
Ф.Ф. МЕНДЕ

доктор техн. наук, директор

E-mail: fedormende@gmail.com

НИИ Криогенного приборостроения

Физико-технический институт низких температур им Б.И. Веркина НАН Украины

Харьков, Украина

А.С. ДУБРОВИН,

доктор техн. наук, акад. РАЕН, профессор

E-mail: asd_kiziltash@mail.ru

ФКОУ ВПО Воронежский институт

ФСИН России

г. Воронеж, Российская Федерация

ПРИНЦИП ДЕЙСТВИЯ И МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ГЕНЕРАТОРА ВАН ДЕ ГРААФА

Физический принцип работы генератора Ван де Граафа до сих пор окончательно не выяснен, а имеется лишь техническая схема генератора. Нет и расчетных соотношений, которые дают возможность рассчитать такой генератор. В статье представлена физическая схема генератора и показано, что принцип его работы основан на использовании закона параметрической самоиндукции. Получены также расчетные соотношения, позволяющие рассчитать параметры генератора.

Ключевые слова: генератора Ван де Граафа, вольт, емкость, параметрическая самоиндукция, пеллетрон.

F.F. MENDE

Doctor of Techn. Sciences, Director

Research institute for cryogenic instrument engineering B.I. Verkin Institute for Low Temperature

Physics and Engineering NAS Ukraine

Kharkov, Ukraine

E-mail: fedormende@gmail.com

A.S. DUBROVIN,

Doctor of Techn. Sciences, Professor

E-mail: asd_kiziltash@mail.ru

FKOU VPO Voronezh Institute

of Russian Federal Penitentiary Service

Voronezh, Russian Federation

THE PRINCIPLE OF OPERATION AND THE MATHEMATICAL MODEL OF VAN DE GRAAFF GENERATOR

The physical principle of the work of the Van de Graaf generator has not yet been finally clarified, but there is only a technical scheme of the generator. There are no calculated relationships that make it possible to calculate such a generator. The article presents the physical scheme of the generator and shows that the principle of its operation is based on the use of the law of parametric self-induction. Calculation relationships are also obtained, which make it possible to calculate the parameters of the generator.

Key words: generator Van de Graaf, volt, capacitance, parametric self-induction, pelletron.

1. Введение

Генератор Ван де Граафа (рис. 1) это генератор высокого напряжения, принцип действия которого основан на электризации движущейся диэлектрической ленты. Первый генератор был разработан американским физиком Робертом Ван де Граафом в 1929 г. и позволял получать разность потенциалов до 80 кВ. В 1931 и 1933 им же были построены более мощные генераторы, позволившие достичь напряжения в 1 миллион и 7 миллионов вольт соответственно [1].

Генератор Ван де Граафа состоит из диэлектрической (шелковой или резиновой) ленты 4, вращающейся на роликах 3 и 6, причем верхний ролик диэлектрический, а нижний металлический и соединен с землей. Один из концов ленты заключен в металлическую сферу 1. Два электрода 2 и 5 в форме щеток находятся на небольшом расстоянии от ленты сверху и снизу, причем электрод 2 соединен с внутренней поверхностью сферы 1. Через щетку 5 воздух ионизируется от источника высоковольтного напряжения 7, образуя положительные ионы под действием силы Кулона

