

Постоянный и переменный электрический ток

И. К. Белкин, *Квант*¹, 1984, № 10, 28, 29.

Долгое время единственным источником электрического тока служил гальванический элемент, появившийся в самом начале XIX века. В цепи, присоединенной к такому источнику, течет постоянный электрический ток.

Успехи в исследовании электромагнетизма привели к изобретению генератора переменного тока, и с тех пор именно переменный ток стал основой современной электроэнергетики.

Почему же? Чем переменный ток «лучше» постоянного?

Переменный ток (как и постоянный ток) — это упорядоченное движение заряженных частиц, в частности в металлах — электронов. Однако в цепи переменного тока электроны по многу раз изменяют направление своего упорядоченного движения. Малая масса электронов позволяет им «успевать» изменять направление своего движения не только 100 раз в секунду, как это происходит в промышленной сети, но также и десятки миллионов раз в секунду, как, например, в антеннах радиостанций.

Чтобы в электрической цепи протекал переменный ток, цепь должна быть присоединена к источнику переменной ЭДС. Она выступает здесь в роли периодической вынуждающей силы, и ток в цепи совершает вынужденные колебания, разумеется, с частотой вынуждающей силы. Если ЭДС в источнике изменяется со временем по закону $e = \mathcal{E}_m \cos \omega t$, и источник включен в цепь с активным сопротивлением R , то и ток в цепи изменяется по косинусоидальному закону

(«Физика 10», § 17):

$$i = \frac{e}{R} = \frac{\mathcal{E}_m}{R} \cos \omega t = I_m \cos \omega t.$$

Здесь \mathcal{E}_m и I_m — амплитуды (максимальные значения) ЭДС и силы тока. Но свойства функции косинуса таковы, что в среднем за период колебаний сила тока равна нулю. Это, однако, не значит, что такой ток бесполезен и ни в чем себя не проявляет. Потому что хотя в среднем сила тока и равна нулю, не равен нулю квадрат силы тока. А мощность тока определяется именно квадратом силы тока. В любой момент времени мощность переменного тока в цепи с активным сопротивлением выражается равенством

$$p = i^2 R = I_m^2 R \cos^2 \omega t.$$

Среднее значение квадрата косинуса за период равно не нулю, а $1/2$, так что среднее значение мощности

$$\bar{p} = \bar{i}^2 R = \frac{1}{2} I_m^2 R = \left(\frac{I_m}{\sqrt{2}} \right)^2 R.$$

Величина $I = I_m / \sqrt{2}$ называется *действующим* значением силы тока. В нашем случае мощность можно также выразить через напряжение на сопротивлении:

$$p = \frac{u^2}{R}, \quad \bar{p} = \frac{\bar{u}^2}{R} = \frac{1}{2} \frac{U_m^2}{R} = \frac{U^2}{R},$$

где $U = U_m / \sqrt{2}$ — действующее значение напряжения.

В этом состоит одно из отрицательных свойств переменного тока. Ведь провода, по которым протекает ток, нужно рассчитывать на максимальное значение силы тока, а практически используется немногим более $2/3$ этого значения. Есть и другие отрицательные следствия. Явление электромагнитной индукции приводит, например, к тому, что переменный ток в проводах распределяется не равномерно

¹ «Квант» — научно-популярный физико-математический журнал.

по всему сечению, а главным образом вблизи поверхности. (Это явление называется скин-эффектом, о нем в «Физике 10» не рассказывается. Характерно, что глубина проникновения переменного тока зависит от многих факторов, в том числе — и от частоты колебаний. Так, при частоте 50 Гц в медном проводнике эта глубина составляет ≈ 9 мм. С увеличением частоты глубина проникновения тока уменьшается.) Благодаря тому, что используется не все сечения проводов, их сопротивление реально возрастает. Далее, переменный ток, как и ток постоянный, окружен магнитным полем, но полем переменным. А такое поле, согласно закону электромагнитной индукции, вызывает в соседних проводах и в других проводящих материалах электрические токи, что приводит к бесполезной потере энергии.

