

回路網合成論과 필터設計의 歷史的背景

金 炯 甲*

■ 차 례 ■

- | | |
|----------------------|---------|
| 1. 回路網合成과 필터設計와의 關係 | 의 位置 |
| 2. 現代教科課程에 있어서의 필터設計 | 參 考 文 獻 |

① 回路網合成과 필터設計와의 關係

電氣回路網合成論은 한개의 體系로 세워진 것이 1920年代의 일이었으니 그의 歷史는 比較的 짧다고 할 수 있으나 內容이 豊富하고 잘 整理된 學問이다. 電氣回路網合成論은 回路網分析和 함께 回路網 理論의 兩翼을 이루고 있으며 따라서 電氣・電子工學의 기초가 되는 科目中의 하나라고 볼 수 있다. 回路網分析이란 回路에 어떠한 電氣的인 入力이 加해 질때 回路가 어떻게 應答하는가를 調查하는 것으로써 答이 唯一(Unique)한 데 反해 回路網合成은 미리 作定된 設計明細條件(Specifications)을 滿足시키는 回路를 여러가지 素子를 使用하여 實現하는 것이므로 그 解答이 唯一하지 않다. 바로 이 唯一하지 않다는 點이 여러가지의 可能性을 含蓄하여 엔지니어의 흥미를 喚起시키는 것이다. 合成을 할 때에는 보통 크기와 價格, 무게, 모양, 그리고 壽命등을 고려해야 되므로 무엇을 第一優先의 欸로 취급하여 가장 適合한 回路를 만들 것인가 하는 最適化(Optimization) 問題가 수반되기 마련이다. 이렇게 하므로써 經濟性있는 設計가 되어야 하기 때문에 回路網合成은 原來 數學과 物理學을 많이 利用하지만 自然科學이라기 보다는 오히려 工學에 속하는 것이다.

回路網合成을 한 개의 學問으로 定立시키는데 있어서 큰 貢獻을 한 사람들이 있다. 그들은 마치 집

을 지을때의 기둥과 같은 役割을 한 것이다. 여기 限定된 紙面으로 發展過程을 더듬어 보는데 있어서 그들의 몇편의 論文에 言及해 보는것도 方法일 것으로 생각된다.

美國 Bell 電話會社의 技術員이었던 R. M. Foster 는 1924년에 “A Reactance Theorem”이라는 論文을 Bell System Technical Journal에 실렸는데 이것이 바로 回路網合成을 數學的으로 다룬 최초의 論文이라고 볼 수 있다. 이 論文은 無損失인 두 가지의 素子, 即 인덕터와 커패시터로 된 回路를 合成할 때 回路函數가 어떠한 性質을 가져야 할 것인가를 究明한 것이다. 그로부터 2年後인 1926년에는 伯林의 한 젊은 工學徒 W. A. E. Cauer가 “Die Verwirklichung von Wechselstromwiderstanden vorgeschriebener Frequenzabhängigkeit. 英譯: The Realization of Impedances with Prescribed Frequency Dependence” 라는 論文을 Arch. Elektr. Otech에 發表함으로써 周波數 特性이 提示될때 回路를(다시 말해서 필터를) 合成하는 科學的인 方法에의 문을 열게 되었다. 이 외에도 37편의 當당한 論文을 發表한 Cauer야 말로 一大 선구자 중의 하나였다고 생각된다. 여기서 指摘하고 싶은 것은 Foster나 Cauer의 方法들을 使用하면 梯子形 回路를 만들 수 있으므로 필터 合成에 아주 適合했다는 점이다. 1930年代에 들어와서는 Q. Brune을 손 꼽을 수 있다. 그는 南아프리카 出身의 유학생으로 MIT에서의 그의 博士學位 論文을 要約하여 “Synthesis of a Finite Two-terminal Network Whose Driving-

