

DANMARKS TEKNISKE HØJSKOLE
LABORATORIET FOR VARMEISOLERING

Meddelelse nr. 10

Professor, civilingeniør Vagn Korsgaard og civilingeniør Hans Lund

EN PASSIV ELEKTRISK ANALOGIREGNETMASKINE TIL
RUMKLIMABEREKNINGER

A passive-electrical analog computer for room-climate calculations

Un calculateur analogique électrique aux calculs concernant le climat intérieur.

Eine passive elektrische Analogie-Rechenmaschine für raumklimatischen
Berechnungen.

Un calcolatore analogico elettrico passivo per il calcolo di temperatura interna.

LABORATORIET FOR VARMEISOLERING
KØBENHAVN

1965

Meddelelser fra Laboratoriet for Varmeisolering

- nr. 1 Vagn Korsgaard: Laboratoriet for Varmeisolering, 4 s.
Særtryk af Ingeniørens Ugeblad 24. juni 1960.
- nr. 2 Vagn Korsgaard: Termisk ækvivalente ydervægge, 8 s.
Særtryk af Ingeniøren nr. 11, 1961.
- nr. 3 Vagn Korsgaard: Den principielt rigtige opbygning af
en ydervæg, 26.s. Særtryk af Husbygningsteknik 1961,
udg. af Teknisk Forlag, Kbhvn.
- nr. 4 Vagn Korsgaard og Th. Lund Madsen: Solafskærmning af
vinduer og måling af solindfaldet gennem forskellige
typer varmeisolerende vinduesruder. Udsolgt. Særtryk
af Ingeniøren nr. 3, 1962.
- nr. 5 Vagn Korsgaard og Th. Lund Madsen: Registrering af
sol- og himmelstråling gennem vinduer. Særtryk af
Ingeniøren nr. 9, 1962.
- nr. 6 Vagn Korsgaard, Jørgen S.R.Nielsen og Jens R.Jensen:
Krydsvarmeveksleres dynamik og regulering, 174 s.
Udgivet sammen med Servolaboratoriet 1962 i kommis-
sion hos Akademisk Forlag, København.
- nr. 7 Axel Rubinstein: Metoder til bestemmelse af varme-
ledningstal, med særlig vægt på teorien for de in-
stationære metoder samt nogle målinger med en termo-
sonde af egen konstruktion, 100 s. Licentiatafhand-
ling 1963, i kommission hos Akademisk Forlag, Køben-
havn. (Udsolgt).
- nr. 8 Vagn Korsgaard og Th. Lund Madsen: Isoleringsevnen
af nogle typiske ydervægge udsat for det naturlige
klima, 77 s. I kommission hos Akademisk Forlag,
København. 1964.
- nr. 9 Vagn Korsgaard og Mogens R.Byberg: El-modeller til
beregning af flerdimensionale varmestrømme i byg-
ningskonstruktioner. Særtryk af Ingeniøren nr. 6,
1965.

Sammendrag

Den beskrevne regnemaskine er konstrueret og bygget ved Laboratoriet for Varmeisolering, Danmarks tekniske Højskole. Den er en termisk-elektrisk analog, hvor det virkelige, termiske system simuleres ved hjælp af elektriske kredsløb bygget op af modstande og kondensatorer.

Den er en såkaldt 'langsom' analogregnemaskine, med et tidsforhold så 24 timer i det virkelige system svarer til 6 sek. i det elektriske system. Tidsfaktoren kan varieres inden for ret vide grænser, så man som udlæsningsapparat kan benytte enten katodestråleoscillograf eller en elektromisk potentiometerskriver.

Maskinen er specielt velegnet til modeller af rum og bygninger, og den er forsynet med specielle modstandskredsløb, hvormed en persons varmeudveksling med de omgivende flader kan simuleres og analyseres og muligvis bruges som et mål for behagelighed i stedet for rumlufttemperaturen eller en eller anden rumtemperatur.

Som et eksempel på brugen af maskinen er beregnet kølebelastningen i et givet rum og for en fastsat max.temperatur i afhængighed af vinduesstørrelsen og for givne vejrforhold.

Summary

The computer described is designed and constructed in the Thermal Insulation Laboratory at the Technical University of Denmark.

It is designed as a thermal-electrical analog computer, the real, thermal system being simulated by means of electrical networks built up of resistors and capacitors.

It is a so-called 'slow' analog computer with a time scale so that 24 hours real time are equivalent to 6 seconds in the electric system. The time factor is variable within fairly wide limits, so that both ordinary electronic strip-chart recorders and cathode-ray oscilloscopes can be used as readout equipment.

The computer is particularly well suited for setting up models of rooms or buildings, and it is equipped with special networks of resistors for simulating a person so that exchanges of heat between such a 'person' and the surroundings can be analysed and possibly used as a measure of comfortableness instead of the air temperature or some other room temperature.

As an example of the application of the computer, the cooling power required for limiting the air temperature of a room at an upper value has been determined for some different sizes of windows and specified outside weather conditions.

Résumé

La calculatrice décrite dans l'article a été projetée et construite aux laboratoires de isolation thermique de l'Ecole Polytechnique du Danemark. La machine a été construite sous forme d'une calculatrice analogique thermo-électrique, les systèmes thermiques étant simulés à l'aide de réseaux électriques, composés de résistances et de capacités.

La calculatrice analogique est du type dit "lent", l'échelle chronologique étant conçue de telle sorte que 24 heures du système thermique correspondent à 6 secondes du système électrique. Le rapport en temps peut être modifié dans des limites assez vastes pour que tant les potentiometreenregistreurs électriques que les oscilloscopes à rayons cathodiques puissent servir d'équipement de relèvement.

La calculatrice se prêter particulièrement bien à l'établissement de modèles électriques pour locaux ou bâtiments. La calculatrice est dotée de réseaux spéciaux de résistances pour simuler une personne, de façon que les échanges thermiques entre cette "personne" et l'ambiance puissent être analysées pour servir éventuellement de mesure du bien-être, au lieu de la température de l'air ou d'une autre température d'ambiance.

A titre d'exemple d'application de la calculatrice a été déterminé l'effet de refroidissement nécessaire pour limiter la température de l'air d'un local à une valeur déterminée, pour quelques dimensions différentes de fenêtres, lorsque le temps à l'extérieur varie d'une façon donnée.

Zusammenfassung

Der im Artikel beschriebene Analogrechner wurde in dem Laboratorium für Wärmeschutz an der Technischen Hochschule Dänemarks projektiert und gebaut. Er wurde als ein thermisch-elektrischer Analogrechner gebaut, indem die wirkliche, thermische System mit Hilfe von aus Widerständen und Kapazitäten zusammengestellten elektrischen Netzwerken nachgebildet werden.

Er ist ein sogenannter "langsamer" Analogrechner, mit eine Zeitskala, so dass 24 Stunden im thermischen System 6 Sekunden im elektrischen System entsprechen. Der Zeitfaktor lässt sich in ziemlich weiten Grenzen ändern, so dass zum Ablesen sowohl gewöhnliche elektrische Kompensations-schreiber als auch Kathodenstrahloszillographen verwendbar sind.

Der Analogrechner ist zum Aufbau von elektrischen Modellen von Räumen und Gebäuden besonders zweckmässig, und er ist mit speziellen Widerstandsnetzwerken zur Nachbildung einer Person ausgerüstet, so dass der Wärmeaustausch zwischen dieser "Person" und den Umgebungen analysiert und gegebenenfalls anstatt der Lufttemperatur oder einer anderen Raumtemperatur als ein Mass für die Behaglichkeit benutzt werden kann.

Als Anwendungsbeispiel ist die Kühlleistung bestimmt worden, die notwendig ist, um die Lufttemperatur in einem Raum bei einigen verschiedenen Fenstergrössen auf einem bestimmten Wert zu beschränken, wenn das Wetter aussen eine gegebene Tagesgang aufweist.

Sommario

Il calcolatore descritto fu progettato nel Laboratorio di Isolamento termico alla Università tecnica di Danimarca. È progettato come simulatore termoelettrico, con i sistemi termici simulati da reti elettriche costituite da resistori e capacitori.

Si tratta di un così detto calcolatore analogico "lento", poichè la scala dei tempi è calcolata in modo che 24 ore del sistema termico corrispondono a 6 secondi nel sistema elettrico. Il fattore di tempo è variabile entro limiti piuttosto ampi cosicchè si possono usare come apparecchiature per la lettura sia registratori elettronici normali a banda che oscilloscopi a raggi catodici.

Il calcolatore è particolarmente adatto a realizzare modelli elettrici per ambienti o edifici, e possiede reti di resistori speciali per simulare una persona così da rendere possibile l'analisi degli scambi tra questa "persona" e l'ambiente circostante. Questi scambi possono essere usati come misura del benessere in luogo della temperatura dell'aria o di qualche altra temperatura ambiente.

Come esempio dell'applicazione del calcolatore, è stata determinata la potenza di raffreddamento necessaria per mantenere la temperatura dell'aria di un locale a un valore definitivo, per diverse dimensioni di finestre, e per variazioni del clima esterno secondo una legge data.

Indledning

I takt med den stigende levestandard, som har fundet sted i Vesteuropa siden den 2. verdenskrig, er ikke alene kravene til husenes udstyr og indretning vokset, men også kravet om et behageligt indendørsklima. I Mellem- og Nordeuropa har det altid været nødvendigt at installere varmeanlæg for at kunne opnå et behageligt indendørsklima om vinteren, men den moderne arkitekturs anvendelse af store vinduesarealer i såvel bolig- som kontorhuse har medført et voksende behov for køling om sommeren. I det sydlige Europa har den moderne curtain-wall arkitektur medført et behov for luftkonditionering hele året.

Såfremt arkitekten eller den rådgivende ingeniør skal kunne forudbestemme det termiske indendørsklima, som må forventes i en moderne letvægtsbygning, er det nødvendigt at benytte avancerede beregningsmetoder til bestemmelse af installationære termiske forløb. Disse metoder er også nødvendige for at kunne dimensionere økonomiske varme- og køleanlæg til sådanne bygninger.

Elektrisk analogi

Elektroniske regnemaskiner, som benyttes til løsning af ingeniøropgaver, kan inddeles i to hovedgrupper. Den første gruppe omfatter cifferregnemaskiner, som regner med tal, den anden gruppe omfatter analogiregnemaskiner, som regner med kontinuerlig variable, fysiske størrelser. Selv om cifferregnemaskiner er velegnede til løsning af varmetransmissionsproblemer i bygninger [1] [2], mener vi, at analogiregnemaskiner til dette formål har adskillige fordele, men vi skal iøvrigt ikke diskutere dette forhold nærmere.