Все эти недостатки полностью отсутствуют у постоянного тока. Почему же все-таки переменный ток практически безраздельно господствует в технике и в быту?

Прежде всего необходимо сказать, что сам принцип действия электрических генераторов таков, что в них возникает именно переменная ЭДС («Физика 10», § 23). Но не в этом главное. С помощью нехитрого устройства можно тот же генератор сделать источником и постоянного тока. Главная причина «популярности» переменного тока связана с тем, что электрическую энергию приходится передавать из мест, где она производится (электростанции), к местам ее потребления и часто на большие расстояния. При этом часть передаваемой энергии неизбежно теряется в виде тепла в проводах, по которым она передается в линиях электропередачи (ЛЭП). Чтобы эти потери были не слишком высокими, нужно, оказывается, использовать для передачи элект-

троэнергии *высокое напряжение*.

Необходимость в высоком напряжении видна, например, из следующего простого расчета. Допустим, что электрическая мощность $P = 66$ кВт передается от электростанции в город под напряжением 220 В (именно такое напряжение обычно используется потребителями). Пусть сопротивление ЛЭП равно 0,4 Ом. Тогда сила тока в ЛЭП составит $I = 66\,000 \text{ Вт}/220 \text{ В} = 300 \text{ А}$, а выделившееся в линии количество теплоты — $Q = I^2 R = (300 \text{ А})^2 \times 0,4 \text{ Ом} = 36\,000 \text{ Вт}$. Больше половины передаваемой электрической мощности (54,5%) будет потеряно в виде тепла в ЛЭП! А теперь представим себе, что та же мощность по той же ЛЭП передается при напряжении 22 000 В. Теперь ток в цепи линии будет равен $I = 66\,000 \text{ Вт}/22\,000 \text{ В} = 3 \text{ А}$, а выделившееся количество теплоты — $Q = (3 \text{ А})^2 \cdot 0,4 \text{ Ом} = 3,6 \text{ Вт}$. Потеряно будет всего около 0,005%! Вот почему электрическая энергия по ЛЭП всегда передается при очень высоком напряжении — 110, 220, 330, 400, 500 и даже 750 киловольт.

Тем не менее на клеммах генераторов электростанций напряжение значительно меньше — всего несколько тысяч вольт. Значит, в начале линии электропередачи это напряжение требуется повысить, а перед распределением энергии среди потребителей — понизить так, чтобы потребитель получил ее при напряжении 220 вольт. Такое повышение и понижение напряжения оказывается возможным только для переменного тока. Делается это с помощью устройств, действующих на основе явления электромагнитной индукции, — трансформаторов («Физика 10», § 24). Существование трансформаторов — пожалуй, единственная причина повсеместного применения переменного тока в технике.

Однако те недостатки переменного тока, которые были изложены выше, заставляют думать о том, нельзя ли все-таки для передачи электрической энергии использовать постоянный ток, конечно, тоже высокого напряжения? Это сделать непросто. Действительно, сначала нужно переменное напряжение, после его повышения, преобразовать в постоянное (для этого служат выпрямители), а затем на другом конце ЛЭП — превратить переданное постоянное напряжение в переменное (это можно сделать с помощью устройств, называемых инверторами), чтобы напряжение можно было понизить до значения, нужного потребителю. Одна такая ЛЭП постоянного тока на напряжении 400 кВ в СССР уже работает.

Сказанное в этой заметке нельзя понимать так, что постоянный ток —

это «хороший» ток, а переменный — «плохой». И тот и другой — это явления природы, и их нельзя оценивать словами «лучше», «хуже». Сказанное лишь означает, что для передачи энергии на большие расстояния предпочтительнее постоянный ток. И если пока все же преобладает применение для этой цели переменного тока, то это объясняется тем, что преобразование переменного тока в постоянный и обратно до сих пор еще представляет собой трудную задачу, которая, впрочем, успешно решается. Для техники в равной мере нужны и полезны оба тока. В некоторых случаях незаменим постоянный ток, например там, где используется электролиз. Но без переменных токов не было бы радиосвязи, телевидения и т. д. Перефразируя известное детское стихотворение, можно сказать: токи всякие нужны!