

О совместной работе синхронных машин

В. Н. Кузнецов

кандидат технических наук, доцент кафедры электротехники и электроники
Вятский государственный университет. Россия, г. Киров. E-mail: kaf_eie@vyatsu.ru

Аннотация. Трехфазные синхронные генераторы электростанций работают, как правило, совместно. Теория совместной работы синхронных машин разработана давно и является классической. Однако изложение этой теории в литературе сопровождается многочисленными противоречиями, неточностями и даже ошибками. Это связано главным образом с произвольным, ничем не обоснованным выбором положительных направлений электрических величин на электрических схемах, с неверной трактовкой законов Кирхгофа, встречного и согласного включения синхронных генераторов.

В статье показано, что параллельное соединение двух синхронных генераторов – это их встречное (не согласное и не противофазное) включение, так как обмотки фаз генераторов соединены между собой одноименными выводами. Напряжение между этими выводами является общим для обоих генераторов. Отдельный генератор, включенный в сеть, становится частью ее, и из своего у него остается только ЭДС и механический момент на валу.

Ключевые слова: синхронный генератор, электрическая сеть, электрическое напряжение, ЭДС, параллельное соединение.

Совместная работа синхронных генераторов предполагает параллельное соединение их статорных (якорных) обмоток. Внутреннее сопротивление каждой фазы полученного таким образом эквивалентного генератора практически равно нулю. Поэтому электрическую сеть с таким источником можно считать трехфазным симметричным идеальным источником синусоидального напряжения, в котором фазные напряжения равны одноименным фазным ЭДС, амплитуды и действующие значения напряжений всех трех фаз и частоты этих напряжений равны между собой и являются постоянными величинами.

Идеальным условием включения синхронного генератора в такую сеть является равенство мгновенных значений фазных напряжений генератора и сети: равенство амплитуд, частот и начальных фаз напряжений «(совпадение по фазе векторов \dot{U}_C и $\dot{U}_Г$)» [2, с. 335]. Однако описание последующей совместной работы этой машины с сетью не выдерживает никакой критики.

Цель данной статьи – показать характерные ошибки в изложении теории совместной работы синхронных машин в учебной литературе и выразить мнение по этой проблеме.

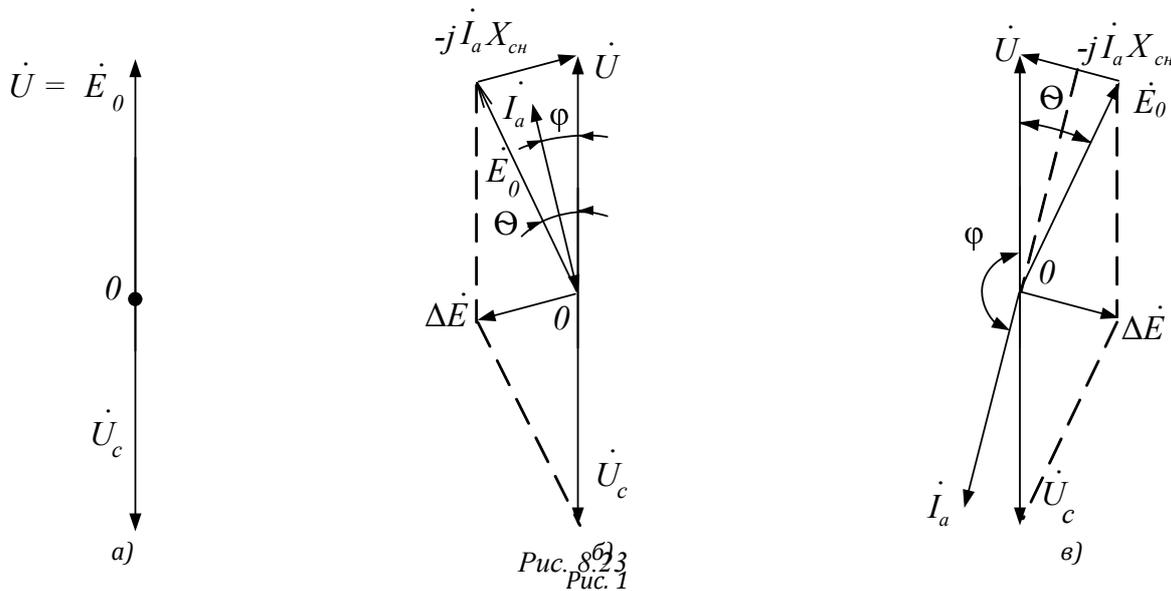
Авторы цитируемого выше учебника утверждают: «После включения генератора в сеть его напряжение U становится равным напряжению сети U_C . Относительно внешней нагрузки напряжения U и U_C совпадают по фазе, а по контуру “генератор – сеть” находятся в противофазе, т. е. $\dot{U} = -\dot{U}_C$ (рис. 1а). При точном выполнении <...> условий, необходимых для синхронизации генератора, его ток I_a после подключения машины к сети равняется нулю. <...> Если к валу генератора приложить внешний момент, <...> то <...> вектор \dot{E}_0 смещается относительно вектора \dot{U} на некоторый угол θ (рис. 1б). <...> При работе в рассматриваемом режиме генератор отдает в сеть активную мощность. <...> Если к валу ротора приложить внешний тормозной момент, то вектор \dot{E}_0 будет отставать от вектора напряжения \dot{U} на угол θ (рис. 1в).

