

Девяносто лет отрицательной обратной связи

О.В. Стукач

Национальный исследовательский Томский политехнический университет

Аннотация: В истории науки усилитель с отрицательной обратной связью считается одним из крупнейших технических изобретений, поскольку сам принцип, положенный в основу, имеет широкую область применения. История изобретения электронного усилителя с отрицательной обратной связью – это превосходный пример сложного взаимодействия инновационного технологического бизнеса и процветающих университетов. Это блестящий результат экспериментальных исследований, быстрого развития общей теории управления и коммерциализации разработок. В статье рассказывается об истории открытия и использования отрицательной обратной связи в электронных усилителях мощности. Показано, как изобретение усилителя не только изменило методологию научного творчества в прошлом, но и до сих пор влияет на развитие техники, открывая всё новые и новые проблемы использования обратной связи в управлении.

Ключевые слова: историческое событие, обратная связь, инновация, коммерциализация разработок, новые проблемы управления, системы с переменной структурой

Статья посвящена открытию и использованию обратной связи в усилительных устройствах, впервые предложенной Г.С. Блэком 90 лет назад. Ее цель – на историческом примере показать, как техническое изобретение в узкой области радиоэлектроники может открыть удивительные глубины познания законов управления.

Гарольд Стивен Блэк (*Harold Stephen Black*, Рис. 1) родился в Массачусетсе в 1898 г [1]. Он окончил Вустерский политехнический институт (WPI) в 1921 году с дипломом бакалавра-электрика [2]. В этом же году он стал работать в компании *Western Electric*, производственной площадке американской телефонной компании AT&T с зарплатой 32 доллара в неделю при шестидневной рабочей неделе. Когда в 1925 году была образована *Bell Telephone Laboratories*, являющаяся научным подразделением AT&T, Блэк перешёл туда, где и проработал в отделе разработчиков до 1963 года. Характерно, что степень инженера-электрика Блэк получил только в 1951 году.

Как писал сам Блэк в статье [3], идея усилителя с отрицательной обратной связью родилась, когда он ехал на пароме через Гудзон из Нью-Джерси до Нью-Йорка 2 августа 1927 г. В то время лаборатория располагалась на 463-й западной улице Манхэттена. Живя в Нью-Джерси, ему каждое утро приходилось ездить на работу на пароме. В дороге обнаружилось, что писать решительно не на чем. Тогда была использована газета с одной чистой страницей, на которой стояла лишь дата (Рис. 2). Заявка на патент была подана через четыре года, а сам патент № 2102671 был выдан только через пять лет после подачи заявки, в декабре 1937 года [4].



Рис. 1. Гарольд Стивен Блэк [1]

Каскадные ламповые усилители, используемые в телефонии в то время, обладали большими нелинейными и перекрёстными искажениями [5]. Коэффициент усиления таких усилителей изменялся под воздействием неисчислимого множества факторов: напряжения питания, температуры, старения ламп и т.д. Нелинейность вольтамперных характеристик ламп приводила к интермодуляционным искажениям в многоканальной системе. Усилители часто теряли устойчивость, превращаясь в автогенератор. В 1921 г. инженеры сталкивались с этими трудностями на трансконтинентальной телефонной линии, построенной в 1915 г. Линия была модернизирована и включала трёхканальную систему с двенадцатью усилителями (Рис. 3). Лаборатория строила вторую трансконтинен-

тальную линию в 1923 г. с четырьмя каналами и двадцатью усилителями и планировала более сложные системы в будущем. Поэтому улучшение характеристик усилителей стало неотложной проблемой.



