

1. ЗБУДНИКИ БЕЗКОНТАКТНИХ СИНХРОННИХ МАШИН

1.1 Безконтактні системи збудження синхронних машин

Системою збудження синхронної машини (СМ) називається комплекс устаткування, пристроїв, апаратів і збірних одиниць, призначених для збудження автоматично регульованим постійним струмом СМ в нормальних і аварійних режимах.

Деякі терміни та відповідні визначення по системам збудження СМ приведені в таблиці 1.1 [17].

Таблиця 1.1 Терміни та відповідні визначення по системам збудження СМ (ГОСТ 21558-2000)

№ п./п.	Терміни	Визначення
1	Збудник	Пристрій, що є складовою частиною системи збудження та призначений для живлення постійним струмом обмотки збудження СМ і такий, що представляє електричну машину постійного струму, або напівпровідниковий перетворювач в комплексі з джерелом живлення змінного струму
2	Безконтактна система збудження	Система збудження СМ, в якій передача енергії від збудника до обмотки збудження СМ здійснюється без ковазоу чого щіткового контакту
3	Тиристорна система збудження	Система збудження СМ, в якій змінний струм джерела живлення перетворюється в постійний струм збудження СМ тиристорними перетворювачами
4	Діодна система збудження	Система збудження СМ, в якій змінний струм джерела живлення перетворюється в постійний струм збудження СМ діодними перетворювачами
5	Форсировка збудження	Перехід системи збудження в режим видачі максимальної напруги та струму збудження СМ
6	Кратність форсировки збудження по напрузі	Стельова стала напруга системи збудження СМ, виражена в долях номінальної напруги збудження
7	Кратність форсировки збудження по струму	Стельовий струм збудження СМ, виражений в долях номінального струму збудження

В наш час в основному випускаються безконтактні синхронні машини (БСМ) з безконтактною системою збудження (БСЗ). БСЗ – система збудження БСМ, в якій передача енергії від збудника до обмотки збудження СМ здійснюється без ковзаючого щіткового контакту. БСЗ складається зі збудника та пристроїв управління, діагностики та захисту.

Система збудження синхронного генератора (СГ) характеризується основними параметрами: номінальний струм і напруга; граничний струм і напруга при форсировці збудження; тривалість режиму форсировки; швидкість збільшення напруги. Основні вимоги до систем збудження СГ: висока надійність в роботі; можлива велика простота і мала вартість; постійність напруги генератора.

1.2 Класифікація, принципальні схеми та характеристики напівпровідникових перетворювачів

Напівпровідникові перетворювачі класифікуються за ознаками [12]:
за вихідною потужністю – установки малої (одиниці кВт), середньої (десятки кВт), великої потужності (сотні кВт) і надпотужні (більше тисячі кВт);
за кількістю фаз джерела живлення – однофазні, трифазні, багатофазні;
за можливостями регулювання – некеровані та керовані;
за величиною напруги – низької, середньої та високої напруг;
за частотою джерела живлення – промислової, підвищеної (до 1000 Гц) та високої частоти;
за схемами включення вентилів і схемам з'єднання обмоток джерела живлення - нульові, мостові, мосто-нульові, каскадні, полігональні та інші;
за кількістю пульсацій в кривій випрямленої напруги за період частоти живлення – двох -, трьох -, шести -, багатопульсні випрямлячі.

Класифікація перетворювачів може бути проведена і по інших ознаках.

Принципальні схеми напівпровідникових перетворювачів, які застосовуються в системах збудження синхронних машин [1, 2, 3, 6, 12, 14 – 16, 19], показані на рис.1.1.

