

Розділ II. Кола однофазного та трифазного синусоїдального струму

Тема 2.1 «Кола однофазного та трифазного змінного струму»

Лекція 7

Отримання трифазної системи напруг і струмів. Синхронний генератор. З'єднання обмоток генератора та споживачів «зіркою»

Мета: оволодіти знаннями про принцип дії та улаштування трифазних синхронних генераторів, способи з'єднання їх обмоток та способи з'єднання споживачів електричної енергії з трифазними генераторами.

Методи: словесний, практичний, наочний.

План:

1. Принцип побудови трифазної системи.
2. Синхронний генератор.
3. Трипровідна та чотирипровідна схеми з'єднання трифазної системи «зіркою».

1. Принцип побудови трифазної системи.

Об'єднання в одній лінії електропередачі декількох ланцюгів змінного струму з незалежними джерелами електроенергії називається *багатофазною системою*. Найбільше поширення одержала *трифазна система*, яка була винайдена й розроблена у всіх деталях, включаючи генератор трифазного змінного струму, трифазний трансформатор і асинхронний двигун, М.О.Доліво-Добровольским в 1889-1891 рр. Завдяки своїм перевагам винахід привернув увагу інженерів і промисловців усього світу; трифазна система швидко зайняла провідне положення у світовій електротехніці й зберігає його дотепер.

Трифазною системою змінного струму називається сукупність трьох однофазних змінних ЕРС (струмів) однакової частоти й амплітуди, зрушених одна відносно іншої по фазі на $1/3$ періоду (120°). Кожна з ЕРС (струмів) перебуває у своїй фазі періодичного процесу, тому часто називається просто «фазою». Також «фазами» називають провідники – носії цих струмів.

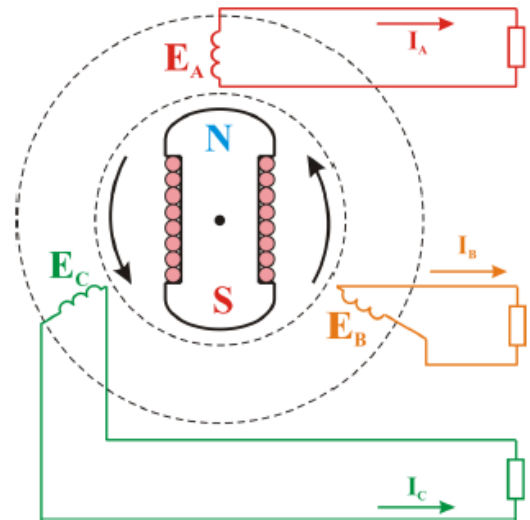
Причини широкого розповсюдження трифазних систем:

1. Значна економія металу проводів порівняно з трьома однофазними лініями.
2. Низькі вартість, маса і висока економічність трифазного генератора порівняно з трьома однофазними.
3. Можливість отримання обертового магнітного поля трьома нерухомими котушками.

Для того щоб з'ясувати, як одержують трифазний змінний струм, коротко розглянемо устрій трифазного генератора. Трифазний генератор складається із трьох однакових ізольованих друг від друга обмоток, розташованих на статорі й рознесених у просторі на 120° . У центрі статора обертається електромагніт (мал. 1).

При цьому форма магніту така, що магнітний потік, що пронизує кожну котушку, змінюється по косинусоїдальному закону.

Через те, що котушка В зміщена відносно котушки А на 120° , то така сама ЕРС, яка створюється у котушці А в момент часу t , в котушці В створюватиметься тоді, коли вона повернеться на 120° і займе місце котушки А. Тобто ЕРС у фазі В відстає від ЕРС у фазі А на 120° .



Мал. 1. Принцип одержання трифазної ЕРС

З тієї ж причини, ЕРС у фазі С відстає від ЕРС у фазі А на 240° .

