

# В ЗАЩИТУ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН

Е. СЕКЛЕНКОВ, инженер  
г. Сухуми

(В порядке обсуждения)

Рис. В. Брюна

В последнее время стало своего рода признаком хорошего тона ругать машинную энергетику и хвалить так называемые «прямые» способы производства электроэнергии. При этом в качестве основного обычно приводится один довод: главный-де недостаток тепловых электростанций — «множественность промежуточных трансформации энергии первичного источника в электроэнергию». Зачарованные кажущейся логичностью этого соображения, люди несведущие обычно упускают из виду, что промежуточные ступени очень мало влияют на величину общего к.п.д. электростанций, если каждая из них в отдельности вносит очень небольшую потерю. А на тепловых электростанциях картина именно такова. Главная причина того, что их к.п.д. пока еще меньше 50%, не во «множественности промежуточных трансформаций», а в том, что температура пара, подаваемого в турбину, ограничена качествами материалов,

Весь ход развития техники убеждает: погоня за «прямизной» сама по себе бессмысленна. Полупроводниковые, термоионные, магнитогидродинатические генераторы и топливные элементы привлекают внимание инженеров не потому, что они «прямые», а потому, что в некоторых условиях они оказываются легче, надежнее, проще, чем машинные установки. Но когда речь заходит о крупных, высокоэкономичных энергетических установках, все эти новые преобразователи энергии отходят на задний план.

## ПАРОТУРБИННЫЙ ЭТАЛОН

Прежде чем рассматривать перспективы «прямых» способов получения электроэнергии, необходимо поговорить об эталоне, с которым они сравниваются: о современной тепловой электростанции. В начале XX века к.п.д. турбинных электростанций составлял в среднем 10%. В 1940 году он поднялся до 20%, в 1955 году — до 27%, в 1960 он достиг 30%, а в 1965-м перевалил за 35%. Главная причина столь быстрого роста к.п.д. — увеличение единичной мощности агрегатов и применение пара сверхвысоких параметров. Например, увеличив давление пара с 90 до 240 атм., температуру с 540°С до 560°С и единичную мощность блока котел — турбина со 100 до 300 Мвт, энергетики снизили удельный расход топлива на 12—14%. Дальнейшее, повышение параметров пара до 300 атм. и 650°С обещает снизить расход топлива еще лишь на 4%. Поэтому некоторые специалисты считают, что дальнейшие возможности повышения экономичности паросиловых установок ограничены и что существует недалекий уже предел. Дальше нет смысла повышать параметры пара и единичную мощность блоков.

Думается, что время внесет в это свои

поправки. В истории техники уже не раз объявлялось, что в той или иной области достигнут потолок. В 1929 году самой мощной в мире считалась американская турбина — 185 Мвт. И уже тогда некоторые специалисты заявляли: «Дальнейшее увеличение мощности невозможно». А сейчас, спустя 40 лет, уже существуют блоки и в 500, и в 800, и в 1000 Мвт и уже ведутся проектные разработки одновальных турбин на 2000 Мвт.

Говоря об экономичности турбины самой по себе, следует помнить, что в наши дни эти машины доведены до высокой степени совершенства, их к.п.д. близок к 100%. Если же брать паросиловую установку, то к.п.д. тепловых станций, как мы уже говорили, всего около 35%. Главный источник потерь не турбина, а котел, в нем топливо сгорает при температуре 2—2,5 тыс градусов, а температура пара — всего 500—600°С. А поскольку общий к.п.д. установки сильно зависит от начальной температуры рабочего тела, то ясно: повышение параметров — наиболее перспективный путь в тепловой энергетике. И здесь предел поставлен материалами, которые могут сохранять прочность при высоких температурах. Образно говоря, в формулу для вычисления к.п.д. тепловой станции в замаскированном виде входит прочность современных жаропрочных сплавов.

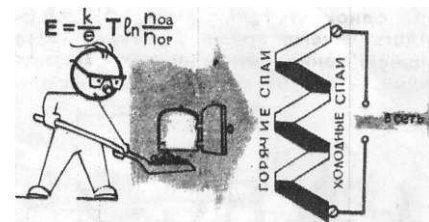
Какие же установки противопоставляются обычно турбогенераторам, хотя громоздким и косвенным, но весьма экономичным машинам?

## «ВСЮ ТЕХНИКУ В ЕДИНЫЙ МИГ ЗАМЕНИТ ПОЛУПРОВОДНИК»

Термопара — старейший и самый что ни на есть безмашинный метод производства электроэнергии. По замыслу некоторых энтузиастов, термопары, нагреваемые до высокой температуры, станут давать постоянный электрический ток высокого напряжения без всяких котлов и турбин. Поскольку этот вопрос принципиально важен для будущего энергетики, посмотрим, чего можно ожидать от термопар теоретически, в идеальном случае.