Рис. 2. Идея усилителя с отрицательной обратной связью

Блэк попросил руководство дать возможность поработать над улучшенными усилителями для системы из тысячи каналов. Идея состояла в использовании электронных приборов с меньшими, чем у ламп искажениями. Начальство было ошеломлено масштабом мышления, но отнеслось к идее равнодушно и посоветовало заняться задачей в свободное от основной работы

время. Но решения не находилось. Блэк уже тогда понял, что нужен иной взгляд на проблему, что дело не в усилительном элементе. Он вспомнил, что в 1923 году посетил лекцию С.П. Стейнмеца, главного инженера Джeneral Электрик на конференции AIEE (Американский институт инженеров-электриков, предшественник IEEE – Института инженеров по электротехнике и радиоэлектронике, <http://www.ieee.org>) [6] и был увлечён общими теоретическими принципами, изложенными Стейнмецем. Вскоре на их основе был сконструирован усилитель с прямой связью [1]. В нём использовался параллельный канал усиления сигнала с той же амплитудой (Рис. 4). Сигнал основной гармоники вычитался из основного канала усиления. Получившийся сигнал, представляющий собой гармоники второго и третьего порядка, усиливался в дополнительном усилителе. Затем он подавался на основной усилитель в противофазе. Ненужные гармонические составляющие вычитались из сигнала основного усилителя, искажения снижались.

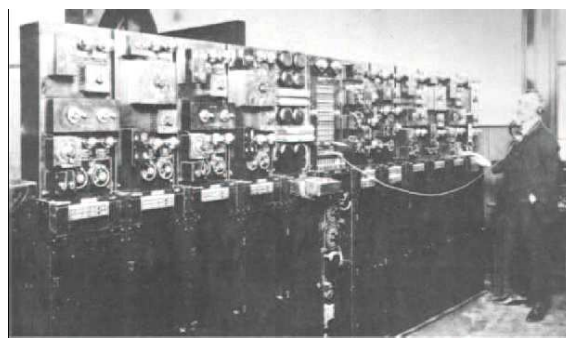
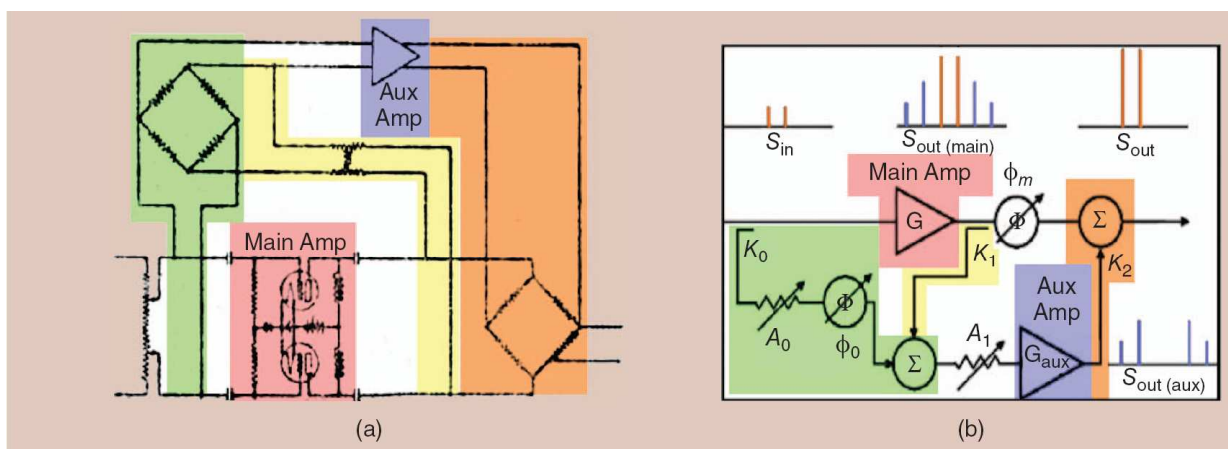


Рис. 3. Гарольд Блэк и его усилитель на 60 дБ с режекцией интермодуляционных искажений [1]



Feedforward linearization employs two loops: (a) Black's original block diagram and (b) an updated version are shown

Рис. 4. Усилитель с прямой связью [1]

Хотя в этом усилителе Блэк не использовал отрицательную обратную связь, это был первый шаг к усилителю без искажений. Проблема была сформулирована без привязки к искажениям ламп. Нелинейность ламп воспринималась как их неотъемлемое свойство, а искажения надо было устранить схемотехнически. Но усилитель со связью вперёд более чувствителен к изменению внутренних параметров и внешних возмущающих воздействий. Это неизбежно сказывалось на технических характеристиках [7].