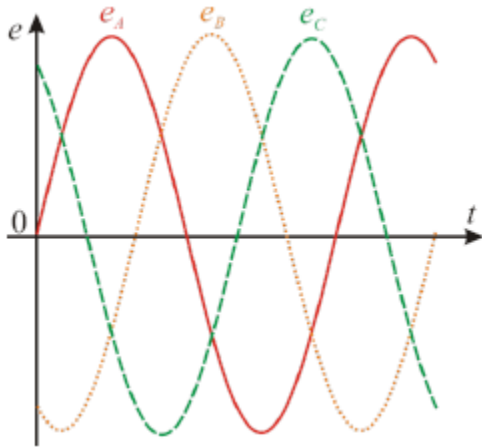
Отже, за законом електромагнітної індукції в котушках будуть індуковані ЕРС рівної амплітуди й частоти, що відрізняються одна від одної по фазі на 120° :

$$e_A = E_m \sin \omega t;$$

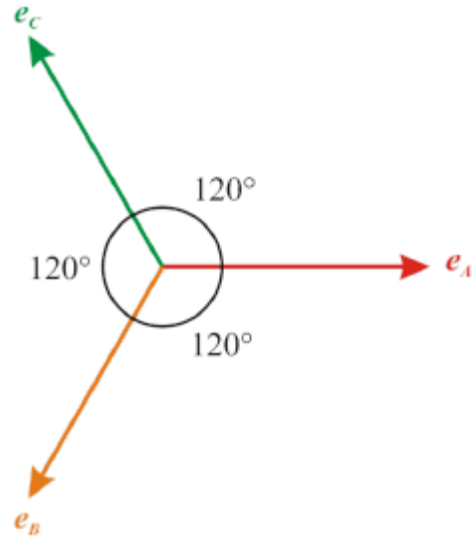
$$e_B = E_m \sin(\omega t - 120^\circ);$$

$$e_C = E_m \sin(\omega t - 240^\circ).$$

Ці три ЕРС можна зобразити на часовій (мал. 2) і векторній (мал. 3) діаграмах.



Мал. 2. Часова діаграма трифазної ЕРС



Мал. 3. Векторна діаграма трифазної ЕРС

Як видно з векторної діаграми, сума цих ЕРС дорівнює нулю.

Якщо в трифазній системі діють електрорушійні сили, рівні по величині й зрушені по фазі на 120° , а повні опори навантажень усіх трьох фаз як по величині, так і по характеру (по величині й знаку фазового зрушення) однакові, то режим у ній називається **симетричним**. Невиконання однієї із цих умов або обох є причиною **несиметричного** режиму.

Щоб утворювати із цих незалежних однофазних систем єдину трифазну, необхідно певним чином електрично з'єднати окремі обмотки.

Існують два основні способи з'єднання: зіркою й трикутником.

2. Синхронний генератор.

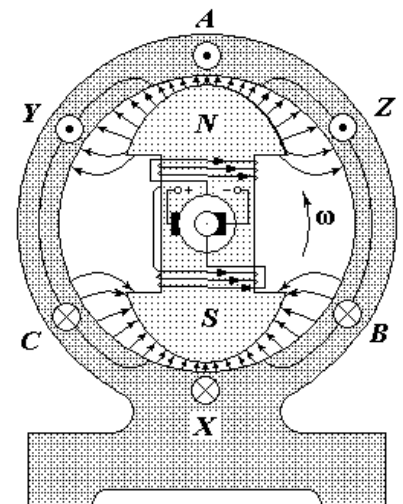
Синхронні генератори перетворюють механічну енергію первинних двигунів в електричну енергію трифазного струму.

Основними частинами будь-якого генератора є:

- 1) **система збудження**, що створює основний магнітний потік машини;
- 2) **якір**, в обмотці якого індукується ЕРС.

Генератори трифазного струму, як правило, виконуються з рухомою системою збудження (ротор) і нерухомим якорем (статор).

