

УДК 681.3 (09)

**Д. В. БРЕСЛАВСКИЙ**, докт. техн. наук, **С.А. ГОРЕЛОВА**,  
**А.А. ЛАРИН**, канд. техн. наук; НТУ «ХПИ»

**ИВАН АЛЕКСЕЕВИЧ ВЫШНЕГРАДСКИЙ –  
ОСНОВОПОЛОЖНИК ТЕОРИИ АВТОМАТИЧЕСКОГО  
УПРАВЛЕНИЯ (К 175-ЛЕТИЮ СО ДНЯ РОЖДЕНИЯ)**

Висвітлюється науково-педагогічна та громадська діяльність І.О. Вышнеградского, його внесок у розвиток вітчизняної механіки та організацію інженерної освіти. Особливо розглядається внесок Вышнеградского у теорію регулювання ходу машин.

The paper is devoted to the educational and scientific achievements in Mechanics of famous scientist I. Vyshnegradsky. Special opinion is stressed on his contribution in Control Theory for different machines.



1 января 2007 г. исполнилось 175 лет со дня рождения Ивана Алексеевича Вышнеградского, выдающегося ученого в области математики и механики, основоположника русской прикладной механики. Ученик М.В. Остроградского, И.А. Вышнеградский стоял у истоков машиностроительного образования в России и внес большой вклад в основание Харьковского технологического института (НТУ «ХПИ»). Он также является основоположником теории автоматического регулирования хода машин, выросшей впоследствии в теорию автоматического управления. И.А. Вышнеградский был не только видным ученым и организатором высшего образования, но и крупным государственным деятелем, в конце своей карьеры он работал министром финансов Российской империи.

Иван Алексеевич Вышнеградский родился 1 января 1832 г. (20 декабря 1831 г.) в Вышнем Волочке Тверской губернии в семье священника. В 1843 г. он поступил в Тверскую духовную семинарию. Проучившись там три года, Вышнеградский переехал в Санкт-Петербург, где поступил на физико-математическое отделение Главного педагогического института. Этот институт в 1844 г. уже окончил его старший брат Николай, который с 1849 г. читал там педагогику. И.А. Вышнеградский прославился организацией в России всесословного и общедоступного женского образования [Бефрон, т VII, с. 601].

В Главном педагогическом институте преподавали лучшие ученые России, и, конечно же, среди них на физико-математическом отделении выделялись преподаватели математики - М.В. Остроградский и физики - Э.Х. Ленц. М.В. Остроградский сразу обратил внимание на способного студента Вышнеградского и руководил его научными занятиями до своей кончины в 1861 г.

И.А. Вышнеградский окончил институт в 1851 г. с серебряной медалью и был определен учителем математики во 2-й Петербургский кадетский корпус. При этом он продолжал свои занятия с М.В. Остроградским и в 1854 г. защитил диссертацию на тему «О движении системы материальных точек, определяемой полными дифференциальными уравнениями», за которую получил степень магистра математики. После этого по рекомендации М.В. Остроградского новоиспеченный магистр получил место преподавателя в Михайловской артиллерийской академии.

Поражение России в Крымской войне и вскрывшаяся в ходе ее техническая отсталость побудили в И.А. Вышнеградском страстное желание помочь родине. Он стал детально изучать прикладную механику, артиллерийскую технику, производство вооружения и боеприпасов. С этой целью руководство академии командировало его в Киев, Шостку и Брянск на заводы артиллерийского ведомства, после чего И.А. Вышнеградскому было поручено чтение ряда специальных курсов и курсовое проектирование. В 1859 г. он стал членом Артиллерийского комитета, в котором занимался вопросами перевооружения армии винтовками и нарезными орудиями. В 1867-78 гг. И.А. Вышнеградский занимал пост инженера-механика Главного артиллерийского управления [ИМР, с. 232]. Его ученик А.В. Гадолин провел важнейшие исследования в области внутренней баллистики орудий, заложив основы теории и производства многослойных стволов орудий.

