



АЛЕКСАНДР МИКЕРОВ,

д. т. н., проф. каф.
систем автоматического управления
СПбГЭТУ «ЛЭТИ»
amikerov@gmail.com

Первым практическим применением открытия электрона было изобретение электронных приборов, среди которых газоразрядные лампы появились даже раньше электровакуумных и продолжили с ними мирно сосуществовать на протяжении всего XX века, преимущественно в области мощной электропреобразовательной техники.

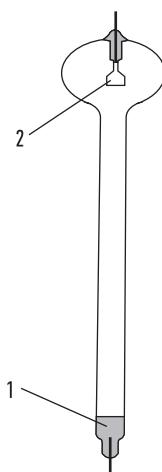


ГАЗОРАЗРЯДНЫЕ ПРИБОРЫ — ПЕРВЫЕ ЭЛЕКТРОННЫЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ

РИС. 1. ▶
Питер Купер-Хьюитт
(1861–1921)



РИС. 2. ▼
Лампа Купера-Хьюитта



электротехник Питер Купер-Хьюитт (Peter Cooper-Hewitt).

Питер Купер-Хьюитт (рис. 1) родился в богатой американской семье, его отец Абрам Хьюитт (Abram Hewitt) был мэром Нью-Йорка, а мать — дочерью знаменитого предпринимателя и филантропа Питера Купера (Peter Cooper) [2]. Семья Куперов-Хьюиттов создала известный нью-йоркский Музей дизайна.

И отец, и дед Питера Купера-Хьюитта (со стороны матери) были изобретателями и промышленниками, поставлявшими металл для ружей во время Гражданской войны, причем отец занимался плавкой стали, а дед — ее обработкой. Кроме того, Питер Купер создал первый американский паровой локомотив, пневматический двигатель для парома, разработал рецепт желатина, газонокосилку и многое другое.

Закончив технологический институт Стивенса и Горную школу Колумбийского университета, Купер-Хьюитт увлекся электричеством и в 1901 г. запатентовал ртутно-дуговую осветительную лампу (рис. 2) [2–4].

Она представляла, по существу, вакуумную трубку Геслера [1]

с катодом (1) и анодом (2), в которой катод был ртутным. За счет этого при приложении к аноду высокого положительного напряжения (либо при наклоне лампы до кратковременного касания анода ртутью) происходили ионизация паров ртути и зажигание дуги, световая отдача которой в восемь раз выше, чем у аналогичной лампы накаливания Эдисона. К сожалению, такая лампа давала мертвенный свет, пригодный лишь для производственных помещений, и поэтому не нашла применения в быту, однако ее дальнейшее совершенствование привело к созданию популярных люминесцентных ламп.

При внедрении систем электроснабжения переменного тока возник вопрос о питании парка оборудования постоянного тока, например для гальванопластики, зарядки аккумуляторов, дугового освещения, электротяги и т. д. [5]. Купер-Хьюитт обнаружил, что при приложении переменного напряжения его лампа действует как однополупериодный выпрямитель (в немецком языке этот термин также обозначает «вентиль»), проводящий ток только при

