

1. СИСТЕМИ ЗБУДЖЕННЯ СИНХРОННИХ МАШИН

1.1 Система збудження синхронної машини, загальна характеристика

Системою збудження синхронної машини (СМ) називається сукупність машин, апаратів і пристроїв, призначених для живлення обмотки збудження постійним струмом і регулювання значення цього струму.

Системи збудження СМ можна розділити на наступні основні групи:

- системи збудження із збудниками постійного струму;
- системи збудження із збудниками змінного струму;
- статичні системи збудження.

В даний час в основному випускаються безконтактні синхронні машини (БСМ). БСМ застосовуються, перш за все, тоді, коли установка щіткового вузла утруднена по тих або інших причинах: великий струм збудження СМ, висока швидкість обертання валу машини, вибухонебезпечне навколишнє середовище і тому подібне. Гідність БСМ - підвищена надійність

У БСМ застосовуються збудники змінного струму. Збудник змінного струму разом з обертовим перетворювачем, пристроями управління, діагностики і захисту утворюють безконтактну систему збудження (БСВ). БСВ знаходять широке застосування в синхронних двигунах, генераторах, компенсаторах при різних потужностях і частотах обертання.

Основні вимоги до систем збудження СГ: висока надійність в роботі; можливо велика простота і мала вартість; постійність напруги генератора.

Система збудження СГ характеризується наступними **основними параметрами:** номінальний струм і напруга; граничний струм і напруга при форсировке збудження; тривалість режиму форсировки; швидкість підйому напруги.

Синхронні генератори (СГ) забезпечуються автоматичними регуляторами збудження (АРВ). При повільних змінах струму навантаження генератора АРВ здійснює пропорційне регулювання струму збудження генератора. АРВ реагує на зміну напруги $\Delta U = U - U_N$. При швидких змінах напруги генератора пропорційне регулювання малоефективне внаслідок електромагнітної інерції ланцюга збудження, що має велику індуктивність. Струм збудження генератора змінюється з запізнюванням, підтримувати $U = \text{const}$ з необхідною точністю неможливо. Тому в СГ застосовують АРВ сильної дії, які реагують не тільки на відхилення певних параметрів, але і на значення їх похідних в часі.

При коротких замиканнях в мережі напруга генераторів різко падає, тому різко знижується їх потужність. Оскільки потужності турбін залишаються незмінними, виникає небезпека випадання генераторів з синхронізму. У цих випадках для підтримки напруги на можливо вищому рівні і запобігання випаданню генераторів з синхронізму застосовується форсировка збудження. Напруга збудження u_{fm} повинна бути достатньо великою. Згідно стандарту коефіцієнт форсировки збудження турбогенераторів $k_{fm} = u_{fm} / u_{fN} \geq 2$, у гідрогенераторів $k_{fm} \geq 1.8$, у автономних генераторах середньої потужності $k_{fm} \geq 2.75$.

Швидкість наростання напруги збудження при форсировке не менше $2 u_{fN}$ в секунду для турбогенераторів, для гідрогенераторів - не менше $1,5 u_{fN}$ в секунду. Тривалість режиму форсировки - не менше $3.5 \div 5$ сек.

1.2 Системи збудження із збудниками постійного і змінного струму

Класична система збудження із збудником постійного струму складається із збудника у вигляді генератора з паралельним або незалежним збудженням на загальному валу з синхронною машиною.