Велика роль И.А. Вышнеградского в проводимых с 1863 г. преобразованиях русской артиллерии. Будучи прекрасным знатоком практической механики, он является автором многих проектов перестройки и переоборудования заводов артиллерийского ведомства. На Охтинском пороховом заводе он сконструировал пресс, получивший широкое распространение в России и в Германии. Там же Вышнеградский применил передачу механической энергии на большое расстояние с помощью проволочных канатов. Будучи энергичным и деятельным человеком, он лично руководил монтажом и наладкой оборудования при строительстве и пуске орудийных заводов, а также первого в России патронного завода. Также им реализован собственный проект пристани в Рыбинске, где с помощью гидравлических приспособлений были механизированы процессы погрузки барж и вагонов.

И.А. Вышнеградский с самого начала своей педагогической

деятельности выступает как пропагандист технических знаний. С 1858 г. он читает в Петербурге публичные лекции по теории тепловых машин. Эти лекции привлекали обширную аудиторию, были изданы в 1859 г. отдельным изданием и получили широкую известность [ИМР, с. 232]. После длительной заграничной командировки, в которой И.А. Вышнеградский изучал практическую механику, он был утвержден в звании профессора и приступил к чтению различных специальных курсов механики в Артиллерийской академии и Петербургском технологическом институте. В последнем он стал читать новые курсы механической теории теплоты и устройства паровых двигателей. И.А. Вышнеградский был также назначен членом учебного комитета института. По его инициативе в институте была вновь введена кафедра технологии металлов и дерева и выстроена механическая лаборатория для научных исследований по сопротивлению строительных материалов и опытов по теплоте и гидравлике [???].

И.А. Вышнеградский был не только ученым и педагогом, но и выдающимся организатором науки, главой первой русской школы в области машиностроения, воспитав своей педагогической деятельностью целое поколение русских инженеров-машиностроителей. В 1871 г. он создал кружок ученых, работающих в области прикладной механики (сам Вышнеградский называл кружок пентагональным обществом, так как он насчитывал всего пять человек). Кроме Вышнеградского в кружок входили Н.П. Петров – создатель гидродинамической теории смазки, В.Л. Кирпичев – видный ученый в области механики, организатор и первый директор Харьковского технологического и Киевского политехнического институтов, А.П. Бородин – один из основоположников русского паровозостроения и П.В. Котурницкий – профессор Петербургского технологического института, видный специалист по теплотехнике и паровым машинам.

Своими трудами И.А. Вышнеградский оказал огромное влияние на развитие теории машиностроения и подготовку научно-педагогических кадров. В 1860 г. он издал учебник «Элементарная механика. Учебное руководство для военно-учебных заведений», по которому учились многие поколения кадетов. В 1871 г. И.А. Вышнеградский улучшил теорию изгиба криволинейных стержней, разработанную его коллегой И.А. Евневичем в 1868 г. В 1880 г. ученик Вышнеградского профессор Х.С. Головин\* дал первое точное решение этой задачи методами теории упругости [ИМР, с. 230]. В течение 1871-72 гг. И.А. Вышнеградский создает также курс подъемных машин, опубликованный в 1872 г.

---

\* Харлампий Сергеевич Головин (1844-1904) с 1888 по 1891 гг. был профессором Харьковского технологического института, с 1891 г. – директор Петербургского технологического института.

Научная деятельность И.А. Вышнеградского с середины 70-х годов в основном посвящена исследованию систем автоматического регулирования хода машин и разработка теории регулирования хода машин является его самым весомым вкладом в развитие науки. В 1784 Дж. Уатт предложил для паровой машины центробежный регулятор скорости вращения кривошипа. Высокая, для отмеченного периода развития техники, эффективность этого изобретения стимулировала его широкое практическое использование. В то же время теоретические исследования практически находились в зачаточном состоянии и не могли ответить на многие вопросы, которые выдвигала практика.

Одной из первых существенных работ, посвященных теории центробежного регулятора, была работа Максвелла «О регуляторах» (1868 г.), в которой рассматривается процесс саморегулирования, базирующийся на учете сил кулоновского трения. Серьезную теоретическую работу «О центробежном уравниателе», посвященную теории регулятора, значение которой оценили только полвека спустя, опубликовал в 1871 г. П.Л. Чебышев.