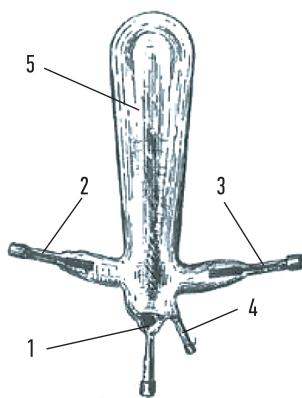


РИС. 3. ▲
Двуханодный вентиль

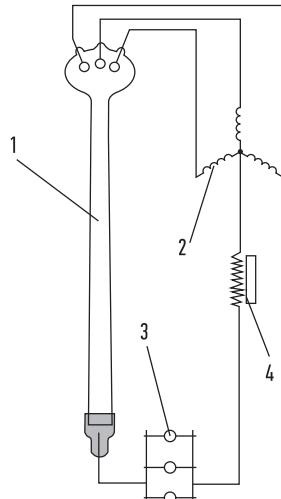


РИС. 4. ▶
Треханодный выпрямитель

положительном напряжении на аноде. При отрицательном напряжении лампа гаснет. Добавление второго анода позволило получить двухполупериодное выпрямление с гораздо меньшими пульсациями. На рис. 3 показана одна из первых двуханодных ламп на 100 В компании General Electric, сделанная по патенту Купера-Хьюитта 1902 г. [4, 6]. Помимо катода (1), рабочих анодов (2) и (3) из стали (а позднее из графита), она снабжена дополнительным зажигающим электродом (4) для «поджига» дуги и ее поддержания при снижении или перемене полярности напряжения. Характерная колба (5) служит для конденсации паров ртути, стекающей затем на катод.

Еще меньшие пульсации обеспечивает трехфазный выпрямитель Купера-Хьюитта с треханодной лампой (1), подключенной непосредственно к обмотке трехфазного генератора (2) через нагрузку (3), например сеть постоянного тока и дроссель фильтра (4) (рис. 4) [4].

Купер-Хьюитт создал вместе с Джорджем Вестингаузом компанию Cooper Hewitt Electric Company, которой принадлежали монопольные права по производству таких приборов (один из них виден на рис. 1 в руках его изобретателя). Уже в 1905 г. выпрямители стали использоваться в Нью-Йорке для зарядки аккумуляторов, гальваники и сети освещения постоянного тока [3]. После 1911 г. на рынке ртутно-дуговых выпрямителей у Cooper Hewitt Electric Company появились мощные конкуренты: General Electric в США, Brown Boveri, Siemens и AEG в Европе [3, 4]. В СССР производство таких приборов началось на заводе «Электросила» в 1926 г. Ртутный

характерное «жужжание» и фиолетовое свечение, памятное многим из лабораторных работ по элементам автоматики (рис. 5) [3].

Недостатком стеклянных ртутно-дуговых вентилей, помимо их хрупкости, является плохое охлаждение стеклянной колбы. В 1908 г. тот же Купер-Хьюитт запатентовал ртутный вентиль с металлическим корпусом и водяным охлаждением, что позволило довести мощность до десятков мегаватт при напряжении в сотни тысяч вольт [3, 4, 7]. Например, если первый прибор компании Brown Boveri в 1910 г. обеспечивал ток 100 А, то в 1921 г. этот показатель составлял уже 1000 А, а в 1930 г. — 8000 А. Однако металлический корпус, в отличие от стеклянного, не гарантирует герметичность, поэтому такие выпрямители снабжаются насосами для откачки воздуха.

Дальнейшее развитие ртутно-дуговых выпрямителей связано с попытками регулирования анодного тока. До этого менять скорость двигателя постоянного тока можно было только по громоздкой схеме Вард-Леонарда, содержащей вспомогательный электродвигатель постоянной скорости, с генератором постоянного тока на валу, выходное напряжение которого управлялось сравнительно небольшим током возбуждения [4]. В 1903 г. Перси Томас (Percy Thomas), помощник Купера-Хьюитта, предложил идею поджигать дугу ртутного выпрямителя не сразу при приложении положительного анодного напряжения, а с некоторой задержкой, как показано на рис. 6 [4]. Регулируя время T (фазу) задержки, можно было изменять среднее значение выпрямленного тока I_B .