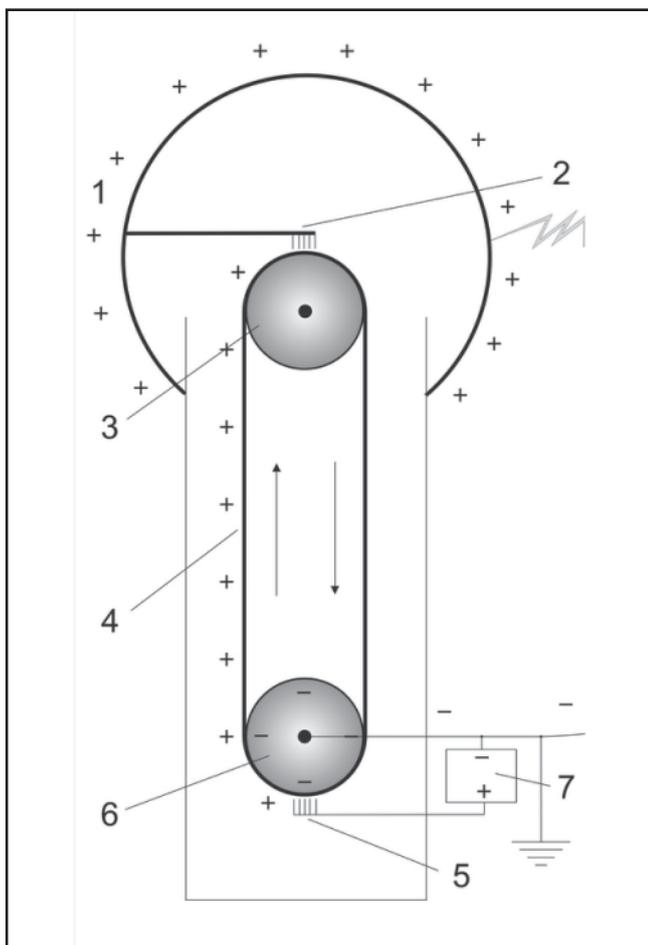


Рис. 1. Генератор Ван де Граафа

движутся к заземленному ролику 6 и оседают на ленте. Движущаяся лента переносит заряд внутрь сферы 1, где он снимается щеткой 2, под действием силы Кулона заряды выталкиваются на поверхность сферы и поле внутри сферы создается только дополнительным зарядом на ленте. Таким образом, на внешней поверхности сферы накапливается электрический заряд. Возможность получения высокого напряжения ограничена коронным разрядом, возникающим при ионизации воздуха вокруг сферы.

Современные генераторы Ван де Граафа вместо лент используют цепи, состоящие из чередующихся металлических и пластиковых звеньев, которые называются пеллетронами.

К сожалению, приведенная схема генератора является лишь работоспособной технической схемой, а физический принцип ее действия до сих пор вызывает ряд вопросов. Например, непонятно, какие причины вызывают увеличение потенциала зарядов, расположенных на ленте, при ее движении вдоль определенного направления. Неясно также будет ли функционировать генератор, если движущуюся ленту расположить горизонтально земной поверхности. Непонятно также, каким способом может быть изменена полярность генератора. А поскольку ни физическая, ни математическая модель генератора до конца не разработана, то его совершенствование может проводиться только методом проб и ошибок. С этим и связано то обстоятельство, что со времен изобретения генератора Ван де Граафа его конструкция практически не изменилась.

2. Математическая модель генератора Ван де Граафа

Если имеется конденсатор, емкость которого C , и этот конденсатор заряжен до разности потенциалов U , то энергия, накопленная в нем, определяется соотношением

$$W_c = \frac{1}{2} CU^2. \quad (2.1)$$

Заряд Q , накопленный в емкости, равен

$$Q_{c,U} = CU. \quad (2.2)$$

Из соотношения (2.2) видно, что если в единичной емкости заряд оставить неизменным, то напряжение на ней можно изменять путем изменения самой емкости. В этом случае выполняется соотношение

$$Q_{C,U} = CU = C_0U_0 = \text{const},$$

где C , U – текущие значения; а C_0 , U_0 – начальные значения этих параметров.

Представленное соотношение представляет закон параметрической самоиндукции [3...6].

Напряжение на емкости и энергия, накопленная в ней, будут при этом определяться соотношениями:

$$U = \frac{C_0U_0}{C} = KU_0, \quad (2.3)$$

$$W_C = \frac{1}{2} \frac{(C_0U_0)^2}{C}. \quad (2.4)$$

Коэффициент

$$K = \frac{C_0}{C} \quad (2.5)$$

назовем коэффициентом трансформации постоянного напряжения. Этот коэффициент легко регулировать путем изменения отношения емкостей.

