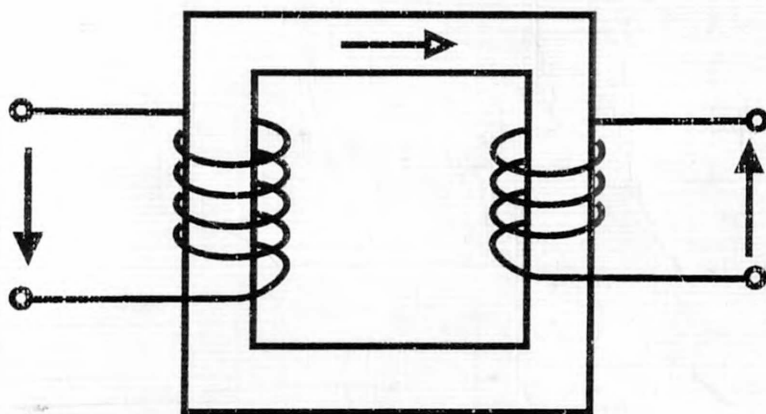


621.3  
0.35

В. В. О В Ч А Р О В

# ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ЭЛЕКТРОТЕХНИКИ

Часть 2



2007г.

В.В. Овчаров

# ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ЭЛЕКТРОТЕХНИКИ

*Часть 2*

Допущено Министерством аграрной политики Украины в качестве учебного пособия для подготовки бакалавров направления 0919 «Механизация и электрификация сельского хозяйства» (специальностей «Энергетика сельскохозяйственного производства» и «Электрификация и автоматизация сельского хозяйства») в высших учебных заведениях II – IV уровней аккредитации Министерства аграрной политики Украины.

72312 МЕЛІТОПОЛЬ  
Б. ХМЕЛЬНИЦЬКОГО 18  
БІБЛІОТЕКА ТДАТУ

2007 г.

Рецензенты: Ю.М. Васецкий, доктор технических наук, ведущий научный сотрудник Института электродинамики национальной академии наук Украины;  
А.Д. Черенков, доктор технических наук, профессор кафедры теоретической электротехники Харьковского государственного технического университета сельского хозяйства.

**Овчаров В.В.**

О-35 Теоретические основы электротехники 2007. – 215 с.

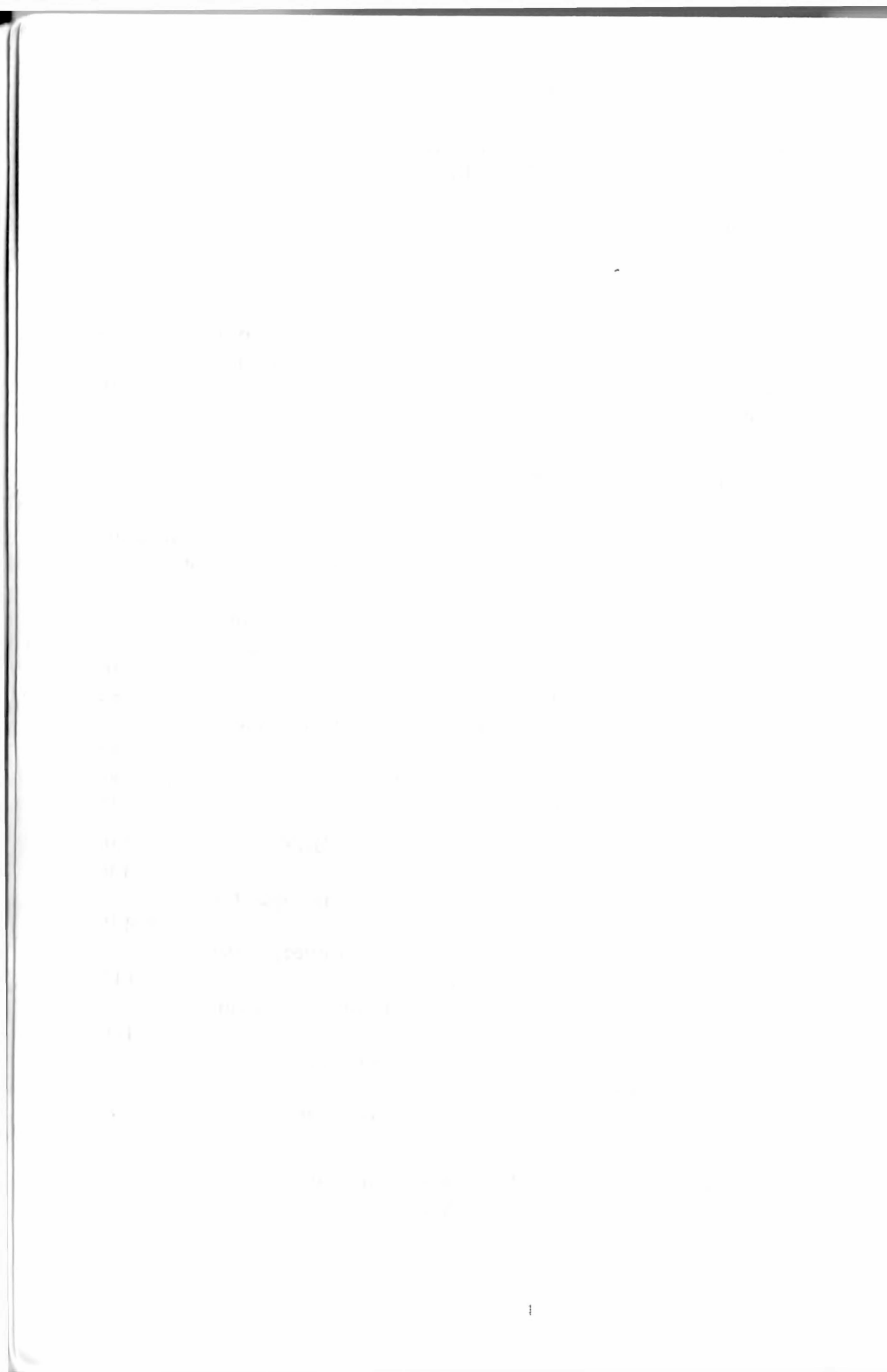
В пособии на базе основных физических понятий и положений рассматриваются электрические цепи трехфазного синусоидального тока, методы их расчета с использованием символического (комплексного) анализа.