Следовательно, в рассматриваемом режиме <...> машина работает двигателем. <...> Однако для синхронного двигателя в приведенные уравнения вместо напряжения машины \dot{U} надо подставить – \dot{U}_C , так как термин «напряжение двигателя» обычно не употребляется» [2, с. 336, 337, 353].

Налицо, как видим, парадоксальная ситуация.

Казалось бы, предусмотрели все: сравнивали напряжения сети и подключаемого генератора как по амплитуде, так и по частоте, и по фазе; не забыли и о порядке следования фаз. Но как только ге-

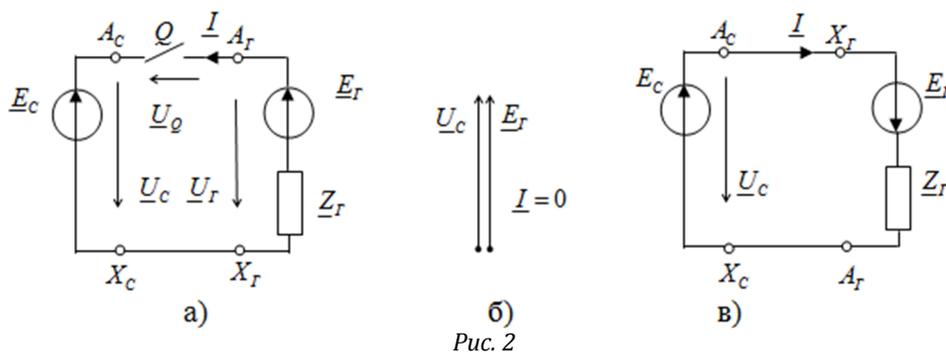
нератор подключили к сети, фаза напряжения генератора изменилась на 180° (вектор \dot{U} повернулся на 180°). Возникает вопрос: как генератор почувствовал, что его уже подключили к сети (тока нет) и по какому сигналу вектор напряжения повернулся на 180°?



Допустим, что авторы учебника правы – после подключения генератора к сети сложилась описанная выше ситуация (рис. 1а). Предположим, что параметры сети (эквивалентного генератора) и присоединенного к нему генератора одинаковы. В результате получили: два одинаковых генератора соединены между собой в двух точках (для одной фазы), и при этом их напряжения находятся в противофазе. А теперь к этим точкам попытаемся подключить еще один генератор. Сразу же возникает новый вопрос: при его синхронизации на какое из этих двух напряжений ориентироваться? (Оба генератора равноправны и оба претендуют на роль сети.) Задача неразрешимая с точки зрения теории, изложенной в рассматриваемом учебнике. И не только в этом учебнике, к сожалению.

