

**МІНІСТЕРСТВО ВНУТРІШНІХ СПРАВ УКРАЇНИ
ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ВНУТРІШНІХ СПРАВ
КРЕМЕНЧУЦЬКИЙ ЛЬОТНИЙ КОЛЕДЖ**

Циклова комісія авіаційного і радіоелектронного обладнання

ТЕКСТ ЛЕКЦІЇ

з навчальної дисципліни «Електричні станції та підстанції»
обов'язкових компонент
освітньо-професійної програми першого (бакалаврського) рівня вищої освіти

Електромеханіка

За темою № 3 - Синхронні генератори

Харків 2022

ЗАТВЕРДЖЕНО

Науково-методичною радою
Харківського національного
університету внутрішніх справ
Протокол від 30.01.2023 № 1

СХВАЛЕНО

Методичною радою Кременчуцького
льотного коледжу
Протокол від 19.12.2022 № 5

ПОГОДЖЕНО

Секцією Науково-методичної ради
ХНУВС з технічних дисциплін
Протокол від 27.01.2023 № 1

Розглянуто на засіданні циклової комісії авіаційного і радіоелектронного обладнання, протокол від 10.12.2022 № 8.

Розробники:

Викладач циклової комісії авіаційного і радіоелектронного обладнання,
к.т.н., доцент, викладач, Шокарьов Д.А.

Рецензенти:

1. Інженер з технічного обслуговування, ремонту та діагностики авіаційної техніки ТОВ «ЕЙР ТАУРУС» Калінін О.В.
2. Професор циклової комісії авіаційного і радіоелектронного обладнання, к.т.н., спеціаліст вищої категорії Гаврилюк Ю.М.

План лекції:

1. Вступ.
2. Основні поняття і визначення.
3. Типи генераторів
4. Питання для самоконтролю.

Лекція 3 Генератори

Рекомендована література (основна, допоміжна), інформаційні ресурси в Інтернеті

Основна література:

1. Козлов В. Д. Електрична частина станцій та підстанцій аеропортів: підручник / В. Д. Козлов, В. П. Захарченко, О. М. Тачиніна; за заг. ред. В. Д. Козлова.— К. : НАУ, 2018. – 312 с.
2. Костишин, В. С. Електрична частина станцій та підстанцій: навч. посіб. / В. С. Костишин, М. Й. Федорів, Я. В. Бацала. - Івано-Франківськ: ІФНТУНГ, 2017. - 243 с.
3. Бардик Є. І. Електрична частина станцій та підстанцій. Основне електрообладнання: навч. посібник / Є. І. Бардик, М. П. Лукаш – К.: НТУУ «КПІ», 2016 – 220 с.

Допоміжна література:

1. Неклепаев Б.Н. Руководящие указания по расчету токов короткого замыкания и выбору электрооборудования / под ред. Б.Н. Неклепаева. – М.: изд-во НЦ ЭНАС, 2014. – 152 с.
2. Шкрабець Ф.П., Плешков П.Г. Основи електропостачання. Навчальний посібник. – Кіровоград: РВЛ КНТУ, 2015.
3. Шестеренко, В. Є. Електропостачання промислових підприємств. Посібник до курсового та дипломного проектування / Шестеренко В. Є., Шестеренко О. В. — Київ, 2015. — 424 с.

Інформаційні ресурси в Інтернеті

1. Офіційний сайт Міністерство енергетики України <http://mpe.kmu.gov.ua/>
2. Сервер Верховної Ради України. – Режим доступу : www.rada.gov.ua.

1 Синхронні генератори

Основними елементами електростанцій є турбо- або гідроагрегати, складовими частинами яких є турбіни (парові, газові або гідравлічні) і електричні синхронні генератори.

Прийнято генератори, первинними двигунами яких є парові або газові турбіни, називати турбогенераторами, а генератори з гідравлічними турбінами - гідрогенераторами.

2 Турбогенератори

Турбогенератор (ТГ) являє собою швидкохідну (1500, 3000 об / хв.) Електричну машину з нерухомим статором і обертовим циліндричним ротором. Збільшення частоти обертання підвищує економічність роботи парових турбін і зменшує габарити турбін і генераторів. Швидкохідність забезпечується конструкцією ротора.

Ротор турбоагрегатів виконується неявнополюсним у вигляді цільної поковки з високоякісної легованої сталі. У радіальні пази ротора укладається обмотка збудження зі смужової електролітичної міді з ізоляцією зі слюди або Мікаленти.

Максимальний діаметр ротора (1,0 - 1,3 м) при високій швидкості обертання визначається механічною міцністю поковки, а довжина обмежена прогином валу (до 12 м).