To typer analogiregnemaskiner anvendes til løsning af ingeniøropgaver, den "aktive" analogiregnemaskine med operationsforstærkere og den passive analogiregnemaskine, opbyg-

get som modstands-kapacitets netværk [3] [4]. Denne artikel behandler kun den sidstnævnte type.

Den termisk-elektriske analogi er baseret på den formelle lighed mellem de matematiske ligninger, der beskriver varmeledning og elektrisk ledning, d.v.s. på analogien mellem de partielle differentiaalligninger for henholdsvis temperaturfordelingen i et fast stof, der gennemløbes af en varmestrøm, og spændingsfordelingen langs et vilkårligt afsluttet elektrisk kabel. Tilsvarende ses analogien mellem udtrykkene for varmeakkumulering og opladning af en kondensator.

Fouriers varmeledningssligning lyder for eendimensionale varmestrømme i et homogent legeme med temperaturuafhængig varmeledningsevne:

$$\frac{\partial^2 \vartheta}{\partial x^2} - \frac{1}{a} \frac{\partial \vartheta}{\partial t} = 0$$

hvor ϑ er temperaturen i et punkt

x er koordinaten til stedet

t er tiden

og a er temperaturledningstallet, $a = \frac{\lambda}{c \cdot \rho}$

hvor λ er varmeledningsevnen

c er varmemfylden

og ρ er vægtfylden

Det kan vises, at der for et induktionsfrit og afledningsfrit elektrisk kabel gælder en tilsvarende ligning

$$\frac{\partial^2 v}{\partial x_e^2} - R' C' \frac{\partial v}{\partial t} = 0$$

hvor v er spændingen i et punkt

x_e er koordinaten til punktet

R' er modstanden pr. længdeenhed

og C' er kapaciteten pr. længdeenhed

Sammenlignes de to ligninger ses, at varmekapaciteten $c \cdot \rho$ svarer til el-kapacitet pr. længdeenhed C' , varmemod-

standen $\frac{1}{\lambda}$ svarer til el-modstand pr. længdeenhed R' . Længde svarer til længde og tid til tid. Det kan videre vises, at analogien kan føres videre, så varmemængde svarer til elektricitetsmængde, og varmem strømme til elektriske strømme.

Benyttes denne analogi, vil man selvfølgelig kunne fremstille en elektrisk model af det termiske system, man ønsker at undersøge. Denne model vil bestå af kabler med jævnt fordelt modstand og kapacitet og af enkelte modstande f.eks. svarende til overgangsmodstande. I stedet for kabler vil man dog altid benytte enkelte modstande og kondensatorer. Derved indføres en fejl, som dog kan gøres lille, blot kablet erstattes af tilstrækkelig mange $R-C$ led i serie. I almindelighed er 2-6 led tilstrækkeligt. Endvidere må man som hovedregel regne materialeparametrene konstante inden for det betragtede temperaturinterval.

Et modstands-kapacitets netværk, der svarer til et enkelt led, vil almindeligvis se ud som en af de tre typer, der er vist i fig. 3: T-led, π -led eller L-led.

Bruges flere T-led efter hinanden, slås modstandene i naboleddene sammen to og to. Bruges π -led, slås kapaciteterne sammen to og to. Da vi undertiden er interesseret i temperaturer inde i væggen, er π -led de bedst egnede, fordi samlingspunkterne mellem to led da er umiddelbart tilgængelige. Ved T-led må man i et sådant tilfælde undlade at slå modstandene sammen for at have samlingspunktet tilgængeligt. Det er ikke uden videre tilladeligt at måle midtpunktet i T-ledet, da der derved indføres en ekstra fejl.

Konstruktive detaljer

Maskinen er en såkaldt "langsom" analog med en tidsskala på 4, svarende til at 6 sek. i det elektriske system svarer til 24 timer i det termiske. Denne tidsskala kan dog alt efter opgavens art vælges inden for ret vide grænser.

Spændingerne på maskinen ligger i området ± 100 V. Omregningsfaktoren for temperatur til spænding må derfor vælges, så spændingerne ligger i dette område.

De elektriske indgangssignaler kan fås fra elektroniske funktionsgeneratorer eller fra motordrevne omskiftere. Det er i praksis muligt at simulere næsten hvilke som helst temperatur- eller varmestråmsforløb, i særdeleshed periodiske.

Målingerne foretages med en potentiometerskriver med en nøjagtighed på 0,5 % og en indstillingstid på 0,3 sek. Såfremt man kun er interesseret i øjebliksværdier, kan man i stedet bruge et ciffer-voltmeter.

Ved bygningen af analogen har følgende synspunkter været taget op:

1. Maskinen skal være nem at bruge, og den direkte analogi skal udnyttes.
2. Maskinen skal kunne bruges med en rimelig nøjagtighed uden korrektion af nogen art.
3. Maskinen skal være fleksibel.

Punkt 1 kræver dels, at der er så rigeligt af passive komponenter, og at de dækker så stort et interval i værdier, at der for alle almindeligt forekommende rum kan arbejdes med nogenlunde nemme omregningsfaktorer, dels at modellen for almindelige opgaver får en logisk fysisk opbygning, og dels at hjælpeudstyr - ind- og udlæsning - er så vidt automatiseret som muligt.

Den logiske opbygning er søgt opnået ved at placere komponenterne efter de sandsynligt hyppigst forekommende opgaver, så forbindelserne mellem dem i størst mulig udstrækning kan ske med korte kontaktbøjler.

Punkt 2 kræver, at komponenterne vælges med en passende tolerance svarende til ind- og udlæsningsudstyret, samt at fejl hidrørende fra maskinen, såsom ledningsmodstande og afledningsstrømme, tab i kondensatorer og spredningskapaciteter, holdes så små, at de normalt kan lades ude af betragtning. Navnlig afledningsstrømme er her et alvorligt problem, fordi nogle af de benyttede modstande er meget store, op til 100 MOhm. I almindelighed kan de enkelte modstande i en væg dog holdes mindre end 1 MOhm.

Det ser dog ud til, at det er lykkedes at holde alle disse fejl af en så lille størrelsesorden, at man kan se bort fra dem og kun behøver at regne med tolerancerne på komponenter og måleinstrumenter.

Punkt 3 imødekommes ved at lade alle forbindelser mellem komponenter opsætte med kontaktbøjler eller bløde ledninger med bananstik, og ved at enhver komponent, d.v.s. en 3-dekaders kondensator eller et 10-omgangs potentiometer + dekademodstand er ført frem til stikbøsninger med begge terminaler.

Maskinen indeholder af passive komponenter:

129 modstande: potentiometer $100\text{ k}\Omega$, 1% + dekademodstand $11 \times 100\text{ k}\Omega$, 0,25 %

64 kondensatorer: $10 \times 0,01\mu\text{F}$ + $10 \times 0,1\mu\text{F}$ + $10 \times 1\mu\text{F}$, 0,5 %

56 faste kondensatorer: $10\mu\text{F}$, 0,5 %

2 kondensatorer: $10 \times 0,001\mu\text{F}$ + $10 \times 0,01\mu\text{F}$ + $10 \times 0,1\mu\text{F}$, 0,5 %

Desuden findes i en gruppe for sig:

6 modstande: potentiometer $100\text{ k}\Omega$ + dekademodstand $11 \times 100\text{ k}\Omega$

12 modstande: potentiometer $100\text{ k}\Omega$ + dekademodstande

$11 \times 100\text{ k}\Omega$ + $11 \times 1\text{ M}\Omega$

54 modstande: dekademodstande $11 \times 100\text{ k}\Omega$ + $11 \times 1\text{ M}\Omega$ + $10 \times 10\text{ M}\Omega$

Foruden de ovenfor nævnte varmetekniske beregninger er det hensigten at benytte den sidstnævnte særlige gruppe til simulering af en person i et rum for derved at kunne foretage komfortberegninger, eller i det mindste at prøve at opstille udtryk for personers varmeudveksling med omgivelserne.

Procedure

Når tidsskalaen er fastlagt, kan også de øvrige omregningsfaktorer for varmemodstand til el-modstand og for varmekapacitet til el-kapacitet fastlægges, så modstande og kapaciteter får værdier indenfor det område, som maskinen har komponenter til. Sluttelig kan omregningsfaktoren for varme-

strøm til el-strøm beregnes. Når alle de termiske størrelser for det givne problem, f.eks. et rum, er omregnet til elektriske, kan modellen opstilles på maskinen.

Foruden modstande svarende til varmeledning og konvektion, kan også strålingsmodstande svarende til stråling mellem flader indføres i modellen. Til beregning af vinkelstrålingstal mellem parallelle eller på hinanden vinkelrette rektangulære flade er der udviklet programmer til cifferregnemaskiner.

Eksempel

Analogiregнемaskinens formåen illustreres bedst ved et eksempel.

For et kontorrum ønskes vinduesarealets indflydelse på lufttemperaturen og kølebehovet bestemt under sommerforhold med klart solskin, når rumtemperaturen ikke må overskride 25 °C.

Kontorrummet har følgende specifikationer:

Størrelse:	4.75·3.05 m ² gulvareal, loftshøjde 3.00 m
Vinduestype:	hermetisk dobbelt rude
Solafskærmning:	indvendige, lyse gardiner
Facadevæg:	let elementvæg isoleret med 10 cm mineraluld
Indvendige vægge:	16 cm murede kalksandstensvægge
Loft og gulv:	16 cm armeret beton med linoleum og nedhængt loft
Luftskifte:	tre gange pr. time med yderluft
Orientering:	København, 56°n.b., SW-facade

Det antages, at kontoret er omgivet af andre kontorrum, hvor temperaturen varierer på samme måde.

Resultaterne fremgår af fig. 5 og tabel 1.

På samme måde er det muligt at bestemme indflydelsen af f.eks. varmekapaciteten af vægge, gulv og loft.