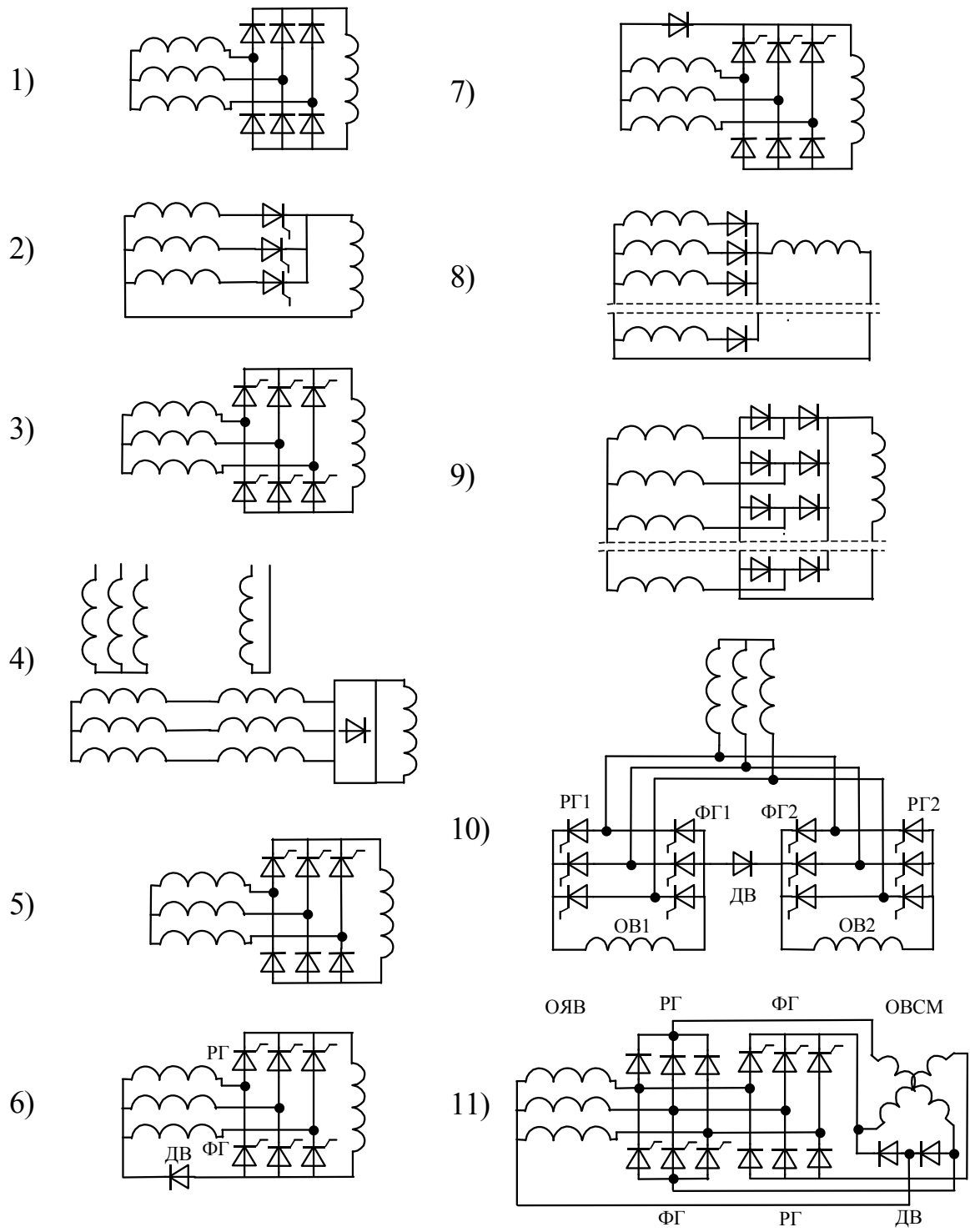


Рис.1.1 – Принципіальні схеми напівпровідникових перетворювачів

У синхронних машинах середньої і великої потужності в основному застосовують трифазні збудники (рис. 1,1, ÷ 1,7). У БСЗ турбогенераторів застосовують трифазні та багатофазні (рис. 1,8, 1,9) напівпровідникові перетворювачі. Багатофазні перетворювачі відрізняються високою якістю форми кривої вихідної напруги. У багатофазному збуднику практично відсутні пульсації випрямленої напруги, знижені перенапруги на елементах схеми і додаткові втрати збудника. Застосування цих перетворювачів перспективне в БСМ середньої і великої потужності.

