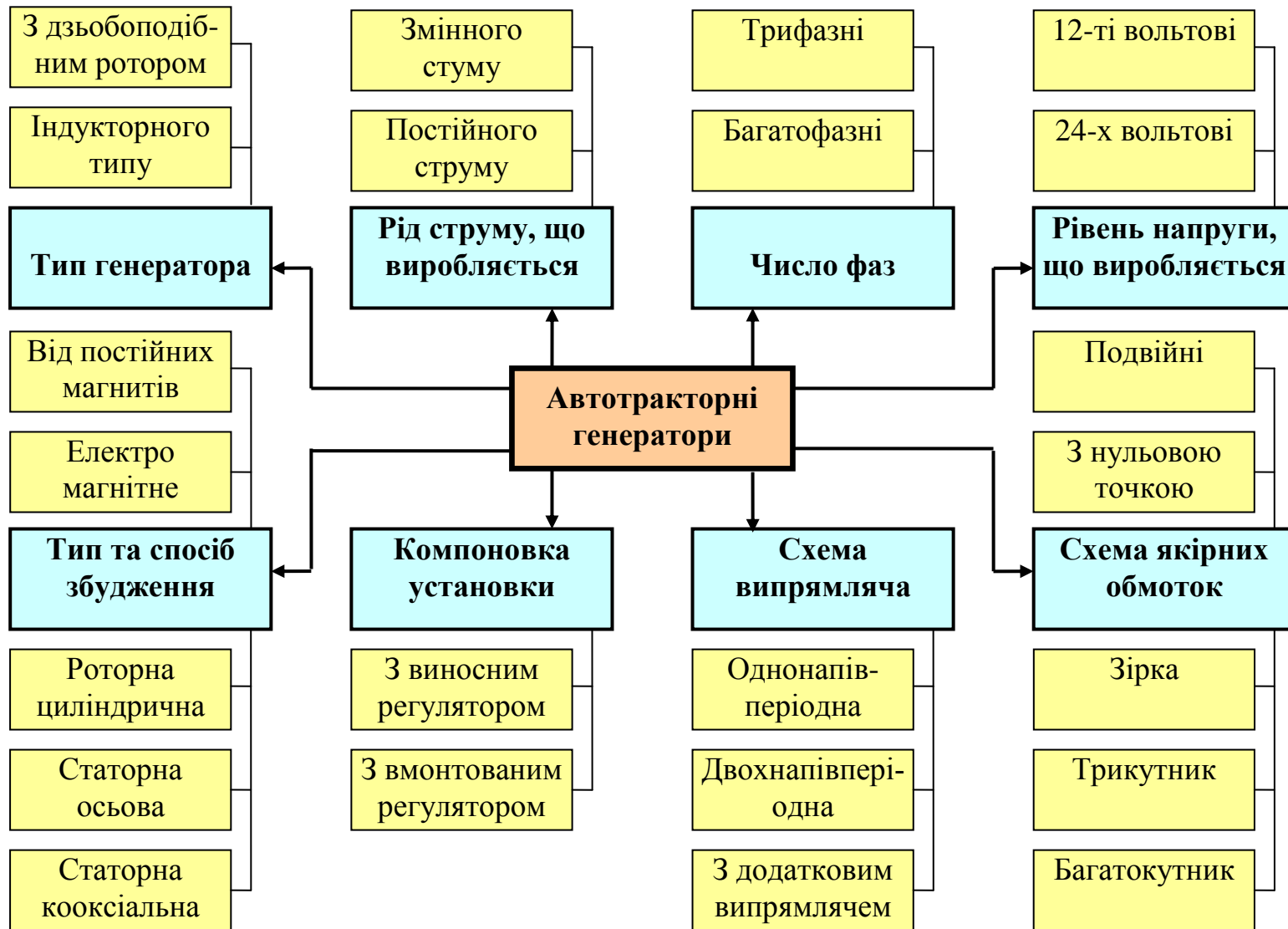


Рис. 3.1.1. Структурна характеристика генераторів

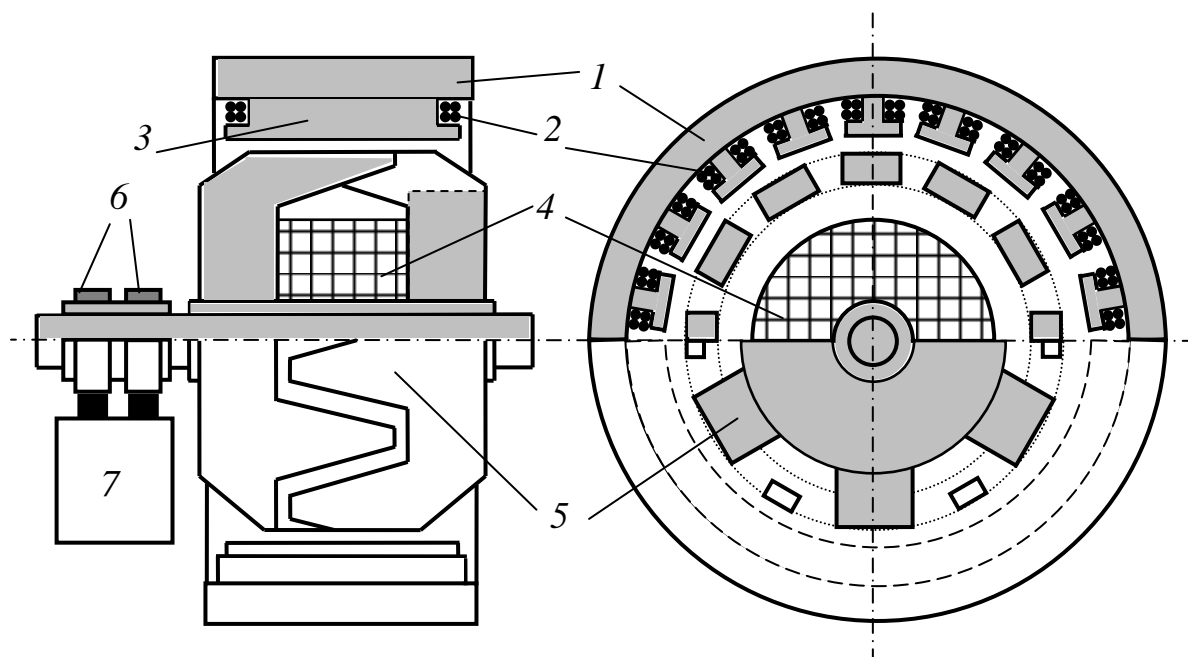


Рис. 3.1.2. Конструкція вентильного генератора з дзьобоподібним ротором

Автотракторні генератори змінного струму різняться за конструкцією магнітної системи і мають вмонтований випрямляч. За принципом побудови автотракторні вентильні генератори поділяють на генератори з дзьобоподібним ротором (контактні) та індукторного типу (безконтактні). Основною відзнакою генератора індукторного типу є те, що обидві обмотки (якірна та збудження) розташовані на статорній частині машини [1, 4, 17, 20].

Магнітна система індуктора безконтактних генераторів будується за двома схемами. В першому варіанті (рис. 3.1.3), обмотка збудження 4 міститься на циліндричній частині дискового кронштейну 6 та з обох боків охоплена полюсами дзьобоподібного ротора 5 який складається з двох половин. Магнітний потік при цьому проходить з полюсів однієї половини ротору на другу (різнойменно-полюсні генератори).

В другому варіанті (рис. 3.1.4), обмотка збудження 4 розташована на втулці 6, що поєднана з кришкою генератора 7. В такій конструкції, магнітний потік в полюсах статору 3 змінюється по величині за рахунок зміни магнітної провідності повітряного зазору при обертанні ротору 5. Відносно полюсів (зубців) ротора потік збудження виникає в однаковому напрямку (однойменно-полюсні генератори). Така конструкція індуктора більш технологічна, але й

більш важка (кришка генератора виготовляється з магнітного матеріалу).