Статор виконується шихтованим з листів сталі товщиною 0,5 мм. Листи набираються в пакети, між якими залишають вентиляційні канали. Обмотка (стрижнева двошаровий з ізоляцією з Мікаленти) укладається в пази у внутрішній расточке.

Турбогенератори виконуються з горизонтальним валом.

При частоті (f) 50 Гц турбогенератори мають одну пару полюсів (p) при номінальній частоті обертання (n) 3000 об / хв.,

На АЕС найчастіше встановлюються реактори ВВЕР. Вони порівняно дешеві, але виробляють пар зі зниженими параметрами, що призводить до необхідності збільшення вихідного перетину циліндрів низького тиску та зменшення швидкостей лопаток останніх ступенів для запобігання ерозії, що можливо за рахунок переходу на швидкість 1500 об / хв. Тому генератори для АЕС можуть мати дві пари полюсів (чотириполюсні).

Для турбогенераторів прийнята стандартна шкала потужностей: 2,5 - 4 - 6 - 12 - 32 - 63 - 100 - 160 - 200 - 300 - 500 - 800 - 1200 МВт.

3 Гідрогенератори

Гідрогенератори відносяться до числа тихохідних електричних машин (60 - 750 об / хв) в залежності від напору і витрати води. Так як швидкість обертання визначається потенціалом річки, де споруджується ГЕС, то генератори можуть мати різну кількість пар полюсів і потужність їх не стандартизується (від 8 до 640 МВт). Для ГЕС генератори зазвичай виготовляються на замовлення.

Залежно від розташування вала гідроагрегати називають горизонтальними (малої потужності) і вертикальними (великої потужності). Більшість гідроагрегатів мають вертикальне виконання з розміщенням генератора над турбіною.

Основними елементами вала вертикальної машини є подп'ятник і напрямні підшипники. Підп'ятник сприймає навантаження від ваги генератора і робочого колеса турбіни, а так само від вертикальної складової реакції води. У потужних генераторах він занурюється в масло. Радіальні зусилля, діючі на ротор, сприймається двома напрямними підшипниками, які також забезпечують вертикальне положення вала.

Залежно від розташування подп'ятника розрізняють гідрогенератори підвісного (а) і зонтичного (б) типу:

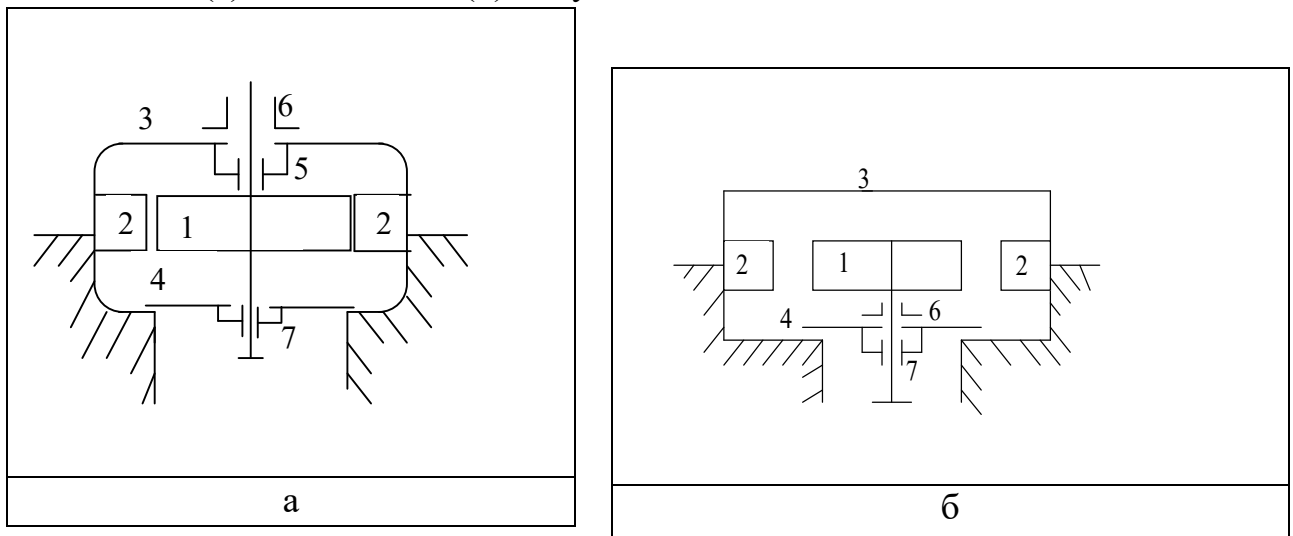


Рис. 2.1. Гідрогенератори підвісної і зонтичного типу

1 - ротор, 2 - статор, 3 - верхня хрестовина, 4 - нижня хрестовина, 5 - верхній напрямляючий підшипник, 6 - підп'ятник, 7 - нижній напрямляючий підшипник.