Однако статья И.А. Вышнеградского «О регуляторах прямого действия», опубликованная в 1877 году в Известиях Санкт-Петербургского Практического технологического института, по праву считается работой, с которой берет начало современная линейная теория регулирования [Геронимус, с. 138]. Действительно, общий подход, который впервые применил И.А. Вышнеградский при составлении математической модели замкнутой системы «объект-регулятор», базирующийся на совместном рассмотрении регулятора и объекта, до настоящего времени практически не изменился за исключением некоторых деталей и терминологии.

**П о с т а н о в к а   з а д а ч и .** На выходной вал паровой машины (рис.1) действует постоянный движущий момент  $M_0$  и равный ему по модулю нагрузочный момент  $M_n$  (рис. 2). В установившемся режиме угловая скорость вращения вала постоянна и равна  $\omega_0$ , муфта  $A$  регулятора и шары  $B$  и  $C$  находятся в относительном равновесии. В момент времени  $t_0$  происходит сброс нагрузки, например до значения  $M_1$ . Как следствие этого увеличиваются угловые скорости вала машины и регулятора. Увеличение центробежной силы приведет к раздвижке шаров регулятора и, следовательно, к подъему муфты  $A$ . Заслонка опустится вниз, что приведет к уменьшению подачи пара на паровую машину и снижению движущего момента.

Максвелл, рассматривая работу регулятора, установил зависимость положения муфты регулятора  $u$  (рис. 3) от скорости вращения вала, полагая, что при изменении угловой скорости муфта займет соответствующее ей положение, т. е. произойдет саморегулирование. Другими словами,

Максвелл, считал априори систему устойчивой и качество перехода из одного состояния системы в другое не рассматривал. Но именно здесь стали возникать проблемы при повышении мощности машин и скорости вращения вала.

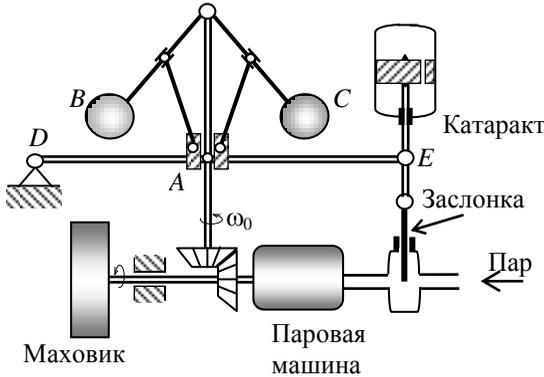


Рис. 1

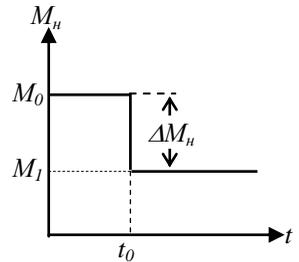


Рис. 2

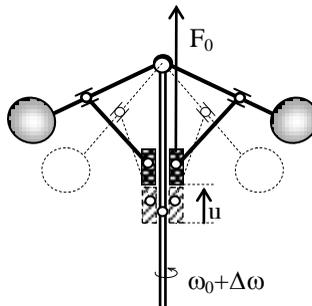


Рис. 3

Таким образом, возникла необходимость анализа переходного процесса системы *машина - регулятор* при изменении нагрузки. И эту задачу блестяще решает И. А. Вышнеградский. Сначала он выводит уравнение движения вала машины, связывающее угловую скорость вала с нагрузкой и положением муфты регулятора, затем выводит уравнение движения муфты. Связывая эти уравнения, Вышнеградский приходит к математической модели системы *машина - регулятор*. Анализ этой модели позволил Вышнеградскому сформулировать условия устойчивости системы в пространстве параметров.