Tabel 1

Tilfælde	I	II	III	IV
Vinduesareal i % af gulvareal	14	28	42	55
Vinduesareal i % af facadeareal	22	44	67	88
Max. rumlufttemperatur uden køling	°C 24,4	28,0	30,0	32,6
Max. rumlufttemperatur med køling, max.1000 kcal/h	°C	25,0	25,0	25,5
Maximal kølelast kcal/h		335	730	1000
Kølebehov kcal/dag		1400	4800	7200
Kraftforbrug til kølemaskineri, skønnet kWh/dag		0,5	1,9	2,8

Efterskrift

Arkitekter og rådgivende ingeniører har i en del tilfælde benyttet analogiregnemaskinen til forudberegning under projekteringen af de indendørstemperaturer, som må forventes om sommeren og om vinteren i moderne kontorhuse med store vinduesarealer for herudfra at kunne vurdere, hvor effektive solafskærmninger, der er nødvendige for at undgå overop-
hedning. Samtidig er varmebehovet og eventuelt kølebehovet beregnet.

Introduction

With the rise in the standard of living which has taken place in all Western European countries since the Second World War, the demands placed on buildings have increased, not only in the area of sanitary and the other technical fittings, but equally in the need in houses and offices for a pleasant indoor climate. In Central and Northern Europe it is especially necessary in the winter to use technical means to maintain the indoor climate, although the curtain wall architecture used in houses as well as offices is gradually increasing the need for summer cooling. In Southern Europe this modern light architecture has created the need for year-round air conditioning of houses.

In order for the consulting engineers and architects to be able to predict, with some accuracy, the indoor thermal climate which is to be expected in a modern light building with large window areas it is necessary to use advanced methods for computing non-steady heat flow problems. These methods are also necessary for the design of economical heating and cooling plants for such buildings.

Electrical Analog

In general, computing devices used in the solution of engineering problems may be grouped into two major classes. These are the digital computer, which deals only in numbers and the analog computer, which operates with continuous physical variables. Although the digital computer is well suited for solving heat transfer problems associated with buildings [1] [2] we feel that the analog computer has several advantages, but we are not going to discuss this further. Two types of analog computers are generally used, the general purpose d-c analog computer and the passive resistance-capacity network analog [3] [4]. This paper deals only with the last type of analog.

The thermal-electrical analogy is based on the similarity of the equations describing heat and electrical conduction, i.e. on the analogy between the partial differential equation for temperature distribution in a solid produced by the conduction of heat and the partial differential equation for the distribution of electric potential produced by a current flowing through a thin transmission line, and between the equations for the rate at which thermal energy is stored and for the rate of flow of charge into a capacitor.

Fourier's equation for one-dimensional heat flow in a homogenous body with thermal conductivity independent of temperature reads:

$$\frac{\partial^2 \vartheta}{\partial x^2} - \frac{1}{a} \frac{\partial \vartheta}{\partial t} = 0$$

where ϑ = temperature

x = position coordinate

t = time

$a = \frac{\lambda}{c \cdot \rho}$ = thermal diffusivity

λ = thermal conductivity

c = specific heat

ρ = density

The similar equation for an induction-free and leakage-free electrical cable reads:

$$\frac{\partial^2 v}{\partial x_e^2} - R'C' \frac{\partial v}{\partial t} = 0$$

where v = electric potential

x_e = position coordinate

R' = resistance per unit length

and C' = capacitance per unit length

If the two equations are compared, it will be seen that the thermal capacity, $c \cdot \rho$ corresponds to electrical capacitance per unit length C' , the thermal resistivity, $\frac{1}{\lambda}$,

corresponds to electrical resistance per unit length R' . Length corresponds to length, and time to time. It can further be shown that the analogy can be extended so that thermal energy corresponds to stored charge, and rate of flow of heat to electric current [4].

If we use this analogy, it is possible to produce an electrical model of the thermal system which we want to investigate. This model consists of cables with evenly distributed resistance and capacitance and of single resistances, corresponding for instance to surface resistances. Instead of using cables, however, resistors and capacitors will be used. This introduces an error, which can, however, be minimised if only a sufficient number of R-C sections in series are substituted for the cable. In general, 2-6 sections are sufficient. Further, it has to be assumed that the parameters of the material can be reckoned as constant within the temperature interval under consideration.

A resistance-capacitance network representing one section will in general be one of the types shown in fig. 3.

If several consecutive T-sections are used, the resistances in the neighbouring sections are combined. If π -sections are used, the capacities are combined. It is sometimes of interest to know the temperature of the dividing plane between two layers of the wall. In this case the π -sections are the most suitable ones, because the measuring points between the two layers are then immediately accessible. If T-sections are used, it is necessary to omit combining the resistances belonging to two separate layers, in order to have the connections accessible. It is not permissible to measure at the centre of the T-section, seeing that this will introduce an extra error.

Details of Construction

The computer is a so-called "slow" analog with a time ratio of the order of 4 , which means that 24 hours in the thermal system correspond to 6 seconds in the electrical system.

This time ratio may, however, be chosen within rather wide limits, depending on the nature of the problem.

The voltages of the computer are within the range ± 100 V. The potential ratio must therefore be chosen for the voltages to be within this range.

The input signals can be obtained from electronic function generators or from motor-driven or stepping switches. In practice it is possible to simulate almost any temperature or heat waveform, especially periodic waveforms.

Output signals are recorded by means of an electronic strip-chart potentiometer recorder with an accuracy of 0,5% of full scale and a pen speed corresponding to full scale travel in 0,3 seconds. If only momentary values such as maximum or minimum are of interest, a digital voltmeter may be used instead.

When designing the analog computer the following points of view have been considered:

1. The computer must be easily operated, and the direct analogy is to be utilised.
2. The computer must be capable of being used with reasonable accuracy without corrections of any kind.
3. The computer must be flexible.

Point 1 requires first, the passive components to be so plentiful and to cover a sufficiently wide range of values, that reasonable values of conversion factors can be used for all common types of rooms, second that the model should be given a logical layout, and third, that auxiliary equipment - input and output - should be automated as far as possible.

The layout has been planned bearing in mind the tasks most frequently performed by the computer, so that connections between components are, as far as possible, made with short contact plugs.

Point 2 requires the components to be selected with a suitable tolerance, corresponding to the input and the output equipment, and that errors arising from the computer, such as line resistances and leakage currents, losses in capacitors and stray capacities, should be kept so small that it would be permissible to disregard them. Leakage currents, especially, present a serious problem here, seeing that some of the resistances used are very large, up to 100 megohm. In general, however, the individual resistances can be kept smaller than 1 megohm.

Apparently, however, it has been possible to keep all these errors to negligible proportions, so that it will only be necessary to take the tolerance of components and measuring instruments into consideration.

Point 3 is complied with by having all connections between components established through contact plugs or flexible leads with banana plugs, and by every component, that is, a 3-decade capacitor or a 10-turn potentiometer plus decade resistance, being carried to plug sockets with both terminals.

The computer contains the following passive components:

129 resistances:	potentiometer 100 kOhm, 1% + decade resistance 11×100 kOhm, 0,25%
64 capacitors:	$10 \times 0,01 \mu\text{F} + 10 \times 0,1 \mu\text{F} + 10 \times 1 \mu\text{F}$, 0,5%
56 fixed capacitors:	$10 \mu\text{F}$, 0,5%
2 capacitors:	$10 \times 0,001 \mu\text{F} + 10 \times 0,01 \mu\text{F} + 10 \times 0,1 \mu\text{F}$, 0,5%

Further a separate group containing:

6 resistances:	potentiometer 100 kOhm + decade resistance 11×100 kOhm
12 resistances:	potentiometer 100 kOhm + decade resistance 11×100 kOhm + 11×1 MOhm
54 resistances:	decade resistance 11×100 kOhm + 11×1 MOhm + 10×10 MOhm

It is intended to use the last mentioned special group for simulation of a person in a room to be able to make calculations relating to thermal comfort.

Procedure

When the time ratio has been selected, it is possible to choose such values for the resistance ratio and the capacity ratio that the values of the single resistances and capacities will be inside the range of the resistors and capacitors of the computer. When the above mentioned ratios have been fixed the flow ratio can be calculated. By means of these ratios all thermal quantities can be converted into electrical quantities.

Besides resistances corresponding to heat conduction and convection, resistances corresponding to heat radiation between surfaces may also be introduced into the analog. For this purpose programmes for digital computers have been developed to calculate the angle factors for radiation between surfaces parallel with or at right angles to one another.

Example

As an example of the use of the analog computer the air temperature of a small office, when the size of the window is varied, will be computed for summer conditions, and the cooling required, when the air temperature must not exceed 25 °C.

Details:

Size of office:	4,75 by 3,05 m ² , ceiling height 3,00 m
Type of window:	double glazing of regular plate
Type of shading:	indoor light draperies
Front wall:	curtain wall, insulated with 0,10 m of mineral wool.

Interior walls: solid masonry wall (0,16 m sand-lime brick)

Ceiling and floor construction: 0,16 m of reinforced concrete with linoleum and ceiling panels

Infiltration rate: 3 times per hour of outdoor air

Position: Copenhagen, 56° north latitude, SW-faced

Summer conditions: 8. of august, clear sky, outside air temperature etc. shown on fig. 5

It is assumed that the office is surrounded by similar office-rooms, where the temperature varies in the same way.

The results of the calculations appear as the curves shown on fig. 5 and the figures in table 1.

In the same way it is possible to find the influence of the heat capacity etc. of the walls, floor or ceiling.

Table 1

Case	I	II	III	IV
Window size, % of floor area	14	28	42	55
Window size, % of front area	22	44	67	88
Max. air temp. without cooling °C	24,4	28,0	30,0	32,6
Max. air temp. with cooling, max. 1000 kcal/h, °C		25,0	25,0	25,5
Max. cooling load kcal/h		335	730	1000
Cooling consumption kcal/day		1400	4800	7200
Power consumption of refrigeration machinery kWh/day, estimated		0,5	1,9	2,8

The analog has been in intense use since its completion, to help consulting architects and engineers to predict the indoor temperatures which may be expected in modern office

buildings with large window areas under summer and winter conditions, to estimate the effectiveness of the shading devices needed to prevent overheating in there, and to calculate the heating and cooling loads and the annual fuel and power consumption.

Introduction

Avec l'augmentation du standard de vie qui a eu lieu dans tous les pays d'Europe occidentale après la deuxième guerre mondiale les exigences de nos logements se sont accrues pas seulement en ce qui concerne les conditions sanitaires et autre équipement technique mais aussi bien le besoin d'un climat intérieur agréable des maisons et bureaux. En Europe centrale et Europe du Nord il est particulièrement nécessaire en hiver de se servir de moyens techniques pour maintenir le climat intérieur, de même l'emploi en architecture de murs-rideaux aussi bien pour les bureaux que pour les logements augmente graduellement le besoin d'un refroidissement pendant l'été. Cette architecture moderne, légère, a en Europe du sud créé un besoin de conditionnement d'air pendant toute l'année.