Приращение напряжения, которое может обеспечить такой трансформатор, определяется из соотношения

$$\Delta U_C = \left(\frac{C_0}{C} - 1 \right) U_0. \quad (2.6)$$

Как следует из соотношений (2.3) и (2.4) при уменьшении емкости конденсатора на нем увеличивается не только напряжение, но и энергия, запасенная в нем. Эта энергия отбирается у механического источника энергии, обеспечивающего изменение емкости. Поэтому рассматриваемый трансформатор можно рассматривать, и как преобразователь механической энергии в электрическую.

Приращение энергии, накопленной в конденсаторе, при изменении его емкости определяется из соотношения

$$\Delta W_C = \frac{1}{2} (C_0U_0)^2 \left(\frac{1}{C} - \frac{1}{C_0} \right). \quad (2.7)$$

Соотношения (2.3)...(2.7) и определяют физику работы генератора Ван де Граафа. Движущиеся металлические пеллетроны ленты или ее участки имеют относительно земли емкость, которая при движении этих участков относительно земли изменяется по определенному закону. У основания генератора эти участки следует зарядить до заданного потенциала определенного знака. Если емкость этих участков будет меняться относительно земли,

то будет изменяться и потенциал зарядов, расположенных на них. В верхней части генератора эти участки передают накопленный потенциал сфере, заряжая ее до высокого потенциала.

Для расчета генератора необходимо знать первоначальный потенциал металлических пеллетрон и закон изменения их емкости по отношению к земле при движении ленты. Следует также знать величину их перемещения от нижней части генератора, где они заряжаются, к верхней его части, где они отдают свой заряд сфере. Поэтому в данном случае главной математической задачей расчета генератора является нахождение зависимости емкости пеллетрона в зависимости от расстояния до земли. При вертикальном положении генератора это будет одна зависимость, при горизонтальном положении – другая. Если лента движется параллельно земле, то такая зависимость будет отсутствовать, и генератор работать не будет. Вблизи вертикальной части генератора также должны отсутствовать металлические заземленные элементы конструкции здания.

Точный расчет емкости пеллетрона относительно земли выполнить трудно, но хорошим приближением является предположение о том, что пеллетроны представляют проводящие сферы, диаметр которых равен ее размеру. При этом необходимо вычислить емкость сферы заданного размера относительно плоской проводящей поверхности, которой является земля. Такая зависимость известна и определяется формулой [2, 7]

$$C = 4\pi\epsilon a \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\sinh \left[\ln \left(D + \sqrt{D^2 - 1} \right) \right]}{\sinh \left[n \ln \left(D + \sqrt{D^2 - 1} \right) \right]} = \quad (2.8)$$

$$= 4\pi\epsilon a \left(1 + \frac{1}{2D} + \frac{1}{4D^2} + \frac{1}{8D^3} + \frac{1}{32D^5} + \dots \right),$$

где $D = \frac{d}{2a}$; a – радиус сферы; d – расстояние от нижней части генератора до ее верхней части.

Первый член в разложении (2.8) представляет емкость уединенной сферы и не зависит от расстояния до земли. Нас будут интересовать только та емкость, которая зависит от расстояния.

В случае, когда d значительно больше, чем a в соотношении (2.8) достаточно взять только второй член разложения. При этом зависимость емкости политрона от расстояния определится соотношением

$$C = 4\pi\epsilon \frac{a^2}{d}. \quad (2.9)$$

В нижнем положении пеллетрона его емкость относительно земли составляет

$$C_0 = 4\pi\epsilon \frac{a^2}{d_0}, \quad (2.10)$$

где d_0 расстояние пеллетрона до земли в нижнем положении.

Следовательно, коэффициент трансформации потенциала может быть найден из соотношения (2.5)

$$K = \frac{d}{d_0}.$$

Таким образом, получены все необходимые данные для проектирования генератора. Практическая схема генератора, в которой учтены рассмотренные принципы, представлена на рисунке 2.