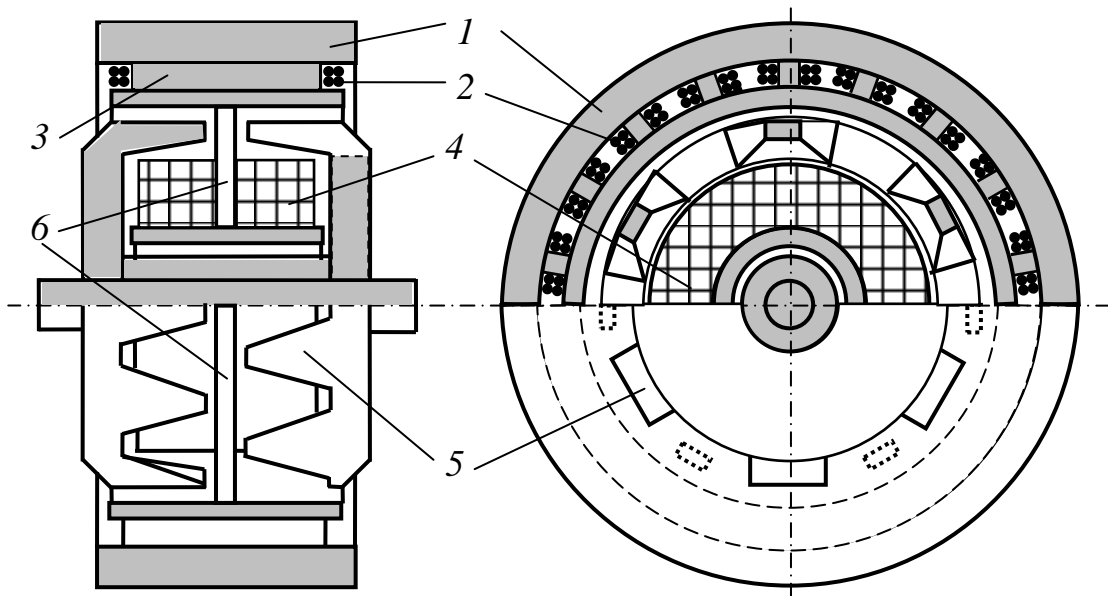


Рис. 3.1.3. Конструкція безконтактного різнойменно-полюсного генератора

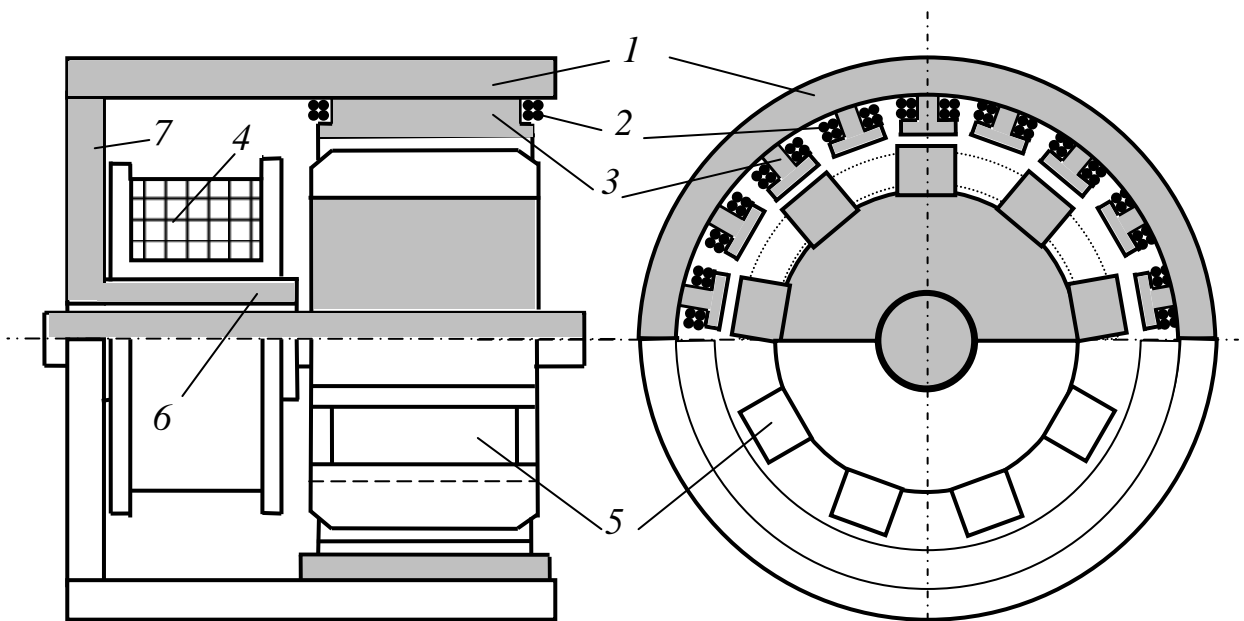


Рис. 3.1.4. Конструкція однойменно-полюсного генератора індукторного типу

Безконтактні генератори індукторного типу практично не потребують технічного обслуговування, мають високу надійність та більший ресурс експлуатації.