Підвісне виконання забезпечує більш високу механічну стійкість і вільний доступ до підп'ятника. Парасолькове - дозволяє зменшити розміри верхньої хрестовини і висоту будівлі електростанції, що важливо при великих потужностях.

Ротор гідрогенератора принципово відрізняється від ротора турбогенератора. Він виконується явнополюсним у вигляді колеса, до обода якого кріпляться полюса. Полюса збираються з листової сталі. Обмотки збудження виконуються у вигляді котушок з голою шинної міді, які надягають на виступаючі полюса. Замість смуговий міді можуть використовуватися трубки, одночасно використовуються для охолодження. Витки ізолюють азбестом або міканітів. Чим менше частота обертання, тим більше полюсів має бути на роторі. Тому ротор може мати діаметр 4 - 8 м.

Статор гідрогенератора конструктивно не має принципових відмінностей від статора турбогенератора.

4 Системи охолодження генераторів

Під час роботи в генераторах виникають втрати енергії, що викликають нагрівання його елементів. Хоча ККД генераторів високий і втрати складають всього 1.5 - 2%, абсолютні втрати досягають 10 МВт в машині 800 МВт, що призводить до значного підвищення температури активної сталі, міді та ізоляції. При цьому граничний нагрів лімітується ізоляцією обмоток.

Синхронні генератори мають штучне охолодження. Розрізняють системи штучного охолодження:

- поверхневе або непряме;
- безпосереднє.

В якості охолоджуючої середовища в генераторах застосовуються гази (повітря і водень) і рідини (вода і масло).

5 Непрямі системи охолодження

При поверхневому чи непрямому охолодженні охолоджуючий газ подається за допомогою вбудованого або зовнішнього вентилятора всередину машини і проганяється через її повітряний зазор і систему вентиляційних каналів. При цьому газ не стикається з провідниками обмоток, і тепло від них передається холодному тілу газу через ізоляцію обмоток, папів ізоляцію і сталь зубців, тобто через значний "тепловий бар'єр".

Непрямі системи охолодження можуть бути повітряними і водневими.

Повітряні системи охолодження можуть бути:

- проточними;
- Замкнуті.

При проточному охолодженні повітря забирається ззовні через очисні фільтри, проганяється через машину і викидається назовні. Воно застосовується для генераторів невеликої потужності (ТГ - до 2 МВА, ГГ - до 4МВА), так як з повітрям в машину надходить пил, незважаючи на фільтри.

Для великих генераторів застосовують замкнуту систему охолодження, коли один і той же об'єм повітря циркулює в машині. Нагріте в машині повітря виходить через спеціальний патрубок в камеру гарячого повітря, проходить через повітроохолоджувач (зрошувану водою) і через камеру холодного повітря повертається в машину.

Для заповнення втрат повітря в результаті витоків передбачений забір повітря через подвійні масляні фільтри в камері холодного повітря.

Замкнені системи охолодження виконуються за двома схемами:

- осьові;
- багатоструменеві.

Осьова схема передбачає проходження охолоджувача через зазор між статором і ротором, а також через вентиляційні осьові канали статора. Недоліком є нерівномірність охолодження обмотки на початку і в кінці обмотки по руху повітря.

Ефективність вентиляції підвищується при поділі потоку охолоджуючого повітря на кілька струменів.

Багатоструменеві радіальна схема охолодження передбачає поділ системи вентиляції вертикальними (перпендикулярно валу) площинами по секції. У кожен секцію повітря надходить з повітряного зазору або спеціального осьового каналу і проходить через радіальні вентиляційні канали в відводять камери.

Повітряне охолодження застосовується в турбогенераторах до 12 МВт і гідрогенераторах до 150- 160 МВт.

Більші генератори і синхронні компенсатори економічно вигідніше постачати водневим охолодженням.

Водневі системи охолодження забезпечують краще відведення тепла, так як водень має в 7 разів більшу теплопровідність і в 1,44 рази більший коефіцієнт тепловіддачі з поверхні. Це дозволяє збільшити потужність ТГ на 15 - 20%, або зберегти при тій же потужності на 15- 30% активні матеріали. Ще більш підвищується ефективність охолодження при підвищенні тиску водню.

За рахунок водневого охолодження також:

- знижуються втрати на тертя ротора;
- більш довговічною стає ізоляція, так як в середовищі водню не утворюється озону, її руйнівної);
- менше ймовірність пожежі, так як водень не підтримує горіння.