Для створення основного магнітного потоку в синхронних машинах застосовують електромагніти, що живляться від допоміжного джерела постійного струму. Обмотку електромагнітів прийнято називати обмоткою збудження. Якір (статор) має форму порожнистого циліндра, в пазах якого з внутрішньої сторони розміщені провідники трифазної обмотки, – по суті не відрізняється від статора асинхронної машини.



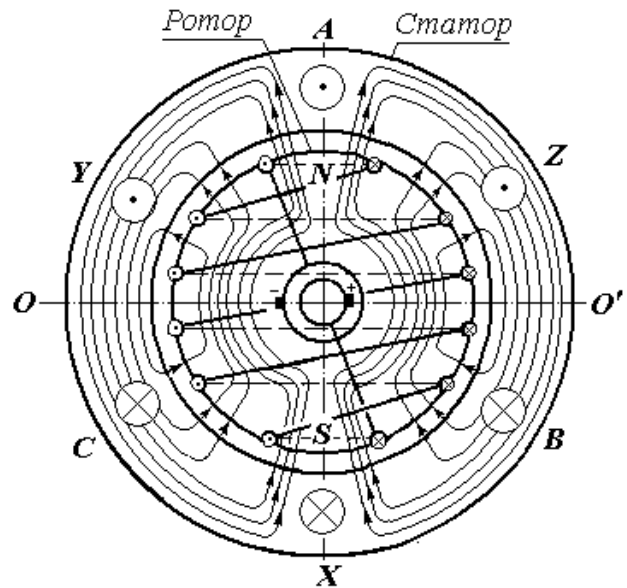
Отримання синусоїдальної ЕРС.

Для отримання синусоїдальної ЕРС в обмотці якоря необхідно, щоб розподіл магнітних ліній (тобто магнітної індукції B) в повітряному зазорі між статором і ротором був також синусоїдальним.

Цього можна досягнути двома шляхами:

- 1) застосуванням електромагнітів з полюсами належної форми;
- 2) відповідним розміщенням обмотки збудження в пазах ротора.

У першому випадку ротор виконується з явно вираженими (виступаючими) полюсами. Полісні наконечники мають таку форму, при якій повітряний зазор збільшується, а магнітна індукція (щільність магнітних ліній) зменшується від середини полюса до його країв.



У другому випадку ротор являє собою масивний сталевий циліндр, в пазах якого розміщена обмотка збудження. Окремі котушки цієї обмотки сполучені між собою так, як показано на мал. (суцільні лінії показують з'єднання котушок з переднього торця ротора, а пунктирні лінії — із заднього торця). Магнітні потоки котушок мають спільну вісь (N–S). Розміри котушок неоднакові. Завдяки цьому максимум магнітної індукції B_m співпадає з віссю полюсів NS і по мірі віддалення від цієї осі щільність магнітного потоку убиває. Розподіл магнітної індукції в повітряному зазорі при цьому виходить близьким до синусоїдального.

Тихохідні генератори, що приводяться в рух гідротурбінами або двигунами внутрішнього згорання, виконуються з явно вираженими полюсами. Швидкохідні паротурбінні генератори мають циліндричні ротори з неявно вираженими полюсами (кругова швидкість ротора в швидкохідних машинах досягає значенні 150 – 160 м/сек. При цих швидкостях застосовувати ротори з явно вираженими полюсами не можна за умовою механічної міцності).

Кінці обмотки збудження у ротора будь-якого виконання приєднані до двох ізольованих від вала кілець. Струм в обмотку збудження подається через щітки, накладені на кільця. Як правило, обмотка ротора живиться від збуджувача (генератора постійного струму), що знаходиться на одному валу з ротором синхронного генератора. Потужність збуджувача становить 1 – 3% від номінальної потужності генератора.

3. Трипровідна та чотиріпровідна схеми з'єднання трифазної системи «зіркою».

Окремі фази трифазної системи прийнято позначати латинськими буквами A, B і C. Цими ж буквами позначають початки обмоток генератора. Кінці обмоток позначають буквами X, Y і Z.