Автотракторні генератори промислових зразків мають електромагнітне незалежне збудження. Малопотужні генератори зі збудженням від постійних магнітів можуть застосовуватися на борту тільки при постійній частоті обертання приводного двигуна (трактори, гібридні силові установки).

Використання багатофазних машин з двохнапівперіодними випрямлячами дозволяє підвищити питому потужність та покращити якість напруги автотракторних генераторів.

Трифазні якірні обмотки генераторів змінного струму підключаються за схемою «зірка» або «трикутник». Обмотки багатофазних індукторних генераторів підключаються за схемою «багатокутник».

Підключення за схемою зірки є переважним з позицій отримання достатньої напруги при малих частотах обертання ротору генератора (ДВЗ). Для схеми трикутника фазна напруга дорівнює лінійній, а лінійні струми перевищують фазні в 1,73 рази. Тому при рівній потужності генератора фазні обмотки, що підключені трикутником мають більш тонкий провід (краща технологічність при намотувальних операціях). З цих же міркувань в потужних генераторах застосовують подвійні якірні обмотки, які підключаються паралельно одна до одної.

В трифазних якірних обмотках синхронного генератора включених за схемою «зірки» в нульовому виводі виникають треті гармоніки фазної напруги. Якщо для нульової точки підключити додаткову пару вентилів, то енергію цих гармонік можна додати у мережу системи електропостачання. Потужність, що віддає генератор в такому разі підвищується на 12...15 %.

Номінальна напруга генератора обирається у відповідності до рівня бортової напруги та визначається типом АКБ яка використовується для забезпечення режиму пуску ДВЗ. Іноді застосовується дворівневе живлення від комплекту АКБ. При пуску ДВЗ акумуляторні батареї з'єднуються послідовно на напругу 24В для підвищення потужності стартеру, а після пуску, в робочому режимі – паралельно, для живлення споживачів борта з номінальною напругою 12В. В такому разі генератор обирається у відповідності з номінальною напругою основних споживачів електроенергії.

Обов'язковим елементом бортової системи електропостачання є регулятор напруги який може конструктивно поєднуватись з кор-

пусом генератора. Така компоновка елементів системи отримала назву – генераторна установка. Застосування вбудованих (інтегральних) регуляторів напруги дозволяє підвищити компактність системи та її надійність. Відсутність проводів підключення в установці виключає помилку регулювання та необхідність в обслуговуванні електричних з'єднань.

Швидкісний режим генератору визначається швидкісним режимом ДВЗ та залежить від передаточного співвідношення приводу (діаметрів шківів приводу та генератору) яке для різних АТЗ знаходиться у межах 1,5...2,4. Автотракторні генератори змінного струму з електромагнітним збудженням характеризується такими технічними параметрами.

Максимальна частота обертання $n_{G.max}=5000 \text{ хв}^{-1}$. Визначається механічними обмеженнями та працездатністю щіткового вузлу.

Максимальний струм $I_{G.max}$ який забезпечується на максимальній швидкості обертання при максимальному струмі збудження.

Номинальна напруга $U_{GH}=12(14) \text{ В}, 24(28) \text{ В}$.

Номинальна потужність визначається перемноженням максимальної сили струму на номинальну напругу $P_{GH}=300...4200 \text{ Вт}$.

Номинальний струм $I_{GH}=30...150 \text{ А}$ який забезпечує генератор в розрахунковому режимі (при максимальному співвідношенні P/n).

Оберти холостого ходу $n_{GX}=650...1250 \text{ хв}^{-1}$. Оберти при яких генератор здатен виробляти номинальну напругу без навантаження.

Номинальна частота обертання $n_{GH}=1250...3200 \text{ хв}^{-1}$. Оберти при яких генератор здатен виробляти номинальну напругу під номинальним навантаженням ($I_G=I_{GH}$).

Кількість фаз якірної обмотки $m=3, 5, 7, 9$.

Кількість пар полюсів $p=3, 6$ (для генераторів з дзьобоподібним ротором) або число зубців ротора $z_2=6, 9, 10$ (для генераторів індукторного типу).

Кількість витків фазної обмотки $w_\Phi=39...132$.

Кількість витків обмотки збудження $w_{O3}=480...1350$.

Опір обмотки збудження постійному струму $r_{O3}=2,5...16,7 \text{ Ом}$.

Маса генератора у зборі $g_G=3,2...21,5 \text{ кг}$.