Сам Блэк не объяснял, почему он неожиданно решил проверить другой способ компенсации искажений в усилителе. Решение не было очевидным, так как использование прямой и обратной связи – это диаметрально противоположные концепции. Блэк конечно знал о двух главных типах обратной связи – используемой в механических и электрических системах управления для формирования сигнала ошибки, а также в регенеративных приёмниках.

Отрицательная обратная связь была известна давно. Часть выходного отклика системы направляется на её вход так, чтобы полностью изменить направление входного воздействия. Целью является поддержание постоянного уровня какой-либо величины или препятствие её изменению. В частности, поплавковый регулятор – это классический пример использования отрицательной обратной связи. Когда вода заполняет бак почти полностью, поплавок поднимается, и связанный с ним рычаг перекрывает кран. В данном случае сигнал обратной связи противоположен воздействию, уменьшая его. Отрицательная обратная связь поддерживает равновесие системы. Напротив, при положительной обратной связи выходной сигнал направляется на вход так, чтобы увеличить его. И положительная, и отрицательная обратная связь требует наличия петли обратной связи. В противоположность обратной связи существуют системы прямого регулирования, не требующие информации о выходе системы.

Пусть $X(p)$ – входное воздействие, $Y(p)$ – отклик системы, $K(p)$ – оператор, преобразующий входной сигнал в выходной, $p = j\omega$, ω – круговая частота. Для системы прямого управления $K(p) = Y(p)/X(p)$. Для системы с обратной связью введем звено $K_{oc}(p)$, преобразующее выходной сигнал $Y(p)$ в сигнал обратной связи (рис. 5). Очевидно, сигнал обратной связи равен $K_{oc}(p)Y(p)$. Для отрицательной обратной связи сигнал ошибки определяется как $E(p) = X(p) - K_{oc}(p)Y(p)$, поэтому с учётом $K(p) = Y(p)/E(p)$ получаем оператор системы с отрицательной обратной связью в виде: $K_{обц}(p) = Y(p)/X(p) = K(p)/[1 + K(p)K_{oc}(p)]$. Важно то, что $K_{обц}(p) < K(p)$.

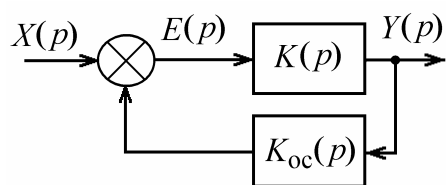


Рис. 5. Модель системы с обратной связью

Снижать усиление до 2 августа 1927 г. никому не хотелось. Но в данном случае наверно впервые был применён приём, ставшим классическим в ТРИЗ – обратить вред в пользу. Нужно было догадаться, что жертвуя усилением, мы получаем в системе новое свойство – снижение нелинейных искажений.

Выводы Блэка в его статье, которая была дважды переиздана в трудах *IEEE* [8], с позиции сегодняшнего дня кажутся предельно примитивными. Автор рассматривает искажения, которые просто складываются с полезным сигналом, хотя это не всегда так. Введение обратной связи уменьшает усиление и искажения в равной мере в $1 + KK_{oc}$ раз, но при большом K искажения уменьшаются значительно, что подтверждается в статье экспериментальными результатами. Рассмотрим простой частный случай. Пусть оператор, преобразующий входной сигнал в выходной, представляет собой звено возведения в квадрат с усилением k . Тогда $Y = kX^2$. Очевидно, это нелинейный оператор, превращающий воздействие в его вторую гармонику. Введем в систему единичную $K_{oc}(p) = 1$ отрицательную обратную связь. Применяя оператор k к сигналу ошибки, получим $Y = k(X - Y)^2$, или $kY^2 - (2kX + 1)Y + kX^2 = 0$. Решая получившееся квадратное уравнение относительно Y , получим корни, которые будут представлять собой линейные функции. При большом усилии k можно пренебречь единицей в скобках предыдущего уравнения, из чего непосредственно вытекает, что $Y = X$: нелинейные искажения полностью исчезли.