Некоторые авторы вообще предлагают подключать генераторы к сети в момент, когда напряжения генератора и сети сдвинуты по фазе на 180°, заявляя, что уравнивающего тока в этом случае не будет. Так, Н. П. Ермолин считает, что для включения генератора в сеть необходимо установить «равенство фазных напряжений машины и сети $U = U_C$ и совпадение их по фазе во внешней цепи нагрузки (или сдвиг по фазе на 180° во внутренней цепи машин). <...> При включении генератора <...> никакого тока в цепи статора не будет, так как ЭДС его равна и прямо противоположна по фазе напряжению сети» [3, с. 178, 179, 184]. Об этом же говорит в своем учебнике и А. В. Иванов-Смоленский. Правда, как это ни странно, в своих теоретических построениях он игнорирует законы Кирхгофа и Ома. Чтобы убедиться в этом, достаточно сравнить рисунки 58-2, 58-3 и формулы (58.1) – (58.4) [4, с. 136–139].

А вот как изложена синхронизация генератора Н. Ф. Котеленцем, одним из авторов учебного пособия [1]. Он использует известную схему с ламповым синхроскопом на погасание света и схему замещения одной фазы, которая аналогична схеме, показанной на рис. 2а, только стрелка, указывающая положительное направление напряжения генератора, имеет противоположное направление.



Итак, читаем: «При замыкании рубильника <...> ток синхронизации I_c определяется по формуле:

$$\dot{I}_c = (\dot{E}_r - \dot{E}_c) / Z_a = (\dot{U}_r - \dot{U}_c) / Z_a,$$

где \dot{E}_r , \dot{E}_c (\dot{U}_r , \dot{U}_c) – ЭДС (напряжения) генератора и сети соответственно; Z_a – полное сопротивление обмотки якоря генератора. Чтобы ток \dot{I}_c был равен нулю (в контуре $E_r - E_c$), необходимо выполнение следующих условий: ЭДС генератора \dot{E}_r и сети \dot{E}_c должны быть равны по значению и находиться в противофазе. При отключенном рубильнике <...> между контактами рубильника действует ЭДС $\Delta \dot{E} = \dot{E}_r - \dot{E}_c = \dot{E}_{10} - \dot{E}_c$. Регулированием тока возбуждения генератора добиваются равенства ЭДС E_r и E_c , контролируя их значения с помощью вольтметров. Наиболее благоприятным для включения генератора в сеть является момент, когда $\Delta E = 0$ <...> и лампы не горят. Если в этот момент замкнуть рубильник, ток в <...> генераторе будет равен нулю» [1, с. 199–201].

В этой короткой выписке имеются, как минимум, пять ошибок. Так, в выделенной формуле перед напряжением генератора должен стоять знак минус, так как, согласно закону Кирхгофа, $\dot{U}_r = -\dot{E}_r$; в знаменателе формулы должно быть комплексное сопротивление, а не полное. Между контактами рубильника «действует» напряжение, но никак не ЭДС. Далее. Два равных по значению комплексных числа (ЭДС генератора и сети в условии синхронизации) принципиально не могут находиться в противофазе. (Равенство комплексных чисел заключается в равенстве не только их модулей, но и аргументов.) Допустим, что в текст вкралась опечатка и условием синхронизации является равенство действующих значений (не комплексных) противофазных ЭДС. В этом случае $\Delta \dot{E} = \dot{E}_r - \dot{E}_c = \dot{E}_r - (-\dot{E}_r) = 2\dot{E}_r$, т. е. результат противоположен предсказанному автором пособия: яркость ламп наибольшая, ток в момент включения равен удвоенному току короткого замыкания генератора. (И последнее: вольтметром измеряют напряжение, а не ЭДС.)