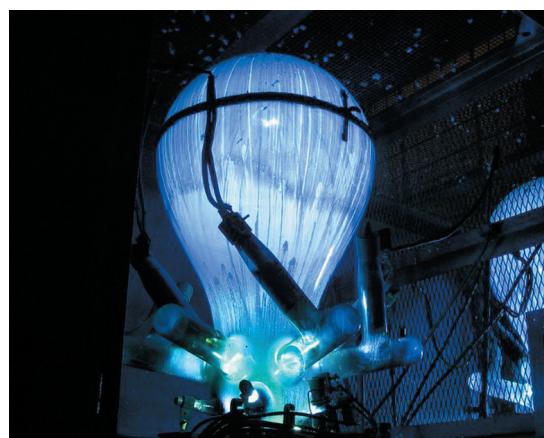


РИС. 5. ▲
Вентиль в работе

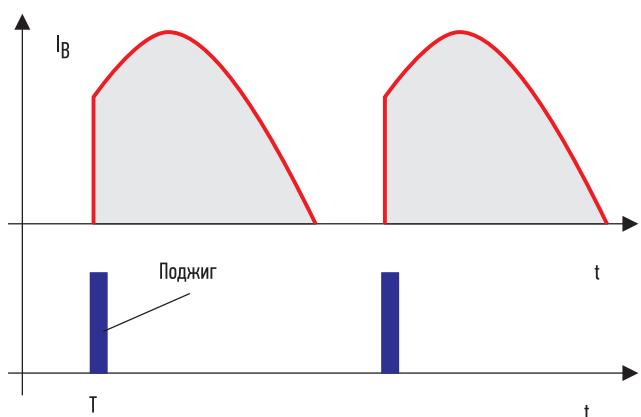


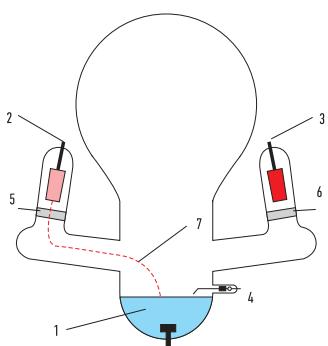
РИС. 6. ▶
Фазовое управление



РИС. 7. ▶
Ленгмюр (слева)
и Уитни (справа)



РИС. 8. ▶
Сеточное управление



Впоследствии такой способ регулирования стал называться фазовым управлением, однако на практике реализовать его с помощью зажигающего электрода удалось лишь после изобретения в 1931 г. Иосифом Слепианом (Joseph Slepian) из компании Вестингауз прибора под названием ингитрон [3, 8].

Более эффективный способ регулирования ртутно-дуговых вентилей был предложен гениальным

американским ученым Ирвингом Ленгмюром (Irving Langmuir) (1881–1957), лауреатом Нобелевской премии 1932 г. [9, 10]. Ирвинг родился в Нью-Йорке в семье выходцев из Британии. Отец его, страховой агент, не имел значительных средств, однако Ирвинг смог получить фундаментальное химическое образование в знаменитом немецком университете в Геттингене. Вернувшись на родину, он преподавал химию в институте, однако огромная учебная нагрузка, невозможность проводить исследования и низкая зарплата вынудили его искать новую работу. В 1892 г. Эдисон создал крупнейшую американскую компанию General Electric, в составе которой профессор Массачусетского технологического института Уиллис Уитни (Willis Whitney) основал уникальную индустриальную лабораторию фундаментальных исследований, связанных с электротехникой. Уитни пригласил на работу Ленгмюра в 1909 г. и предоставил ему полную свободу в выборе направлений (рис. 7).

Ленгмюр остановился на электрических явлениях в газах как продолжении темы докторской диссертации, и уже скоро стало ясно, что Уитни не ошибся в своем выборе. Ленгмюр опроверг общепринятое мнение, что для ламп накаливания необходим вакуум, и уже в 1912 г. предложил вместо этого наполнять их инертным газом (аргоном) или азотом, а вольфрамовую нить свернуть в спираль. Такие лампы светили гораздо ярче и дольше, что сразу принесло General Electric огромную прибыль. Продолжение исследований привело Ленгмюра к изобретению в 1914 г. ртутно-дуговых ламп с сеточным управлением (рис. 8) с катодом (1), анодами (2) и (3), зажигающим электродом (4) и сетками (5) и (6). Подача в нужный момент на сетку (5) отрицательного относительно катода напряжения гасит дугу (7) [3].

Другой темой, которая многие годы занимала Ленгмюра и принесла ему Нобелевскую премию, были поверхностные явления. Еще в 1916 г. он установил, что покрытие вольфрамовой нити лампы слоем тория толщиной всего в одну молекулу приводило к увеличению в 100 тысяч раз эмиссии электронов с нагретого катода [9]. Это позволи-

ло ему в 1928 г. создать новый вид газоразрядных управляемых ламп — тиатронов (рис. 9) с катодом (1), анодом (2) и сеткой (3) [8, 11].