У тихохідних машин потужністю до $P_n \cong 5000$ кВт для зменшення маси і вартості збудників їх іноді сполучали з валом синхронної машини за допомогою клиноремінної передачі. Гідрогенератор зазвичай має збудник на одному валу з генератором. У могутніх тихохідних гідрогенераторів з $n_N = 60 \div 150$ об/хв розміри і вартість збудника – великі, збудники володіють великою електромагнітною інерцією, що знижує ефективність автоматичного регулювання і форсування збудження. Тому застосовуються також системи збудження у вигляді окремого швидкохідного агрегату ($n = 750 \div 1500$ про./мин.), що складається з асинхронного двигуна і генератора постійного струму. Асинхронний двигун отримує живлення від спеціального допоміжного СГ, розташованого на одному валу з головним гідрогенератором, а в деяких випадках – від шин власних потреб гідростанції або від виводів головного гідрогенератора. У останньому випадку збуджуючий агрегат схильний до впливу аварій в енергосистемі, тому для підвищення його надійності приводні асинхронні двигуни виконують з підвищеним максимальним моментом ($M_m \geq 4 M_N$). Іноді ці агрегати забезпечують також маховиками.

Агрегати резервного збудження електростанцій також виконуються у вигляді окремих збуджуючих агрегатів.

Турбогенератори потужністю до $P_N = 100$ Мвт зазвичай мали збудники у вигляді генераторів постійного струму на своєму валу. Проте при $P_N > 100$ Мвт, потужність збудників стає настільки великою, що їх виконання при $n_N = 3\,000 \div 3600$ об/хв за умовами комутаційної надійності виявляється скрутним або навіть неможливим. При цьому застосовуються різні рішення. Наприклад, широко використовувалися збудники із швидкістю обертання $n_N = 750 \div 1000$ об/хв, що сполучаються з валом турбогенератора за допомогою редуктора, а також збуджуючі агрегати з асинхронними двигунами, які одержують живлення з шин станції або з виводів генератора.

У системах збудження СГ широко застосовувався принцип компаундування, при якому здійснюється автоматична зміна струму збудження при зміні струму навантаження генератора.

На рис. 1 показана принципова схема компаундованої системи збудження СГ із збудником постійного струму. Обмотка збудження збудника 4 з реостатом 6 підключені до якоря збудника 3. Крім того, обмотка збудження 4 підключена до виходу випрямляча 9, вхід якого підключений до вторинних обмоткам послідовного трансформатора 7. На холостому ході генератора обмотка збудника 4 отримує живлення тільки від якоря збудника 3. У міру збільшення струму навантаження генератора напруга вторинної обмотки трансформатора 7 буде рости. Вже при невеликому навантаженні генератора напруга, яка випрямлена випрямлячем 9, підживлює обмотку збудження збудника 4. Тому струм цієї обмотки і струм збудження генератора будуть рости із збільшен-