Для студентов высших учебных заведений II – IV уровней аккредитации.

Все права защищены. Никакая часть этой книги не может быть отобрана в какой либо форме никакими способами без письменного согласия автора книги.

## Содержание

|   |            |
|---|------------|
| <b>Введение .....</b>   | <b>6</b>   |
| <b>Тема 8. СИММЕТРИЧНЫЕ ТРЕХФАЗНЫЕ ЦЕПИ СИНУСОИДАЛЬНОГО<br/>ТОКА .....</b>                          | <b>8</b>   |
| 8.1 Трехфазный генератор... ..  | 8          |
| 8.2 Трехфазные системы .....  | 12         |
| 8.3 Соединение фаз генератора звездой. ....   | 16         |
| 8.4 Соединение фаз нагрузки треугольником .....   | 24         |
| 8.5 Расчет неразветвленных трехфазных цепей синусоидального тока ..                                 | 28         |
| 8.6 Переключение нагрузки со схемы звезда на схему треугольник ..                                   | 36         |
| 8.7 Расчет разветвленных симметричных трехфазных цепей ...  | 38         |
| АЛГОРИТМ ИЗУЧЕНИЯ ТЕМЫ. ....  | 42         |
| <b>Тема 9. НЕСИММЕТРИЧНЫЕ ТРЕХФАЗНЫЕ ЦЕПИ<br/>СИНУСОИДАЛЬНОГО ТОКА. ....</b>                        | <b>62</b>  |
| 9.1 Четырехпроводная трехфазная система при несимметричном режиме ..                                | 62         |
| 9.2 Трехпроводная трехфазная система при соединении фаз звездой и<br>несимметричном режиме .....    | 68         |
| 9.3 Замыкание на землю одного из проводов трехфазной линии<br>электропередачи. ....                 | 72         |
| 9.4 Дугогасящая катушка .....   | 76         |
| 9.5 Расчет разветвленных несимметричных трехфазных цепей ...  | 80         |
| 9.6 Случаи несимметрии при соединении генератора и нагрузки<br>треугольником. ....                  | 84         |
| 9.7 Мощность трехфазных систем и ее измерение .....   | 88         |
| АЛГОРИТМ ИЗУЧЕНИЯ ТЕМЫ .....  | 98         |
| <b>Тема 10. МЕТОД СИММЕТРИЧНЫХ СОСТАВЛЯЮЩИХ. ....</b>   | <b>136</b> |
| 10.1 Оператор $\mathbf{a}$ трехфазной системы. ....   | 136        |
| 10.2 Симметричные составляющие несимметричных трехфазных<br>систем. ....                            | 136        |
| 10.3 Свойства трехфазных цепей по отношению к симметричным<br>составляющим токов и напряжений ..... | 142        |
| 10.4 Сопротивления симметричной трехфазной цепи токам разных<br>последовательностей .....           | 146        |
| 10.5 Расчет статической цепи при симметричной нагрузке и<br>несимметричной системе напряжений.....  | 150        |
| 10.6 Фильтры симметричных составляющих токов и напряжений .....                                     | 154        |
| АЛГОРИТМ ИЗУЧЕНИЯ ТЕМЫ. ....  | 158        |
| <b>Тема 11. ТРЕХФАЗНЫЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ЦЕПИ С ВРАЩАЮЩИМИСЯ<br/>ЭЛЕКТРИЧЕСКИМИ МАШИНАМИ. ....</b>      | <b>168</b> |
| 11.1 Пульсирующее магнитное поле .....  | 168        |
| 11.2 Вращающееся магнитное поле .....   | 172        |