Продолжим чтение: «После включения генератора в сеть <...> его напряжение $\dot{U}_r = -\dot{E}_{10}$ уравновешивает напряжение сети, при этом $\Delta \dot{U} = \dot{U}_r + \dot{U}_c = 0$. Ток в цепи якоря также равен нулю». (На диаграмме изображены два вектора (\dot{U}_r и \dot{U}_c), равной длины и сдвинутые относительно друг друга на 180° . Сумма (не разность) этих векторов действительно равна нулю.) А далее следует нечто невероятное: «Если теперь увеличить ток возбуждения..., то ЭДС \dot{E}_{10} и напряжение \dot{U}_r возрастут, а $\Delta \dot{U} \neq 0$. Под действием разности напряжений $\Delta \dot{U}$ в цепи якоря возникнет ток. <...> Если при $\Delta \dot{U} = 0$ уменьшать ток возбуждения, то ЭДС E_{10} и напряжение U_r будут уменьшаться, а вектор $\Delta \dot{U}$ изменит свое направление. <...> При дальнейшем уменьшении тока возбуждения разность напряжений будет увеличиваться, а ток якоря – возрастать» [1, с. 207]. (На диаграммах изображены сдвинутые относительно друг друга на 180° векторы \dot{U}_r и \dot{U}_c и суммарный вектор $\Delta \dot{U}$, обуславливающий ток генератора. При этом на одной диаграмме вектор \dot{U}_r длиннее вектора \dot{U}_c , а на другой – короче.)

То, что сумму векторов автор пособия называет разностью, – это не главное. Суть в другом. Представим себе следующую ситуацию. Выводы генератора и электрической сети соединены между собой (речь идет об одной фазе), а к точкам соединения этих выводов подключены два одинаковых вольтметра: один для измерения напряжения сети, другой – генератора. Показания приборов одинаковы. Оператор стал изменять ток возбуждения генератора и показание одного вольтметра остается неизменным, а показание другого изменяется?!

Нелепость «теории» становится еще более выпуклой, когда речь заходит о синхронных двигателях. Напряжение на выводах работающего двигателя – это не что иное, как напряжение сети, к которой подключен двигатель. Это – истина, не требующая доказательств. Авторы же пособия и иже с ними считают, что напряжение двигателя существует само по себе, что оно противофазно напряжению сети и уравновешивает его [1, с. 212].

И последняя выписка, относящаяся к рассматриваемой теме: «При этих условиях в контуре «сеть – машина» сумма ЭДС равна нулю. <...> Говорят, что при синхронизации ЭДС находятся в противофазе, имея в виду, что они уравновешивают друг друга: $\dot{U}_c + \dot{E}_0 = 0$. <...> E_0 – ЭДС генератора ... и в обмотке якоря машины ток равен нулю» [5, с. 420, 424]. И здесь не по Кирхгофу: сумма ЭДС вместо разности, противофазные напряжения сети и генератора и т. д.

Общим для всех этих выдержек является то, что режим короткого замыкания подключенного к сети генератора преподносится читателю в качестве режима холостого хода. А далее, исходя из

этой ложной предпосылки, строится вся теория. Поэтому авторам невольно приходится вместо одного напряжения вводить два одновременно существующих и находящихся в противофазе напряжения – сети и генератора, сети и двигателя; питать синхронный двигатель не от реально существующей сети (с напряжением \dot{U}_C), а от ее зеркального отображения (с напряжением минус \dot{U}_C); о погасшей лампе говорить, что она светит ярко, и, наоборот, о ярко горящей лампе говорить, что она погасла и т. п.