*正會員: 캐나다 마니토바大 電氣工學科 教授・王博

point Impedance is a Prescribed Function of Frequency 라는 題目의 論文을 1931년에 Jour. of Math and Phys 에 發表하였다. 이 論文은 數學的으로 完璧하며 그 論理的인 展開는 實로 精단할 만한 것이었다. 그는 우선 正實函數(Positive Real Function)을 定義하였고 이 定義를 滿足시키는 函數이면 반드시 RLC 驅動點回路로 合成될 수 있다는 것과 그 逆도 眞理라는 것을 證明했다. 이 論文은 에너지(Energy)와 受動性(Passivity)을 利用한 것으로서 函數論의 一章을 장식했다. 그로부터 약 8년이 지난 1939년에는 S. Darlington의 論文이 亦是 Jour. of Math. and Phys. 에 發表되었다. "Synthesis of Reactance 4-poles Which Produce Prescribed Insertion Loss Characteristics" 라는 것으로서 Columbia 大學에서의 博士學位 論文을 整理한 것이었다. 이 論文은 傳達函數合成의 確固한 基礎가 되었으며 이로 인하여 주어진 函數를 無損失 2端子雙으로 한 후 그 兩端 또는 終端에 抵抗性 負荷를 걸어 주는 方法이 開發된 것이다. 이때 까지는 線形集中受動回路(Linear Lumped Passive Networks)가 主였고 여기에 필요되는 數學은 線形代數와 函數論이었다. 돌이켜 생각하면 回路網合成의 확고부동한 理論的 基盤이 이 時代, 즉 1920~1940年代에 이미 이루어 진 셈이다. 그 당시에도 合成理論은 그 應用을 主로 필터設計에서 찾았고 音聲周波數 內에서는 RLC의 受動필터를 만들었다. 1930年代로 부터도 眞空管을 利用하여 能動 필터를 만들 수 있는 可能性은 있었다. 이 무렵 Black나 Bode 등이 饋還回路를 사용했으며 自動制御系統에 관한 研究가 盛行했었다. H. W. Bode의 著書인 "Network Analysis and Feedback Amplifier Design"(1945)은 그 무렵의 回路網 理論을 條理있게 엮은 것이었다.

1950年代는 受動回路로부터 能動 RC 필터로의 轉向이 일어난 時代로 특징 지을 수 있을 것이다. 從來 사용되어 온 인덕터는 空間을 많이 점령하고 무거우며 非經濟的인 點 外에도 쉽게 飽和되기 때문에 매우 불편한 素子였다. 이것을 能動素子로 代置할 수만 있다면 크기를 줄일 수 있고 값도 내릴 수 있으리라는 可能性에 많은 回路學者들의 관심이 集中된 것이다. 다시 말해서 抵抗과 커패시터 그리고 트랜지스터를 使用하여 從來 RLC 回路가 하는 일을 代行시킬 수 있는 可能性이 싹트기 시작한 것이다. 그러나 이 무렵의 能動RC 回路研究란 主로 理論的인 好奇心에 過熱되었고 多量으로 출판된 論文 中에는 實現性 없는 理論的 技巧에 그친 것도 적지 않았다.

1960年代 中半에 접어들어 過히 비싸지 않은 演算增幅器(Operational Amplifier)가 市中에 나오기 시작하면서 부터 能動 RC 필터를 實驗室에서 만들게 되었는데 그때만 해도 크기와 값은 별로 줄지 않았고 다만 필터의 技能을 낼 수 있다는 것과 RLC 回路가 하지 못하는 增幅도 할 수 있다는 것이 그 全部였다. 經濟的인 商用製品이 나온 것은 薄膜(Thin Film)이나 厚膜(Thick Film)을 사용하는 混成 集積回路(Hybrid Integrated Circuits) 技術이 원숙한 1970年代의 初期였다. 여기서 우리가 注目해야 할 점은 能動素子를 使用하기 始作하면서 부터는 回路網 合成이 거의 필터 設計와 同義語처럼 되었고 또 필터 設計自體의 發展은 그때그때의 새로 나오는 部品 技術(Component Technology), 예를 들면, MO-S LSI(Metal Oxide Semiconductor Large Scale Integration) 技術 등과 密接한 關係를 맺었다는 점이다. 그리고 能動素子는 動作範圍를 벗어나면 바로 非線形性을 나타내며 그들을 제작하는 데는 物理 특히 量子力學의 힘을 입게 된 것이다.