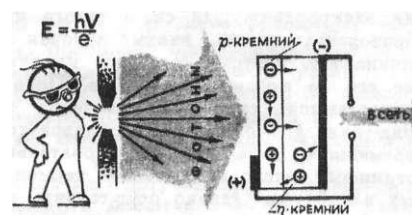
Оказывается, самые эффективные термопары дают электродвижущую силу около одного милливольт на один градус разности температур между спаями. При разности в 3 тыс градусов напряжение на клеммах такого устройства составит всего 3 в! Что же касается к.п.д., то до сих пор в лучших термоэлементах не удалось получить больше 10%.

Тем не менее эти цифры не убеждают энтузиастов «безмашинной» энергетики. В качестве контрвоображения они заявляют, что наука и техника, мол, развиваются и недалек день, когда молодцы химии найдут такой волшебный материал, который при легко достижимой разности



**ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЙ ТЕРМОЭЛЕМЕНТ.**  $E$  — электродвижущая сила — ЭДС,  $k$  — постоянная Больцмана,  $e$  — заряд электрона,  $T$  — разность абсолютных температур между спаями,  $noa$  — число свободных электронов в первом слое,  $noe$  — число свободных электронов во втором слое.

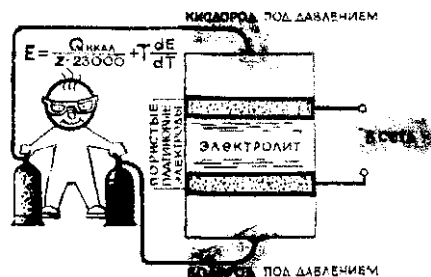
температур на спаях даст небывалую мощность. Однако теория говорит, что главная причина, ограничивающая электродвижущую силу любого термоэлемента, не пороки и несовершенства материала, а величина отношения постоянной Больцмана —  $k$  к заряду электрона —  $e$ . Эта величина —  $k/e$  носит, так сказать, фатальный характер, ибо ни заряд электрона, ни постоянную Больцмана человек изменить не в состоянии. Чтобы получить от термоэлемента более или менее высокое напряжение, потребовалось бы накалывать его до сотен тысяч или даже до миллионов градусов, но, к со-



**ФОТОЭЛЕМЕНТ КАК ЭЛЕКТРОГЕНЕРАТОР.**  $E$  — ЭДС,  $h$  — постоянная Планка,  $e$  — заряд,  $V$  — частота излучения.

жалению, при такой температуре все вещества мгновенно испаряются и могут существовать лишь в виде плазмы. Плазма же для изготовления термопар совершенно непригодна. Теплопроводность горячей плазмы исключительно велика и превосходит теплопроводность металлов почти в миллион раз. Поэтому ни о каком температурном перепаде внутри плазмы при таких температурах не может быть и речи. Эти две причины — высокая теплопроводность плазмы и величина отношения  $k/e$  — заставляют думать, что выработка электроэнергии в промышленных масштабах посредством каких-то плазменных или полупроводниковых термопар относится к области прекрасных, но, увы, неосуществимых фантазий.

Конечно, проблема термоэлектрических генераторов не досужая выдумка фантастов, а предмет серьезного научного исследования. Все сказанное не может опорочить идею термоэлементов. Установки такого типа не выступают в качестве будущих конкурентов действующих электростанций. Они предназначены для работы не в земных, а в космических и



**ТОПЛИВНЫЙ ЭЛЕМЕНТ.**  $Q$  — теплота реакции,  $Z$  — валентность ионов,  $T$  — температура,  $dE/dT$  — температурный коэффициент ЭДС.

других особых условиях, где к величине к.п.д. подходят совсем с других позиций и где достоинства установки оцениваются совсем другими критериями. Здесь, несмотря на относительно небольшой к.п.д., полупроводниковые преобразователи небольшой мощности действительно не имеют себе равных, так как легких и дешевых двигателей с такими мощностями все равно не существует. А термоэлектрогенераторы просты по конструкции, легки, надежны, долговечны и практически не требуют ухода.

Немало написано и о блестящих перспективах термоионных преобразователей. Но, увы, в формулу для определения электродвижущей силы такого преобразователя также входит роковая величина  $k/e$ , поэтому выходное напряжение его не превышает 1–2 в. Правда, предлагаются способы увеличения напряжения: термоионные преобразователи переменного тока или последовательное соединение нескольких тысяч термоионных элементов. Однако осуществить эти способы — задача не такая уж простая и дешевая, как может показаться на первый взгляд.