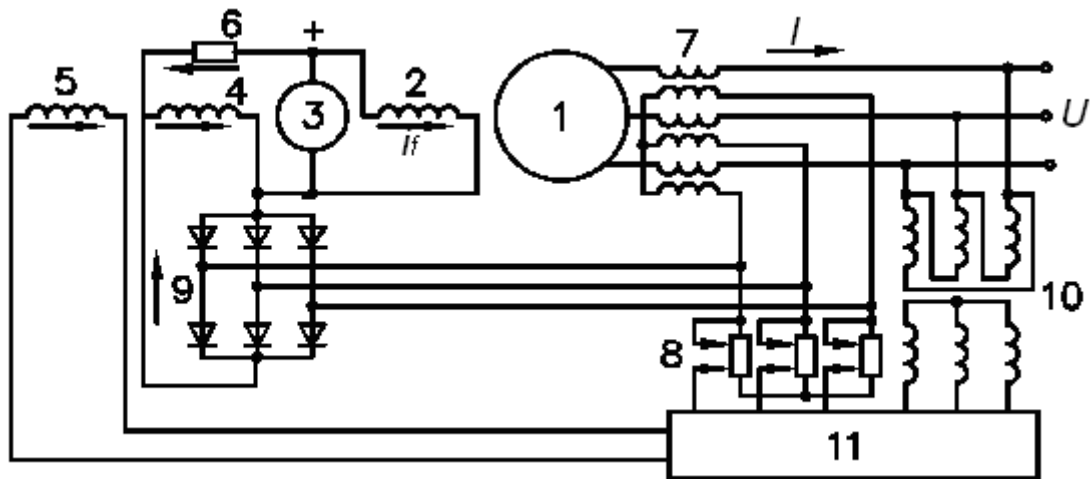


Рис. 1 – Система збудження генератора з пристроєм компаундування

ням навантаження генератора. При збільшенні опору установочного реостата 8 напруга, що подається на випрямляч 9, і компаундуюча дія трансформатора 7 будуть рости. При коротких замиканнях компаундуючий пристрій здійснює форсировку збудження СГ.

Дія компаундуючої схеми з послідовним трансформатором залежить тільки від значення струму навантаження генератора і не залежить від його фази, тому компаундування називається струмовим. В межах діапазону нормальних навантажень постійність напруги генератора вдається зберігати з точністю до $\pm (5 \div 10)\%$. Така точність недостатня. Тому в схемі застосовується додатковий коректор (автоматичний регулятор напруги) 11, який сполучений за допомогою узгоджувального трансформатора 10 із затисками генератора. Регулятор 11 реагує на зміни напруги і струму навантаження генератора і живить постійним струмом додаткову обмотку збудження збудника 5.

Розглянута вище система збудження широко застосовувалася для генераторів потужністю до 100 Мвт.

1.3 Структурна схема безконтактної системи збудження СТГ.

На рис. 2 приведена структурна схема тиристора БСВ турбогенератора ТВВ - 320 - 2 ПО «Електросила», де: ТГ – турбогенератор; СГ – допоміжний синхронний генератор (збудник); ВТВ – випрямляч обертового тиристора; БДТ – блок динамічних трансформаторів; ПВ – підзбудник; УИС - пристрій імпульсної синхронізації; УФИ - пристрій формування імпульсів управління тиристорами; АРВ – автоматичний регулятор збудження; АРН - автоматичний регулятор напруги; КИУ – контрольно-вимірювальний пристрій; ТС - узгоджувачий трансформатор; ТП – тиристорний перетворювач; БЗ - блок захисту.

Основними елементами БСВ є електромашинний збудник (допоміжний генератор) і обертовий випрямляч.

Електромашинні збудники виконуються, в основному, на базі синхронних і асинхронних машин.

БСВ виконуються з діодними або тиристорами обертовими перетворювачами. У діодних БСВ регулювання струму збудження СМ здійснюється через ланцюг збудження збудника. У тиристорах БСВ регулювання струму збуджен-