|  |            |
|--|------------|
| 11.3 Принцип действия асинхронных и синхронных электрических машин.....                          | 176        |
| 11.4 Сопротивления электрических машин токам разных последовательностей.....                     | 178        |
| АЛГОРИТМ ИЗУЧЕНИЯ ТЕМЫ..   | 180        |
| <b>Тема 12. НЕСИНУСОИДАЛЬНЫЕ ТОКИ.....</b>   | <b>188</b> |
| 12.1 Несинусоидальные периодические токи и их представление в виде тригонометрического ряда..... | 188        |
| 12.2 Коэффициенты формы, амплитуды и искажения... ..   | 192        |
| 12.3 Расчет цепей с несинусоидальными электродвижущими силами и токами.. ..                      | 194        |
| 12.4 Мощность и коэффициент мощности при несинусоидальных токах.                                 | 198        |
| 12.5 Высшие гармоники в трехфазных системах.. ..   | 202        |
| АЛГОРИТМ ИЗУЧЕНИЯ ТЕМЫ.....  | 210        |

## Введение

Теоретические основы электротехники являются фундаментальной дисциплиной, на базе которой изучаются все остальные электротехнические дисциплины учебного плана специальности.

В свою очередь теоретические основы электротехники базируются на физике и высшей математике.

Особую роль играют знания физических явлений и законов, в частности семи электромагнитных явлений электризации тел, взаимодействия зарядов, электрического тока, теплового действия электрического тока, электромагнетизма, электромагнитной индукции, электромагнитной силы. Поэтому в учебнике приведены основные выходные знания этих явлений и законов.

Учебник написан таким образом, чтобы студенты имели возможность самостоятельно изучить курс теоретических основ электротехники. Для этого материал излагается так, что наряду с теоретическими положениями приводится их практическое применение для решения задач. В конце каждого раздела темы даются вопросы и задания для самоконтроля. По каждой теме приведен алгоритм ее изучения на трех уровнях: информационно-репродуктивном, практически-стереотипном и логически-понятийном. Экспериментальные исследования предлагается провести самим студентам, для чего они самостоятельно по условию составляют принципиальную электрическую схему экспериментальной установки, по заданию продумывают, как необходимо провести эксперимент и выполнить анализ полученных результатов.

Материал изложен на русском и украинском языках, что позволяет, во-первых, учесть языковую подготовку студента, во-вторых, дает возможность изучить украинский технический язык.

Для успешного изучения курса теоретических основ электротехники необходимо последовательно и ритмично выполнять программу изучения тем, добиваясь полного понимания излагаемого материала, не пропуская ни одного раздела, так как курс теоретических основ электротехники является цельным и непрерывным.

## Вступ

Теоретичні основи електротехніки є фундаментальною дисципліною, на базі якої вивчаються всі інші електротехнічні дисципліни навчального плану спеціальності.

В свою чергу теоретичні основи електротехніки базуються на фізиці та вищій математиці.

Особливе значення мають знання фізичних явищ та законів, зокрема, семи електромагнітних явищ: електризації тіл, взаємодії зарядів, електричного струму, теплової дії електричного струму, електромагнетизму, електромагнітної індукції, електромагнітної сили. Тому в підручнику наведені основні знання цих явищ та законів.

Підручник написаний таким чином, щоб студенти мали можливість самостійно вивчати курс теоретичних основ електротехніки. Для цього матеріал викладається так, що поряд з теоретичними положеннями наводиться їх практичне засновування для вирішення задач. В кінці кожного розділу теми даються запитання і завдання для самоконтролю. З кожної теми наведено алгоритм її вивчення на трьох рівнях: інформаційно-репродуктивному, практично-стереотипному і логічно-понятійному. Експериментальні дослідження пропонується провести самим студентам, для чого вони самостійно за умовою складають принципову електричну схему експериментальної установки, за завданням вирішують, як необхідно провести експеримент і зробити аналіз отриманих результатів.

Матеріал викладено російською і українською мовами, що дає можливість, по-перше, врахувати мовну підготовку студента, по-друге, дає можливість вивчити українську технічну мову.

Для успішного вивчення курсу теоретичних основ електротехніки необхідно послідовно і ритмічно виконувати програму вивчення, прагнучи повного розуміння викладеного матеріалу, не минаючи жодного розділу, так як курс теоретичних основ електротехніки є цілним та безперервним.