Два синхронных генератора (как и два источника постоянного тока) можно соединить между собой либо последовательно, либо параллельно. Параллельное соединение – это встречное соединение источников, так как обмотки фаз генераторов соединяются между собой одноименными выводами. Напряжение между этими точками (выводами) является общим для обоих генераторов. Перед подключением генератора к сети он имеет свои ЭДС, и напряжение. Но как только его присоединили к сети, генератор становится частью ее и из своего у него остается только ЭДС и механический момент на валу. В контуре «генератор – сеть» ЭДС генератора и сети направлены навстречу друг другу и – в режиме холостого хода генератора – совпадают по фазе (не в противофазе!). Поэтому в любой момент времени они имеют равные (по значению и по направлению) мгновенные значения (уравнивают друг друга), их разность равна нулю, соответственно, отсутствует и уравнивающий ток между генератором и сетью. Это можно показать, используя схему замещения одной фазы (рис. 2а), где величины с индексом «С» относятся к сети, а с индексом «Г» – к генератору.

Согласно 2-му закону Кирхгофа, в любом режиме $\underline{U}_C = \underline{E}_C$. В режиме холостого хода генератора $\underline{U}_G = \underline{E}_G$. Напряжение на выключателе Q равно разности напряжений (ЭДС) генератора и сети:

$$\underline{U}_Q = \underline{U}_G - \underline{U}_C = \underline{E}_G - \underline{E}_C.$$

Генератор подключают к сети при $\underline{U}_Q = 0$, т. е. при $\underline{U}_G = \underline{U}_C = \underline{E}_G = \underline{E}_C$. При этом, согласно закону Ома, ток генератора определяется разностью ЭДС генератора и напряжения сети (а не их суммой, как утверждают цитируемые учебники):

$$I = (\underline{E}_G - \underline{U}_G) / Z_G = (\underline{E}_G - \underline{U}_C) / Z_G = 0.$$

Следовательно, и после подключения к сети генератор остается в режиме холостого хода. На рис. 2б показана векторная диаграмма, соответствующая этому режиму.

Если два генератора (генератор и сеть) соединены между собой параллельно (именно параллельно), их ЭДС (напряжения) не могут находиться в противофазе принципиально. Если же в контуре «генератор – сеть» ЭДС (напряжения) генератора и сети находятся в противофазе (что, по утверждению цитируемых учебников, соответствует режиму холостого хода), значит, обмотки фаз генераторов соединены между собой разноименными выводами (рис. 2в). А это уже не параллельное, а последовательное (согласное) соединение источников. В этом случае ЭДС источников, находясь в фазе (изменение направления ЭДС генератора на рис. 2в равносильно изменению ее фазы на 180°), складываются и создают в контуре ток

$$I = (\underline{E}_G + \underline{U}_G) / Z_G = (\underline{E}_G + \underline{U}_C) / Z_G,$$

который представляет собой не что иное, как двойной ток короткого замыкания генератора (при удвоенной ЭДС).

Таким образом, вместо ожидаемого режима холостого хода получили аварийный режим – режим короткого замыкания. Векторная диаграмма напряжений, приведенная на рис. 1а, отражает именно режим короткого замыкания, а не холостого хода.

В подтверждение сказанного выше рассмотрим две следующие ситуации.

Два человека, стоя в качелях лицом друг к другу, пытаются раскачать их. При этом они синхронно совершают абсолютно одинаковые движения с одинаковыми усилиями: толкают качели то вперед, то назад. Их движения находятся в фазе, а качели остаются неподвижными, так как усилия людей в любой момент времени уравновешены (равны и направлены встречно).

А теперь представим, что эти двое совершают такие же движения, что и в первом случае, но со сдвигом по фазе на 180° : один толкает вперед, а другой – назад и наоборот. Качели в этом случае будут качаться, причем амплитуда колебаний будет в два раза больше, чем от усилий только одного человека.

Вторую ситуацию можно заменить равноценной (эквивалентной): движения обоих субъектов находятся в фазе, но один из них предварительно повернулся на 180° .

В рассмотренных ситуациях люди являются аналогами генераторов, их усилия – аналогами ЭДС генераторов, а колебания качелей – аналогом тока в контуре. В первой ситуации с качелями имеем встречное (параллельное), во второй – согласное (последовательное) соединение.