Трифазна нульова схема перетворювачів використовується в установках малої і середньої потужності. Ця схема є складовим елементом інших, складніших схем (наприклад, шестифазної схеми із зрівняльним реактором).

У перетворювачів з трифазними мостовими схемами застосовуються як паралельне включення вентилів, так і паралельні гілки у фазних обмотках. Число паралельних гілок може бути більше 10.

На рис.1,4 показаний двохмашинний каскад з асинхронним і синхронним збудниками.

На рис.1.5 показаний мостовий напівкерований перетворювач, на рис.1.6 – мосто-нульовий повністю керований випрямляч, на рис.1.7 – мосто-нульовий напівкерований перетворювач.

На рис.1.10 та рис.1.11 показані повністю керовані та напівкеровані каскадні мостові перетворювачі. На схемах: РГ – робоча група тиристорів; ФГ – форсировочна група тиристорів; ДВ – додаткові вентиля (діоди або тиристири). У робочих режимах відключені форсировочні групи тиристорів. Схема перетворення шестипульсна в робочих та форсировочних режимах роботи. Перетворювач по рис.1,11 дозволяє здійснювати форсировку збудження по кожній частині навантаження незалежно.

При розробці напівпровідникових перетворювачів визначаються:

зовнішня характеристика – залежність середнього значення випрямленої напруги від середнього значення випрямленого струму: $U_d = f(I_d)$;

регулювальна характеристика тиристорного перетворювача – залежність середнього значення випрямленої напруги від кута управління: $U_d=f(\alpha_u)$;

напруга та струми первинного і вторинного контурів в режимах номінальному, форсировочному та короткого замикання;

активна і повна розрахункова потужність збудника;

параметри вентилів – середній і діючий струми через вентиль при номінальному навантаженні та можливих перевантаженнях, максимальна зворотна напруга на вентилі, максимальна пряма напруга на тиристорі та інші;

гармонійні склади кривої напруги та струмів перетворювача;

коефіцієнт потужності установки χ ;

коефіцієнт корисної дії η .

1.3 Основні співвідношення ідеальних напівпровідникових перетворювачів

Під ідеальним розуміємо перетворювач, у якого випрямлений струм повністю згладжений, опір джерела змінного струму і опір прямій провідності вентиля рівні нулю, опір зворотній провідності вентиля рівний нескінченності [12, 14 – 16].

На рис.1.2,а показані фазні ЕРС джерела m -фазного напівпровідникового перетворювача. Жирною лінією виділена крива випрямленої напруги нульового перетворювача. Вісь ординат проходить по точці найбільшого миттєвого значення ЕРС 1-ої фази джерела живлення. Напруга навантаження

$$U_{do} = \frac{m}{2\pi} \int_{-\pi/m}^{\pi/m} \sqrt{2} \cdot E_i \cdot \cos\theta \cdot d\theta = \frac{m \cdot \sqrt{2}}{\pi} \cdot E_i \cdot \sin \frac{\pi}{m} .$$

Коефіцієнт зв'язку між випрямленою напругою і діючим значенням фазної ЕРС джерела живлення

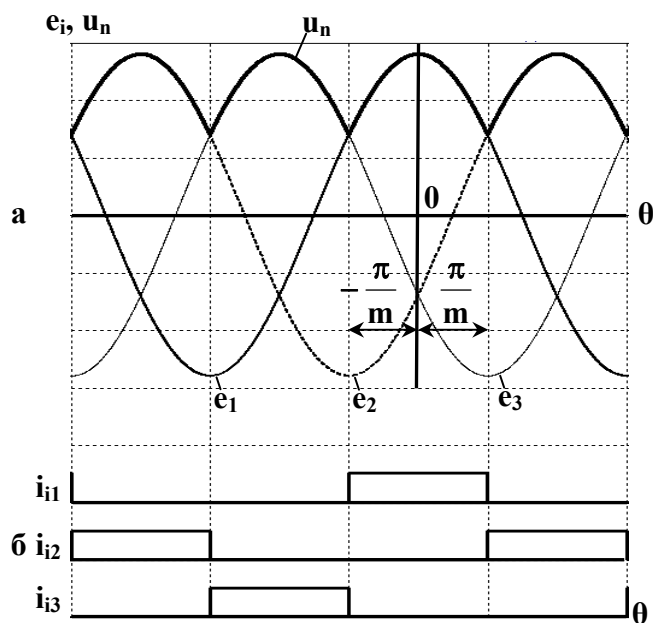


Рис.1.2 – Діаграми напруг (а) та струмів (б) ідеально-нульового напівпровідникового перетворювача

$$\beta_{u_{0n}} = \frac{U_{d0}}{E_i} = \frac{m\sqrt{2}}{\pi} \cdot \sin \frac{\pi}{m}$$