Поряд з цим водневе охолодження створює труднощі:

- щоб уникнути утворення вибухонебезпечної суміші з повітрям необхідна надійна ізоляція вентиляційної системи і підтримку підвищеного тиску;
- корпус генератора повинен бути міцнішим (більше витрати металу і вище якість зварювання);
- вартість вище на 40%, але ця додаткова вартість окупається за 2 - 3 роки.

Джерелом водню на ТЕС є установки електролізу води. Рідше водень доставляють в балонах.

Для гідрогенераторів водневе охолодження не застосовується, тому що великі розміри не дозволяють створити надійну ізоляцію вентиляційної системи від навколишнього повітря.

6 Безпосереднє (форсоване) охолодження

Подальше підвищення потужності турбогенераторів виявилось можливим при переході на систему безпосереднього охолодження. У них охолодне середовище безпосередньо стикається з міддю обмоток. У безпосередніх системах охолодження в якості охолоджуючої середовища використовують водень, воду (рідше масло).

Безпосереднє охолодження турбогенераторів виконується за чотирма схемами:

1. Непряме охолодження статора і безпосереднє охолодження ротора воднем (генератори ТВФ). Непряме охолодження обмотки і стали статора здійснюється по Багатоструменеві радіальної схемою. Циркуляція водню здійснюється вентиляторами на валу машини. Обмотка ротора охолоджується за схемою самовентиляція: газ (водень) забирається з зазору між статором і ротором через отвори в пазових клинах з подальшим викидом нагрітого газу назад в зазор. Обмотка виконана з суцільних провідників прямокутного перерізу з косими вирізами в бічних поверхнях, що утворюють вентиляційні канали.

2. Безпосереднє охолодження статора і ротора воднем (генератори ТГВ). Циркуляція водню забезпечується компресором, встановленим з боку контактних кілець. Обмотка статора охолоджується по аксиальній (осьовій) схемою. Так як в пази статора вкладається велика кількість провідників малого перетину, утруднюється виконання вентиляційних каналів (вирізів) достатнього перетину. Тому водень пропускають по спеціальних трубках з немагнітної сталі, прокладених в пазах.

Обмотка ротора охолоджується по аксиальній схемою або за схемою самовентиляція. У разі аксіального охолодження обмотку ротора виконують з провідників коритоподібного перетину, що утворюють канали, в які газ подається з обох сторін.

Сталь статора охолоджується по радіальної схемою через вентиляційні канали в шіхтованного осерді.

3. Безпосереднє рідинне охолодження статора і безпосереднє водневе охолодження ротора. В якості охолоджуючої рідини застосовують масло і воду. Основна перевага масла полягає в його високих ізолюючих властивості, тому масло дозволяє використовувати дешеву паперову ізоляцію. Разом з тим, масло руйнує ізоляцію обмоток, пожароопасно, в'язкість масла створює труднощі його переміщення. Тому в більшості випадків використовують воду (генератори ТВВ). Обмотка статора охолоджується по аксиальній схемою водою. Для цього обмотка виконується з порожнистих провідників прямокутного перерізу, всередині яких циркулює вода. Сталь статора

охолоджується по радіальній схемою воднем. Ротор - за схемою самовентиляція воднем.

4. Безпосереднє рідинне охолодження статора і ротора. Для генераторів ТГВ- 500, 1200 МВт і гідрогенераторів виконують:

- охолодження статора водою;
- охолодження ротора водою;
- охолодження стали воднем по радіальній схемою.

На ТЕС доцільно використовувати конденсат турбін, включивши систему каналів охолодження генератора в систему циркуляції турбіни.

Для турбогенераторів ТВМ використовується масло, яке проходить через осьові канали в сталі статора і порожнисті провідники обмоток спеціальними маслососами. Сердечник статора відділений від ротора ізоляційним циліндром, який розміщується в зазорі і герметично закріплений в торцях.

Ефективність розглянутих систем охолодження ілюструється табл. 2.1.

Таблиця 2.1

Система охолодження	збільшення потужності
повітряне	1
Непряме водневе тиск 0.005 МПа	1.25
Непряме водневе тиск 0.2 МПа	1.7
безпосереднє водневе	2.7
Безпосереднє: статор- масло ротор- вода	3.6
безпосереднє водяне	4.0

7 Системи збудження генераторів

Система збудження призначена для живлення обмотки збудження ротора постійним струмом і регулювання струму збудження. Джерело струму збудження називається збудником.

Значення ЕРС генератора визначається величиною струму збудження. Тому регулювання напруги на виводах генератора здійснюється за рахунок зміни струму збудження.