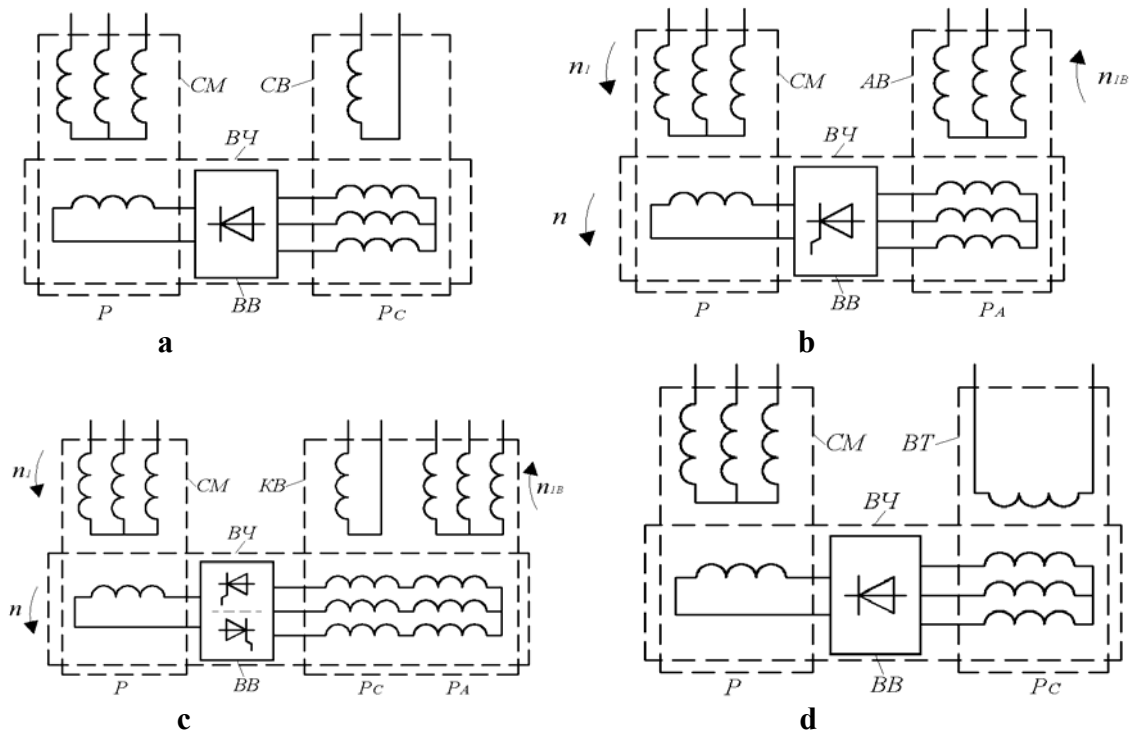


Рис. 3 – Принципові електричні схеми безконтактних збудників СМ

зумовило масовість його застосування, оскільки дозволило різко понизити габарити апаратури управління збудженням СМ. Недоліком СВ є значна інерційність і збільшення габаритів при зниженні частоти обертання.

АВ є асинхронною машиною з фазним ротором, що працює в режимі перетворювача частоти з ковзанням $s > 1$. АВ технологічніший СВ, його легко освоїти у виробництві. АВ дозволяє отримати економічну систему збудження при частоті обертання $n \leq 750$ об/хв. АВ забезпечує високу швидкодію діодних

БСВ при форсировці збудження. Недолік АВ – підвищена потужність первинного контура.

З метою зменшення масогабаритних показників за рахунок зменшення вильоту лобових частин обмоток збудники виконують з підвищеним числом пар полюсів, $p_B = 3 \div 8$ р. Частота ЕРС якірної обмотки збудника $f_2 = 150 \div 400$ Гц. У синхронному збуднику

$$f_{2C} = p_c \cdot n = \frac{p_c}{p} \cdot f_1 \quad (1)$$

де $n = f / p$ – швидкість обертання валу СМ. В асинхронному збуднику

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

Відзначимо, що збільшення числа пар полюсів збудника приводить до збільшення опору розсіяння обмотки якоря, що істотно впливає на режим роботи і основні розрахункові співвідношення перетворювача.

На рис. 3,с показана система збудження з каскадним збудником. Каскадний збудник складається з синхронного і асинхронного збудника, якірні обмотки яких сполучені послідовно. Частоти ЕРС якірних обмоток двох збудників однакові. Враховуючи (1 і 2), отримаємо:

$$f_{2C} = f_{2A}; \quad \frac{P_C}{P} \cdot f = \left(1 + \frac{P_A}{P}\right) \cdot f; \quad P_A = P_C - P. \quad (3)$$

Каскадне з'єднання збудників додає синхронній машині нову властивість – регулювання струму збудження по куту навантаження Θ , що дозволяє підвищити точність підтримки режиму генератора при зміні навантаження в широкому діапазоні. Необхідність застосування двох збудників - недолік каскадного збудника.

У обертовому трансформаторі (рис. 3,d) магнітопровід шихтується у напрямі обертання ротора, що забезпечує незалежність габаритів трансформатора від швидкості обертання синхронної машини.

1.4.2 Головні вимоги до електромашинно-вентильного збудника і шляхи їх реалізації.