Напруга навантаження мостового напівпровідникового перетворювача в два рази більше, тому в мостовому перетворювачі:

$$U_{dom} = \frac{2\sqrt{2} \cdot m}{\pi} \cdot E_i \cdot \sin \frac{\pi}{m}; \quad \beta_{u_{0m}} = \frac{2 \cdot \sqrt{2} \cdot m}{\pi} \cdot \sin \frac{\pi}{m} \quad (1.1)$$

Діюче значення повного струму джерела нульового перетворювача (рис.1.2,б)

$$I_i = \sqrt{\frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi/m} I_d^2 d\theta} = \frac{I_d}{\sqrt{m}}$$

Коефіцієнти зв'язку між струмом навантаження і діючим значенням повного струму джерела живлення нульового і мостового перетворювачів:

$$k_{in} = I_d/I_i = \sqrt{m}; \quad k_{im} = I_d/I_i = \sqrt{m/2}. \quad (1.2)$$

Оскільки повна потужність джерела $S_i = m \cdot E_i \cdot I_i$, а потужність навантаження $P_d = U_d \cdot I_d = U_{d0} \cdot I_d$, то коефіцієнт зв'язку між потужностями

$$k_s = \frac{S_i}{P_d} = \frac{m}{\beta_{u0} \cdot k_i}.$$

Коефіцієнти зв'язку між потужностями джерела і навантаження для нульового і мостового перетворювачів:

$$k_{Sn} = \frac{\pi}{\sqrt{2m} \cdot \sin(\pi/m)}; \quad k_{Sm} = \frac{\pi}{\sqrt{2m} \cdot \sin(\pi/m)}. \quad (1.3)$$

В тиристорних нульових та мостових перетворювачах

$$U_d = U_{d0} - \Delta U_x = U_{d0} \cos \alpha. \quad (1.4)$$

1.4. Діодні та тиристорні збудники безконтактних синхронних машин

Збудники БСМ виконуються, в основному, на базі синхронних і асинхронних машин.

На рис.1.3 показані принципові електричні схеми збудників: а – синхронний збудник (СЗ) з діодним перетворювачем; б – асинхронний збудник (АЗ) з тиристорним перетворювачем. На рисунку: СМ – синхронна машина; ОВ – обертовий випрямляч; ОЧ – обертова частина; р, р_с, р_А - числа пар полюсів СМ, СЗ та АЗ.