При решении поставленной задачи И.А. Вышнеградский учитывает, что благодаря маховику сброс нагрузки вызывает малое изменение угловой скорости вала, по сравнению с  $\omega_0$  и, вследствие этого и перемещение муфты, и скорость этого перемещения малы. Кроме того, он пренебрегает кулоновским трением в системе. Принятые допущения позволяют при разложении в ряд Маклорена функций перемещения муфты отбрасывать слагаемые второго и более высоких порядков, что в конечном итоге приводит к рассмотрению линейной модели при полном отсутствии саморегулирования. Это принципиально отличает подход Вышнеградского от подхода Максвелла.

Отбросив из рассмотрения кулоновское трение, Вышнеградский вводит в систему демпфер вязкого трения (катаракт), имеющий линейную характеристику сопротивления, от скорости перемещения муфты.

Уравнение движения машины строится с помощью теоремы об изменении кинетической энергии, записываемой в дифференциальной форме.

$$dT = d \left( \frac{J_{np} \omega^2}{2} \right) = (M - M_1) d\varphi, \quad (1)$$

где  $J_{np}$  – момент инерции машины, приведенный к ее валу,  $M$  – текущее значение движущего момента, а  $d\varphi$  – элементарный угол поворота вала.

Отсюда

$$J_{np} \frac{d\omega}{dt} + \frac{1}{2} \omega^2 \frac{dJ_{np}}{d\varphi} = M - M_1. \quad (2)$$

Учитывая, что момент инерции маховика велик, полагаем приведенный момент инерции машины постоянным, т.е.  $J_{np} = const$ . Тогда

$$J_{np} \frac{d\omega}{dt} = M - M_1 = (M_0 - M_1) - (M_0 - M) = \Delta M_n - (M_0 - M). \quad (3)$$

Пусть  $u$  перемещение муфты при угловой скорости  $\omega = \omega_0 + \Delta\omega$  из положения относительного равновесия при угловой скорости  $\omega_0$  (рис.3). Разность  $M_0 - M$  является функцией перемещения муфты и обращается в нуль вместе с  $u$ . С учетом рисунка 2 и принятым направлением  $u$  на рис.3 можно приближенно положить  $M_0 - M = Lu, L > 0$ .

Учитывая это обстоятельство в уравнении (3) получаем уравнение вращения вала машины:

$$J_{np} \frac{d\omega}{dt} = \Delta M_n - Lu. \quad (4)$$

Для получения уравнения движения муфты регулятора Вышнеградский рассматривает движение всех его деталей – рычага  $DE$ ,

муфты, заслонки, поршня катаракта и др. (рис 3). Обозначая через  $\omega_u$  угловую скорость, соответствующая равновесному состоянию после смещения муфты на величину  $u$  из равновесного состояния, при угловой скорости  $\omega_0$ , и учитывая принятые выше предположения, Вышнеградский обоснованно полагает, что разность  $(\omega_u - \omega_0) \ll \omega_0$  и обращается в нуль, при  $u=0$ . Это дало возможность считать

$$\frac{\omega_u - \omega_0}{\omega_0} = Cu, \quad \text{где } C > 0. \quad (5)$$

Кинетическая энергия регулятора имеет вид

$$T_p = \sum \frac{m_k v_k^2}{2} = \frac{m_{np} \dot{u}^2}{2}, \quad (6)$$

где  $m_{np} = \sum m \left( \frac{v_k}{\dot{u}} \right)^2$  - приведенная к муфте масса регулятора.

Сила, приведенная к муфте, т.е. сила, действующая по направлению перемещения муфты вверх (рис. 3), элементарная работа которой равна алгебраической сумме работ сил, действующих на регулятор, и центробежных сил инерции шаров на относительных перемещениях их точек приложения:

$$F_0 du = \sum \vec{F} \cdot d\vec{r}_k = dt \sum F \cdot v_k \cos(\vec{F}, \vec{v}_k)$$

$$\text{или } F_0 = \sum \frac{F \cdot v_k \cos(\vec{F}, \vec{v}_k)}{\dot{u}}.$$

Применяя к относительному движению регулятора теорему об изменении кинетической энергии

$$d \left( \frac{m_{np} \dot{u}^2}{2} \right) = \frac{\dot{u}^2}{2} dm_{np} + m_{np} \dot{u} d\dot{u} = F_0 du,$$