Системи збудження характеризуються параметрами:

- $U_{fном}$ - номінальна напруга збудження (на кільцях ротора);
- $I_{fном}$ - номінальний струм збудження (відповідає номінальному навантаженню);
- $P_{fном}$ - номінальна потужність збудження (0,2 - 0,6% від номінальної потужності машини);
- форсіровочная здатність (K_U);
- швидкодія при аваріях в системі;
- швидкість развозбудження генератора при дії релейного захисту.

Форсіровочною здатністю по напрузі (струму) $K_{U(I)}$ називають відношення напруги (струму) стелі збудження $U_{f_{\text{пот}}} (I_{f_{\text{ном}}})$ до номінального $U_{f_{\text{ном}}} (I_{f_{\text{ном}}})$. Генератори повинні мати не менше, ніж дворазову форсировку

$$K_U = \frac{U_{f_{\text{ном}}}}{U_{f_{\text{ном}}}} \geq 2; K_I = \frac{I_{f_{\text{ном}}}}{I_{f_{\text{ном}}}} \geq 2.$$

Стеля збудження - величина, до якої швидко збільшують (форсують) збудження при глибокому зниженні напруги на затискачах генератора при коротких замикань в системі.

Швидкодію систем збудження в процесі форсування напруги при аваріях в енергосистемі характеризується швидкістю наростання напруги збудження (1 / сек).

$$v = 0,632 \cdot \frac{U_{f_{\text{ном}}} - U_{f_{\text{ном}}}}{U_{f_{\text{ном}}} \cdot t} \geq 2 \frac{1}{c},$$

де t - час, за який відбувається форсування.

До систем збудження ставляться такі вимоги:

- висока надійність в нормальному і аварійному режимах;
- стійкість збудження; - висока стеля збудження;
- висока швидкість наростання збудження.

Порушення машини стійко, якщо будь-яка зміна її навантаження не викликає зміни збудження і на затискачах генератора підтримується рівень напруги з точністю до $\pm 0,5\%$.

Залежно від збудника системи збудження можна розділити на два основних види: - електромашини збудження;
- напівпровідниковий збудження.

Напівпровідникові системи збудження, в свою чергу, можна розділити на три види:

- височастотне (індукторні) незалежне збудження;
- тиристорне незалежне збудження;
- безщіткового незалежне збудження;
- напівпровідниковий самозбудження.