能動回路의 發展은 受動回路의 그것처럼 深奧한 理論에 의한 것이라기 보다는 主로 새로운 構造(Configurations)나 接續方式(Connection Modes), 또는 더 性能이 좋은 部品(Components)에 의해 이루어 졌다고 볼 수 있다. 代表的인 例로서 R. P. Sallen과 E. L. Key는 1955년에 發表한 論文 "A Practical Method of Designing RC Active Filters" 에서 많은 能動 필터를 提示했는데 이들은 간단하고 實用的이어서 지금도 사용되고 있다. 短點은 素子の 值가 周邊의 溫度나 濕氣 등의 영향으로 인해 規定値에서 약간 벗어나는데 대한 感度가 높다는 것이다. 이 感度は 設計된 필터의 優劣을 가늠하는 標準이 되었으며 그후에 感度가 낮아 지도록 改良한 回路가 續出하였다. 例挙하자면, Kerwin-Huelsman-Newcomb 3人이 1967년에 發表한 狀態變數 필터(State-Variable Filters)와 J. J. Friend가 1970년에 演算增幅器 한 개를 利用하여 만든 필터, 그리고 1971年 L. C. Thomas의 "The Biquad: Part I, Part II" 를 들 수 있다. 이들은 모두 二次函數의 필터 實現法들이나 高次函數 필터를 合成할 경우에는 필요한 數의 二次 또는 一次 필터를 縱續連結하는 構造를 이룬다. 이와 同時에 構造上으로 전혀 다른 能動 필터 合成法이 研究 對象이 되었다. 即 感度라는 점에서 아주 優秀하며 그 外에도 여러가지 長點을 가진 受動 梯子形回路를 能動 필터로 模擬(Simulation) 하는 方法이 바로 그것이다. 直接 模擬를 위해서는 자

이레이터(Gyrator)나 FDNR(Frequency Dependent Negative Resistance) 등이 出現했고 間接 模擬로서는 개구리 跳躍(Leapfrog) 形의 블록 線圖를 그린 후에 積分增幅器를 사용하는 方法이 開發 되었다. 거의 모든 回路에서 演算增幅器를 能動素子로 사용했으나 그의 利得帶域幅積(Gain-Bandwidth Product)이 有限이라는 事實에 기인하는 影響이 Budak 와 Petrela의 1972年 論文에서 解明되었다. 그런데 또 한편에서는 演算增幅器의 非理想性을 逆利用하여 즉 높은 周波數에서 積分器처럼 動作하는 것을 利用하여 外部 커패시터 없이 能動回路를 合成하는 方法이 탄생하였다. Rao-Srinivasan의 1974年에 나온 論文 "Low-sensitivity Active Filters Using the Operational Amplifier Poles" 을 先頭로 1975年을 前後해서 發展된 이 方法은 能動 R-필터(Active R Filters)라고 불리우며 高周波數帶域에서 使用되는 中庸 Q의 필터合成에 適合한 것이었다.

以上 展開한 바와 같이 受動필터에 이어 能動필터가 後에 發達되었으므로 後者가 前者보다 더 우수하다라고 생각 될지도 모르나 實은 각기 用途가 다르고 또 長短點이 있다. 여기서 兩者를 對照的으로 比較해 보기로 하겠다.

(1) 能動필터는 周波數 範圍가 $0 < f \leq 1 \text{ MHz}$ 이고 특히 音聲周波數 $20 \text{ Hz} \leq f \leq 20 \text{ kHz}$ 에서 有利하다. 한편 受動필터 用役帶域은 훨씬 더넓은 $20 \text{ Hz} \leq f \leq 500 \text{ MHz}$ 이므로 $1 \text{ MHz} \leq f \leq 500 \text{ MHz}$ 에서는 受動필터를 사용하게 된다. 周波數가 더 높아지면 導波管(Wave Guide)이나 同軸케이블 필터(Coaxial Cable Filters)를 사용해야 한다. (2) 能動回路에서는 演算增幅器를 動作시키기 위한 電壓源이 필요하나 受動回路에서는 필요하지 않다. (3) 能動필터는 增幅할수 있는데 受動回路는 하지못한다. (4) 能動回路는 受動回路보다 가볍고 싸다. (5) 能動필터는 受動필터보다 素子值變動에 대한 感度가 높다.

能動 RC 필터가 內質的으로 지니고있는 難點은 바로 이 感度문제이며 또한 單石(Monolithic)으로 完全集積이 困難하다는 것이다. 集積回路를 만들기 위해서는 MOS技術을 사용하며 이 技術로서는 커패시터스와 스위치를 精密하게 만들수 있는데 反해서 抵抗素子는 그렇게 할수없다. 따라서 抵抗素子의 役割을 스위치와 커패시터가 代行할수 있게 되면 集積化가 가능하게 된다. 이 방향에의 先驅的 論文으로는 1977年에 Hosticka, Brodersen, Gray 3人的 青年이 共著로 發表한 "MOS Sampled Data Recursive Filters Using Switched Capacitor Integrators"

가 있다. 커패시터와 스위치로서 抵抗素子를 代置할수 있다는 것을 誇示한 것으로 그후에 많은 論文이 續出하였다. 產業界에서도 즉시 呼應한 결과 요즘은 能動필터를 한개의 칩(Chip)으로 만들 뿐 아니라 기왕에 集積化된 디지털(Digital) 필터와 더불어 兩立(Compatible)할 수 있게 되어가고 있다. 現在는 스위치드 커패시터 필터를 使用한 製品도 생산되므로 앞으로 이 方面의 활발한 研究活動이 기대된다.