Тема 8.  
СИММЕТРИЧНЫЕ ТРЁХФАЗНЫЕ ЦЕПИ  
СИНУСОИДАЛЬНОГО ТОКА

8.1. Трёхфазный генератор

Трёхфазный генератор имеет две основные части: статор и ротор. На статоре размещаются три самостоятельные обмотки, оси которых сдвинуты одна относительно другой в пространстве на  $120^\circ$  (рис.8.1)

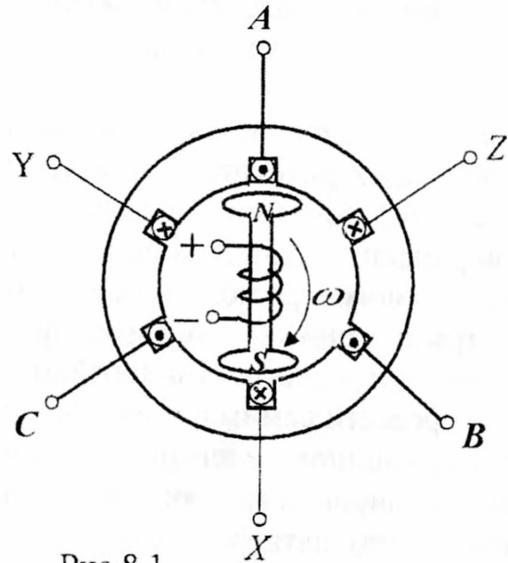


Рис.8.1

Вместе с ротором вращается созданное его током магнитное поле и в каждой обмотке наводится э.д.с. Поскольку э.д.с. достигают максимального значения, когда оси обмотки и полюса ротора совпадают, то сдвиг по фазе между тремя э.д.с. составляет  $120^\circ$ . Отдельные обмотки генератора получили название **фаз**, а сам генератор по количеству фаз называется **трёхфазным**.

Аналитические выражения мгновенных значений э.д.с. отдельных фаз будут иметь при этом такой вид:

$$e_A = E_{Am} \sin \omega t; \quad (8.1)$$

$$e_B = E_{Bm} \sin(\omega t - 120^\circ); \quad (8.2)$$

$$e_C = E_{Cm} \sin(\omega t - 240^\circ). \quad (8.3)$$

Изобразим э.д.с. графически (рис.8.2).

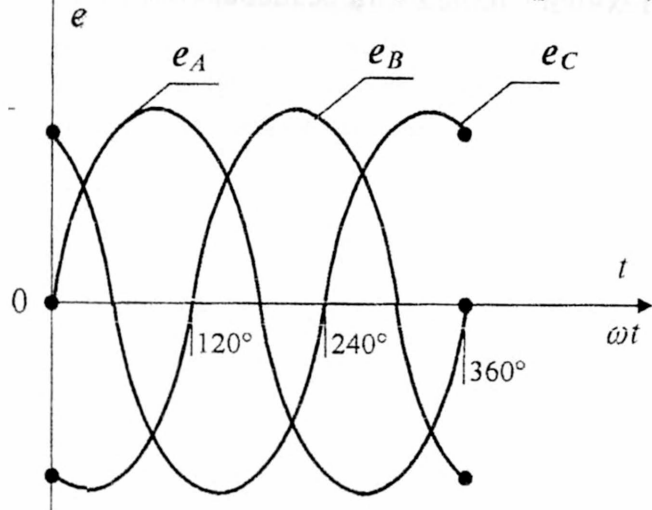
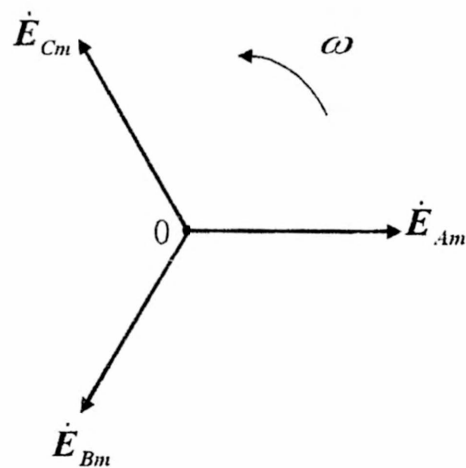


Рис.8.2



Тема 8.  
СИМЕТРИЧНІ ТРИФАЗНІ КОЛА  
СИНУСОЇДНОГО СТРУМУ

8.1. Трифазний генератор

Трифазний генератор має дві основні частини: статор і ротор. На статорі розміщуються три самостійні обмотки, осі яких зсунуті одна щодо іншої в просторі на  $120^\circ$  (рис.8.1).