В отличие от ртутно-дуговой лампы, в данном случае катод выполнен в виде подогреваемой спирали, а лампа наполнена инертным газом или, реже, парами ртути. При отрицательном напряжении на сетке (относительно катода) лампа не проводит ток, но при снятии сеточного напряжения тиатрон зажигается. Для выключения тиатрона, как и ртутно-дуговой лампы, необходимо отключение или перемена полярности анодного напряжения. Наследниками тиатронов стали современные твердотельные ключи — тиристоры, появившиеся в конце 1950-х гг., название которых, как и тиатронов, произошло от греческого *thyrga*, в переводе «дверь, которая может быть открыта» [11].

Работы Ленгмюра также заложили фундамент для разработки электровакуумных приборов, которые будут рассмотрены в последующих статьях. Изобретенный им вакуумный насос позволял создавать в 100 раз большее разряжение, а открытые им законы (например, закон Ленгмюра об эмиссии электронов, волны Ленгмюра в плазме) послужили теоретической базой исследования явлений в вакууме и плазме. Ленгмюр проработал в компании General Electric 37 лет, опубликовав около 200 работ и получив 63 патента [10].

Ртутно-дуговые выпрямители поначалу использовались прежде всего для питания двигателей постоянного тока от сети переменного тока: в 1911 г. для двигателей на 80 кВт литейного цеха во Франкфурте, в 1916 г. для трамвайной сети в Цюрихе, в 1930 г. — для нью-йоркского метро с мощностью сети 3 МВт, а с 1931 г. для немецкой железнодорожной сети [3, 4, 8]. Благодаря газоразрядным приборам были созданы первые бесколлекторные двигатели постоянного тока: в 1932 г. Эрвином Керном (Erwin Kern) на 600 кВт для электрички Brown Boveri и в 1934 г. Эрнстом Александерсоном (Ernst Alexanderson) на 375 кВт для вентилятора General Electric [8]. Эти двигатели были названы вентильным и тиатронным соответственно.

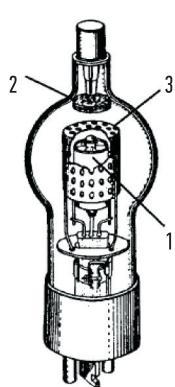


РИС. 9. ▶
Тиатрон

Другое важное применение ртутно-дуговых приборов — для линий электропередачи постоянного тока (ЛПТ) между генерирующей сетью (Л1) и сетью потребителя (Л2) переменного тока, которая содержит повышающий (T1) и понижающий (T2) трансформаторы, а также выпрямитель (AC/DC) и преобразователь напряжения постоянного тока в переменный (DC/AC), построенные на ртутно-дуговых лампах (рис. 10).

Пионером в области высоковольтных линий передачи постоянного тока был известный французский электротехник Марсель Депре (Marcel Deprez), построивший, начиная с 1882 г., несколько дальних линий с напряжением до 6 кВ [12]. В XX в. настало, казалось бы, безраздельное господство линий электропередачи переменного тока [5]. Однако к концу Второй мировой войны в Берлине была создана линия постоянного тока на 200 кВ длиной 115 км — с использованием ртутно-дуговых вентиляй. Линия была кабельной и обеспечивала лучшую защиту от бомбёзек, что и послужило побудительным мотивом для ее строительства. После капитуляции Германии оборудование было демонтировано Красной Армией, перевезено в СССР и использовано в 1954 г. при строительстве линии Кашира — Москва [4]. В том же году аналогичная линия с ртутно-дуговыми приборами и подводным кабелем была запущена в Швеции компанией ASEA [13]. В настоящее время линии постоянного тока считаются более эффективными на дальности более 1000 км, где они и широко применяются, но уже с тиристорами.