Під час вибору конкретного типу генератора, в першу чергу, звертають увагу на умови експлуатації транспортного засобу. Для шосейних автомобілів, автобусів та вантажівок доцільно застосову-

вати генератори з дзьобоподібним ротором. Для важких умов (кар'єрні самоскиди, трактори, дорожньо-будівельні машини) – безконтактні генератори індукторного типу.

Номінальна потужність генератора обирається виходячи з сумарної потужності споживачів енергії на борту та експлуатаційних навантажувальних і швидкісних режимів. Для автобусів, наприклад, потрібна значна потужність генераторної установки при малих обертах. Для автомобілів з дизельними двигунами обираються більш швидкісні генератори. Далі дотримуються наступних рекомендацій.

Номінальні значення напруги та струму генератора U_{GH} , I_{GH} не повинні відрізнятись від значень напруги, що регулюється U_{PH} та номінального струму навантаження I_H не більш як на 15%. Максимальний струм генератора що обирається повинен бути не менше максимального струму навантаження $I_{max} < I_{G.max}$. Кратність частоти обертання генератора повинна бути не менша за кратність обертання двигуна $n_{G.max}/n_{GX} > n_{max}/n_{min}$. Більш детально генератор аналізується за робочими характеристиками які наводяться в технічному паспорті (швидкісна, холостого ходу, струмо-швидкісна, зовнішня, регулювальна).

В окремих випадках при проектуванні систем електрообладнання доцільно використовувати комбіновані електромашинні пристрої які поєднують елементи системи електропостачання та пуску ДВЗ (діностартери) або запалювання (магнедіно).

3.1.3. Порівняльний аналіз регуляторів напруги

Регулятор напруги (РН) виконує широтно-імпульсне (дискретне) регулювання струму в обмотці збудження генератора з метою підтримання постійного рівня напруги бортової мережі при русі автомобіля (трактора) з різною швидкістю та при коливаннях значень струму, що споживається системою електрообладнання.

Регулятори напруги дискретної дії порівнюють за загальними (ККД, надійність та довговічність, стійкість до вібрацій та агресивного середовища, стабільність характеристики, експлуатаційні витрати на технічне обслуговування, ціна) та специфічними (рівень напруги, що регулюється, рівень пульсацій регулювання, структура

регулювання, падіння напруги на регулюючому елементі, максимальний струм збудження) технічними параметрами.

За принципом побудови регулятори напруги промислових зразків поділяють на контактні-вібраційні, контактні-транзисторні та безконтактні. Основною класифікаційною ознакою для регуляторів є спосіб комутації струму, який визначає конструктивне та схемне рішення пристрою (рис. 3.1.5).

Електромеханічні регулятори не забезпечують необхідну стабільність напруги в бортовій електромережі автомобіля, мають низьку експлуатаційну надійність, термостабільність та вібростійкість. Механічна комутація струму в контактних-вібраційних РН обмежує допустимий струм збудження генератора та швидкісний діапазон регулювання, спричиняє значний рівень пульсацій напруги, що регулюється. Контактні РН потребують періодичного обслуговування (налаштування, очищення контактів), є джерелами радіохвильових перешкод.

Робочі характеристики контактних-вібраційних РН поліпшують різними способами. Застосування двохступеневого регулювання дозволяє знизити розривну потужність контактних пар (підвищити максимальний струм збудження) та розширити швидкісний діапазон регулювання напруги генераторної установки. Введення проти-фазних дроселів в кола збудження знижує рівень імпульсних перенапруг на контактних парах при комутаційних процесах в реактивному навантаженні (підвищується термін служби). Використання від'ємних зворотних зв'язків (резисторів в колі обмотки реле-регулятора) дозволяє прискорити процес комутації (підвищити частоту комутації та знизити рівень пульсації напруги).

Використання транзистору як комутуючого елемента в контактних-транзисторних РН дозволяє значно підвищити допустимий струм збудження та надійність роботи механічних контактів. Вимірювальна частина таких реле-регуляторів також виконана на електромагнітному рівні і тому недоліки пов'язані з дискретністю та точністю регулювання не усуваються. Застосування напівпровідникових приладів в безконтактних РН дозволяє позбутися недоліків пов'язаних з механічною комутацією струму (використання виконавчого транзистору) та електромагнітним вимірюванням напруги (використання стабілітрону).