От внимания поклонников безмашинных электростанций не ускользнул и фотоэлемент. Но и здесь законы физики кладут предел смелым мечтам. Если

электродвижущую силу термоэлементов ограничивает отношение постоянной Больцмана к заряду электрона, то для фотоэлемента эту роль играет отношение постоянной Планка к заряду электрона. Электродвижущая сила фотоэлемента, работающего даже в ультрафиолетовой части солнечного спектра, не может превышать 10 в. Чтобы увеличить напряжение, нужно повышать энергию падающих на фотоэлемент квантов, то есть переходить на более высокие частоты. Пока речь идет о небольших мощностях, никаких особых затруднений здесь, по-видимому, не возникает. Но если всерьез ставить вопрос о замене таким элементом крупной турбинной электростанции, то картина получается совершенно другой. Опыт, полученный при взрывах ядерных боеприпасов, свидетельствует: энергия гамма-лучей высокой интенсивности, а также кинетическая энергия электронов, протонов, нейтронов почти полностью переходит в тепло. Элемент в 500 Мвт, работающий на гамма-лучах, 0,05 Мэв создаваемых искусственным источником при площади 1 кв. м и к.п.д. 50% только за счет потерь должен нагреться до 10000°. При такой температуре нет смысла использовать фотоэлементы. Гораздо проще и эффективнее МГД-генератор, а то и обыкновенный турбогенератор. Если же снижать эту температуру за счет увеличения поверхности охлаждения, то фотоэлемент приобретет огромные размеры и окажется неспособным конкурировать с самой обычной тепловой электростанцией. Такой вывод справедлив не только для фотоэлемента, но и для атомной батареи, работающей на быстродвижущихся электронах.

## К.П.Д. -> 100%, КОГДА МОЩНОСТЬ -> 0

А может быть, вообще не связываться с тепловой энергией? Может, попытаться получать электричество прямо за счет химической энергии топлива, минуя обычное сжигание?

Воображение услужливо рисует знакомую картину: на календаре 2020 год. Мы в зале электростанции, работающей на топливных элементах. Перед нами гигантский бак, к которому ведут трубы, провода и т. п. Сопровождающий инженер объясняет, что, кроме этого бака, на электростанции ничего существенного больше нет. Ни котлов, ни турбин, ни даже ядерных реакторов. Тут уже добился стопроцентного коэффициента полезного действия станции...

Но кажущаяся простота топливного элемента в высшей степени обманчива. Еще в конце XIX века казалось: решение не за горами. Упорные поиски тогда велись во всем мире. В частности, в России занимался этим вопросом изобретатель П. Яблочков. Казалось, еще чуть-чуть — и электростанции с топливными элементами дадут мощный промышленный ток. Однако задача оказалась много сложнее, чем представлялась вначале. А уж если топливные элементы не могли удовлетворить энергетические запросы прошлого века, то что говорить об энергетике конца XX и последующих веков! Эта же мысль высказывалась на международном симпозиуме по топливным элементам, на котором один из докладчиков с горечью заявил, что создание промышленных электростанций на

топливных элементах — сейчас гораздо более трудная задача, чем в начале века, когда к.п.д. паротурбинных электростанций не превышал 10%. На том же симпозиуме указывалось, что к.п.д. топливного элемента, близкий к 100%, конечно, вызывает восхищение, но восхищение быстро сменяется разочарованием: поразительный результат достигается при таких низких плотностях тока, которые не имеют практического значения.

Если все проблемы будут блестяще решены, топливные элементы не смогут заменить электрические машины в масштабах целой страны, а тем более планеты. Даже водородно-кислородный элемент — наиболее эффективный из всех возможных типов — может дать электродвижущую силу не более 1,5 в на ячейку, а при большой мощности батареи — меньше 1 в. Получать от топливного элемента большую электродвижущую силу мешает не какой-то конструктивный недостаток, а величина теплового эквивалента электрохимической реакции. Этот эквивалент выражается числом 23 000. Такую работу в калориях производит электрический заряд, переносимый одним грамм-эквивалентом (96 500 кулонов) под напряжением 1 в. Попытаться изменить этот эквивалент — все равно, что пытаться изменить равенство  $2 \times 2 = 4$ . Надежды на будущее тут вряд ли уместны. Поэтому радужное видение — гигантский бак в зале электростанций и т. д. — едва ли найдет материальное воплощение не только в 2020, но и вообще в каком-либо году.

Пусть нас поймут правильно. Мы совсем не хотим сказать, что топливные элементы никуда не годятся. В науке не бывает бесполезных открытий, и топливные элементы, вне всякого сомнения, найдут работу по силам. Однако их роль и значение, как, впрочем, и всех остальных «новых методов преобразования энергии», зачастую непомерно преувеличиваются.