Вышнеградский окончательно пришел к уравнению движения муфты регулятора:

$$m_{np} \ddot{u} + \frac{1}{2} \dot{u}^2 \frac{dm_{np}}{du} = F_0. \quad (7)$$

Приведенная масса  $m_{np}$  регулятора и регулирующего прибора является функцией перемещения и Вышнеградский приближенно полагает ее линейной

$$m_{np} = A + Bu, \quad A > 0.$$

После подстановки этого выражения в (7), с учетом того, что  $u, \dot{u}, \ddot{u}$  - малые величины, получим выражение

$$A \ddot{u} = F_0 \quad (8)$$

Сила  $F_0$  представляет сумму приведенной движущей силы  $F_1$  и приведенной силы сопротивления  $F_2$ . Если бы после перемещения муфты на  $u$  из начального положения выполнялось  $\omega = \omega_u$ , то муфта была бы в равновесии и  $F_1 = F_2 = 0$ . Сила  $F_1$  является функцией величины  $(\omega - \omega_u)$ , обращается в 0 одновременно с обращением в 0 этой разности и имеет тот же знак. По словам И.А. Вышнеградского для хорошего регулятора выполняется условие

$\frac{\omega - \omega_u}{\omega_0} \ll 1$  и тогда можно положить:

$$F_1 = AKg \frac{\omega - \omega_u}{\omega_0}, \text{ где } K > 0, \quad (9)$$

или

$$F_1 = AKg \frac{(\omega - \omega_0) - (\omega_u - \omega_0)}{\omega_0} = AKg \frac{\omega - \omega_0}{\omega_0} - AKg \frac{\omega_u - \omega_0}{\omega_0}.$$

С учетом (5) окончательно получим

$$F_1 = AKg \frac{\omega - \omega_0}{\omega_0} - ACKgu = AKg \frac{\omega - \omega_0}{\omega_0} - ANu, \text{ где } N = CKg > 0. \quad (9)$$

Приведенная сила сопротивления  $F_2$  И.А. Вышнеградским рассматривается в условиях пренебрежения силой трения по закону Кулона, т. е. определяется только гидравлическим сопротивлением, осуществляемым при помощи катаракта. Благодаря этому сопротивление движению муфты пропорционально ее скорости и противоположно по знаку. Поэтому его можно представить в виде  $F_2 = -AM \dot{u}$ . Тогда (8) можно представить так:

$$\ddot{u} = \frac{F_0}{A} = \frac{F_1 + F_2}{A} = Kg \frac{\omega - \omega_0}{\omega_0} - Nu - M \dot{u}. \quad (10)$$

Дифференцирование этого уравнения по  $t$  дает

$$\ddot{u} = Kg \frac{\dot{\omega}}{\omega_0} - M \ddot{u} - N \dot{u},$$

и после подстановки  $\dot{\omega}$  из (3) окончательно получено дифференциальное уравнение движения муфты:

$$\ddot{u} + M \dot{u} + N u + \frac{KLg}{J\omega_0} u = \frac{Kg}{J\omega_0} \Delta M. \quad (11)$$

Анализируя уравнение (11), И.А. Вышнеградский пришел к весьма важным выводам: от кулоновского трения в регуляторах необходимо избавляться с помощью более тщательной обработки деталей. В то же время для устойчивой работы регулятора необходимо включать в систему катаракт.

В следующем 1878 г. Вышнеградский рассмотрел также задачу непрямого регулирования. После его работ стало ясно, что машину и регулятор следует рассматривать как единое целое. Его труды вызвали в мировой литературе бурную дискуссию и положили начало теории регулирования хода машин.

Развитие капиталистического производства в России после освобождения крестьян от крепостной зависимости в 1861 г. пошло с огромной быстротой и потребовало большого количества инженеров-практиков. До крестьянской реформы в стране было семь университетов и только три технических института, располагавшихся в Петербурге: Горный (1773 г.), Инженеров путей сообщения (1810 г.) и технологический (1828 г.). В 1862 г. был открыт политехнический институт в Риге, где преподавание шло на немецком языке, а в 1868 г. Московское техническое училище, с открытием которого связан новый подход к техническому образованию.