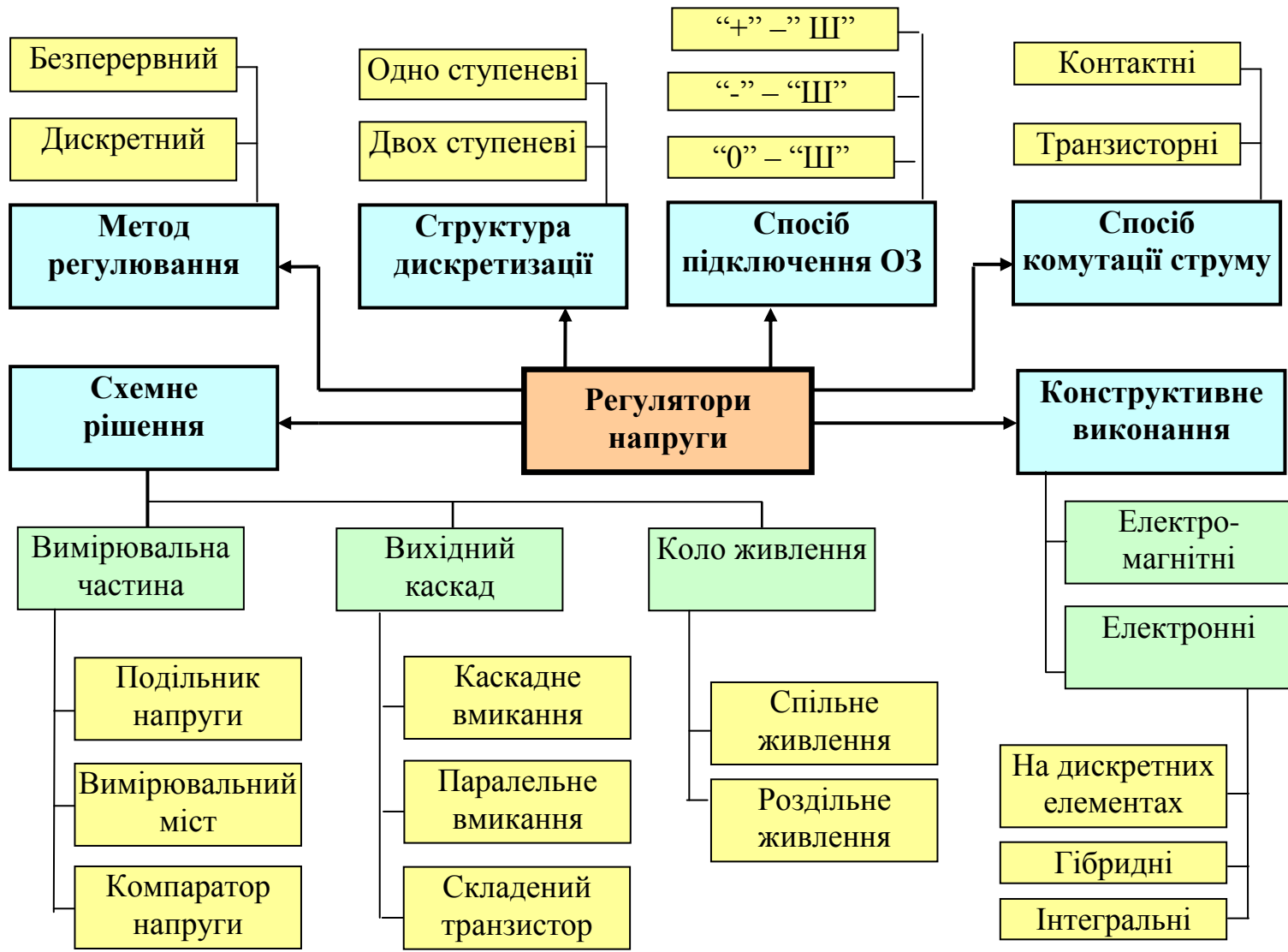


Рис. 3.1.5. Класифікація регуляторів напруги

Швидкодія дискретних транзисторних регуляторів не обмежена явищами електричної, магнітної та механічної інерційності, а строк служби елементів електронної схеми перевищує термін експлуатації транспортного засобу. При цьому електронні РН мають порівняно високий ККД та практично не потребують обслуговування. Термостабільність транзисторних РН забезпечується на електронному рівні шляхом застосування негативних зворотних зв'язків. Надійність електронних РН в експлуатаційних умовах визначається досконалістю схем захисту напівпровідникових приладів при їх функціонуванні в ключових режимах.