Pour que les ingénieurs-conseils et les architectes soient capables de prédire avec une certaine exactitude le climat intérieur à attendre dans un bâtiment moderne, léger, avec de grandes surfaces de baies vitrées il leur est nécessaire de se servir de méthodes avancées pour calculer les problèmes de transmission de chaleur en régime variable. Ces méthodes sont nécessaires aussi pour les projets d'installations économiques thermiques et frigorifiques de tels bâtiments.

Analogue électrique

En général on peut classer les procédés de calcul pour la solution des problèmes de l'ingénieur en deux grands groupes. Ceux-ci sont la calculatrice numérique qui seulement traite des chiffres et la calculatrice analogique qui utilise des variables physiques continues.

Bien que la calculatrice numérique convienne bien à résoudre les problèmes de transmission de chaleur dans le

bâtiment [1] [2], nous trouvons que la calculatrice analogique a plusieurs avantages mais nous n'en parlerons pas plus. Deux types de calculatrices analogiques sont généralement employés; la calculatrice universelle à amplificateurs opérationnels et la calculatrice à réseaux passifs résistance-capacité [3] [4]. Cet article ne traite que le dernier type d'analogue.

L'analogie thermo-électrique se base sur la similitude des équations décrivant la conduction de chaleur et d'électricité, c'est - a - dire sur l'analogie entre les équations aux dérivées différentielles partielles de la répartition de température due à la conduction de chaleur dans un corps et l'équation aux dérivées différentielles partielles de la répartition du potentiel électrique due à un courant d'un bout à l'autre d'un mince ligne de transmission, et entre les équations de l'accumulation de chaleur et la charge d'un condensateur.

L'équation de Fourier d'un flux de chaleur mono-dimensionnel dans un corps homogène en fonction de la conductivité de chaleur indépendante de la température s'écrit:

$$\frac{\partial^2 \vartheta}{\partial x^2} - \frac{1}{a} \frac{\partial \vartheta}{\partial t} = 0$$

ou ϑ = la température

x = l'abscisse d'un point considéré

t = le temps

$a = \frac{\lambda}{c\rho}$ = la diffusivité

λ = la conductivité thermique

c = le chaleur spécifique

ρ = la masse volumique

L'équation similaire d'un cable a constantes réparties supposé sans conductance transversale, ni selfinduction s'écrit:

$$\frac{\partial^2 v}{\partial x_e^2} - R'C' \frac{\partial v}{\partial t} = 0$$

ou v = le potentiel électrique

x_e = l'abscisse

R' = la résistance par unité de longueur

et C' = la capacité par unité de longueur

Si l'on compare les deux équations, on verra que la capacité thermique, $c \cdot \rho$, correspond à la capacité électrique par unité de longueur, C' , la résistivité thermique, $\frac{1}{\lambda}$, correspond à la résistance électrique par unité de longueur R' . Longueur correspond à longueur et temps à temps. On peut de plus montrer que l'analogie peut être étendue, que l'énergie thermique correspond à la charge accumulée et l'intensité de chaleur au courant électrique.

Si nous utilisons cette analogie, il sera possible de monter un modèle électrique du système thermique que nous souhaitons étudier. Ce modèle est constitué de câbles à résistances et capacités uniformément réparties et de résistances simples correspondantes par exemple à des résistances de surface. Au lieu de ces câbles nous utiliserons cependant des résistances et capacités simples. On introduit ainsi une erreur qui toutefois peut être minimisée en utilisant un nombre de R-C sections suffisamment grand. En général 2 à 6 sections sont suffisantes. En plus faut-il admettre que les paramètres du matériau soient constants dans l'intervalle de température considérée.

Un réseau, résistance-capacité, représentant une section sera en général un des types montrés dans fig. 3.

Si l'on utilise des sections T on combine les résistances des sections voisines. Si l'on utilise des sections π ce sont les capacités qui sont combinées. On peut avoir intérêt à connaître la température du plan entre deux couches du mur. En de cas les sections π sont les plus convenables parce que les points de mesure sont ici directement accessibles. Si l'on se sert de sections T il ne faut pas combiner les résistances de deux couches afin d'avoir les connections accessibles. Il n'est pas admissible de mesurer dans le centre d'une section T, - on introduirait une erreur en plus.

Details de construction

La calculatrice analogique est du type dit "lent" d'un rapport en temps de l'ordre de 4, c'est-à-dire que 24 heures dans le système thermique correspondent à 6 secondes dans le système électrique. On peut toutefois choisir ce rapport entre des limites assez larges suivant la nature du problème.

Les tensions du calculateur sont dans une gamme de ± 100 V. Le rapport de potentiel doit donc être choisi de façon que les tensions soient dans cette gamme.

Les signaux d'entrée sont à obtenir soit de générateurs électroniques soit de commutateurs mécaniques. En pratique il sera possible de simuler presque toute forme d'onde de température ou chaleur, surtout les ondes périodiques.

Les signaux de sortie sont enregistrés à l'aide d'un potentiometre-enregistreur avec une approximation égale à 0,5% de la graduation maximale et un balayage de 0,3 secondes d'un déplacement maximum ("full scale travel").

Si seulement des valeurs momentanées telles que maxima ou minima ont de l'intérêt un voltmetre numerique peut être utilisé.

En concevant le calculateur les points de vue suivants ont été considérés:

- 1° La manutention du calculateur doit être facile et l'analogie directe est à utiliser.
- 2° Le calculateur doit pouvoir être utilisé avec une précision raisonnable sans aucunes corrections.
- 3° Le calculateur doit être souple.

Le point no. 1 exige d'abord un nombre assez grand de composants passifs pour qu'ils puissent couvrir une gamme de valeurs suffisamment large pour tous les types courants de pieces, deuxièmement que le modele ait une disposition logique et troisièmement que l'équipement auxiliaire - signaux d'entrée et de sortie - fonctionne automatiquement si loin que possible.

La disposition a été conçue en se rappelant les travaux les plus fréquents de la calculatrice de telle sorte que les connexions entre les composants sont autant que possible joints de fiches courtes de connexion.

Le point no. 2 exige que les composants soient choisis avec une tolérance convenable correspondante a l'équipement de signaux d'entrée et sortie, et que ces erreurs qui se produisent dans la calculatrice telles que les résistances des fils et les courants de déperdition, les pertes des condensateurs et les capacités de dispersion soient maintenues aussi petites qu'il soit permis de les négliger. Les courants de déperdition sont spécialement un problème important ici puisque quelques unes des résistances utilisées sont tres grandes, jusqu' à 100 megohm. En général, les résistances individuelles peuvent être maintenues inférieures à 1 megohm.

Il a été possible, apparemment, de garder toutes ces erreurs à valeurs négligeables de telle façon qu'il ne sera pas necessaire de tenir compte des tolérances des éléments et instruments de mesure.

La troisieme exigence a été satisfaite en utilisant, pour les connexions entre les éléments des fiches de contact ou des fils souples avec fiches bananes, et pour chaque élément, celui-ci étant un condensateur 3-décade ou un potentiomètre helicoïde, 10 tours, avec une resistance decade additionnelle, des prises femelles aux deux bornes. *

La calculatrice contient les éléments passifs suivants:

129 résistances:	potentiomètre, 100 kohm, 1% + résistance decade 11×100 kohm 0,25%
64 condensateurs variables:	$10 \times 0,01\mu F + 10 \times 0,1\mu F +$ $10 \times 1\mu F$, 0,5%
56 condensateurs fixes:	$10\mu F$, 0,5%
2 condensateurs variables:	$10 \times 0,001\mu F + 10 \times 0,01\mu F +$ $10 \times 0,1\mu F$, 0,5%

Encore un groupe séparé contenant:

6 résistances:	potentiomètre 100 kOhm + décade 11×100 kOhm
12 résistances:	potentiomètre 100 kOhm + décade 11×100 kOhm + 11×1 MOhm
54 résistances:	décade 11×100 kOhm + 11×1 MOhm + 10×10 MOhm

On envisage utiliser le dernier groupe spécialement pour la simulation d'une personne dans un local pour pouvoir faire les calculs concernant le confort thermique.

Procédé

Lorsque la base de temps a été choisie, il est possible de choisir les valeurs des rapports de résistance et capacité telles que les valeurs des résistances et capacités particulières soient dans la gamme de résistances et capacités du calculateur. Lorsque les rapports mentionnés ont été fixés, on peut calculer le rapport des flux. À l'aide de ces rapports on peut transformer toutes les quantités thermiques en quantités électriques.

En plus des résistances correspondant à la conduction ou convection de chaleur on peut introduire dans le calcul des résistances qui correspondent à la radiation entre des surfaces. À ce propos on a développé des programmes pour calculatrices numériques pour calculer les facteurs d'angle entre des surfaces parallèles et perpendiculaires.

Exemple

Comme exemple d'utilisation de la calculatrice analogique on calculera les températures d'air d'un petit bureau pour des conditions d'été lorsqu'on varie les dimensions de la fenêtre; en plus on calculera les charges frigorifiques quand la température d'air ne doit pas dépasser 25 °C.

Données:

Dimensions du bureau:	4,75 × 3,05 m ² , hauteur du plafond: 3,00 m
Type de fenêtre:	vitrage double de verre ordinaire
Protection du soleil:	rideaux légers intérieurs
Facade:	parois d'ossature, avec isolation 0,10 m de laine minérale
Cloisons:	maçonnerie (0,16 m de pierres calcaires)
Plafond et plancher:	0,16 m de béton armé avec revêtement de sol en linoleum et plafond suspendu
Renouvellement d'air:	3 fois par heure d'air extérieur
Situation:	Copenhague, latitude 56° nord, la fenetre vers sud-ouest
Conditions d'été:	le 8 aout, ciel dégagé, température d'air extérieur etc. est montrée dans fig. 5.

On suppose que le bureau est entouré de bureaux semblables ou la température varie de la meme maniere.

Les résultats des calculs apparaissent sur les courbes montrées dans fig. 5 et les chiffres dans tableau 1.

De la meme manière il est possible de trouver l'influence de capacité de chaleur etc. des murs, planchers ou plafonds.