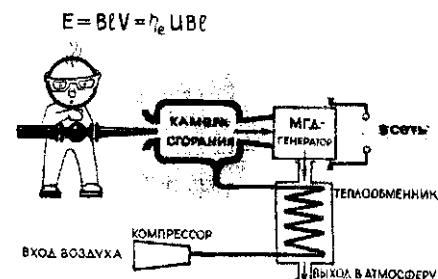
Для специализированных областей производства, например в электролизной технике, эти установки могут оказаться эффективными. Однако пока еще даже здесь топливные элементы не представляют интереса: самые лучшие из них работают на химически чистых водороде и кислороде. Для энергетики же практический интерес представляют только дешевые топлива и самый дешевый окислитель — воздух.

## ПОСЛЕДНЕЕ СЛОВО В ЭНЕРГЕТИКЕ

Из всех «прямых» и «безмашинных» методов получения электроэнергии наилучшие перспективы на будущее в крупной энергетике у магнетогидродинамических генераторов — МГД-генераторов. Правда, их лишь с большой натяжкой можно отнести к «прямым» и к «безмашинным»: по характеру энергетической цепочки они не намного отличаются от обычного турбогенератора.

МГД-генератор может представить практический интерес при очень больших мощностях — 1000 Мвт и выше в одном агрегате. К сожалению, температурная стойкость существующих материалов пока не позволяет начать строительство такой установки.

Сейчас, достоинства магнетогидродинамических генераторов представляются бесспорными, и они проектируются как



**МГД** — генератор.  $\eta_e$  — электрический к. п. д.,  $U$  — скорость движения газа в канале генератора,  $l$  — расстояние между электродами,  $B$  — магнитная индукция поля возбуждения.

форсажные устройства для станций с турбогенераторами. Когда будут найдены сверхтермостойкие и сверхпрочные материалы для турбин, достоинства МГД-генераторов могут предстать в другом свете. Во всяком случае, по разработкам Центрального котлотурбинного института к.п.д. парогазовой установки при начальной температуре перед газовой турбиной всего  $1200\text{--}1300^\circ\text{C}$  уже находится на уровне ожидаемого в будущем к.п.д. турбинных электростанций в сочетании с МГД-генераторами. Для получения такого же к.п.д. установки рабочая температура в МГД-генераторе должна быть около  $3000^\circ\text{C}$ .

Главное обстоятельство, сулящее успех магнитогидродинамическому генератору, — то, что в формулу для вычисления его электродвижущей силы не входят величины-константы.

Вообще существует простая закономерность: если в формулу для вычисления электродвижущей силы устройства входят константы микромира, следует воздержаться от блистательных прогнозов. Именно это обстоятельство позволяет утверждать: термоэлектрические и термоионные генераторы, фотоэлементы и топливные элементы едва ли станут электроэнергетической базой государственного и тем более глобального масштаба. Так называемые прямые способы производства электроэнергии слишком слабы, чтобы от них можно было получить большую мощность. Магнитогидродинамический генератор не в счет: этот аппарат работает на принципе электромагнитной индукции и может быть отнесен к прямым преобразователям лишь с очень большими оговорками. Оборудованию современных электростанций, за исключением, вероятно, котлов, использующих химическое сжигание топлива, не грозит зловещая судьба «оказаться ненужным».

Переход энергетики от машин к термоионным преобразователям и топливным элементам представляется равносильным отказу от ракет и реактивной авиации в пользу воздушных шаров. Воздушный шар, между прочим, обладает идеальным коэффициентом полезного действия, поскольку он вообще не потребляет никакого топлива. Кроме того, он очень прост по конструкции.

Точное предсказание будущего энергетики затруднительно. С течением времени некоторые направления наверняка окажутся несостоятельными, зато возникнут новые идеи, о которых в настоящий момент невозможно даже догадываться. Надо лишь помнить, что для производства энергии хороши любые средства, лишь бы они давали дешевую энергию и в больших количествах. Могут спросить: неужели только машины и аппараты, работающие на основе закона электромагнитной индукции, последнее слово физической науки в области энергетики? Уместно привести слова одного профессора математики, сказанные, правда, по другому поводу: в науке не бывает последнего слова. Никому не запрещено придумывать новые способы и утверждать, что они лучше, чем существующие. Однако реальное развитие техники далеко не всегда считается с такими утверждениями, ибо техника никогда не имела, не имеет и не будет иметь возможности развиваться в произвольном направлении. Она вынуждена идти по тому пути, который ей указывают законы физики. У нее просто нет другого выхода.