Схема електронного регулятора напруги складається з вимірювальної частини та вихідного каскаду. Якщо потрібно, то схему доповнюють підсилюючими каскадами.

При синтезі РН схема вимірювальної частини обирається, виходячи із допустимого значення пульсацій напруги ΔU що виникають при регулюванні. Для регуляторів, які використовуються в системах з електромеханічним обладнанням, застосовують найбільш просту схему з вимірювальним дільником напруги. Якщо використовується електронне обладнання, рекомендується обирати мостову схему з більшою динамічною чутливістю. При жорстких вимогах до якості напруги, використовують більш досконалу схему компаратору.

Транзистори вихідного каскаду можуть включатись за синфазною або протифазною схемами. Паралельне включення виконавчих транзисторів дозволяє знизити опір вихідного каскаду і використувати транзистори меншої потужності. Схема складеного транзистора має високий коефіцієнт передачі струму та є більш економічною у порівнянні з каскадним варіантом. Недоліком такої схеми вихідного каскаду є велике падіння напруги на відкритому складеному транзисторі.

Більшість безконтактних регуляторів промислових зразків мають спільне живлення вимірювальної частини та вихідного каскаду (включаючи коло обмотки збудження) [15]. Напруга на затисках акумулятора і генератора, в такому разі, відрізняється від значення регульованої напруги на величину падіння напруги в колі живлення регулятора. Щоб виключити таку розбіжність, в сучасних регулято-

рах передбачається окремий вимірювальний вивід, що підключається безпосередньо до плюсового затиску акумулятора.

Конструктивно електронні РН будують на базі дискретних елементів як окремі електронні блоки або у вигляді монолітних модулів (мікросхем). Такі модулі розробляються за інтегральною або гібридною технологією та монтуються на корпусі генератора.

3.1.4. Аналіз схемних рішень генераторних установок

Генераторна установка складається з генератора і регулятора напруги та зазвичай являє собою конструктивно закінчений агрегат (регулятор монтується у корпусі генератора) [1].

В генераторах (*GB*) різних типів обмотка збудження (*OZ*) може мати заземлений вивід (рис. 3.1.6, а, г) або обидва ізольовані виводи (рис. 3.1.6, б, в, д, е). Перший варіант передбачає застосування контактно-вібраційних та контактно-транзисторних регуляторів напруги (РН). Другий – розрахований на використання безконтактних РН. Принципово, в обох варіантах, струм збудження можна комутувати за допомогою транзисторних ключів. Щоб виключити розряд АКБ (*GA*) при непрацюючому генераторі, коло обмотки збудження відключається від мережі живлення вимикачем (*BZ*) запалювання (див. рис. 3.1.6, а, б).

Для контролю працездатності генераторної установки, побудованої за схемою (рис. 3.1.6, а), використовується реле (*KV*) контрольної лампи (*HL*), обмотка якого підключена між виводом АКБ і нульовим виводом якірної обмотки. При вмиканні запалювання обмотка підпадає під напругу АКБ і реле вмикає контрольну лампу. Після розгону генератора середнє значення напруги на нульовому виводі наближується до рівня напруги АКБ, обмотка реле знеструмується, контрольна лампа гасне.

В схемі (рис. 3.1.6, в) вимикач запалювання відключає тільки вимірювальне коло РН з роздільним живленням. При цьому коло збудження стає знеструмленим. Таке рішення дозволяє розвантажити контакти вимикача та підвищити їх надійність. Якщо застосовується РН зі спільним живленням, його вимикають дистанційно за допомогою додаткового реле (рис. 3.1.6, г).