8 Електромашинні системи збудження

Збудником (GE) є генератор постійного струму. Збудник може мати

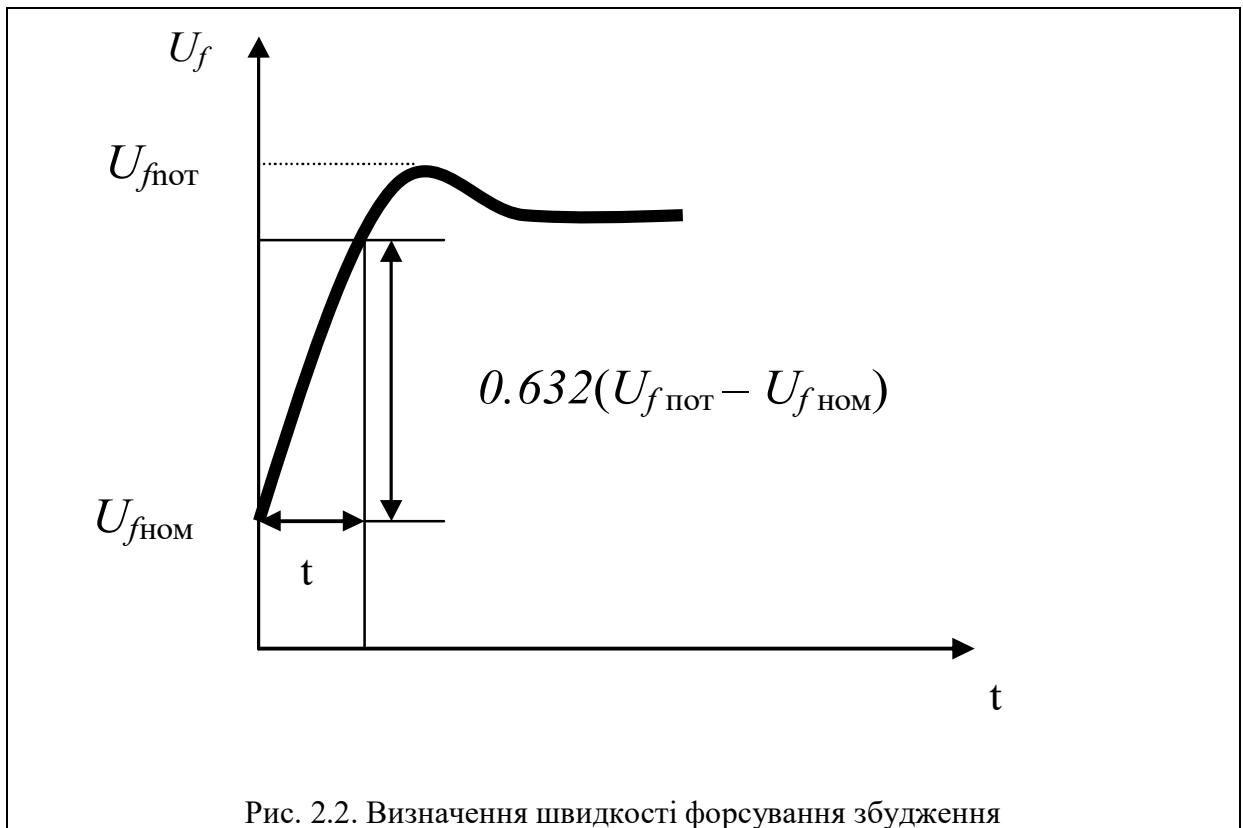


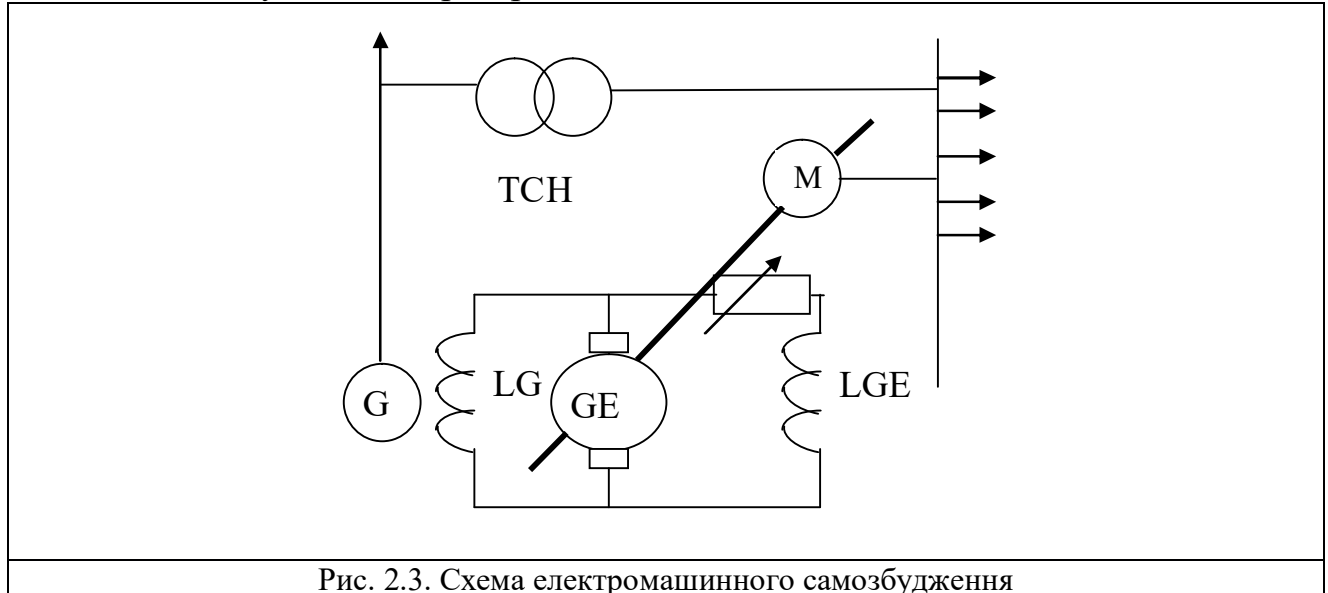
Рис. 2.2. Визначення швидкості форсування збудження самозбудження (обмотка збудження LGE підключена до якоря) або збудження від незалежного підзбудника (генератора постійного струму).

До збудника підключається обмотка збудження LG основного генератора G.