Все электронные приборы (электронные лампы, транзисторы) нелинейны. Введение отрицательной обратной связи приводит к линеаризации системы ценой снижения усиления. Интересно, что два инженера компании *AT&T* Фрис и Дженсен в 1924 году исследовали влияние обратной связи через сеточную ёмкость. Ими был сделан вывод о том, что обратная связь может быть как положительной, так и отрицательной, но в любом случае это явление было названо негативным. Для компенсации обратной связи было предложено схемотехническое решение. Трудно сказать, повлияла ли эта работа на исследования Блэка. Путь к линейному усилителю был весьма непрост. Система постоянно теряла устойчивость. В то время над проблемой повышения запаса устойчивости работал Гарри Найквист (1889–1976). В мае 1928 года Найквист и другие инженеры *AT&T* совещались с Блэком

относительно использования его усилителя для новой кабельной системы. Найквист считал, что правило проектирования Блэка было слишком строгим, и сделал свой анализ отрицательной обратной связи. Позже, в 1932 году эта работа была опубликована, а способ оценки устойчивости стал широко известен как «критерий Найквиста» [9]. Блэк воспользовался теоретическими результатами, и в отдельном разделе статьи, названном “*Avoid singing*” показал, что схемотехнически можно добиться такого фазового набега, чтобы обратная связь не становилась положительной, что автоматически делало усилитель устойчивым. Таким образом, введение отрицательной обратной связи в усилителях привело к стабилизации и улучшению характеристик.

Одновременно Блэком была решена задача расширения полосы частот. Повышение информационной ёмкости каналов связи напрямую связано с широкополосностью. Полосу рабочих частот ограничивают реактивные элементы. Их влияние принципиально невозможно уничтожить, но можно значительно ослабить схемотехнически. Наиболее просто это сделать введением отрицательной обратной связи [10].

Теперь стало возможным проектирование 100-канального усилителя с полосой рабочих частот до 1 МГц для коаксиально-кабельных линий. Другой теоретик *Bell Telephone Laboratories*, Генрих Боде (1905–1982) [11] в 1940 году опубликовал статью «Связь между ослаблением и фазой в усилителе с обратной связью» [12]. Эта статья и книга 1945-го года [13], в которой был предложен график, который известен сейчас как «номограмма Боде», окончательно вывели проектирование усилителей из области инженерного шаманства на строгий научный уровень [14]. Исследования Боде основывались на результатах работы Блэка, а статья [15] написана замечательно и даже сегодня читается с большим интересом.

Правильно выбранная глубина обратной связи уменьшала искажения и шум. Причем положительный эффект достигался с помощью пассивных элементов, а не ламп. Таким образом, новый (он же хорошо забытый старый) приём существенно улучшил характеристики всей системы. Не смотря на немедленное признание важности концепции обратной связи, потребовались годы дополнительных исследований и экспериментов, прежде чем она нашла практическое использование [14]. Обратная связь не привязана к ламповой технике, то есть к технологии её происхождения. Поэтому она стала фундаментальным принципом разработки электронных устройств с неисчислимыми приложениями [3].

Применение принципа отрицательной обратной связи было воспринято довольно быстро в Стэнфордском университете профессором Фредериком Терманом и группой его студентов. В

1939 году Терман, Вильям Хьюлетт, Роберт Басс, и Фрэнсис Кэхилл написали статью-панегирик отрицательной обратной связи [16]. Оказалось, что области её приложения гораздо шире: это усилители звуковых частот, вольтметры переменного напряжения, приёмники и высокочастотные генераторы. Терман часто называется основателем «Кремниевой долины», так как он содействовал коммерческим связям между Стэнфордским университетом и местными электронными компаниями. Влияние Термана на развитие компаний было значительным [17]. Так, работая с Хьюлеттом в гараже у Паккарда над звуковым генератором с емкостной перестройкой частоты, он дал Хьюлетту 538 долларов, помог получить кредит в 1000 долларов и получить первый заказ на восемь генераторов от студии Диснея, которая снимала фильм «Фантазия». В 1940 году компания Хьюлетт-Паккард имела девять штатных сотрудников и вышла из гаража, чтобы разрабатывать полную линейку продуктов, первоначально базировавшихся на усилителе с отрицательной обратной связью.