Однако кадров для бурно развивающейся промышленности катастрофически не хватало, особенно на юге страны, и было решено открыть технологический институт на юге России для подготовки технических кадров в первую очередь для Донецко-Криворожского промышленного района. Выбор пал на город Харьков, в котором с 1805 г. работал один из старейших в стране университетов и к 1871 г. было 79 промышленных предприятий [Ист X, с. 81]. В конце 1870 г. в Харьков были командированы профессора Петербургского практического технологического института И.А. Вышнеградский и Н.П. Ильин. [100 лет ХПИ, с. 12]. В 1871 г. восемь выпускников этого же института были командированы за границу для подготовки к преподавательской деятельности в новом институте. Однако открытие второго после Петербургского практического технологического института задержалось на целых 15 лет. Наконец, он был открыт в 1885 г. и первым директором его стал лучший из учеников И.А. Вышнеградского профессор В.Л. Кирпичев. Иван Алексеевич не оставлял вниманием свое детище и впоследствии, будучи уже министром финансов. Не случайно Харьковский технологический институт находился в ведении министерства финансов России.

Вышнеградского не удовлетворяла только научная и педагогическая деятельность. Будучи разносторонним человеком, он в 1870-е годы

принимает активное участие в управлении железными дорогами и промышленными предприятиями. В 1887 г. Вышнеградский назначен управляющим министерства финансов, а в 1888 г. – министром финансов Российской империи. На этом посту он особое внимание уделил развитию железнодорожного транспорта.

Весной 1892 г. Вышнеградский заболел, в августе того же года оставил пост министра финансов и прекратил всякую деятельность. В 1895 г. он скончался.

Вклад И.А. Вышнеградского в развитие науки и образования огромен и получил всемирное признание. Заслуги Вышнеградского были по достоинству оценены, в 1887 г. он был избран почетным членом Петербургской АН. Творческая деятельность И.А. Вышнеградского не ограничивается только созданием фундамента современной теории автоматического регулирования, им также заложены основы анализа качества процесса регулирования, важнейшего направления теории управления во второй половине XX столетия [Блох, с.11]. В России идеи Вышнеградского получили развитие в трудах Н.Е. Жуковского, Я.И. Грдины, А.И. Сидорова и др., а за рубежом в трудах А. Стодола, Толле и Хорта. [Бог ММ] Бурное развитие техники в Советском Союзе поставило ряд задач автоматического регулирования, что привело к созданию советской школы автоматического регулирования. Достойными продолжателями работ Вышнеградского явились И.Н. Вознесенский, А.А. Андронов, К.Э. Рерих, Б.В. Булгаков, А.В. Михайлов и др. Таким образом, традиции, заложенные И.А. Вышнеградским, продолжены его учениками, учениками учеников, каждому из которых можно посвятить отдельное исследование.

**Список литературы:** 1. *Брокгауз, Ефрон* Энциклопедический словарь, т.7. – СПб., 1892. – 952 с. 2. История механики в России. – Киев: Наук. думка, 1987. – 392 с. 3. *Геронимус Я.Л.* Очерки о работах корифеев русской механики. – М.: Гостехиздат, 1952. – 519 с. 3. Харьковский Политехнический институт 1885 – 1985. История развития. Харьков, издательство при ХГУ Изд. объединения «Вища школа», 1985 4. История городов и сел Украинской ССР. Харьковская область. – Харьков.: Главная редакция УСЭ, 1976. – 722 с. 5. [100 лет ХПИ] Харьковский политехнический институт: 1885-1985. История развития / под общей ред. Н.Ф. Киркача. – Х.: Вища школа, 1985.– 224 с. 6. *Блох З.Ш.* Динамика линейных систем автоматического регулирования машин. – М.: ГТТИ, 1952, – 491 с. 7. *Боголюбов А.Н.* Математики. Механики. Биогр. справочник. – К.: Наук. думка, 1983. – 640 с.

*Поступила в редколлегию 14.03.07*