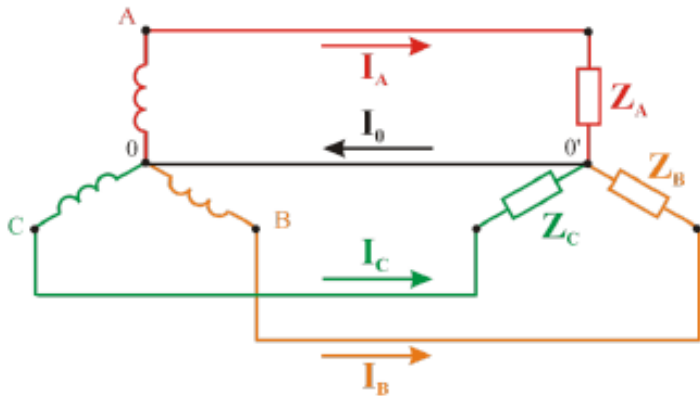
Умовимося, що позитивно спрямований струм виходить із обмотки генератора через її початок і входить у неї через її кінець. Якщо всі кінці обмоток генератора з'єднати в одній точці O, а до їхніх початків приєднати проводи, що йдуть до приймачів електричної енергії (у яких кінці також з'єднані в загальній точці O'), то ми одержимо з'єднання зіркою (мал. 4, 6).

Проводи, що з'єднують початки обмоток генератора із приймачами електроенергії, називаються лінійними.

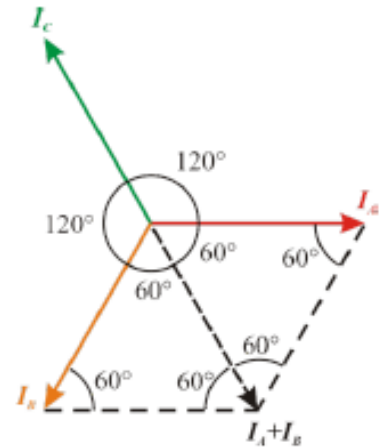
У ланцюгах трифазного струму незалежно від способу з'єднання розрізняють два типи напруг – лінійні U_L й фазні U_ϕ , і два типи струмів – лінійні I_L й фазні I_ϕ . Напруга між двома лінійними проводами називається **лінійною**, а між лінійним і нульовим

проводом - **фазною**. Струми, що протікають у лінійних проводах, називаються **лінійними**, а в навантаженнях фаз - **фазними**.

Ми бачимо, що контури, по яких замикаються фазні струми, при такому з'єднанні не зміняться в порівнянні з мал. 1. Отже, по загальному зворотному проводу буде протікати струм, що дорівнює сумі струмів трьох фаз:



Мал. 4. Чотирипровідна трифазна схема з'єднання зіркою



Мал. 5. Векторна діаграма струмів

$$\vec{I}_0 = \vec{I}_A + \vec{I}_B + \vec{I}_C$$

Якщо всі три фази мають однакові навантаження, то фазні струми будуть рівні по модулю, відрізняючись друг від друга по фазі на 120° :