В отличие от конструкции, приведенной на рисунке 1, и верхний и нижний ролик выполнены из диэлектрика, а нижняя и верхняя щетки скользят по ремню с пеллетронами. Каждый пеллетрон, двигаясь вокруг нижнего ролика, посредством щетки заряжается от источника напряжения U_0 . От полярности этого источника зависит и полярность напряжения, вырабатываемого генератором.

Чтобы увеличить коэффициент трансформации, следует уменьшать d_0 . С этой целью нижний ролик можно сделать составным. Внутреннюю его часть следует выполнить из металла и заземлить, а снаружи одеть манжет из резины или цилиндр из диэлектрика. В этом случае толщина манжета или цилиндра будет размером d_0 . Можно поступить и по-другому. Ролик сделать полностью из металла и заземлить, а на резиновой ленте пеллетрон нанести путем металлизации. Тогда размером d_0 будет служить толщина ленты.

Ранее у нас отсутствовала возможность рассчитать напряжение и мощность генератора Ван де Граафа, теперь такая возможность имеется. Для этого следует воспользоваться соотношениями (2.3) и (2.7).

Приведем конкретный пример. В нашем распоряжении имеется металлизированная резиновая лента толщиной d_0 равной 0,01 м и шириной 0,1 м, что соответствует радиусу a эквивалентной сферы 0,05 м. На этой ленте имеются металлизированные

квадратные участки (пеллетроны), которые чередуются с такими же не металлизированными участками. Скорость ленты 50 м/с, расстояние между нижней и верхней щетками d составляет 5 м, напряжение источника напряжения U_0 равно 10 кВ.

При указанных параметрах напряжение, генерируемое генератором, составит

$$U = \frac{d}{d_0} U_0 = 5000 \text{ кВ.}$$

При скорости ленты 50 м/с за секунду заряд верхней щетке будет отдавать 250 пеллетронов. Каждый пеллетрон будет отдавать энергию равную, определяемую соотношением (2.4). Воспользовавшись соотношениями (2.9) и (2.10) получаем генерируемую мощность

$$P = 500\pi\epsilon \frac{a^2 d}{d_0^2} U_0^2.$$

Расчет по этой формуле с учетом приведенных параметров дает мощность 174 Вт. Эта мощность