Крім вимог, що пред'являються до БСВ синхронних машин в цілому (простота і мала вартість, надійність в роботі і ін.), до електромашинно-вентильних перетворювачів пред'являються дві головні вимоги []: **швидкодія регулювання і висока якість форми вихідної напруги.**

У діодних трифазних мостових БСВ СМ порівняно хороша якість форми вихідної напруги. Необхідна швидкість форсировки збудження СМ досягається за рахунок підвищення стельової напруги збудження збудника. Проте, при зменшенні напруги джерела на вході випрямляча обмотка збудження СМ може виявитися замкнутою накоротко через вентилі, при цьому струм збудження СМ затухає з постійною часу цієї обмотки. **Головний недолік діодної БСВ - повільне гасіння поля.**

Тиристорна БСВ практично безінерційна, вона забезпечує негативну напругу на обмотці збудження СМ в перехідних режимах за рахунок інверторного режиму. Такий режим застосовується для швидкого заспокоєння великих качань в роторі, зменшення об'єму пошкодження при внутрішній аварії СМ []. Проте, техніко-економічні показники збудників з мостовими тиристорними перетворювачами (ТП) невисокі. Це пов'язано з тим, що розробка тиристорних БСВ проведена на основі статичних тиристорних збудників, у яких регулювання збудження на всьому діапазоні (включаючи форсировку) здійснюється кутом управління тиристорами. Тому в режимі номінального навантаження СМ збудник працює з повним магнітним потоком, кут управління тиристорами $\alpha_u = 60^\circ$, що приводить до погіршення якості форми вихідної напруги перетворювача в робочому діапазоні. **Головний недолік тиристорної БСВ - низька якість форми вихідної напруги**, що може привести до зниження терміну служби агрегату. Якщо в тиристорній БСВ зберегти електромашинний збудник діодною БСВ, то в номінальному режимі роботи при $\alpha_u = 60^\circ$ збільшуються струм збудження збудника, втрати в міді і в сталі. Тому в тиристорній БСВ збільшують розміри збудника.

Розробку тиристорної БСВ доцільно виконати на базі діодної БСВ із збереженням регулювання збудження по ланцюгу збудження збудника. Регулювання кутом управління тиристорами треба застосовувати тільки для гасіння поля, для швидкої зміни струму збудження СМ у бік зменшення. В цьому випадку тиристорна БСВ відрізнятиметься високими показниками.

Високими техніко-економічними показниками відрізняється тиристорна БСВ з каскадною мостовою схемою перетворення.

Для зменшення гармонійного складу в криву вихідної напруги застосовують багатофазні збудники. У багатофазному збуднику практично відсутні пульсації випрямленої напруги. При цьому знижуються перенапруги на елементах схеми, диференціальне розсіювання і додаткові втрати збудника.

Багатофазні збудники з числом фаз до 50 і більш застосовуються в БСВ турбогенераторів. Потужність збудника в номінальному режимі досягає 6 Мвт, а в режимі форсировки більше 11 Мвт.

1.4.3 Конструкція безконтактних збудників

В безконтактних синхронних машинах великої потужності збудники виконуються окремим блоком, зв'язаним з основною машиною електрично і механічно.

На рис. 4 показана конструкція збудника синхронного турбогенератора (СТГ) потужністю 500 Мвт (ПО «Електросила»): 1 – якір, 2 – полюс, 3 – обертовий випрямляч, 4 – датчики безконтактного контролю запобіжників, 5 – датчик струму ротора, 6 – вимірювальне кільце струму збудження СТГ.