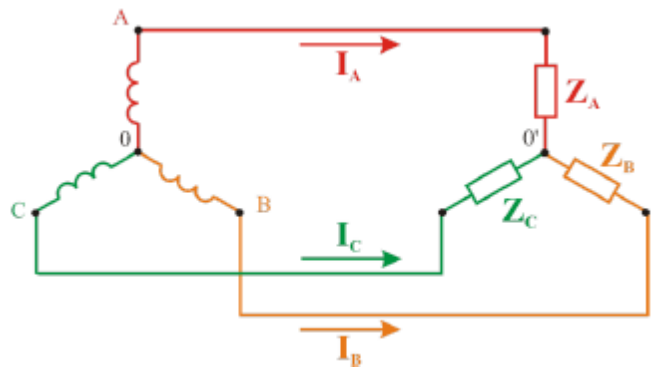
$$I_A = I_m \sin \omega t$$

$$I_B = I_m \sin(\omega t - 120^\circ)$$

$$I_C = I_m \sin(\omega t - 240^\circ)$$

Для того щоб знайти значення струму в проводі OO' , потрібно скласти струми. Але набагато простіше це можна зробити за допомогою векторної діаграми (мал. 5). У результаті ми одержимо, що при симетричній навантаженні струм у загальному проводі дорівнює нулю, тому провід OO' називається **нульовим**. Точка з'єднання кінців обмоток генератора або кінців навантажень називається **нульовою**. Система трифазного струму з нульовим проводом називається **чотирипровідною**. З'єднання зіркою з нульовим проводом умовно позначають Y_0 або Y_n , без нульового проводу - Y .

На перший погляд може здатися, що оскільки в нульовому проводі струм дорівнює нулю, то цей провід можна зовсім забрати, залишивши тільки три лінійні проводи. Однак це не завжди можливо. Струм у нульовому проводі дорівнює нулю при цілком симетричному навантаженні. Трифазна схема, з'єднана «зіркою» без нульового проводу, називається трипровідною (мал. 6).



Мал. 6. Трипровідна трифазна схема з'єднання зіркою

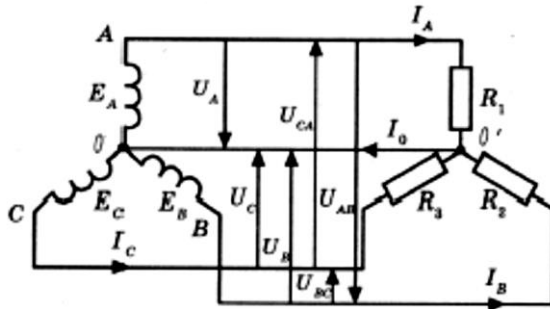
Якщо навантаження несиметричне ($Z_A \neq Z_B \neq Z_C$), то й струми будуть різними $I_A \neq I_B \neq I_C$. З мал. 5 очевидно, що $\vec{I}_A + \vec{I}_B + \vec{I}_C = \vec{I}_0 \neq 0$. Отже, при наявності нульового проводу через рівність потенціалів точок O та O' фазні напруги залишаються незмінними незалежно від симетрії навантаження; але при несиметричному навантаженні по нульовому проводу буде протікати деякий струм $\vec{I}_0 \neq 0$.

У випадку несиметричного навантаження і відсутності нульового проводу струми I_A, I_B, I_C мають змінитися так, щоб на виконання першого закону Кірхгофа їх

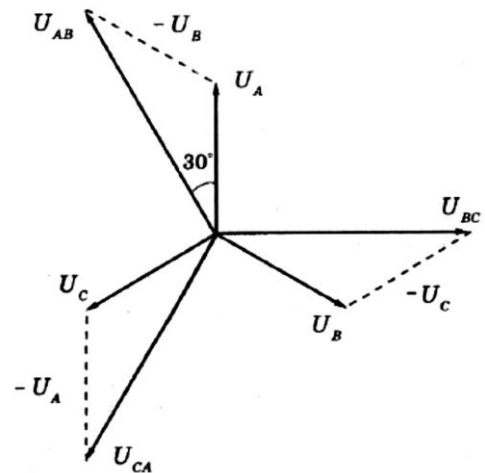
векторна сума дорівнювала нулю. Але при фіксованих опорах навантаження струми можуть змінитися тільки за рахунок фазних напруг. Через те обрив нульового проводу призведе до **перерозподілу фазних напруг**, у результаті чого деякі з них стануть вище номінального (що неприпустимо), а деякі - нижче.

Отже, у ланцюгах із симетричними навантаженнями нульовий провід не потрібний. Такими є, наприклад, електродвигуни. Нульовий провід у чотирипровідній схемі призначений для забезпечення симетрії фазних напруг при несиметричному (наприклад, освітлювальному) навантаженні.