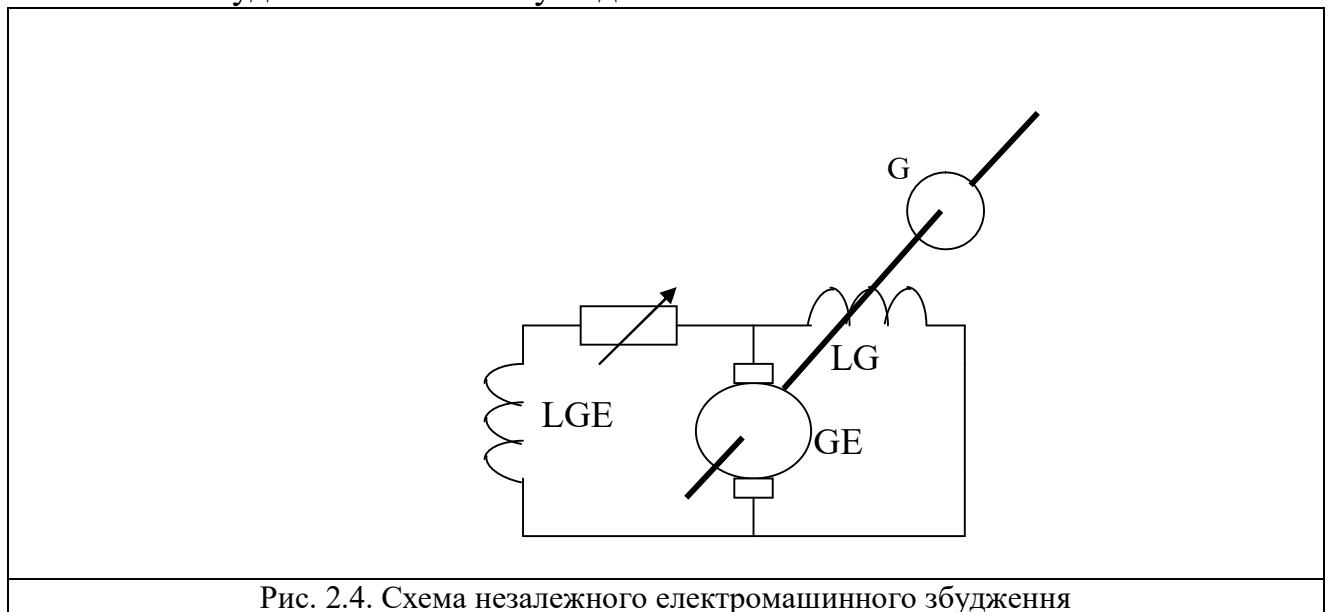
Розрізняють електромашинні системи збудження двох типів: самозбудження і незалежне збудження.

У схемі самозбудження (рис. 2.3) якорь генератора постійного струму (збудника) приводиться в обертання асинхронним двигуном М, який підключений до шин 0,4 кВ власних потреб електростанції. Трансформатор 10 / 0,4 кВ власних потреб (ТСН) підключений до висновків основного

генератора. Якщо поблизу висновків генератора відбудеться коротке замикання, напруга в точці підключення ТСН різко знижується і порушується робота системи збудження. Тому самозбудження застосовується тільки для малопотужних генераторів або в якості резервних систем для потужних генераторів.



У схемі незалежного збудження (рис. 2.4) якор збудника знаходиться на одному валу з ротором основного генератора. При аварійних посадках напруги на виводах генератора не відбувається порушення функціонування системи збудження, так як швидкість обертання ротора основного генератора протягом деякого часу не змінюється за рахунок інерції турбіни. Тому незалежне збудження має високу надійність.



Регулювання струму в схемах електромашиного збудження здійснюється за рахунок змінного опору в ланцюзі LGE.

Електромашинні системи збудження застосовуються тільки для генераторів потужністю до 100 - 150 МВт.

9 Незалежне високочастотне збудження з напівпровідниковими випрямлячами

В якості збудника (GE) використовується генератор змінного струму на одному валу з турбогенератором (G).

Для зменшення габаритів збудника в якості допоміжного генератора застосовують високочастотний індукторний генератор трифазного струму 500 Гц. Ротор індукторного генератора не має обмотки збудження, а на його циліндричній поверхні вифрезерована 10 поздовжніх пазів. У пазах статора розташовані: трифазна обмотка і три обмотки збудження (послідовна і дві незалежні). При обертанні зубчастого ротора магнітний потік, створюваний обмотками збудження, пульсує. За рахунок пульсацій в обмотці трифазного змінного струму наводиться ЕРС частотою 500 Гц.

Напряга збудника випрямляється напівпровідниковим випрямлячем VD і підводиться до обмотки збудження LG основного генератора.

послідовна обмотка збудження LGE1 високочастотного збудника є основною і створює основний магнітний потік збудника.