Таким образом, хотя Блэк считается первооткрывателем усилителя с отрицательной обратной связью, эта область – плод египетского труда и нечеловеческих усилий целой группы инженеров, теоретиков и организаторов коммерциализации разработок. История усилителя Блэка иллюстрирует многое из теории и технологии. Конечно, это озарение, пришедшее в умственный мозг одного человека. Но это и труд многих инженеров и теоретиков, в первую очередь, математиков. В свою очередь, теоретики помогли инженерам понять первоначальный инженерный замысел и развить его до коммерческого использования. Хьюлетт и Паккард не только начали новый бизнес, но и укрепили связи между университетом и электронной промышленностью, которая превратилась в то, что люди позже назвали изобретением в духе Кремниевой долины. Таким образом, история усилителя с отрицательной обратной связью – это превосходный пример сложного взаимодействия между теорией, экспериментом и инновационной практикой с быстро развивающимся бизнесом и процветающими университетами.

Идея использования обратной связи в усилителях имеет славное продолжение уже после ухода Блэка. В первую очередь стоит отметить изобретение усилителя мощности, работающего по классу *D*. В нём выходной сигнал не усиливается, как в класса *A*, а формируется из автоколебаний в контуре под воздействием генератора пилообразных импульсов. А это звено с положительной обратной связью. Для неё $E(p)=X(p)+K_{oc}(p)Y(p)$, поэтому $K_{общ}(p)=Y(p)/X(p)=K(p)/[1-K(p)K_{oc}(p)]$. Использование звеньев с положительной обратной связью в устройствах для повышения устойчивости кажется попыткой совместить пожарного и поджигателя. Тем не менее, это не

так. Рассмотрим неустойчивую систему с одним звеном, операторная функция которого равна $K(p)/(1-pT)$. Для повышения устойчивости охватим систему положительной обратной связью. Имеем: $K(p)/(1-pT)/[1-KK_{oc}(p)/(1-pT)]=K/[1-pT-KK_{oc}(p)]$. Проверка на гурвицевость даст корень $p=[1-KK_{oc}(p)]/T$, который будет отрицательным при $KK_{oc}(p)>1$, а это условие технически легко выполнимо.

В заключение стоит обратить внимание читателя на статью «Управление с обратной связью системами с отрицательной мнимой передачей» [18], в которой исследуется робастность управления с положительной обратной связью систем с гибкой структурой, например, с актюаторами, микроэлектромеханическими устройствами и датчиками положения. В статье приводятся примеры использования общей теории управления применительно к электрическим цепям. Сразу напрашивается историческая параллель с классической работой [8], после появления которой теория управления получила бурное развитие. И снова можно утверждать, что развитию теории управления и масштабного инновационного бизнеса будет способствовать обратная связь, на этот раз положительная. Она ещё ждет своих исследователей, не менее талантливых, чем Гарольд Стивен Блэк.