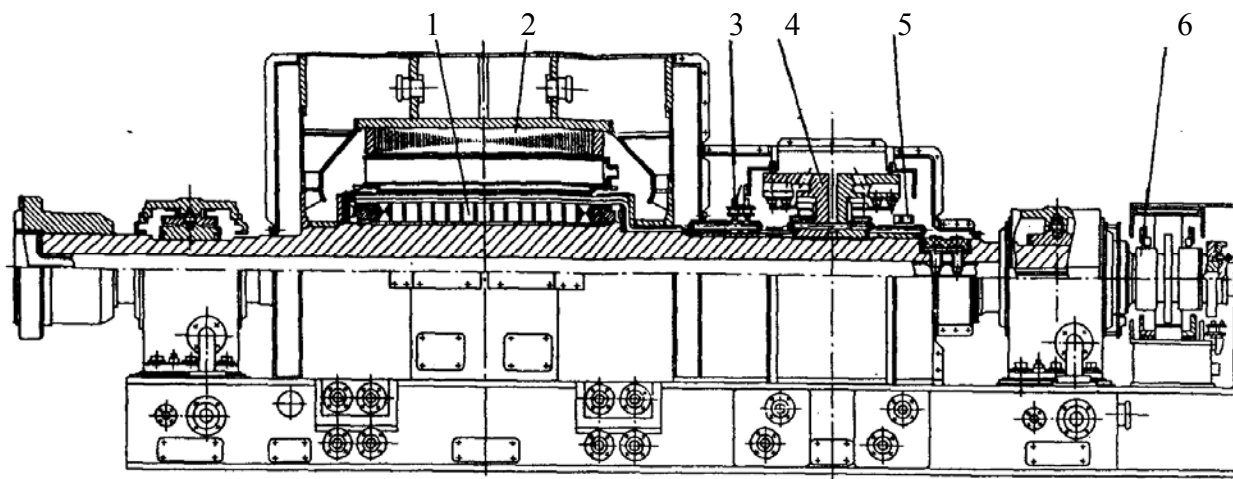


Рис. 4 – Безконтактний збудник СТГ потужністю 500МВт

У машинах малої і середньої потужності застосовуються як вбудовані збудники (збудника розміщені усередині основної машини), так і збудники консольного типу.

Оптимальним для вентилів є їх розміщення на окремому колесі. Тут маємо невеликі відцентрові сили і хороші умови охолодження. Але при такій компоновці отримаємо значну довжину збудника. Скоротити довжину можна, розмістивши вентиля або на роторі збудника, або в його валу.

На рис. 5 показаний ротор безконтактного збудника, в якому з метою зменшення довжини збудника вентиля розміщені під лобовими частинами обмотки якоря. На рисунку показані: 1 – сердечник, 2 – обмотка, 3 – нажимна шайба, 4 – обід, 5 – болт, 6 і 7 – ізоляційні шайби, 8 – вентиля, 9 і 10 – струмопровідні перемички.

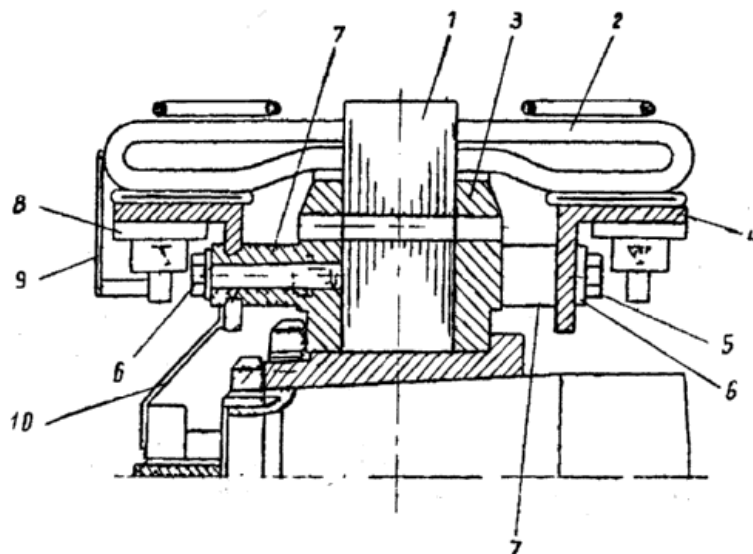


Рис. 5 – Ротор безконтактного збудника

1.5 Безконтактні системи управління обертовими тиристорними перетворювачами

1.5.1 Загальна характеристика

Найбільшого поширення набули безконтактні системи управління (БСУ) з обертовими імпульсними трансформаторами і з генераторами управління.