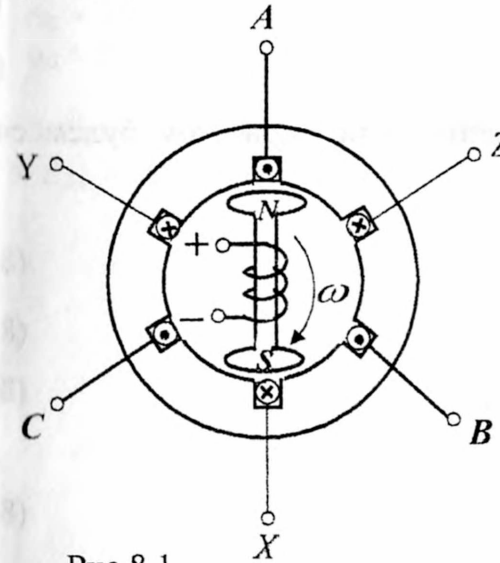


Рис.8.1

Разом з ротором обертається створене його струмом магнітне поле й у кожній обмотці наводиться е.р.с. Оскільки е.р.с. досягають максимального значення, коли осі обмотки і полюси ротора збігаються, то зсув за фазою між трьома е.р.с. становить  $120^\circ$ . Окремі обмотки генератора одержали назву **фаз**, а сам генератор за кількістю фаз називається **трифазним**.

Аналітичні вирази миттєвих значень е.р.с. окремих фаз будуть мати при цьому такий вигляд:

$$e_A = E_{Am} \sin \omega t; \quad (8.1)$$

$$e_B = E_{Bm} \sin(\omega t - 120^\circ); \quad (8.2)$$

$$e_C = E_{Cm} \sin(\omega t - 240^\circ). \quad (8.3)$$

Зобразимо е.р.с. графічно (рис.8.2).

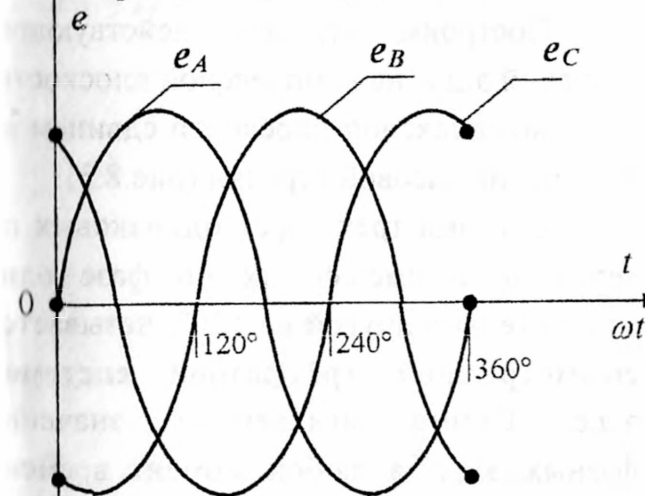
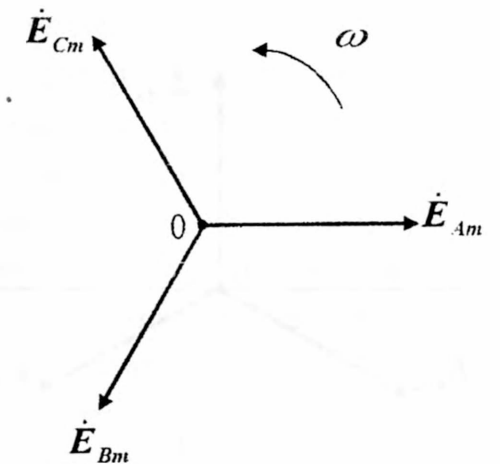


Рис.8.2



### Пример 8.1

Действующее значение фазной э.д.с. равно 220 В

Записать мгновенные значения фазных э.д.с., приняв  $\psi_{eA} = 0$

#### Решение

1 Максимальное значение фазной э.д.с.

$$E_{\phi m} = \sqrt{2} \cdot E_{\phi}$$

$$E_{\phi m} = \sqrt{2} \cdot 220 = 310 \text{ В}$$

2 Мгновенные значения фазных э.д.с.

$$e_A = 310 \sin \omega t,$$

$$e_B = 310 \sin(\omega t - 120^\circ),$$

$$e_C = 310 \sin(\omega t - 240^\circ)$$

Запишем **комплексы действующих значений э.д.с.**, при этом будем считать, что  $E_{Am} = E_{Bm} = E_{Cm} = E_m$ :

$$\dot{E}_A = E, \quad (8.4)$$

$$\dot{E}_B = E e^{-j120^\circ}; \quad (8.5)$$

$$\dot{E}_C = E e^{-j240^\circ}, \quad (8.6)$$

где

$$E = \frac{E_m}{\sqrt{2}}. \quad (8.7)$$

### Пример 8.2

Записать комплексы действующих значений фазных э.д.с., указанных в примере 8.1

#### Решение

1 Комплексы действующих значений фазных э.д.с.

$$\dot{E}_A = 220, \quad \dot{E}_B = 220 e^{-j120^\circ}, \quad \dot{E}_C = 220 e^{-j240^\circ}$$