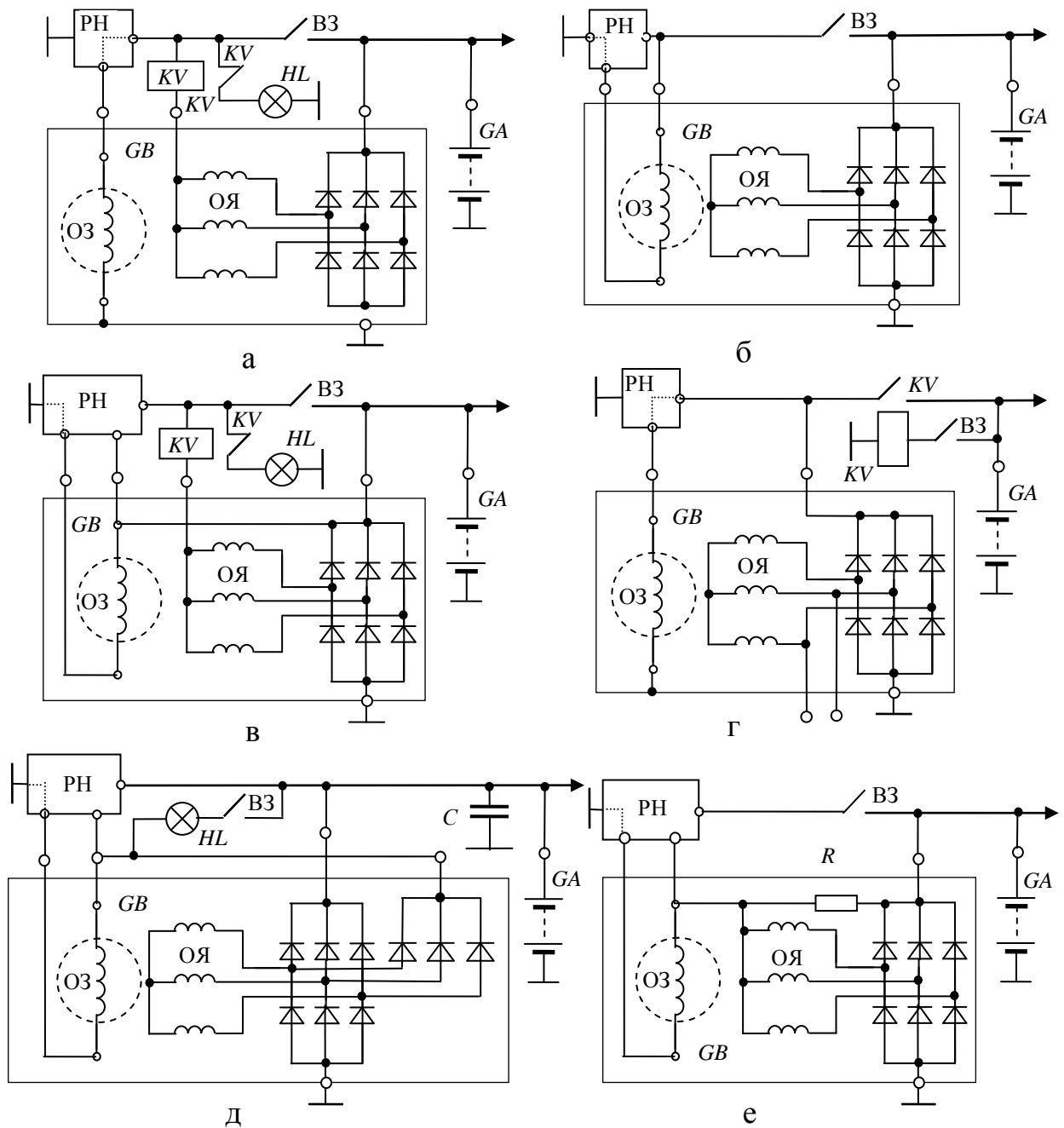


Рис. 3.1.6. Схеми генераторних установок: а – Г221; б – Г266, 17.3701, 29.3701; в – Г222; г – Г502А; д – 37.3701; е – Г273, Г290

В деяких генераторах для живлення обмотки збудження та вимірної частини РН (з роздільним живленням) використовується додатковий випрямляч малої потужності (рис. 3.1.6, д). Щоб розпочати процес збудження генератора від АКБ (на малих обертах генератора) передбачено коло малого струму через лампу *HL*.

Живлення обмотки збудження в генераторних установках з номінальною напругою 28 В доцільно здійснювати від нульової точки якірної обмотки (рис. 3.1.6, е). При цьому, рівень напруги кола збудження та відповідно величина пульсацій випрямлення зменшуються в два рази. Такий підхід дозволяє поліпшити якість регулювання напруги та підвищити надійність роботи напівпровідникових приладів схеми РН. На етапі пуску ДВЗ, коли генератор не виробляє достатньої напруги, живлення кола збудження здійснюється від АКБ через додатковий резистор.

В сучасних системах електрообладнання де використовуються електронні пристрої, генераторна установка має ємнісний фільтр (конденсатор C) для згладжування пульсацій, що утворює випрямляч генератора та імпульсних викидів напруги які викликані перехідними процесами в бортовій мережі живлення [25].