Генератори управління (ГУ) можна розділити на дві групи: ГУ змінного і постійного струму. Серед ГУ змінного струму можна виділити два різновиди залежно від форми ЕРС, що наводиться в обмотках ротора: ГУ з синусоїдальною і пікоподібною ЕРС.

1.5.2 БСУ з обертовими імпульсними трансформаторами

Обертовий імпульсний трансформатор показаний на рис. 6: 1 – вал; 2 – кільцеподібне ярмо, зчленоване з валом; 3 – П-образний сердечник; 4 – первинна обмотка; 5 – кільцеподібна вторинна обмотка.

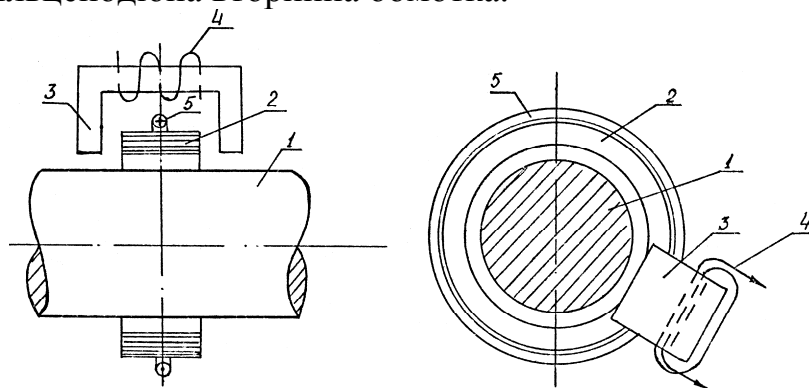


Рис. 6 – Обертовий імпульсний трансформатор

Трансформатор складається з нерухомої частини – статора і обертової частини – ротора. Статор і ротор мають сталеві каркаси, на яких розташовані обмотки. Число пар обмоток відповідає числу каналів управління обертового тиристорного перетворювача. Імпульсний трансформатор може бути виконаний з радіальним або аксіальним повітряним зазором. Застосування того або іншого типу трансформатора визначається зручністю його компоновки в машині. Достоїнства методу управління: простота і надійність передачі імпульсів управління, висока швидкодія, відсутність обертових пристроїв формування імпульсів. Недоліки методу: низький ККД імпульсних трансформаторів ($4 \div 12 \%$), завал фронтів керуючих імпульсів на вторинних обмотках трансформатора, необхідність розробки ефективного екранування обмоток імпульсних трансформаторів від взаємного впливу, невисока адаптація до конструкцій безконтактних синхронних генераторів.

1.5.3 Генератор управління з пікоподібною формою ЕРС

На рис. 7 показана конструкція генератора управління з пікоподібною формою фазної ЕРС: 1 – статор; 2 – обмотка статора; 3 – Т-образний зубець ротора; 4 – обмотка ротора; 5 – вал збудника; 6 – блок формування імпульсу.