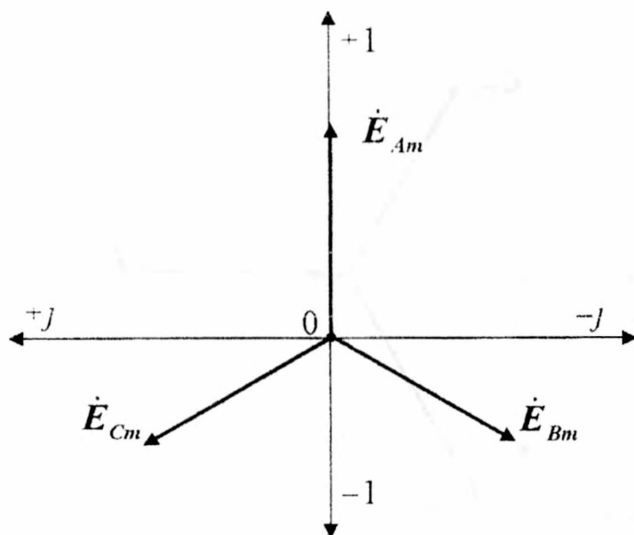


Рис. 8.3

Построим векторы действующих значений э.д.с. на комплексной плоскости, а оси комплексной плоскости сдвинем на  $90^\circ$  против часовой стрелки (рис. 8.3).

Система трёх э.д.с., одинаковых по величине и смещённых по фазе относительно друг друга на  $120^\circ$ , называется **симметричной трёхфазной системой э.д.с.** Сумма мгновенных значений фазных э.д.с. в любой момент времени равна нулю, что видно из векторной диаграммы (рис. 8.3).

### Приклад 8.1

Діюче значення фазної е.р.с. дорівнює 220 В

Записати миттєві значення фазних е.р.с., прийнявши  $\psi_{e_A} = 0$

#### Рішення

1. Максимальне значення фазної е.р.с.

$$E_{\phi m} = \sqrt{2} \cdot E_{\phi}$$

$$E_{\phi m} = \sqrt{2} \cdot 220 = 310 \text{ В}$$

2. Миттєві значення фазних е.р.с.

$$e_A = 310 \sin \omega t,$$

$$e_B = 310 \sin(\omega t - 120^\circ),$$

$$e_C = 310 \sin(\omega t - 240^\circ)$$

Запишемо **комплекси діючих значень е.р.с.**, при цьому будемо вважати, що

$$E_{Bm} = E_{Cm} = E_m$$

$$\dot{E}_A = E, \quad (8.4)$$

$$\dot{E}_B = E e^{-j120^\circ}, \quad (8.5)$$

$$\dot{E}_C = E e^{j240^\circ}, \quad (8.6)$$

$$E = \frac{E_m}{\sqrt{2}}. \quad (8.7)$$

### Приклад 8.2

Записати комплекси діючих значень фазних е.р.с., зазначених у прикладі 8.1

#### Рішення

1. Комплекси діючих значень фазних е.р.с.

$$\dot{E}_A = 220; \quad \dot{E}_B = 220 e^{-j120^\circ}; \quad \dot{E}_C = 220 e^{-j240^\circ}$$

Побудуємо вектори діючих значень е.р.с. на комплексній площині, а осі комплексної площини зсунемо на  $90^\circ$  проти годинникової стрілки (рис. 8.3)

Система трьох е.р.с., однакових за величиною і зсунутих за фазою одна щодо іншої на  $120^\circ$ , називається **симетричною трифазною системою е.р.с.** Сума миттєвих значень фазних е.р.с. у будь-який момент часу дорівнює нулю, що видно з векторної діаграми (рис. 8.3)

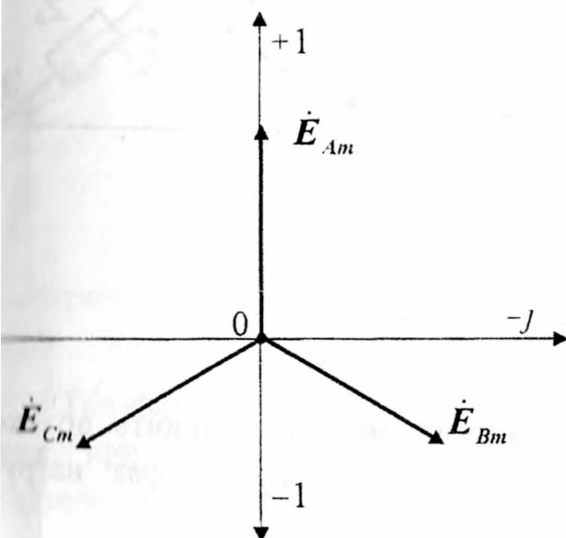


Рис. 8.3

## 8.2. Трёхфазные системы

Расчётная схема отдельной фазы генератора (например, фазы  $A$ ) имеет вид, изображённый на рис.8.4. Но чаще её показывают так, как изображено на рис.8.5. На этих схемах  $r_A, jX_A, Z_A$  – соответственно активное, реактивное и полное сопротивление обмотки.