Надалі для позначення лінійних напруг будемо користуватися подвійними індексами, а фазних - одинарними (мал. 7).



Мал. 7. Фазні й лінійні напруги й струми в з'єднанні зіркою



Мал. 8. Векторна діаграма фазних і лінійних напруг

При з'єднанні зіркою лінійний струм збігається з фазним, тобто $I_L = I_\Phi$. Як видно з мал. 1, лінійні напруги при з'єднанні зіркою є векторними різницями відповідних фазних напруг:

$$\begin{aligned}\vec{U}_{AB} &= \vec{U}_A - \vec{U}_B; \\ \vec{U}_{BC} &= \vec{U}_B - \vec{U}_C; \\ \vec{U}_{CA} &= \vec{U}_C - \vec{U}_A.\end{aligned}$$

Побудуємо векторну діаграму лінійних і фазних напруг при з'єднанні зіркою (мал. 8).

Спочатку побудуємо три вектори фазних напруг: $\vec{U}_A$, $\vec{U}_B$ і $\vec{U}_C$, розташовані відносно один одного під кутом 120° , а потім, користуючись співвідношеннями фазних напруг – вектори лінійних напруг. Для побудови вектора лінійної напруги $\vec{U}_{AB}$ потрібно з вектора $\vec{U}_A$ відняти вектор $\vec{U}_B$, тобто додати до вектора $\vec{U}_A$ вектор $(-\vec{U}_B)$. Таким же способом будуються й інші вектори лінійних напруг. Ми бачимо, що лінійні напруги також утворюють симетричну трипроменеву зірку, повернену щодо зірки фазних напруг на кут 30° проти годинникової стрілки.

Для знаходження співвідношення між модулями лінійних і фазних напруг розглянемо тупокутний трикутник з кутом 120° при вершині, утворений векторами $\vec{U}_A$, $-\vec{U}_B$ і $\vec{U}_{AB}$. Вилучимо перпендикуляр з вершини тупого кута цього трикутника на протилежну сторону й знайдемо що $\frac{U_{AB}}{2} = U_A \cos 30^\circ$. Отже,

$$U_L = \sqrt{3} U_\Phi.$$

Таким чином, у трифазній системі, з'єднаною зіркою, лінійні напруги більше фазних у $\sqrt{3}$ рази. Наприклад, якщо лінійна напруга рівна 220 В, те фазна буде в $\sqrt{3}$ рази менше й рівно 127 В. Якщо ж фазна напруга рівна 220 В, то лінійна буде в $\sqrt{3}$ рази більше

- 380 В. В Україні й у більшості інших країн напруги 127, 220 і 380 В прийняті стандартними для приймачів низької напруги. При з'єднанні зіркою з нульовим проводом існують дві системи напруг - 220/127 В і 380/220 В. Наявність двох напруг (лінійної й фазної) є перевагою чотирипровідної лінії.

Якщо при з'єднанні зіркою з нульовим проводом навантаження стає нерівномірним, то останнє співвідношення можна вважати практично слушним. Слід тільки пам'ятати, що в цьому випадку в нульовім проведенні з'являється струм. Це приводить до незначного спадання напруги на нульовім проводі, яким звичайно можна зневажити. Тому можна вважати, що між нульовою точкою генератора й нульовою точкою приймача різниця потенціалів відсутня.

З'єднання зіркою без нульового проводу застосовують при підключенні обмоток трифазних двигунів, з нульовим проводом - при електрифікації житлових будинків. В останньому випадку він необхідний, оскільки в житловому будинку практично неможливо добитися симетрії навантажень. При цьому до будинків підводять три фази й нульовий провід, а усередині кожного будинку прагнуть приблизно однаково завантажити кожен з фаз, щоб загальне навантаження було більш-менш симетричним. До кожної квартири підводять нульовий провід й одну з фаз. Установка запобіжників у нульовім проводі на розподільних щитах категорично заборонена, тому що при перегорянні фазні напруги можуть стати нерівними, що приводить до перевищення номінальної напруги в деяких фазах і виходу з ладу освітлювальних і побутових приладів.