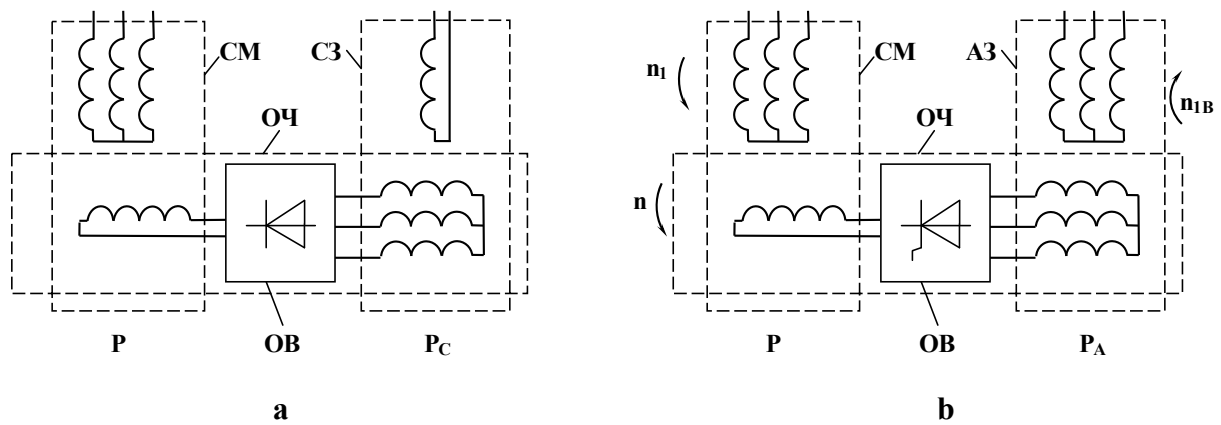


Рис.1.3 – Принципові електричні схеми збудників БСМ

Найбільше використовується СЗ. Збудник має високий коефіцієнтом посилення потужності, що дозволяє знизити габарити системи автоматичного регулювання збудження (АРЗ). Недоліки СЗ: інерційність; збільшення габаритів при зниженні частоти обертання СМ.

АЗ є асинхронною машиною з фазним ротором, яка працює в режимі перетворювача частоти при $s > 1$. АЗ технологічніший СЗ, його легше освоїти в виробництві. АЗ дозволяє отримати економічну систему збудження при частоті обертання $n \leq 750$ об/хв. Недолік АЗ – підвищена потужність системи АРЗ.

З метою зменшення масо габаритних показників за рахунок зменшення вильоту лобових частин обмоток збудники виконують з підвищеним числом пар полюсів, $p_b = 3 \div 8$ р. При цьому частота ЕРС якорної обмотки збудника $f_2 = 150 \div 400$ Гц. У СЗ та АЗ:

$$f_{2C} = p_C \cdot n = \frac{p_C}{p} \cdot f_1 \quad 1.2;$$

$$f_{2A} = p_A \cdot n + f = \left(1 + \frac{p_A}{p}\right) \cdot f_1,$$

де $n = f/p$ – швидкість обертання валу.

Головні вимоги. Крім вимог, що ставляться до БСЗ синхронних машин в цілому (простота і мала вартість, надійність в роботі та інше), до збудників ставляться дві головні вимоги []: **швидкодія регулювання і висока якість форми вихідної напруги.**

У діодних трифазних мостових безконтактних системах збудження (БСЗ) СМ порівняльна хороша якість форми вихідної напруги. Необхідна швидкість форсировки збудження СМ досягається за рахунок підвищення стельової напруги збудження збудника. Проте, при зменшенні напруги на вході перетворювача обмотка збудження СМ може замикатись накоротко через вентиля, при цьому струм збудження СМ затухає з постійною часу цієї обмотки. **Головний недолік діодної БСЗ – повільне гасіння поля []**.

Тиристорна БСЗ практично безінерційна. Вона забезпечує від'ємну напругу на обмотці збудження СМ в перехідних режимах за рахунок інверторного режиму. Такий режим застосовується для швидкого заспокоєння великих коливань ротора, зменшення об'єму пошкодження при внутрішній аварії. Перевага тиристорної БСЗ є відсутність форсировки збудження збудника. Проте, техніко-економічні показники БСЗ з мостовими тиристорними перетворювачами (ТП) невисокі. Це пов'язано з тим, що в цих БСЗ струм збудження на всьому діапазоні (включаючи форсировку) здійснюють кутом управління тиристорів. Тому в режимі номінального навантаження СМ збудник працює з повним магнітним потоком, кут управління тиристорами $\alpha_u = 60^\circ$. Це приводить до погіршення якості форми вихідної напруги збудника в робочому діапазоні. **Головний недолік тиристорної БСЗ – низька якість форми вихідної напруги.**

Якщо в тиристорній БСЗ зберегти електромашинний збудник діодної БСЗ, то в номінальному режимі роботи при $\alpha_u = 60^\circ$ збільшуються струм збудження збудника, втрати в міді і в сталі. Тому в тиристорній БСЗ збільшують розміри електромашинного збудника.

В роботах [1, 2, 14] відмічаються високі техніко-економічні показниками БСЗ з мосто-нульовою та каскадною мостовою схемами перетворення.