Tableau 1

Cas	I	II	III	IV
Surface de la baie vitrée, % de la surface du plancher	14	28	42	55
Surface de la baie vitrée, % de la surface de la façade	22	44	67	88
Température maximale (°C) sans réfrigération	24,4	28,0	30,0	32,6
Température maximale (°C) avec réfrigération 1000 kcal/h maxi.		25,0	25,0	25,5
Charge frigorifique maxi (kcal/h)		335	730	1000
Consommation frigorifique (kcal/jour)		1400	4800	7200
Puissance consommée des réfrigérateurs (kWh/jour), estimée		0,5	1,9	2,8

La calculatrice a été utilisée intensivement après son achèvement pour aider les architectes et les bureaux d'étude à prédire les températures intérieures sous des conditions d'été et d'hiver qui sont à attendre dans les immeubles de bureau modernes avec des grandes surfaces de baies vitrées, pour être compétent à estimer le rendement des protections solaires, pour éviter des températures trop élevées, et pour calculer les charges calorifiques et frigorifiques et la consommation annuelle de combustible et puissance.

Einleitung

Mit dem steigenden Lebensstandard sind in der Zeit nach dem zweiten Weltkrieg in ganz Westeuropa nicht allein die Anforderungen an die Ausstattung und die Einrichtung der Wohnungen gewachsen, sondern auch die Forderungen nach einem behaglichen Innenklima. Um im Winter ein behagliches Innenklima zu erreichen, ist es in Mittel- und Nordeuropa immer notwendig gewesen, Heizungsanlagen zu installieren. Die in der modernen Architektur zu beobachtende Anwendung immer grösserer Fensterflächen sowohl in Wohn- als auch in Bürohäusern hat es mit sich gebracht, dass in zahlreichen Fällen die Kühlung der Räume im Sommer notwendig wurde. Im südlichen Europa ist bei Bauten mit moderner Curtain-Wall-Architektur eine Luftkonditionierung das ganze Jahr über erforderlich.

Wenn Architekten oder beratende Ingenieure das Innenklima, das in einem modernen Leichtbau zu erwarten ist, im voraus festlegen sollen, müssen ihnen fortschrittliche Berechnungsmethoden zur Bestimmung der instationären Wärmeströme zur Verfügung stehen. Diese Methoden sind auch notwendig, um Heiz- und Kühlanlagen in solchen Gebäuden wirtschaftlich dimensionieren zu können.

Elektrische Analogie

Elektronische Rechenmaschinen, die zur Lösung von Ingenieuraufgaben benutzt werden, können in zwei Hauptgruppen eingeteilt werden. Die erste Gruppe umfasst Zifferrechenmaschinen, die mit Zahlen rechnen, die andere Gruppe umfasst Analogie-Rechenmaschinen, die mit kontinuierlich veränderlichen, physikalischen Grössen rechnen. Obwohl Zifferrechenmaschinen zur Lösung von Wärmedurchgangsproblemen in Gebäuden [1] [2] ebenfalls geeignet sind, meinen wir, dass die Analogie-Rechenmaschine für diesen Zweck einige Vorteile

hat. Wir wollen doch auf die unterschiedliche Eignung an dieser Stelle nicht näher eingehen.

Zwei Typen Analogie-Rechenmaschinen werden zur Lösung von Ingenieuraufgaben angewandt. Der gewöhnlich benutzte Typ, die aktive Analogie-Rechenmaschine mit Operationsverstärker, und die passive Analogie-Rechenmaschine, aufgebaut als Widerstands-Kapazitäts-Netzwerk [3] [4].

Die thermisch-elektrische Analogie basiert auf der formellen Gleichheit der mathematischen Gleichungen, die Wärmeleitung und elektrische Leitung beschreiben. Fouriers Wärmeleitungsgleichung lautet für ein-dimensionale Wärmeströme in einem homogenen Körper mit temperaturunabhängigem Wärmeleitvermögen:

$$\frac{\partial^2 \vartheta}{\partial x^2} - \frac{1}{a} \frac{\partial \vartheta}{\partial t} = 0$$

Hierin bedeuten ϑ die Temperatur in einem Punkt

x die Ortskoordinate

t die Zeit

a die Temperaturleitzahl, $a = \frac{\lambda}{c\rho}$

λ das Wärmeleitvermögen

c die spezifische Wärme

ρ das spezifische Gewicht

Für ein induktionsfreies und ableitungsfreies elektrisches Kabel gilt eine entsprechende Gleichung

$$\frac{\partial^2 v}{\partial x_e^2} - R'C' \frac{\partial v}{\partial t} = 0$$

Hierin ist v die Spannung in einem Punkt

x_e die Koordinate

R' der Widerstand pro Längeneinheit

C' die Kapazität pro Längeneinheit

Vergleicht man die beiden Gleichungen, sieht man, dass die Wärmekapazität $c \cdot \rho$ der elektrischen Kapazität pro Längen-

einheit C' entspricht, der Wärmewiderstand $\frac{1}{\lambda}$ dem elektrischen Widerstand pro Längeneinheit R' . Länge entspricht Länge, und Zeit entspricht Zeit.

Es zeigt sich weiterhin, dass die Wärmemenge der Elektrizitätsmenge und die Wärmeströme den elektrischen Strömen entsprechen.

Unter Ausnutzung dieser Analogien kann man deshalb das elektrische Modell eines thermischen Systems herstellen, das man zu untersuchen wünscht. Dieses Modell müsste aus Kabeln bestehen, bei denen Widerstand und Kapazität gleichmässig verteilt sind, sowie aus einzelnen Widerständen, die den Wärmeübergangswiderständen entsprechen. Aus praktischen Gründen wird man jedoch anstelle von Kabeln einzelne Widerstände und Kondensatoren benutzen. Man führt damit einen Fehler in das System ein, der allerdings auf ein erträgliches Mass eingeschränkt wird, wenn man das Kabel durch eine ausreichende Zahl von R-C-Gliedern in Serie ersetzt. In der Regel sind 2 bis 6 Glieder genügend.

Es ist ausserdem eine Hauptregel, die Materialparameter innerhalb des betrachteten Temperaturintervalls als konstant zu rechnen. Abhängig von der Platzierung der Kapazität spricht man von T-Glied, π -Glied oder L-Glied, siehe Fig.3.

Werden mehrere T-Glieder hintereinander verwendet, fasst man die Widerstände in den Nachbargliedern zu zweit zusammen, werden π -Glieder verwendet, fasst man je zwei Kapazitäten zusammen. Da man mitunter an den Temperaturen in der Wand interessiert ist, sind π -Glieder am besten geeignet, weil dort die Verbindungspunkte zwischen zwei Gliedern unmittelbar zugänglich sind. Bei T-Gliedern muss man in diesem Fall vermeiden, die Widerstände zusammenzufassen, um zugängliche Verbindungspunkte zu haben. Es ist nicht ohne weiteres erlaubt, am Mittelpunkt im T-Glied zu messen, da dadurch ein weiterer Fehler eingeführt wird.

Alle drei Typen, namentlich das L-Glied, ergeben durch die Begrenzungen der homogenen Schicht Fehler in den Strömen und Spannungen. Hier muss erwähnt werden, dass es bei Be-

nutzung einer "aktiven" Analogie-Rechenmaschine möglich ist, mit der gleichen Anzahl Glieder ein wesentlich genaueres Ergebnis zu erreichen, besonders in Bezug auf die Verhältnisse an den Begrenzungsflächen. Deshalb besteht Grund anzunehmen, dass man mit Vorteil kombinierte "hybride" Analogons benutzen könnte, d.h. solche mit sowohl passiven Netzwerken als auch aktiven Verstärkern.

Konstruktive Einzelheiten

Die Maschine ist ein sogenanntes "langsame" Analogon mit einem Zeitmassstab, bei dem z.B. 6 Sek. 24 Stunden in der Wirklichkeit entsprechen. Dieser Zeitmassstab kann nach Art der Aufgabe innerhalb recht weiter Grenzen gewählt werden.

Die Spannungen der Maschine liegen im Gebiet ± 100 V. Der Umrechnungsfaktor für Temperatur zur Spannung muss deshalb so gewählt werden, dass die Spannungen innerhalb dieses Gebietes liegen.

Der elektrische Eingang kann von elektronischen Funktionsgeneratoren oder vom motorgetriebenen Umschaltern kommen. In der Praxis ist es möglich, fast jeden beliebigen, insbesondere periodischen Temperatur- oder Wärmestromverlauf zu simulieren.

Die Messungen werden mit einem Potentiometerschreiber mit einer Genauigkeit von 0,5% und einer Einstellungszeit von 0,3 sek. vorgenommen. Ist man nur an Augenblickswerten interessiert, kann man ein Ziffervoltmeter benutzen.

Beim Bau von diese Analogons wurden folgende Gesichtspunkte berücksichtigt:

1. Die Maschine soll leicht zu gebrauchen sein und die direkte Analogie soll ausgenutzt werden.
2. Die Maschine soll mit ausreichender Genauigkeit ohne Korrektur jeder Art zu gebrauchen sein.
3. Die Maschine soll flexibel sein.

Einerseits müssen mit Rücksicht auf Punkt 1 passive Komponenten so reichlich vorhanden sein und einen so grossen Zahlenbereich überdecken, dass für alle gewöhnlich vorkommenden Räume mit einigermaßen leichten Umrechnungsfaktoren gearbeitet werden kann. Andererseits muss das Modell für allgemeine Aufgaben einen physikalisch logischen Aufbau haben. Die Hilfsausstattung für das Eingeben und Ablesen von Werten sollte soweit wie möglich automatisiert sein.

Den logischen Aufbau hat man dadurch zu erreichen versucht, dass man die Komponenten nach den wahrscheinlich am häufigsten vorkommenden Aufgaben plziert hat. Die Verbindungen zwischen ihnen können so meist mit kurzen Kontaktstöpseln hergestellt werden.

Punkt 2 fordert, dass die Komponenten entsprechend der Eingabe- und Ableseausstattung mit passender Toleranz gewählt werden, und dass von der Maschine stammende Fehler, wie Leitungswiderstände und Ableitströme, Verluste in Kondensatoren und Streuungskapazitäten, so klein gehalten werden, dass sie normalerweise unbeachtet bleiben können. Namentlich Ableitungsströme sind hier ein ernstes Problem, weil einige der benutzten Widerstände sehr gross sind, bis zu 100 MOhm. Meistens können die einzelnen Widerstände in einer Wand allerdings unter 1 MOhm gehalten werden.