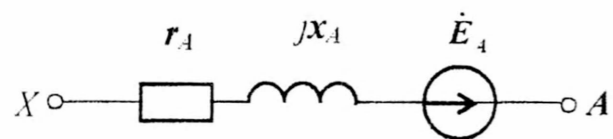


Рис.8.4

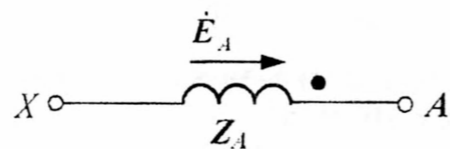


Рис.8.5

Каждую фазу (обмотку) трёхфазного генератора можно соединить с отдельным потребителем электрической энергии (фазой нагрузки), как показано на рис.8.6. В этом случае создается **несвязанная трёхфазная система** с тремя самостоятельными цепями и шестью проводами. Такая система неэкономична и потому не нашла применения.

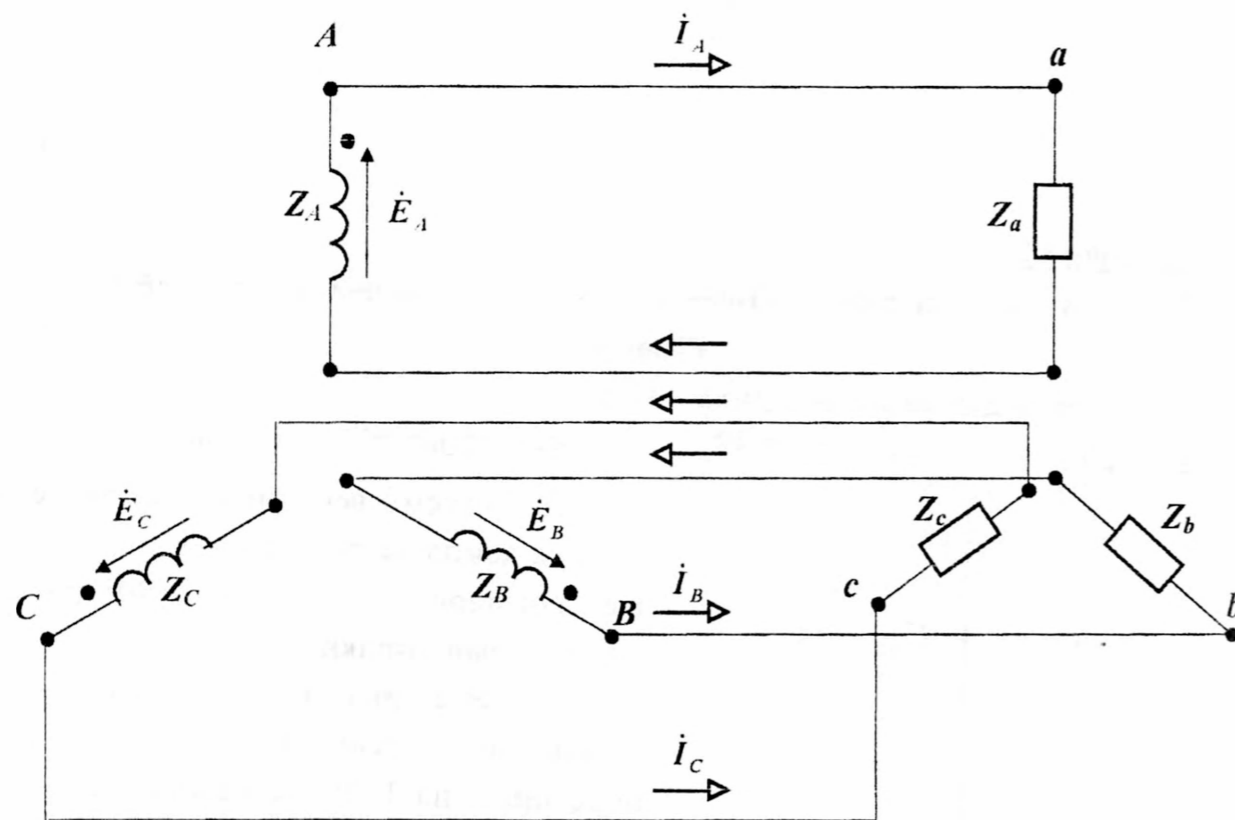


Рис.8.6

Три фазы генератора или три фазы нагрузки можно соединить по схеме **звезда**, при этом одноименные зажимы фаз генератора или фаз нагрузки объединяются в один узел (рис.8.7).