Могут ли два находящиеся в противофазе и имеющих одинаковые амплитуды колебательных процесса уравновесить друг друга? Не могут, так как ни в один момент времени они не имеют равных мгновенных значений (кроме нулевых). Если, например, чашки весов уравновешены, значит, разность (не сумма) их масс равна нулю. А какое может быть равновесие, если одна чашка занимает крайнее верхнее, а другая – крайнее нижнее положение (одно напряжение имеет положительный максимум, а другое в это же время – отрицательный максимум)?

Если два колебательных процесса совпадают по фазе, то относительно чего бы их не рассматривать (хоть «относительно внешней нагрузки», хоть «по контуру «генератор – сеть») – они все равно находятся в фазе. Это очевидно.

Итак, установили, что синхронная машина, подключенная к сети, находится под напряжением этой сети. Если на векторных диаграммах (рис. 1) убрать вектор напряжения синхронной машины (вектор \dot{U}), то на векторной диаграмме генератора (рис. 1б) ЭДС будет отставать по фазе от напряжения сети (и генератора), а на диаграмме двигателя (рис. 1в), наоборот, ЭДС будет опережать по фазе напряжение сети. А это противоречит физическому смыслу и всей теории синхронных машин.

Кроме того, угол между векторами \dot{E}_0 и \dot{U}_C (угол нагрузки) и в генераторе, и в двигателе больше 90° . В этих условиях устойчиво синхронная машина работать не может. Рассмотрим ситуацию с энергетических позиций. В соответствии с векторными диаграммами электромагнитная и электрическая активная мощности как генератора, так и двигателя имеют разные знаки, что также противоречит физическому смыслу. Исходя из того что на векторной диаграмме перевозбужденного генератора уравнительный ток опережает по фазе напряжение сети, авторы цитируемых учебников желаемое выдают за действительное: «Перевозбужденная машина, работающая в режиме холостого хода, относительно сети эквивалентна емкости» [2, с. 338]. Здесь уместно напомнить, что ток в емкостном элементе опережает по фазе напряжение только в том случае, когда положительные направления тока и напряжения совпадают. В противном случае ток отстает по фазе от напряжения. В рассматриваемой ситуации положительные направления тока и напряжения сети противоположны (противный случай), поэтому генератор «относительно сети эквивалентен» индуктивному элементу, а не «емкости».

Как видим, неточность следует за неточностью. А началось все с того, что встречное направление ЭДС (напряжений) в контуре «сеть – машина» было ошибочно принято за противофазное включение.

Чтобы устранить противоречия и привести теорию в соответствие с практикой, следует исходить из того, что отдельная синхронная машина, включенная в сеть, находится под напряжением сети. При идеальном холостом ходе мгновенное значение ее ЭДС равно мгновенному значению напряжения (рис. 2б). Двигатель следует рассматривать не как источник электроэнергии с отрицательной электромагнитной мощностью (некое теоретическое надуманное построение), а как активный приемник электроэнергии с положительной мощностью. Если в схеме замещения якоря турбогенератора (рис. 3а) положительное направление напряжения противоположно направлениям тока и ЭДС, то в схеме замещения турбодвигателя (рис. 4а) положительное направление тока следует выбрать совпадающим с направлением напряжения, т. е. изменить его направление по сравнению с генератором на противоположное. Поэтому уравнения электрического состояния генератора и двигателя отличаются друг от друга только знаком тока якоря. Для генератора: $\underline{E}_0 - RI - jXI = \underline{U}$, а для двигателя: $\underline{E}_0 + RI + jXI = \underline{U}$, где R и X – активное и синхронное индуктивное сопротивления обмотки якоря. На основании этих уравнений на рис. 3б построена векторная диаграмма генератора, а на рис. 4б – двигателя.