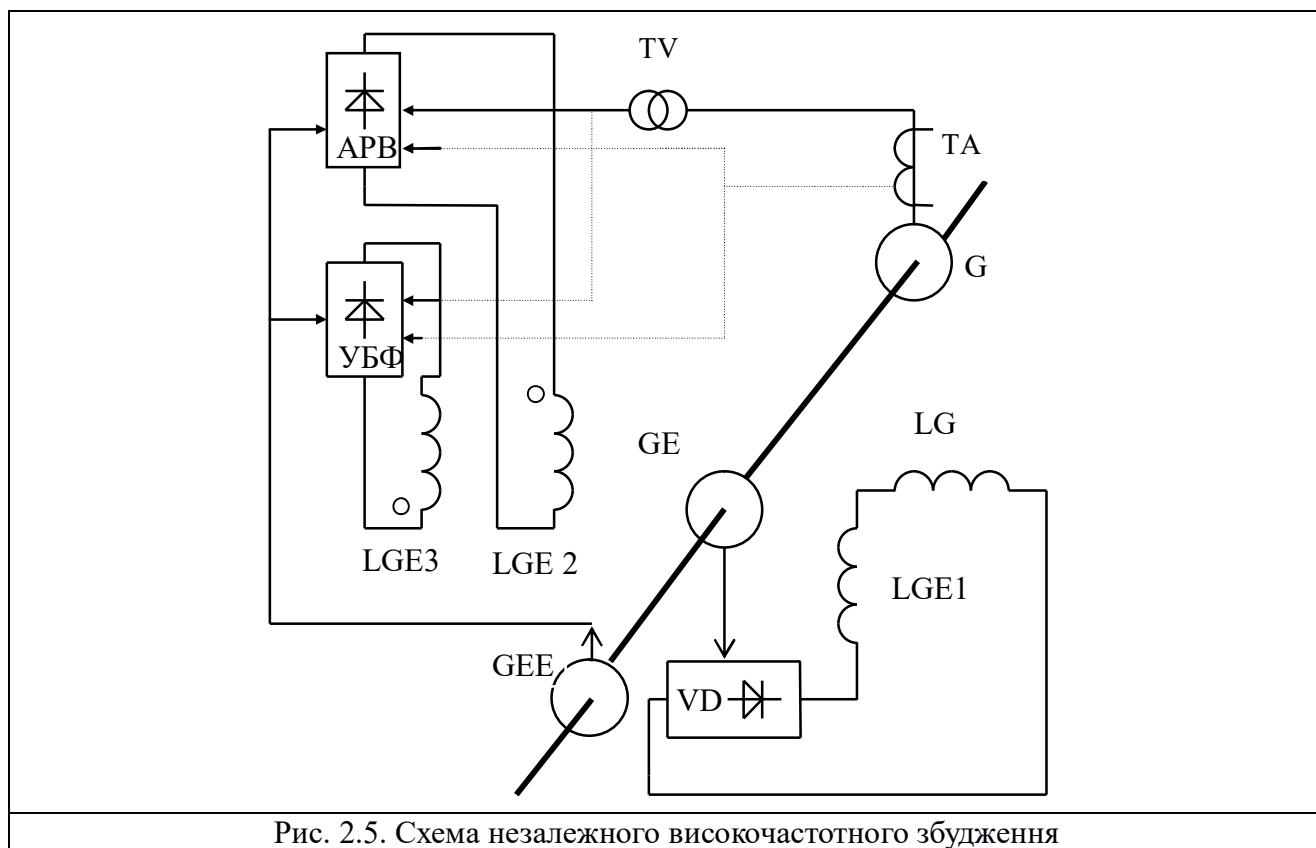


Рис. 2.5. Схема незалежного високочастотного збудження

Незалежна обмотка збудження LGE2 підключена через випрямний пристрій APB до підзбудника GEE. Вона створює МДС, зустрічну МДС основний обмотки. Регулювання струму в обмотці LGE2 здійснюється

пристроєм АРВ (автоматичного регулювання збудження), забезпечуючи підтримку напруги генератора при нормальному режимі роботи в функції напруги генератора через трансформатор напруги TV і струму через трансформатор струму ТА.

Незалежна обмотка збудження LGE3 підключена до підзбудника через пристрій безконтактної форсування збудження УФБ. Вона створює МДС, згідну з МДС основний обмотки, і забезпечує початкове короткочасне збудження при пуску і форсування збудження при аварійному зниженні напруги генератора більш ніж на 5%.

Як підзбудника GEE використовується високочастотний індукторний генератор (400 Гц), що порушується постійними магнітами на роторі.

Високочастотний збудження забезпечує $KU = 2$ і $V = 2$ (1 / с). Тому воно використовується для ТГ середньої потужності 200 -300 МВт за умови, що вони не вимагають високої швидкодії за умовами роботи.

10 Питання для самоконтролю.

1. Синхронні генератори.
2. Основні параметри та експлуатаційні характеристики.
3. Конструктивні особливості.
4. Системи охолодження.
5. Сучасні системи збудження і вимоги до них.
6. Перспективи поліпшення характеристик генераторів.