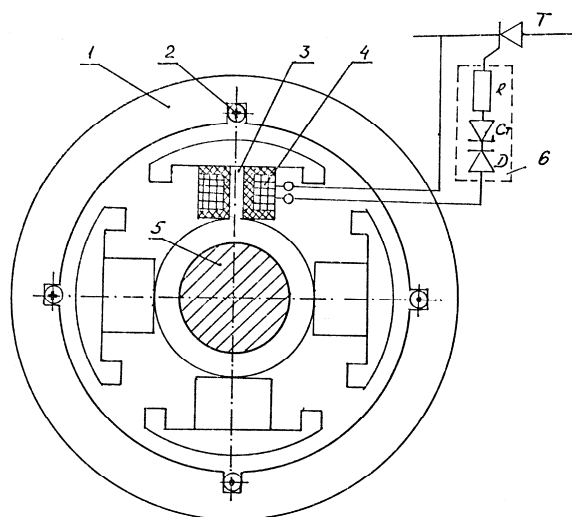


Рис. 7 – Генератор керування з пікообразною формою фазної ЕРС

Зубці ротора ГУ мають розвинену поверхню уздовж кола, сумірну з полюсним діленням, а ніжки зубців мають мінімальну товщину (з технологічних і механічних міркувань). Потік, проникаючий в розвинену поверхню зубця, швидко насичає тонку ніжку. При синусоїдальній намагнічуючій силі потокощеплення має сплюснену форму кривої в часі. Тому ЕРС, яка пропорційна похідній потокощеплення, має пікоподібну форму. Поліпшенню форми імпульсу сприяє блок формування імпульсів 6, що містить діод, стабілітрон і резистор. Діод Д зрізає зворотну півхвилю, стабілітрон Ст зрізає полого частину імпульсу і можливі перешкоди, резистор R обмежує величину струму управління тиристора Т.

ГУ використовується в безконтактному збуднику тиристора турбогенератора типу ТГВ – 300 (ПО «Електротяжмаш»). Силевий випрямляч зібраний по шестнадцятифазній мостовій схемі. На роторі ГУ розташовані обмотки якорі,

число яких рівне числу тиристорів керованого випрямляча. Число фаз ГУ рівне числу фаз збудника ($m = 16$) і в той же час рівне числу зубців його ротора. Число полюсів статора ГУ рівне числу полюсів збудника. Синхронізація по фазі ГУ із збудником досягається механічним поворотом статора ГУ з подальшою його фіксацією.

1.5.4 Генератор управління з синусоїдальною формою ЕРС

Генератор управління з синусоїдальною формою ЕРС обмотки якоря показаний на рис. 8. У пазах статора ГУ розташовуються, як правило, дві обмотки збудження (2), які зрушені один відносно одного в просторі на 90 електричних градусів. Зміною співвідношень і напрямів постійних струмів в цих обмотках можна повертати вісь результуючого магнітного поля в зазорі на будь-який кут і відповідно змінювати фазу керуючих імпульсів по відношенню до фази анодної напруги, регулюючи випрямлений струм в обмотці ротора основної електричної машини. Обмотка якоря 1 виконується трифазною або багатофазною залежно від схеми керованого випрямляча.

Система управління вимагає установки на обертовій частині спеціальних блоків (елементи 3 та 5), що формують імпульси управління необхідної форми.

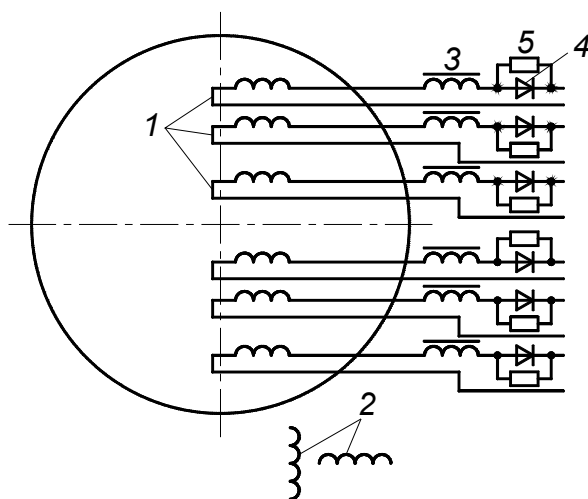


Рис. 8 – Генератор керування з синусоїдальною формою фазної ЕРС