Важным преимуществом линий постоянного тока является возможность развязывания энергосистем переменного тока соседних стран, защищающая их от блэкаутов (т. е. от аварий). Такая линия также называется вставкой постоянного тока. В августе 2003 г. в результате крупнейшего блэкаута в Северной Америке на два дня остались без электричества более 55 млн жителей северо-востока США и Канады [14]. Выстояла только канадская провинция Квебек, имеющая вставки постоянного тока на своих границах. Аналогичная вставка есть на границе России и Финляндии.

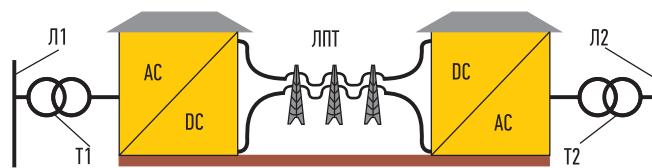


РИС. 10. ▲
Линия постоянного тока

Уже в 1970-х гг. ртутно-дуговые приборы стали вытесняться тиристорами, и в начале 2000-х гг. век мощных газоразрядных приборов закончился [3, 7, 13]. Последние «ветераны» были демонтированы на железной дороге острова Мэн в Великобритании (рис. 5) и на линиях постоянного тока в Манитобе (Канада) и Новой Зеландии.

Однако мощные тиатроны с водородным заполнением на напряжение более 20 кВ и на токи в десятки килоампер остаются пока вне конкуренции в импульсных устройствах с очень крутым фронтом импульсов — в радиолокаторах, лазерах, радиотерапии, защите телевизионных передатчиков и даже во взрывателях ядерного оружия [3, 11]. ●

ЛИТЕРАТУРА

- Микров А. Г. Начало электроники — открытие электрона // Control Engineering Россия. 2018. № 5 (77).
- Peter Cooper Hewitt, inventor. 1903. www.paperstast. natlib.govt.nz/newspapers/CHP19030903.2.5?query=ivor.
- Guarnieri M. Solidifying Power Electronics // IEEE Industrial Electronics Magazine. 2018. March.
- Dittmann F. The development of power electronics in Europe // IEEE Conference on the History of Electronics. 2004. www.ethw.org/w/images/a/7/DITTMANN.pdf.
- Микров А. Г. Война токов и победа переменного тока // Control Engineering Россия. 2017. № 2 (68).
- Mercury Arc Rectifiers. Edison Tech Center. www. edisontechcenter.org/MercArcRectifiers.html.
- Mercury-arc valve. www.en.wikipedia.org/wiki/Mercury-arc_valve.
- Johns T. M., Owen E. L. AC Adjustable-Speed Drives at the Millennium: How Did We Get Here? // IEEE Transactions on power electronics. 2001. V.16. N1.
- Уилсон М. Американские ученые и изобретатели. М.: Знание. 1964.
- Аснин Л. Ирвинг Лэнгмюр и деньги. www.trv-science. ru/2009/08/04/irving-lehngmyur-i-dengi/.
- Thyatron. www.en.wikipedia.org/wiki/Thyatron.
- Микров А. Г. Марсель Депре — ученый, реализовавший идею передачи электроэнергии // Control Engineering Россия. 2018. № 3 (75).
- Wolf G. A Short History of The Mercury-Arc Valve. www. tdworld.com/hvdc/short-history-mercury-arc-valve.
- Northeast blackout of 2003. www.en.wikipedia.org/wiki/ Northeast_blackout_of_2003.

Обнаружение электрона открыло возможность бесконтактного регулирования и преобразования электрического тока электронными приборами:

- Первым среди них был ртутно-дуговой выпрямитель Купера-Хьюитта, 1902 г.
- Результаты исследований Ленгмюра с 1914 г. позволили регулировать с помощью сетки ток такого выпрямителя, привели к созданию нового управляемого прибора с твердым катодом — тиатрона, а также заложили теоретическую базу электровакуумных приборов.
- Газоразрядные приборы широко применялись до конца XX в. для мощных электроприводов постоянного и переменного тока и линий электропередачи постоянного тока.