지금까지 回路網合成과 필터設計의 歷史를 1920年을 起點으로 해서 더듬어 보았는데 여기서 우리가 잊어서는 안될 事實은 電氣波필터(Electric Wave Filter)의 가장 基礎的인 概念을 1915年에 독일의 K.W Wagner 와 미국의 G.A. Campbell 이 각각 獨自的으로 發明했다는 점이다. O.J. Zobel의 影像퍼라미터法(Image Parameter Methods)이 소개된 것도 이 무렵의 일이었다.

끝으로 이節을 마치면서 세사람의 不朽의 名作에 관해 言及하고 싶다. 그들이 현재 生存했더라면 當時에는 대수롭지 않다고 생각되었던 研究가 오늘날 끼치게 된 지대한 공헌에 대하여 本人들도 환희와 경탄을 금치 못할것이다. 첫째 英國의 엔지니어 S. Butterworth가 1930年에 발표한 "On the Theory of Filter Amplifiers"가 그 하나요 러시아인 P.L. Chebyshev가 蒸氣機關을 研究하면서 考案해 낸 多項式에 關한 紀要로써 1899年에 발표한 "Théorie des mecanemes connus sous le nom de parallelogrammes"가 그것이다. 이 두 論文에서 由來한 近似法(Approximation)은 가장 代表的인 것으로서 오늘날에도 愛用되고있는 것이다. 이들 近似法은 각각 他者가 따라갈수 없는 卓越한 점을 內包하고 있다. 即 前者는 最大平坦(Maximally Flat) 特性을, 그리고 後者는 等波狀(Equal Ripple) 特性을 지니고 있다.

세상에는 아무리 時間이 흘러도 그 빛을 잃지않는 것들이 있으니 불란서인 Jean-Baptiste-Joseph Fourier의 名作도 其中的 하나가 아닌가 한다. 熱傳導와 境界值問題를 다루던 次 연구해 낸 "Théorie analytique de la Chaleur"가 1822年에 발표되었던 당시 그의 나이 54세 였으니 大器晚成의 한 例라고 볼수 있다. 이 偉大한 寄與가 없었더라면 오늘날의 回路網 理論, 그리고 더 나아가서는 工學全體가 얼마나 貧困할 것인가.

2 現代教科課程에 있어서의 필터設計의 位置

돌이켜 볼때 우리生活에 劃期的인 영향을 끼친 두 가지의 발명이 1940年代에 終戰을 前後하여 이루어 졌다. 即 史上 처음으로 機械式計算器의 領域을 벗어나서 ENIAC 이라는 略名을 가진 電子式計算器가 出現했고 또 直空管으로 부터 트랜지스터로의 跳躍이 이어서 일어났던 것이다. 이 두가지의 成就로 부터 決定的인 자극을 받은 産業界는 경제적이고, 크기가 작고, 가벼우며 性能이 우수한 製品을 빠른 시일내에 만들어 내는 것을 絶對命(Imperative)으로 받아들일 수 밖에 없게되자 서로 경쟁하면서 눈부신 발전을 거듭해왔다. 이러한 支配的인 趨勢는 學界에도 밀려와 各教育機關, 특히 大學의 教科課程의 新陳代謝를 요구하게 됨에 따라 새로운 科目이 出現하게 되었고, 既存의 科目들은 生存을 위하여 早晚間 改革을 하지 않을 수 없게 되었다. 따라서 回路網合成의 경우에도 마이크로프로세서, 디지털 信號處理, VLSI 등 새로운 것 들에 끼어 共榮하기 위해서는 面目을 一新할 뿐 아니라 體質改善까지 敢行해야 할 立場에 서게 되었다. 回路網合成이란 元來 秩序整然하고 鮮明한 理論으로 電氣 電子工學의 基盤이 되는 科目中의 하나였다. 그런데 理論에 너무 偏重한 나머지 數學的인 精密이나 好奇心의 滿足을 위해서 過度로 精力을 소모하여 實用性있는 考案物(Device)을 경시 하는 경우도 있었다. 例를들어 1950年代에는 正實函數(Positive Real Functions)와 驅動點函數合成을 위해서 교과서의 약 4分の 1까지 할애하는등 正實函數에 過分の 比重을 주는 傾向이 있었다. 또한 1960年代에는 能動素子에 관심이 高潮된 나머지 負임피던스 轉換器(Negative Impedance Converter)라는 數學的인 模형을 提案하고 이것을 利用한 수 많은 論文이 流行처럼 범람하였는데 그의 實用性은 오늘날에도 찾지 못하고 있다.