Es scheint gelungen zu sein alle diese Fehler in einer so geringen Grössenordnung zu halten, dass man sie vernachlässigen kann und nur mit den Toleranzen der Komponenten und Messinstrumente rechnen muss.

Punkt 3 wird erfüllt, wenn alle Verbindungen zwischen den Komponenten mit Kontaktstöpseln oder weichen Leitungen mit Bananensteckern hergestellt werden, und wenn beide Klemmen jeder Komponente, d.h. eines Dreidekadenkondensators oder eines Wendepotentiometers (mit 10 Umdrhg) + Dekadenwiderstands, zu Steckbuchen geführt werden.

Die Apparatur enthält an passiven Komponenten:

129 Widerstände:	Potentiometer 100 k Ω , 1% + Dekadenwiderstand 11×100 k Ω , 0,25%
64 Kondensatoren:	$10 \times 0,01 \mu\text{F} + 10 \times 0,1 \mu\text{F} + 10 \times 1 \mu\text{F}$, 0,5%
56 feste Kondensatoren:	$10 \mu\text{F}$, 0,5%
2 Kondensatoren:	$10 \times 0,001 \mu\text{F} + 10 \times 0,01 \mu\text{F} + 10 \times 0,1 \mu\text{F}$, 0,5%

Ausserdem befinden sich in einer besonderen Gruppe:

6 Widerstände:	Potentiometer 100 k Ω + Dekadenwiderstand 11×100 k Ω
12 Widerstände:	Potentiometer 100 k Ω + Dekadenwiderstände 11×100 k Ω + 11×1 M Ω
54 Widerstände:	Dekadenwiderstände 11×100 k Ω + 11×1 M Ω + 10×10 M Ω

Über die oben beschriebene wärmetechnische Berechnung hinaus, kann mit Hilfe der letzten besonderen Gruppe die Anwesenheit einer Person in einem Raum simuliert werden. Man will damit versuchen, Komfortberechnungen zu vornehmen.

Arbeitsablauf

Nach der Wahl des geeigneten Zeitmassstabes können die übrigen Umrechnungsfaktoren - Wärmewiderstand zu elektrischem Widerstand und Wärmekapazität zu elektrischer Kapazität - so festgelegt werden, dass Widerstände und Kapazitäten Werte innerhalb der Bereiche erhalten, für die Komponenten vorhanden sind. Schliesslich muss der Umrechnungsfaktor Wärmestrom zu elektrischem Strom berechnet werden. Nachdem alle thermischen Grössen für ein gegebenes Problem, z.B. für einen Raum, in elektrische Grössen umgerechnet sind, kann das Modell zusammengestellt werden.

Ausser Widerständen, die Wärmeleitung und Konvektion entsprechen, können auch Widerstände, die der Strahlung zwischen Flächen entsprechen, im Modell berücksichtigt werden. Zur Berechnung der Einstrahlzahl zwischen parallelen oder winkelrecht aufeinander stehenden rechtwinkligen Flächen sind Programme für Ziffernrechenmaschinen entwickelt worden.

Beispiel

Was die Analogie-Rechenmaschine vermag, lässt sich am besten durch ein Beispiel verdeutlichen: Für einen Büroraum soll der Einfluss der Fenstergrösse auf die Lufttemperatur bestimmt werden oder auf die Höhe der Kühllast, wenn die Lufttemperatur unter Sommerverhältnissen 25 °C nicht überschreiten darf.

Technische Daten des zu untersuchenden Büroraumes:

Grösse:	4,75 m × 3,05 m Bodenfläche, Deckenhöhe 3,00 m
Fensterverglasung:	Zweischeiben-Isolierglas
Sonnenabblendung:	helle Innengardinen
Fassadenwand:	leichte Elementwand, mit 10 cm Mineralwolle isoliert
Innere Wände:	16 cm gemauerte Kalksandsteinwände
Decke und Boden:	10 cm armierter Beton mit Linoleum und Deckenpanel
Luftwechsel:	dreimal stündlich mit Aussenluft
Orientierung:	Kopenhagen, 56° NB, SW-Fassade

Wir nehmen an, das Büro sei von anderen Büroräumen umgeben, in denen die Temperatur auf gleiche Weise schwankt.

Die Resultate gehen aus Fig. 5 und Tabelle 1 hervor.

Auf gleiche Weise ist es möglich, z.B. den Einfluss der Wärmekapazität von Wänden, Böden und Decken zu bestimmen.

Tabell 1

Fall	I	II	III	IV
Fenstergrösse, % von Fussboden	14	28	42	55
Fenstergrösse, % von Fassade	22	44	67	88
Höchsttemperatur im Luft, ohne Kühlung °C	24,4	28,0	30,0	32,6
Höchsttemperatur im Luft, mit Kühlung, höchstens 1000 kcal/h °C		25,0	25,0	25,5
Höchste Kühlleistung kcal/h		335	730	1000
Kühlleistung kcal/Tag		1400	4800	7200
Energieverbrauch für Kältema- schine (ermessen) kWh/Tag		0,5	1,9	2,8

Nachschrift

Architekten und beratende Ingenieure haben in einer Reihe von Fällen während der Projektierung die Analogie-Rechenmaschine zur Vorausberechnung von Innentemperaturen benutzt, die im Sommer und im Winter in modernen Bürohäusern mit grossen Fensterflächen zu erwarten sind, um davon ausgehend beurteilen zu können, wie wirkungsvoll die Sonnenabblendungen sein müssen, um Überhitzung zu vermeiden. Gleichzeitig wurden Wärmebedarf und evtl. Kühllast berechnet.

Introduzione

Con l'aumento del tenore di vita che ha avuto luogo nei paesi Europei Occidentali dalla fine della seconda guerra mondiale non sono aumentate soltanto le richieste per quanto riguarda apparecchiature sanitarie ed altri apparati tecnici, ma anche per il bisogno di una temperatura interna piacevole nelle case e negli uffici. Nell'Europa Centrale e Settentrionale è particolarmente necessario, in inverno, usare mezzi tecnici per mantenere la temperatura interna, ma l'architettura a pareti di vetrate, usata nelle case e negli uffici, sta gradualmente aumentando il bisogno di condizionamento d'aria per tutto l'anno.

Per permettere agli ingegneri ed architetti di predire con una certa accuratezza le condizioni termiche interne che si potranno ottenere in un moderno e leggero edificio con grandi superfici di finestre, è necessario usare progrediti metodi per il calcolo e lo studio dei problemi inerenti al flusso di calore non stazionario. Questi metodi sono necessari anche per progettare impianti economici di riscaldamento e raffreddamento per tali edifici.

Calcolatore analogico elettrico

In generale i dispositivi di calcolo usati per la soluzione di problemi di ingegneria possono essere raggruppati in due classi principali. Queste sono, il calcolatore digitale che esegue solo calcoli numerici ed il calcolatore analogico che agisce con variabili fisiche continue. Sebbene il calcolatore digitale sia adatto per risolvere i problemi di trasmissione del calore che si presentano negli edifici [1] [2], noi pensiamo che il calcolatore analogico abbia diversi vantaggi, ma non vogliamo discutere ulteriormente questo argomento. Generalmente vengono usati due tipi di calcolatori analogici, il calcolatore analogico universale

ed il calcolatore analogico a rete passiva di resistenza-capacità [3] [4]. Questo articolo tratta soltanto quest'ultimo tipo di calcolatore analogico.

L'analogia termo elettrica è basata sulla similarità delle equazioni descriventi la conduzione elettrica e termica, cioè sull'analogia tra l'equazione differenziale parziale per la distribuzione di temperatura in un solido prodotta dalla conduzione di calore e tra l'equazione differenziale parziale per la distribuzione del potenziale elettrico prodotto da un flusso di corrente in una sottile linea di trasmissione, e tra la equazione dell'accumulo di energia termica e quella del flusso di carico in un condensatore elettrico.

L'equazione di Fourier per un flusso di calore uni-dimensionale in un corpo omogeneo con conduttività termica indipendente dalla temperatura è:

$$\frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} - \frac{1}{a} \frac{\partial \theta}{\partial t} = 0$$

dove: θ = temperatura

x = coordinata di posizione

t = tempo

$a = \frac{\lambda}{c\rho}$ diffusività termica

λ = conduttività termica

c = calore specifico

ρ = densità

L'equazione simile per un cavo elettrico senza induzione e senza perdite è:

$$\frac{\partial^2 v}{\partial x_e^2} - R'C' \frac{\partial v}{\partial t} = 0$$

dove: v = potenziale elettrico

x_e = coordinata di posizione

R' = resistenza per unità di lunghezza

C' = capacità per unità di lunghezza

Se vengono confrontate le due equazioni si vedrà che la capacità termica $c \cdot \rho$ corrisponde alla capacità elettrica per unità di lunghezza C' , la resistenza termica $\frac{1}{\lambda}$ corrisponde alla resistenza elettrica per unità di lunghezza R' . La lunghezza corrisponde alla lunghezza, il tempo al tempo. Si può dimostrare inoltre che l'analogia può essere estesa così che l'energia termica corrisponda al carico immagazzinato ed il valore del flusso di calore alla corrente elettrica [4].

Se noi usiamo questa analogia, è possibile produrre il modello elettrico di sistema termico che noi vogliamo studiare. Questo modello consiste di cavi aventi resistenza e capacità distribuiti in modo uguale e di singole resistenze, corrispondenti per esempio a resistenze, corrispondenti per esempio a resistenze di superficie. Invece di usare cavi, tuttavia, verranno usati resistori e capacitori. Questo provoca un errore che tuttavia può venire minimizzato con la sola sostituzione per ogni cavo di un numero sufficiente di sezioni di R-C in serie. In generale sono sufficienti 2-6 sezioni. Inoltre bisogna supporre che i parametri del materiale possano essere considerati come costanti entro l'intervallo di temperatura considerato.

Una rete a resistenza-capacità che rappresenta una unica sezione sarà generalmente una di quelle mostrate nella figura 3.

Se vengono usate diverse sezioni a T consecutive, le resistenze nelle sezioni adiacenti sono combinate. Se vengono usate sezioni a π , sono combinate le capacità. Qualche volta è interessante conoscere la temperatura del piano di divisione fra due sezioni di pareti. In questo caso le sezioni a π sono le più adatte perchè i punti di misurazione tra le due lastre sono allora accessibili immediatamente. Se vengono usate sezioni a T è necessario tralasciare di combinare le resistenze che appartengono alle due lastre separate in modo da poter avere le connessioni accessibili. Non si può misurare al centro della sezione T, poichè questo provocherebbe un ulteriore errore.