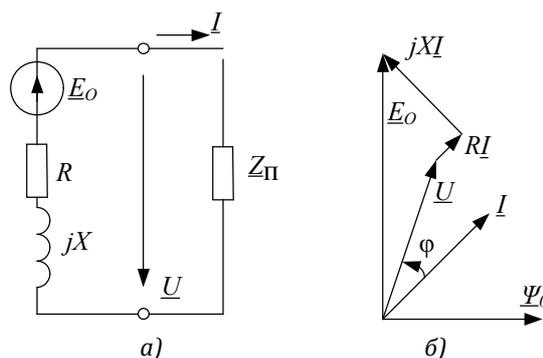


Рис. 3



Рис. 4

В результате все становится на свои места: генератор преобразует механическую энергию в электрическую, двигатель – электрическую в механическую; при увеличении момента на валу машины – вращающего в генераторе, тормозящего в двигателе – угол нагрузки увеличивается от нулевого значения (не уменьшается от 180 градусов); в любом режиме работы машины коэффициент мощности ее сохраняет положительное значение и выполняется баланс реактивных мощностей машины и сети, перевозбужденная машина является источником индуктивной (приемником емкостной) энергии, недозабужденная – приемником индуктивной (источником емкостной) энергии.

Список литературы

1. Беспалов В. Я., Котеленец Н. Ф. Электрические машины : учеб. пособие для студентов вузов. М. : Академия, 2006. 320 с.
2. Брускин Д. Э., Зорохович А. Е., Хвостов В. С. Электрические машины и микромашины : учебник для электротехн. спец. вузов. М. : Высш. шк., 1990. 528 с.
3. Ермолин Н. П. Электрические машины : учебник для вузов. М. : Высш. шк., 1975. 295 с.
4. Иванов-Смоленский А. В. Электрические машины : учебник для вузов : в 2 т. Т. 2. М. : Изд-во МЭИ, 2004. 532 с.
5. Копылов И. П. Электрические машины : учебник для вузов. М. : Высш. шк. ; Логос, 2000. 607 с.

About joint work of synchronous machines

V. N. Kuznetsov

PhD of Technical Sciences, associate professor of the Department of electrical engineering and electronics, Vyatka State University. Russia, Kirov. E-mail: kaf_eie@vyatsu.ru

Abstract. Three-phase synchronous generators of power plants usually work together. The theory of joint operation of synchronous machines has been developed for a long time and is a classic one. However, the presentation of this theory in the literature is accompanied by numerous contradictions, inaccuracies and even errors. This is mainly due to the arbitrary, unjustified choice of positive directions of electrical quantities on electrical circuits, with an incorrect interpretation of the Kirghoff laws, counter and consonant switching of synchronous generators.

The article shows that the parallel connection of two synchronous generators is their counter (not consonant and not antiphase) inclusion, since the phase windings of the generators are connected to each other by the same conclusions. The voltage between these terminals is common to both generators. A separate generator, included in the network, becomes part of it, and from its own it has only EMF and mechanical moment on the shaft.

Keywords: synchronous generator, electrical network, electric current, electromotive force, parallel connection.

References

1. Беспалов В. Я., Котеленец Н. Ф. *Elektricheskie mashiny : ucheb. posobie dlya studentov vuzov* [Electric machines : training manual for university students]. М. Akademiya. 2006. 320 p.
2. Брускин Д. Э., Зорохович А. Е., Хвостов В. С. *Elektricheskie mashiny i mikromashiny : uchebnik dlya elektrotekhn. spec. vuzov* [Electric machines and micromachines : textbook for electrical engineering. spec. of higher education]. М. Vyssh. shkola. 1990. 528 p.
3. Ермолин Н. П. *Elektricheskie mashiny : uchebnik dlya vuzov* [Electric machines : textbook for universities]. М. Vyssh. shkola. 1975. 295 p.
4. Иванов-Смоленский А. В. *Elektricheskie mashiny : uchebnik dlya vuzov : v 2 t.* [Electric machines : textbook for universities: in 2 vols.] Vol. 2. М. MEI. 2004. 532 p.
5. Копылов И. П. *Elektricheskie mashiny : uchebnik dlya vuzov* [Electric machines : textbook for universities]. М. Vyssh. Shkola ; Logos. 2000. 607 p.