이러한 非理에서 벗어나고자 지금 北美와 日本에서는 從來의 回路網合成理論 中에서 歷史的인 意義만을 갖는 資料는 簡略하게 취급하고, 그대신 實用性이 풍부한 필터에 관한것을 많이 받아드리는 경향이 抬頭하고 있다. 그리하여 “필터理論과 設計” 또는 이와 비슷한 새로운 이름을 갖인 科目이 發足되고 있으며 이를 뒷받침 하는 專門書籍도 나오고 있다.

사실상 필터合成은 設計明細條件(Specifications)으로 부터 시작하여 近似法(Approximation), 實

現(Realization) 등 종래의 回路網合成理論의 根幹을 이루는것을 모두 活用하면서 本是設計(Design) 라는것이 가지는 基本段階를 착실하게 밟아서 이루어진다. 게다가 實現段階에서는 例를들면 MOS(Metal Oxide Semiconductor) 技術등 그때 그때의 最尖端技術을 利用하게 되므로 필터設計는 最新部品技術(State-of-the-Art Component Technology)과 有機的인 연관을 맺게 된다.

이어서 필터의 用途를 생각해보자, 필터는 그應用 範圍가 아주 넓어서 信號處理를 하는 機器에 반드시 끼어있어 긴요한 역할을 할 뿐 아니라 電力系統(Power System)에서도 다양하게 쓰인다. 위에 記述한 점들을 종합하여 생각해보면 “필터設計”라는 것이 電氣·電子工學科의 한 科目으로 발전하고 보존될 展望은 매우 밝다고 볼 수 있다.

끝으로 이 글을 쓸것을 勸誘해준 大韓電氣學會에 感謝한다.

參考文獻

A. 큰 貢獻을 한 論文

- 1) R. M. Foster, "A Reactance Theorem", Bell System Tech. J., vol. 3, pp.259--267, April 1924.
- 2) W. Cauer, "Die Verwirklichung von Wechselstromwiderstanden vorgeschriebener Frequenzabhängigkeit". Arch. Elektrotech., vol. 17, no. 4, pp. 355--388, December 1926.
- 3) O. Brune, "Synthesis of a finite two-terminal network whose driving-point impedance is a prescribed function of frequency", J. Math. Phys., vol. 10, pp.191--236, August 1931.
- 4) S. Darlington, "Synthesis of Reactance 4-poles which produce prescribed insertion loss characteristics", J. Math. Phys., vol. 18, pp.257--353, September 1939.
- 5) H. W. Bode, *Network Analysis and Feedback Amplifier Design*, D. Van Nostrand Company, Inc., Princeton, N. J., 1945.
- 6) P. R. Sallen and E. L. Key, "A practical method of designing RC active filters", IRE Trans. Circuit Theory, vol. CT-2, pp.74--85, 1955.
- 7) W. T. Kerwin, L. P. Huelsman, and R. W. Newcomb, "State variable synthesis for insensitive integrated circuit transfer functions", IEEE J. Solid-State Circuits, vol. SC-2, pp.87--92, Sep-