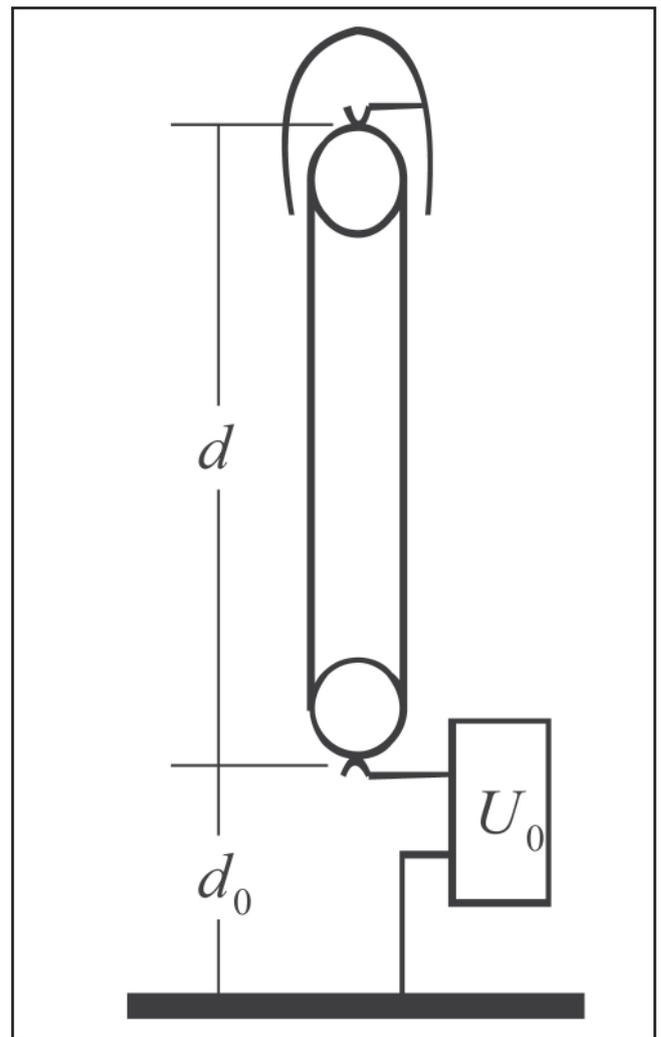


Рис. 2. Схема генератора

соизмерима с механической мощностью, необходимой для приведения в движение резиновой ленты.

Пользуясь соотношениями (2.1) и (2.4) можно вычислить КПД генератора, который равен отношению вырабатываемой энергии к энергии, расходуемой источником напряжения. В данном случае КПД будет равен

$$\text{КПД} = \frac{d^2}{d_0^2}.$$

При указанных параметрах КПД составляет величину $2,5 \cdot 10^4$. Такой высокий КПД означает, что практически вся механическая энергия (если не учитывать расходы энергии на привод движения ленты) тратится на выработку электрической энергии. Таким высоким КПД не обладает ни один из существующих генераторов электроэнергии. Естественно возникает вопрос о создании конкурентно способного генератора по сравнению с существующими генераторами. Это можно решить только путем увеличения емкости пелетрон относительно земли. Имеется ли такой путь? Да такой путь имеется. Для этого нужно воспользоваться опытом создания металлокерамических конденсаторов, у которых в качестве диэлектрика используется титанат бария, имеющий очень высокую диэлектрическую проницаемость. Схема такого генератора представлена на рисунке 3. Представленная схема является аналогом генератора Ван де Граффа.

На схеме жирными отрезками обозначены обкладки плоских конденсаторов. Жирной сплошной линией обозначена нижняя обкладка, которая является общей для обоих конденсаторов. Этой обкладкой может быть земля. Между обкладками левого конденсатора расположена пластина из титаната бария, на концах которой имеются выступы, при помощи которых могут замыкаться и размыкаться

контактные пары. Когда пластина находится в крайнем правом положении, она замыкает контактную пару, соединяющую источник напряжения с верхней пластиной правого конденсатора, заряжая его до потенциала U_0 . В этом положении пластины емкость правого конденсатора максимальна. Когда пластина начинает перемещаться влево, правая контактная пара размыкается, отключая конденсатор от источника напряжения. При дальнейшем движении пластины емкость правого конденсатора начинает уменьшаться по линейному закону и потенциал на нем растет. В крайнем левом положении, когда пластина выходит за пределы правого конденсатора, и потенциал на нем достигает максимального значения, происходит замыкание левой контактной пары и часть заряд из левого конденсатора переходит в правый конденсатор, и их потенциалы уравниваются. Далее при возвращении пластины в крайнее правое положение цикл повторяется. Таким образом, трансформация потенциала в данном случае происходит по уже рассмотренной выше схеме.

Заключение

Физический принцип работы генератора Ван де Граффа до сих пор окончательно не описан, а имеется лишь техническая схема генератора. Нет и расчетных соотношений, которые дают возможность рассчитать такой генератор. В статье представлена физическая схема генератора и показано, что принцип его работы основан на использовании закона параметрической самоиндукции. Получены также расчетные соотношения, позволяющие рассчитать параметры генератора. Расчет, проведенный по предлагаемой методике, показывает, что рассматриваемый генератор обладает очень высоким КПД, который не достижим в существующих генераторах.