ЛИТЕРАТУРА / REFERENCES

- [1] Allen Katz, John Wood, Daniel Chokola. The Evolution of PA Linearization // Microwave Magazine. – 2016. – N 2. – P. 32–40. DOI: 10.1109/MMM.2015.2498079.
- [2] Desoer C.A. In memoriam: Harold Stephen Black // IEEE Transactions on Automatic Control. – 1984. – Vol. AC-29. – N 8. – P. 673–674. DOI: 10.1109/TAC.1984.1103645.
- [3] Harold S. Black. Inventing the negative feedback amplifier // IEEE Spectrum. – 1977. – Vol. 14. – N 12. – P. 54–60. – DOI: 10.1109/MSPEC.1977.6501721.
- [4] Harold S. Black. U.S. Patent 2102671. Заявл. 22.04.1932, выд. 21.12.1937.
- [5] Ronald Kline. Harold Black and the Negative-Feedback Amplifier // IEEE Control Systems. – 1993. – N 8. – P. 82–85. DOI: 10.1109/37.229565.
- [6] O.V. Stukach, B.G. Lvov. The International IEEE Siberian Conference on Control and Communications // IEEE Microwave Magazine. – 2017. – Vol. 18. – Issue 2, March–April. – P. 97–99. – DOI: 10.1109/MMM.2016.2635928. – <http://ieeexplore.ieee.org/document/7843734/>.
- [7] Bernard Friedland. Introduction to "Stabilized Feed-Back Amplifiers" // Proceedings of the IEEE. – 1999. – Vol. 87. – N 2. – P. 376–378. – DOI: 10.1109/JPROC.1999.740031.
- [8] Black H.S. Stabilized Feed-Back Amplifier // Electrical Engineering. – 1934. – Vol. 53. – N 1. – P. 114–120. – DOI: 10.1109/EE.1934.6540374. – Reprinted in Proceedings of the IEEE. – 1984. – Vol. 72. – N 6. – P. 716–722. – DOI: 10.1109/PROC.1984.12921. – Reprinted in Proceedings of the IEEE. – 1999. – Vol. 87. – N 2. – P. 379–385. – DOI: 10.1109/JPROC.1999.740032.
- [9] Harry Nyquist. Regeneration Theory // Bell Syst. Tech. Journal. – Vol 11. – N 1. – P. 126–147.
- [10] Stukach O.V. A Novel Darlington Amplifier Optimized for Wideband / Proceedings of the 1st European Wireless Technology Conference. – European Conference on Wireless Technology EuWiT, 2008. – Amsterdam, the Netherlands, 28–29 October 2008. – P. 155–157. – <http://ieeexplore.ieee.org/document/4753830/>.
- [11] Mac E. Van Valkenberg. In Memoriam: Hendrik W. Bode (1905–1982) // IEEE Trans. Auto. Control. – 1984. – Vol. 29. – P. 193–194. – DOI: 10.1109/TAC.1984.1103509.
- [12] Bode H.W. Relations between attenuation and phase in feedback amplifier design // Bell Syst. Tech. Journal. – 1940. – Vol 19. – N 7. – P. 421–454.
- [13] Bode H.W. Network Analysis and Feedback Amplifier Design. Princeton, N.J. – 1945.
- [14] Black H. Invention in engineering // Elec. Eng. – 1958. – N 8. – Vol. 77. – P. 722–723.
- [15] Bode H.W. Feedback: The history of an idea // Selected Papers on Mathematical Trends in Control Theory. – New York: Dover. – 1964. – P. 107–124.
- [16] Terman F.E., Buss R.R., Hewlett W.R., Cahill F.C. Some applications of negative feedback with particular reference to laboratory equipment // Proc. IRE. – 1939. – Vol. 27. – N 10. – P. 649–655. – DOI: 10.1109/JRPROC.1939.228752.
- [17] Bernstein D.S. Feedback Control: An Invisible Thread in the History of Technology // IEEE Control Systems Magazine. – 2002. – N 4. – P. 53–68. – DOI: 10.1109/37.993315.
- [18] Petersen I.R., Lanzon A. Feedback Control of Negative-Imaginary Systems // IEEE Control Systems Magazine. – 2010. – N 10. – P. 54–72. – DOI: 10.1109/MCS.2010.937676.

Ninety Years of the Negative Feedback

O.V. STUKACH

National Tomsk Politechnical University,
Tomsk, Russia

Abstract: The amplifier with the negative feedback is considered in history of science as one of the largest technical invention due wide fields of utilization of this principle. The history of invention of the electronic amplifier with the negative feedback is an excellent example of complex interaction of innovative technological business and prospering universities. It is brilliant result of the experimental researches, fast development of the general theory of control and studies for commerce. The paper presents essay of opening and use of the negative feedback in electronic power amplifiers. It is shown, how invention of the amplifier not only has changed methodology of scientific creativity in the past, but also influences for technics development till now, opening all novel problems of use of feedback in control.

Key words: historical event, feedback, innovation, development for commerce, new problems of control, system with variable structure

REFERENCES

- [1] Allen Katz, John Wood, Daniel Chokola. The Evolution of PA Linearization // Microwave Magazine. – 2016. – N 2. – P. 32–40. DOI: 10.1109/MMM.2015.2498079.