- tember 1967.
- 8) J. Friend, "SAB: Single Amplifier Biquad", 1970 IEEE Int. Symp. Circuit Syst. Dig. Pap., p.179.
 - 9) J. Friend, "STAR: An Active Biquadratic Filter Section", IEEE Trans. Circuits Syst., vol. CAS-22, pp.115—121, February 1975.
 - 10) L. C. Thomas, "The Biquad: Pt. I: Some practical design considerations", IEEE Trans. Circuit Theory, vol. CT-18, pp.350—357, May 1971.
 - 11) L. C. Thomas, Biquad: Pt. II. 1 Multipurpose Active Filtering System", IEEE Trans. Circuit Theory, vol. CT-18, pp. 358 - 361, May 1971.
 - 12) R. K. Rao and S. Srinivasan, "Low-sensitivity active filters using the operational amplifier pole", Proc. IEEE, pp.1713—1714, December 1974.
 - 13) B. Hosticka, R. Brodersen, and P. Gray, "MOS samples data recursive filters using switched capacitor integrators", IEEE J. Solid-State Circuits, vol. SC-12, no. 5, pp.600—608. December 1977.
 - 14) S. Butterworth, "On the theory of filter amplifiers", Wireless Engr., vol. 7, pp.536—541, October 1930.
 - 15) P. L. Chebyshev, "Théorie des mecanismes connus sous le nom de parallelogrammes", Oeuvres, ol. I, St. Petersburg, 1899.
 - 16) J. B. J. Fourier, "Theorie analytique de la chaleur: the analytical flow of heat", 1822.
 - 7) David E. Johnson, *Introduction to Filter Theory*, Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, N. J., 1976, 306 pp.
 - 8) Adel S. Sedra and Peter O. Brackett, *Filter Theory and Design: Active and Passive*, Matrix Publishers, Inc., Forest Grove, Ore., 1978, 785 pp.
 - 9) 矢崎銀作, 武部幹, 伝送回路網およびフィルタ, 電子通信學會, 東京, 第4版, 昭和53年(1978), 451. pp.
 - 10) Harry Y-F. Lam, "Analog and Digital Filters: Design and Realizations, Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, N. J., 1979, 632 pp.
 - 11) L. P. Huelsman and P. E. Allen, "Introduction to the Theory and Design of Active Filters," McGraw-Hill Book Co., New York, 1980, 429 pp.
 - 12) M. S. Ghauri and Kenneth R. R. Laker, "Modern Filter Design: Active RC and Switched Capacitor," Prentice-Hall, Inc., 1981, 608 pp.
 - 13) Rolf Schaumann, M. A. Soderstrand, and Kenneth R. Laker (Ed.), "Modern Active Filter Design," IEEE Press, New York, 1981, 436 pp.
 - 14) M. E. Van Valkenburg, "Analog Filter Design," Holt, Rinehart, and Winston, 1982, 608 pp.
 - 15) 金炯甲, "回路網合成論과 필터設計," 1983, 出版予定

B. 필터理論과 設計

- 1) Philip R. Geffe, *Simplified Modern Filter Design*, John F. Rider, Publisher, New York, 1963, 182 pp.
- 2) DeVerl S. Humphreys, *The Analysis, Design and Synthesis of Electrical Filters*, Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, N. J., 1970, 675 pp.
- 3) Sanjit K. Mitra (Ed.), *Active Inductorless Filters*, IEEE Press, New York, 1971, 224 pp.
- 4) Gabor C. Temes and Sanjit K. Mitra (Eds.), *Modern Filter Theory and Design*, John Wiley & Sons, Inc., New York, 1973, 566 pp.
- 5) W. E. Heinlein and W. H. Holmes, *Active Filters for Integrated Circuit*, Oldenbourg, Munich, West Germany, 1974, 688 pp.
- 6) Claude S. Lindquist, *Active Network Design with*

C. 필터 핸드북(Handbook)

- 1) Philip R Geffe, "Simplified Modern Filter Design," John F. Rider Publisher, Inc., New York, 1963, 182 pp.
- 2) A. I. Zverev, "Handbook of Filter Synthesis," John Wiley & Sons, Inc., New York, 1967, 576 pp.
- 3) J. W. Craig, "Design of Lossy Filters," The MIT Press, Cambridge, Mass., 1970, 197 pp.
- 4) David E. Johnson and J. L. Hilburn, "Rapid Practical Designs Active Filters," John Wiley & Sons, Inc., New York, 1975, 264 pp.
- 5) Erich Christian and Egon Eisenmann, "Filter Design Tables and Graphs," John Wiley & Sons, Inc., New York, 1966; reissued by Transmission Networks International, Inc., Knightdale, N. C. 1977, 310 pp.

- 6) Rudolf Saal, "Handbook of Filter Design," AEG-Telefunken, Berlin, West Germany, 1979, 663 pp.
- 7) David E. Johnson, J. R. Johnson, and H. P. Moore, "A Handbook of Active Filters," Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, N. J., 1980, 244 pp.
- 8) George S. Moschytz and Peter Horn, "Active Filter Design Handbook," John Wiley & Sons, Inc., New York, 1981, 296 pp.
- 9) Arthur B. Williams, "Electronic Filter Handbook," McGraw-Hill Book Co., New York, 1981, 576 pp.