Dettagli di costruzione

Il calcolatore è del tipo detto "lento" con un rapporto di tempo dell'ordine di 4, che significa che 24 ore nel sistema termico corrispondono a 6 secondi nel sistema elettrico. Questo rapporto di tempo, tuttavia, può essere scelto entro limiti più ampi a secondo della natura del problema.

Le tensioni del calcolatore sono di ± 100 V. Il rapporto di potenziale deve perciò essere scelto per voltaggi nell'ambito di questo campo.

I segnali di entrata possono essere ottenuti da generatori a funzionamento elettronico o da interruttori azionati a motore. In pratica è possibile simulare quasi ogni forma di onda di temperatura o di calore ed in particolare forme di onde periodiche.

I segnali di uscita sono registrati per mezzo di un potenziometro elettrico registratore a carta con una precisione dello 0,5% fondo scala ed una velocità della penna corrispondente ad un totale scorrimento in 0,3 secondi. Se interessano soltanto valori istantanei come il massimo o il minimo, si può usare invece un voltmetro digitale.

Nel progettare il calcolatore analogico sono stati considerati i seguenti punti:

1. Il calcolatore deve essere di facile funzionamento e si deve utilizzare la analogia diretta.
2. Il calcolatore si deve poter usare con una ragionevole accuratezza senza correzioni di sorta.
3. Il calcolatore deve essere flessibile.

Il punto 1 richiede: primo, che i componenti passivi devono essere molto numerosi e coprire una gamma sufficientemente ampia di valori così che valori ragionevoli di fattori di conversione possano essere usati per tutti i tipi comuni di ambiente; secondo, che il modello abbia una disposizione logica e terzo che l'equipaggiamento ausiliare - di entrata e di uscita - debba essere il più possibile au-

tomatizzato. La disposizione è stata progettata tenendo presente i compiti eseguiti con maggior frequenza dal calcolatore, in modo che le connessioni fra i componenti siano, per quanto è possibile, realizzate con brevi cavi connettori.

Il punto due richiede che le parti componenti vengano scelte con una giusta tolleranza, corrispondente al sistema di entrata e di uscita e che gli errori derivanti dal calcolatore, come le resistenze di linea e le correnti disperse, perdite nei capacitori e capacità parassite, siano mantenuti a livello minimo così da poterli trascurare. Le correnti disperse specialmente presentano qui un serio problema, osservando che alcune delle resistenze usate sono molto forti, fino a 100 Megaohm. In generale tuttavia le resistenze individuali possono essere più piccole di 1 Megaohm. Sembra tuttavia che sia stato possibile mantenere tutti questi errori in proporzioni trascurabili così che sarà soltanto necessario considerare la tolleranza dei componenti e degli strumenti di misura.

Il punto 3 si ottiene mantenendo tutte le connessioni tra i componenti attraverso connettori o con cavi flessibili terminanti a banana e collegando ogni componente, e cioè un capacitore a tre decadi o un potenziometro helicoidale, 10 giri, con una resistenza decadica addizionale, a zoccoli con ambedue i terminali.

Il calcolatore contiene i seguenti componenti passivi:

129 resistenze:	potenziometro 100 Kohm + resistenza decadica 11×100 Kohm
64 capacitori:	$10 \times 0,01\mu F + 10 \times 0,1\mu F + 10 \times 1\mu F$
56 capacitori fissi:	$10\mu F$
2 capacitori:	$10 \times 0,001\mu F + 10 \times 0,01\mu F + 10 \times 0,1\mu F$

più un gruppo separato contenente:

- 6 resistenze: potenziometro 100 Kohm + resistenza deca-
dica 11×100 Kohm
- 12 resistenze: potenziometro 100 Kohm + 11×100 Kohm +
 11×1 Megaohm
- 54 resistenze: resistenza decadica 11×100 kohm + 11×1
Megaohm + 10×10 Megaohm

Si intende usare quest'ultimo gruppo speciale per simulare la presenza di una persona in un ambiente così da essere in grado di fare calcoli relativi al benessere termico o cercar almeno di farvi un'espressione di benessere che potrà essere adoperata in pratica.

Procedimento

Una volta scelto il rapporto di tempo, è possibile scegliere valori per il rapporto di resistenza ed il rapporto di capacità tali che i valori delle singole resistenze e capacità entreranno nel campo dei resistori e capacitori del calcolatore.

Per mezzo di questi valori si possono convertire tutte le quantità termiche in quantità elettriche. Quando i rapporti suddetti sono stati fissati si può calcolare il valore del flusso ed installare nella macchina il modello.

Oltre alle resistenze corrispondenti alla conduzione e alla convezione, si possono introdurre in un calcolatore analogico anche resistenze corrispondenti all'irraggiamento termico fra superfici.

Per questo scopo si sono sviluppati programmi per calcolatori digitali per calcolare i fattori angolari per l'irraggiamento fra superfici parallele, o ad angolo retto tra loro.

Esempio

Come esempio per l'uso di calcolatore analogico si calcolerà la temperatura dell'aria in un piccolo ufficio, in condizioni estive, al variare della grandezza delle finestre e si calcolerà il raffreddamento richiesto affinché la temperatura dell'aria non superi i 25°C .

Dettagli:

Dimensione dell'ufficio:	4,75 per 3,05 m ² , altezza del soffitto 3,00 m
Tipo di finestra:	doppio vetro ermetico
Tipo di ombreggiatura:	tende chiare interne
Parete esterna:	parete leggera isolata con 0,10 m di lana minerale
Pareti interne:	parete in muratura (0,16 m mattoni in calce e sabbia)
Costruzione del soffitto e pavimento:	0,16 m di cemento armato con linoleum e pannelli a soffitto
Infiltrazione:	3 ricambi/ora d'aria esterna
Posizione:	Copenaghen, latitudine nord 56°
Condizioni estive:	8 Agosto, cielo limpido, temperatura esterna dell'aria ecc., come mostrate alla fig. 5

Si presume che l'ufficio sia circondato da uffici simili dove la temperatura varia nello stesso modo.

I risultati dei calcoli sono indicati dalle curve mostrate in fig. 5 e dai valori della tavola 1.

Nello stesso modo è possibile trovare l'influenza della capacità termica ecc; delle pareti, pavimento e soffitto.

Tavola 1

Caso	I	II	III	IV
Dimensioni della finestra, % dell' area di pavimento	14	28	42	55
Dimensione della finestra % dell' area della parete esterne	22	44	67	88
Mass. temperatura dell'aria senza raffreddamento °C	24,4	28,0	30,0	32,6
Mass. temperatura dell'aria con raffreddamento, max.1000 Kcal/h, °C		25,0	25,0	25,5
Mass. carico di raffreddamento Kcal/h		335	730	1000
Consumo di raffreddamento Kcal/al giorno		1400	4800	7200
Consumo di energia del macchinario di refrigerazione KWh/al giorno, stimato		0,5	1,9	2,8

Fin dal suo completamento il calcolatore analogico è stato usato intensamente, per aiutare gli architetti ed ingegneri a predire la temperatura interna che bisogna avere in edifici moderni adibiti ad uffici con grandi superfici a vetrate, in condizioni estive ed invernali, per prevedere l'efficacia dei dispositivi di ombreggiamento di cui si ha bisogno per prevenire l'eccesso di calore, e per calcolare i carichi di riscaldamento e di raffreddamento e il consumo annuale di energia e di combustibile.

Bibliography

1. Brown, G.: Metod för datamaskinberäkning av värme- och ljusstrålning samt kyl- och värmebehov. VVS no. 10 and 11, Stockholm 1963.
2. Lindsoug, N.E. and L.Andersson: Värmeberäkning med datamaskin. Byggmästaren no. 10, Stockholm 1963.
3. Stephenson, D.G.: Methods of determining non-steady heat flow through walls and roofs of buildings. J.I.H.V.E., May 1962.
4. Karplus, W.J.: Analog simulation. New York 1958.

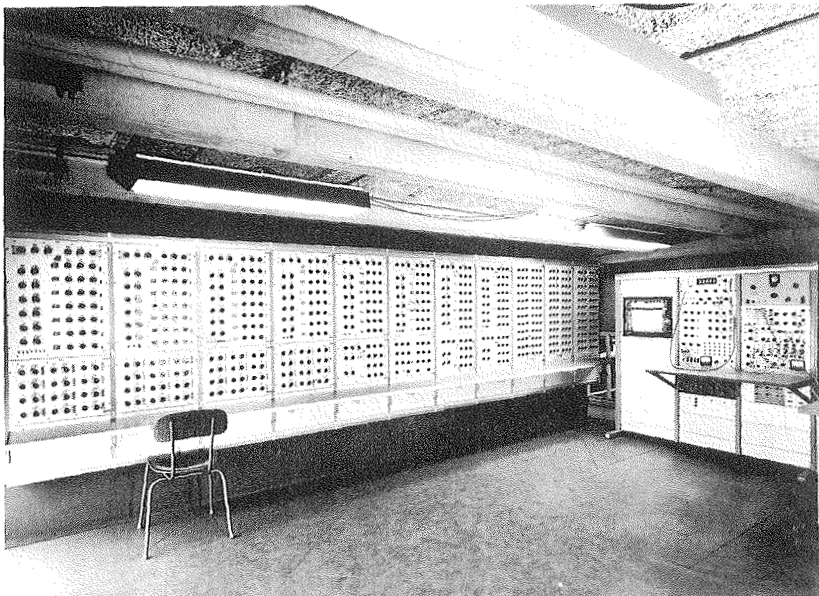


Fig. 1

Den passive analogregnemaskine ved Laboratoriet for Varmeisolering,
Danmarks tekniske Højskole.

The passive electrical analog computer at the Thermal Insulation Laboratory
of the Technical University of Denmark in Copenhagen.

Calculatrice analogique passive électrique du Laboratoire d'Isolation
Thermique de l'Ecole Polytechnique du Danemark à Copenhague.

Das passive elektrische Analogrechner im Laboratorium für Wärmeschutz der
Technischen Hochschule Dänemarks in Kopenhagen.

Calcolatore analogico elettrico passivo del Laboratorio di Isolamento
Termico della Università Technica di Danimarca.