- [2] Desoer C.A. In memoriam: Harold Stephen Black // IEEE Transactions on Automatic Control. – 1984. – Vol. AC-29. – N 8. – P. 673–674. DOI: 10.1109/TAC.1984.1103645.
- [3] Harold S. Black. Inventing the negative feedback amplifier // IEEE Spectrum. – 1977. – Vol. 14. – N 12. – P. 54–60. – DOI: 10.1109/MSPEC.1977.6501721.
- [4] Harold S. Black. U.S. Patent 2102671. Filed 22.04.1932, issued 21.12.1937.
- [5] Ronald Kline. Harold Black and the Negative-Feedback Amplifier // IEEE Control Systems. – 1993. – N 8. – P. 82–85. DOI: 10.1109/37.229565.
- [6] O.V. Stukach, B.G. Lvov. The International IEEE Siberian Conference on Control and Communications // IEEE Microwave Magazine. – 2017. – Vol. 18. – Issue 2, March-April. – P. 97–99. – DOI: 10.1109/MMM.2016.2635928. – <http://ieeexplore.ieee.org/document/7843734/>
- [7] Bernard Friedland. Introduction to "Stabilized Feed-Back Amplifiers" // Proceedings of the IEEE. – 1999. – Vol. 87. – N 2. – P. 376–378. – DOI: 10.1109/JPROC.1999.740031.
- [8] Black H.S. Stabilized Feed-Back Amplifier // Electrical Engineering. – 1934. – Vol. 53. – N 1. – P. 114–120. – DOI: 10.1109/EE.1934.6540374. – Reprinted in Proceedings of the IEEE. – 1984. – Vol. 72. – N 6. – P. 716–722. – DOI: 10.1109/PROC.1984.12921. – Reprinted in Proceedings of the IEEE. – 1999. – Vol. 87. – N 2. – P. 379–385. – DOI: 10.1109/JPROC.1999.740032.
- [9] Harry Nyquist. Regeneration Theory // Bell Syst. Tech. Journal. – Vol 11. – N 1. – P. 126–147.
- [10] Stukach O.V. A Novel Darlington Amplifier Optimized for Wideband / Proceedings of the 1st European Wireless Technology Conference. – European Conference on Wireless Technology EuWiT, 2008. – Amsterdam, the Netherlands, 28–29 October 2008. – P. 155–157. – <http://ieeexplore.ieee.org/document/4753830/>.
- [11] Mac E. Van Valkenberg. In Memoriam: Henrik W. Bode (1905–1982) // IEEE Trans. Auto. Control. – 1984. – Vol. 29. – P. 193–194. – DOI: 10.1109/TAC.1984.1103509.
- [12] Bode H.W. Relations between attenuation and phase in feedback amplifier design // Bell Syst. Tech. Journal. – 1940. – Vol 19. – N 7. – P. 421–454.
- [13] Bode H.W. Network Analysis and Feedback Amplifier Design. Princeton, N.J. – 1945.
- [14] Black H. Invention in engineering // Elec. Eng. – 1958. – N 8. – Vol. 77. – P. 722–723.
- [15] Bode H.W. Feedback: The history of an idea // Selected Papers on Mathematical Trends in Control Theory. – New York: Dover. – 1964. – P. 107–124.
- [16] Terman F.E., Buss R.R., Hewlett W.R., Cahill F.C. Some applications of negative feedback with particular reference to laboratory equipment // Proc. IRE. – 1939. – Vol. 27. – N 10. – P. 649–655. – DOI: 10.1109/JRPROC.1939.228752.
- [17] Bernstein D.S. Feedback Control: An Invisible Thread in the History of Technology // IEEE Control Systems Magazine. – 2002. – N 4. – P. 53–68. – DOI: 10.1109/37.993315.
- [18] Petersen I.R., Lanzon A. Feedback Control of Negative-Imaginary Systems // IEEE Control Systems Magazine. – 2010. – N 10. – P. 54–72. – DOI: 10.1109/MCS.2010.937676.



Стукач Олег Владимирович – основатель Томской группы Института *IEEE*, профессор кафедры Систем управления и мехатроники Томского политехнического университета.
E-mail: tomsk@ieee.org