## 8.2. Трифазні системи

Розрахункова схема окремої фази генератора (наприклад, фази  $A$ ) має вигляд, зображений на рис.8.4. Але частіше її показують так, як зображено на рис.8.5. На цих схемах  $r, jX_A, Z_A$  – відповідно активний, реактивний і повний опори обмотки.

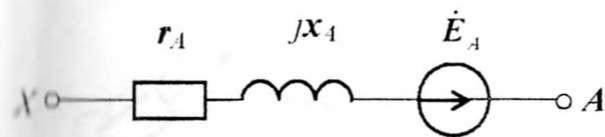


Рис 8.4

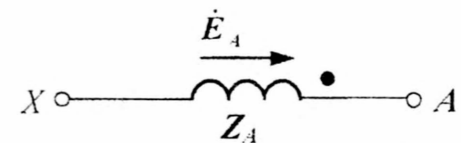


Рис.8.5

Кожну фазу (обмотку) трифазного генератора можна з'єднати з окремим споживачем електричної енергії (фазою навантаження), як показано на рис.8.6. У цьому випадку створюється **незв'язана трифазна система** з трьома самостійними колами і шестью проводами. Така система неекономічна і тому не знайшла застосування.

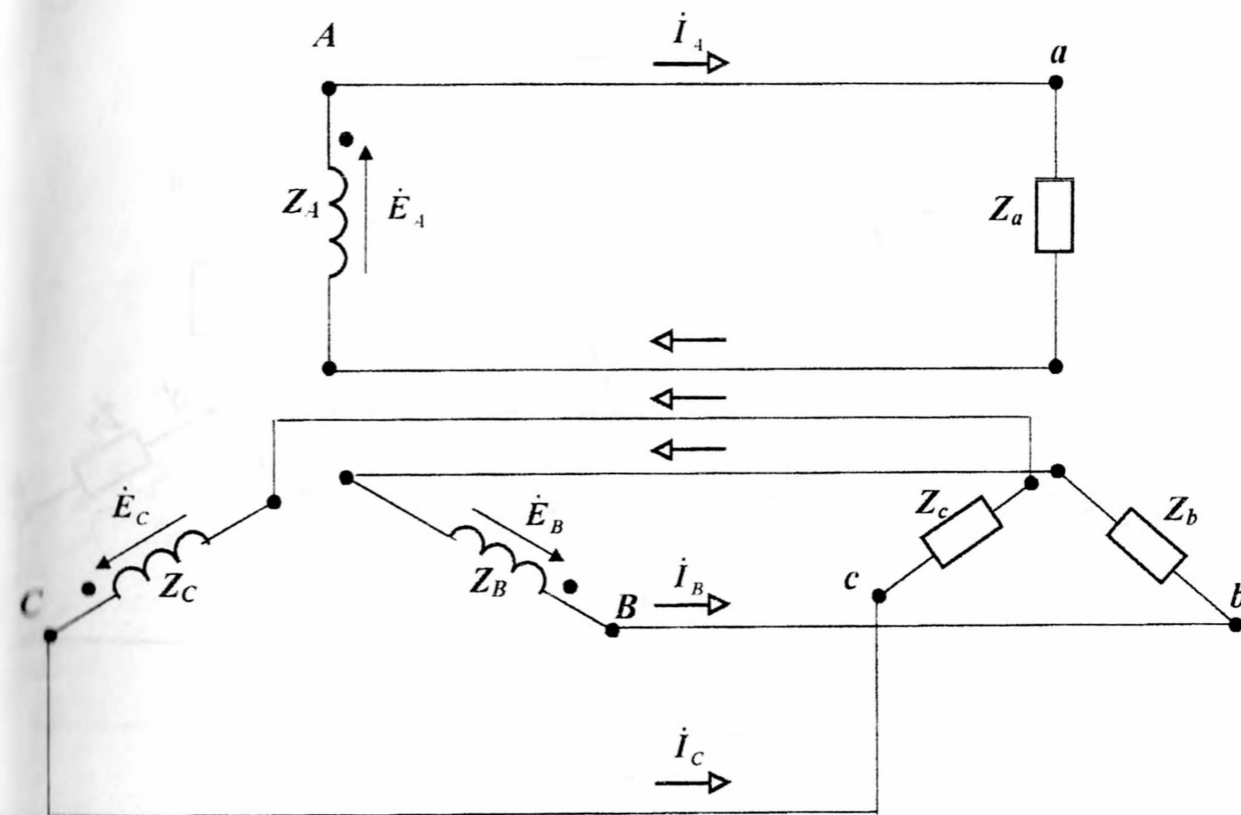


Рис 8.6

Три фазы генератора або три фазы навантаження можна з'єднати за схемою **зірка**, при цьому однойменні затиски фаз генератора або фаз навантаження об'єднуються в один вузол (рис.8.7).