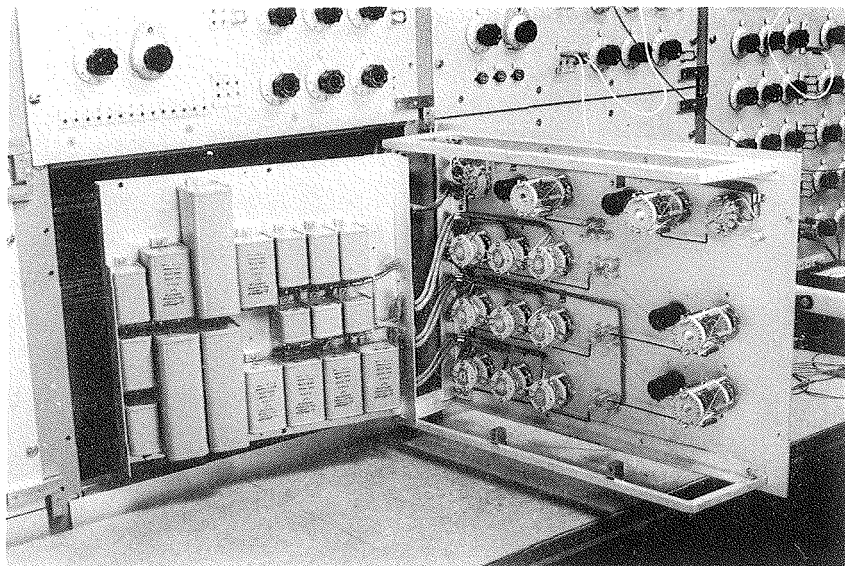


Fig. 2 Montering af kondensatorer og modstande på bagsiden af panelerne.

Close up view of the mounting of the condensers and the resistors on the back of the panels.

Vue rapprochée du montage des condensateurs et des résistances sur le côté arrière des panneaux de montage.

Nahbild von der Montierung der Kondensatoren und Drehwiderstände an der Rückseite des Paneeles.

Montatura di capacitori e resistenze sul lato posteriore dei pannelli

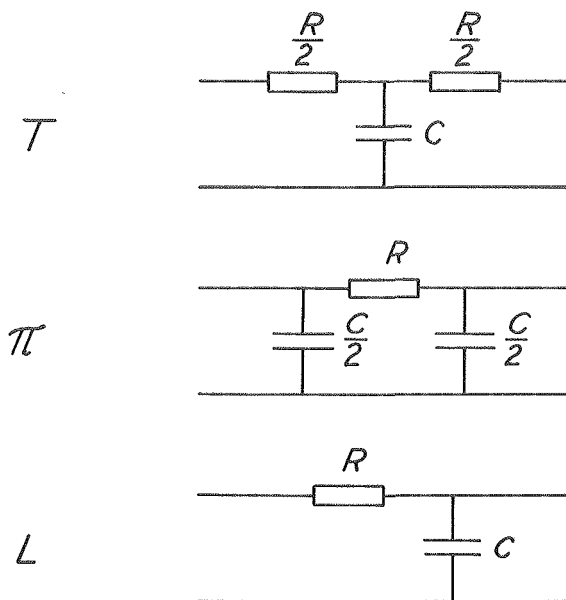


Fig. 3

Tre forskellige muligheder for erstatning af et element af det homogene elektriske kabel med jævnt fordelt modstand og kapacitet, med enkelte modstande og kondensatorer: T-led, π -led og L-led.

Three different substitutions for a section of a slender transmission line with distributed resistance and capacitance: T-section, π -section and L-section.

Trois exemples de substitution d'un câble électrique avec résistance et capacité distribuées, par un groupe simple de résistance et de capacité: Section T, section π et section L.

Drei verschiedene Methoden eine Teilstrecke des homogenen elektrischen Kabels durch Einzelwiderstände und -kapazitäten zu ersetzen: T-Glied, π -Glied und L-Glied.

Tre sistemi per sostituire una parte del cavo elettrico omogeneo, munito di resistenze e capacitori che sono distribuiti in modo uguale, con certe resistenze e condensatori: sezione T, sezione π e sezione L.

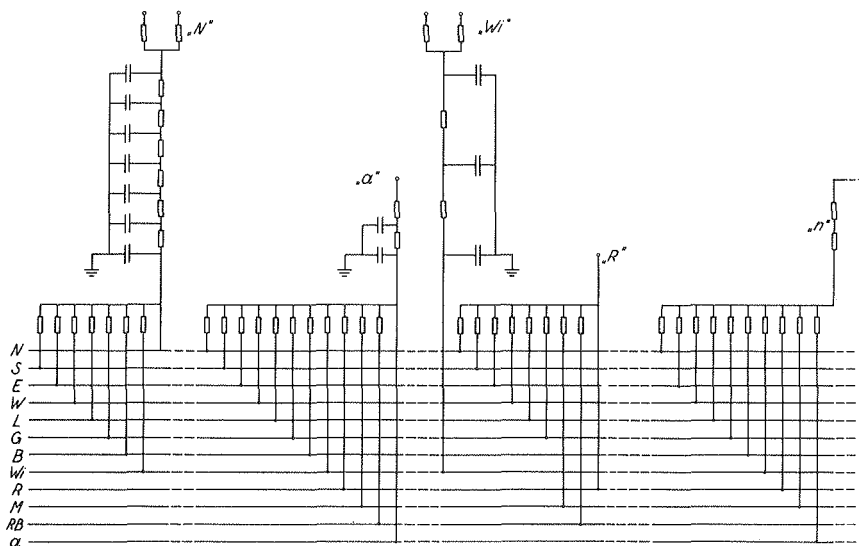


Fig. 4.

Forenklet diagram af det passive netværk: 'N' er een af de 8 'vægge' med strålingsmodstande til de andre 'vægge', 'a' er rumluft med overgangsmodstande, 'Wi' er 'vindue', 'R' en 'radiator' i rummet, 'n' en af 'personens' 6 sider. Alle modstande og kondensatorer er variable.

A simplified diagram of the passive network, showing: 'N', one of the 8 'walls' of the room with its radiation resistance to the other 'walls'. 'a', inside air with film resistances, 'Wi' 'window', 'R' 'radiator' in the room, 'n', one of the six sides of the 'man' in the room. All components are variable.

Un diagramme simplifié du réseau passif où les différents groupes nommés représentent: 'N', un des 8 'murs' de la chambre avec ses résistances de radiation vers les autres 'murs' de la chambre, 'a', l'air de la chambre avec sa résistance de surface, 'Wi', la fenêtre, 'R', un radiateur, 'n', un des six côtés de 'l'homme'. Toutes les résistances et tous condensateurs sont variables.

Vereinfachtes Schaltbild von einem Teil des passiven Netzes des Analogrechners: 'N', eine von den 8 'Wänden' des Zimmers mit Strahlungswiderständen zu den anderen Wänden, 'a', Raumluft mit Wärmeübergangswiderständen, 'Wi', Fenster, 'R', Strahlungsheizkörper, 'n', eine von den 6 Seiten des 'Menschen'. Alle Widerstände und Kapazitäten sind variabel.

Diagramma semplificato della rete passiva: 'N', una delle 8 'pareti' dell'ambiente con le sue resistenze di irraggiamento alle altre 'pareti', 'a', l'aria dell'ambiente con la sua resistenza termica di superficie, 'Wi', finestra, 'R', radiatore dell'ambiente, 'n', uno dei 6 fianchi della 'persona'. Tutte le resistenze e tutti i capacitori sono variabili.

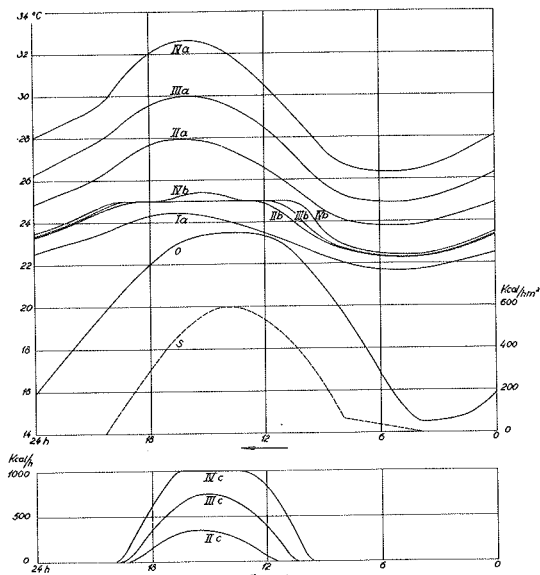


Fig. 5

Eksempel: SV-ventd rum. - An example: A room, facing SW. - Un exemple: Une chambre, la fenêtre vers sud-ouest. - Ein Beispiel: Ein Zimmer mit Fenster gegen SW. - Esempio: Ambiente esposto al sud-ovest.

0: Udvendig lufttemperatur. - Outside air temperature. - Température d'air extérieur. - Aussenlufttemperatur. - Temperature dell'aria esterna.

S: Globalstråling på SV-væg. - Global radiation on a SW-wall. - Radiation globale sur un mur orienté sud-ouest. - Globalstrahlung auf eine SW-wand. - Radiazione globale sulla parete sud-ovest.

Ia, IIa, IIIa, IVa: Rumlufttemperatur, uden køling. - Room air temperature without cooling. - Temperature d'air intérieure, sans réfrigération. - Raumlufttemperatur, ohne Kühlung. - Temperature dell'aria interna, senza raffreddamento.

IIb, IIIb, IVb: Rumlufttemperatur, med køling, max.1000 kcal/h
Room air temperature, with cooling, max.1000 kcal/h
Temperature d'air intérieure, avec réfrigération,
max. 1000 kcal/h
Raumlufttemperatur, mit Kühlung, max.1000 kcal/h
Temperatura dell'aria interna, con raffreddamento,
max.1000 kcal/h

IIc, IIIc, IVc: Kølelast, max. 1000 kcal/h. - Cooling load, max.
1000 kcal/h. - Charge frigorifique, max. 1000 kcal/h.
- Kühllast, max. 1000 kcal/h. - Carico di raffreddamento, max. 1000 kcal/h. -

I 14% Vinduesareal i % af gulvareal. - Window size in % of floor
II 28% area. - La Baie vitree % de la surface du plancher. - Fen-
III 42% : sterfläche % der Fussbodenfläche. - Dimensione della fi-
IV 55% nestra % dell'aria di pavimento. -