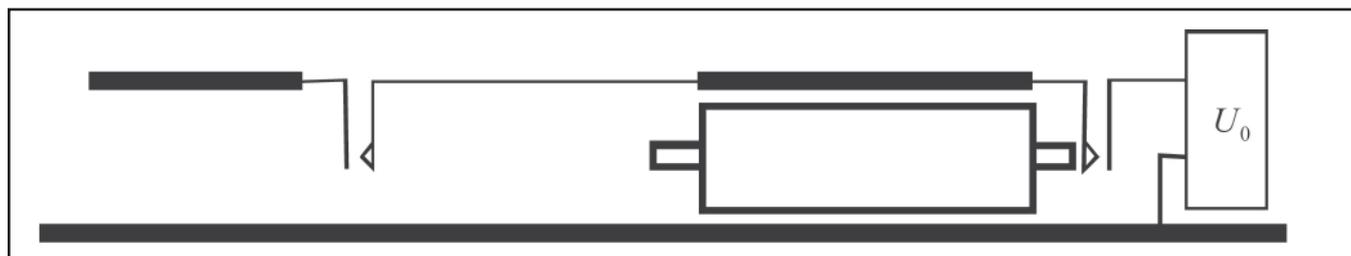


Рис. 3. Схема генератора

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ (REFERENCES)

1. Darryl J. Leiter, Van de Graaff, Robert Jemison. *A to Z of Physicists*. 2003, 312 p.
2. Maxwell J.C. *A Treatise on Electricity and Magnetism*. Dover, 1873. 266 p.
3. Менде Ф.Ф., Дубровин А.С. Особые свойства реактивных элементов и потоков заряженных частиц // *Инженерная физика*. 2016. № 11. С. 13...21 [Mende F.F., Dubrovin A.S. Special properties of reactive elements and fluxes of charged particles. *Engineering Physics*. 2016. No. 11. Pp. 13...21] (in Russian).
4. Mende F.F. New Properties of Reactive Elements and the Problem of Propagation of Electrical Signals in Long Lines. *American Journal of Electrical and Electronic Engineering*. 2014. Vol. 2. No. 5. Pp. 141...145.
5. Mende F.F. Induction and Parametric Properties of Radio-Technical Elements and Lines and Property of Charges and Their Flows. *AASCIT Journal of Physics*. Vol. 1. No. 3. Publication Date: May 21, 2015. Pp. 124...134.
6. Менде Ф.Ф., Дубровин А.С. *Альтернативная идеология электродинамики*. М.: Перо, 2016. 198 с. [Mende F.F., Dubrovin A.S. *Alternative ideology of electrodynamics*. Moscow: Publishing House «Pero», 2016. 198 p.] (in Russian).
7. Rawlins A.D. Note on the Capacitance of Two Closely Separated Spheres. *IMA Journal of Applied Mathematics*. 1985. Vol. 34. (1). Pp. 119...120.

Сведения об авторах

Менде Федор Федорович, доктор техн. наук, директор

E-mail: fedormende@gmail.com

НИИ Криогенного приборостроения Физико-технический институт низких температур им. Б.И. Веркина НАН Украины
61103, Украина, Харьков, пр. Ленина, 47

Дубровин Анатолий Станиславович, доктор техн. наук, акад. Российской Академии Естествознания, профессор факультета внебюджетного образования, закрепленный за кафедрой информационной безопасности телекоммуникационных систем ФКОУ ВО Воронежский институт ФСИН России

394072, г. Воронеж, Российская Федерация, ул. Иркутская 1-а

E-mail: asd_kiziltash@mail.ru

Information about authors

Mende Fedor F., Doctor of Techn. Sciences, Director

E-mail: fedormende@gmail.com

Research institute for cryogenic instrument engineering B.I. Verkin Institute for Low Temperature Physics and Engineering
NAS Ukraine

61103, Kharkov, Ukraine, Lenin Ave., 47

Dubrovin Anatoliy S., Doctor of Techn. Sciences, Professor

FKOU VPO Voronezh Institute of Russian Federal Penitentiary Service

394072, Voronezh, Russian Federation, Irkutskaya str., 1-a

E-mail: asd_kiziltash@mail.ru