Знання, корисні для практики!

Ринок електрообладнання пропонує покупцям для побутових потреб різні агрегати з вироблення електричного струму, серед яких генератор синхронний і асинхронний генератор. Чому вони так називаються? Тому що будь-який такий агрегат має в своїй конструкції альтернатор. Це одна з основних частин, завдяки якій і виробляється електроенергія.

В чому ж різниця між синхронним та асинхронним генераторами?

Генератор синхронний являє собою апарат, в якому встановлений синхронний альтернатор. Він перетворює механічну енергію в електричну за допомогою вугільних щіток, які знімають цю електричну енергію з мідної або алюмінієвої обмотки ротора. Тому синхронний генератор ще називають щітковий. Саме такий вид альтернатора видає стабільну напругу при різних навантаженнях, наприклад пускових струмах.

У синхронного генератора величина напруги і частота підтримуються з великою точністю. Йому не страшні перевантаження перехідного режиму, не страшні надлишкові струми, які виникають при пуску побутових або промислових приладів, що містять електродвигуни. Саме вони мають різні коефіцієнти, які часом перевищують номінальну напругу в 2-4 рази. Це обов'язково потрібно враховувати при розрахунку потужності генератора.

Мінусом такого генератора можна вважати його нездатність працювати в сильно запиленіх і брудних місцях. У такому разі його обмотки засмічуються, починають грітися і щітки швидко виходять з ладу. Він також трохи важче і дорожче свого побратима. Однак, якщо обмотки статора і ротора мідні - здатність витримувати перепади потужності споживачів дуже висока. Саме мідна обмотка вважається найбільш якісним, тому що вона не перегрівається так сильно як алюмінієва і служить довше.

Застосування синхронного генератора виправдано, якщо електричні приймачі та прилади вимагають стабільної величини напруги, і, якщо можлива поява перевантажень в перехідному режимі при запуску обладнання.

Саме синхронний генератор в 97% використовується для живлення приватного будинку, дачі або котеджу. Тільки він здатний впоратися з пусковими струмами побутових електроприладів, такими як холодильник, морозильна камера, насос, кондиціонер, пылесос, котел опалення та ін.

Крім цього, їх варто придбати для забезпечення автономної життєдіяльності селища, малого підприємства, фермерського господарства, коли немає можливості

зробити централізоване енергопостачання. Виправдано його використання і там, де встановлено дороге електрообладнання, так він виробляє більш якісний струм.

Генератор асинхронний – це агрегат, який має більш просту конструктивну схему. Його альтернатор не має обмоток і щіток. Принцип дії асинхронного генератора заснований на принципі оборотності енергії. Він легше, дешевше, але має один істотний недолік – не здатність підтримувати стабільну напругу. Друга назва асинхронних генераторів – безщітковий.

Асинхронний генератор вразливий від перевантажень пускових струмів і не може підтримувати стабільну напругу і частоту при включенні і виключенні приладів з електродвигунами. Зате він легко витримує короткочасні короткі замикання і має широкий діапазон характеристик електричного струму, який видає. Для роботи певного обладнання (наприклад зварювального) ця його можливість стає незамінною.

Такий генератор має кращі властивості пилозахисту, він не має щіток, які треба періодично міняти, він легше і трохи дешевше.

Застосування асинхронного генератора виправдано, якщо споживач збирається підключити електрозварювання. Він забезпечує стабільну роботу електрозварювального апарату і гарантує більш рівний шов без раковин. Крім цього, асинхронний електрогенератор використовують на невеликих гідроелектростанціях, вітроенергетичних станціях, суднових електроенергетичних установках, а також для освітлення приміщень, в якості джерела живлення обігрівальних приладів, обладнання на будівельному майданчику, де завжди висока запиленість, і так далі.