



TALLINN UNIVERSITY OF
TECHNOLOGY

Tarbimise juhtimine elektri hinna järgi

Argo Rosin, Tehnikateaduste doktor
Elektroenergeetika ja mehhatroonika instituut
Inseneriteaduskond
30.11.2016



Sissejuhatus

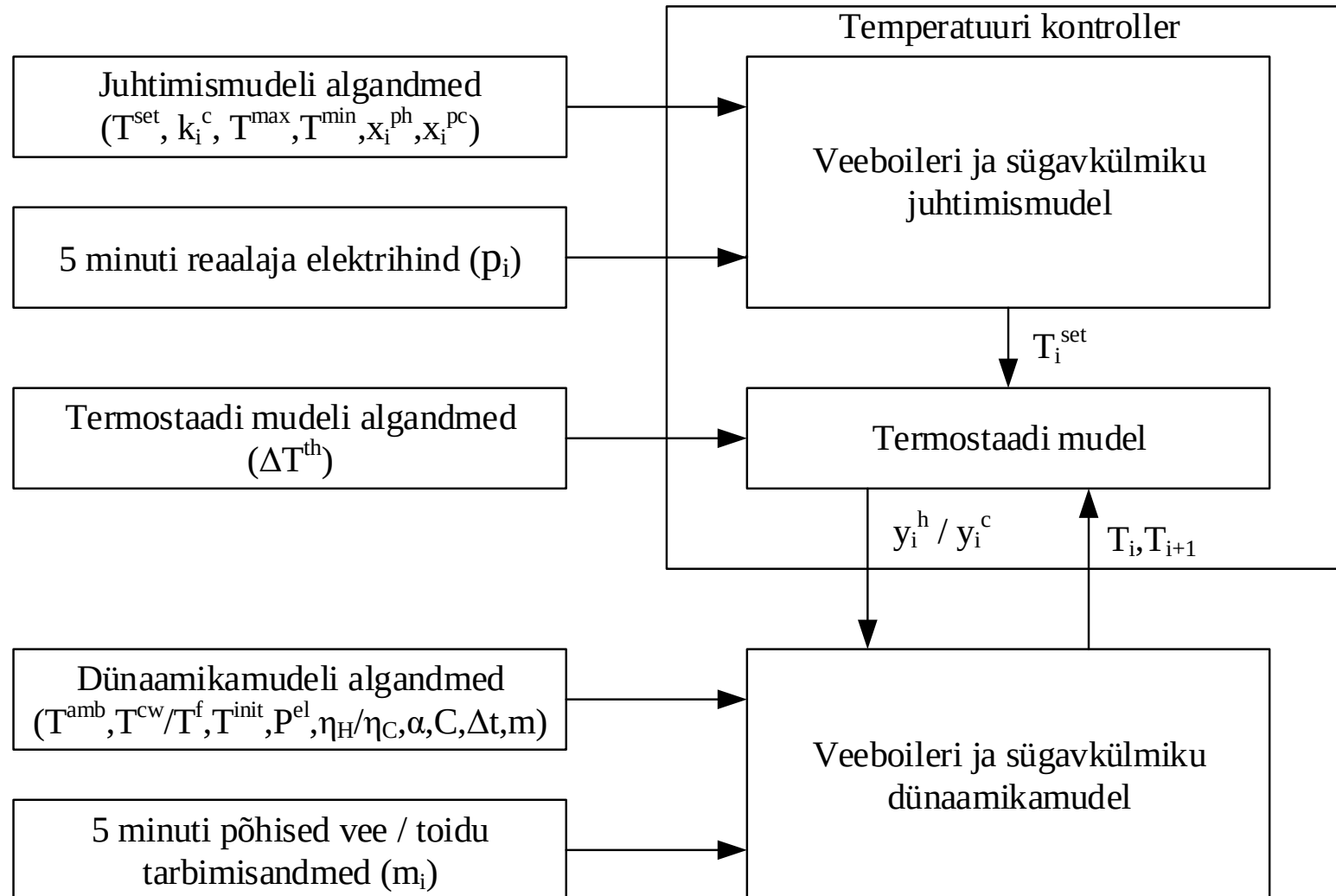
- Elektri hinnapõhine soojussalvestite juhtimine on kasvava tähtsusega nii elektrisüsteemi tasakaalustamise kui ka lõpptarbija kokkuhoiu kontekstis.
- Kui senised uuringud on keskendunud peamiselt võrgu tasakaalustamisele, siis vähem tähelepanu on pööratud lõppkasutaja mugavusele ja tasuvusele.
- Käesoleva uuringu eesmärk oli analüüsida hinnapõhiste juhtimismudelite tõhusust ja tasuvust, arvestades lõpptarbija mugavust. Uuringu käigus simuleeriti ja võrreldi olemasolevaid ja uusi juhtimismudeleid. Hinati erinevate mudelite ja reaalaaja hinna muutuse mõju lõpptarbija elektri maksumusele ja tarbimisele.
- Kuna tänased maksumuse ja energiasäästu arvutused ei arvesta mugavuskriteeriumi-tega, siis täiendati tõhususe hindamise metoodikat. Tõhusus määrati nii: mida väiksema temperatuuri muutuse juures saavutatakse maksimaalne maksumuse või energi kasutuse kokkuhoid, seda tõhusam on juhtimismudel.
- SÄÄST – kokkuhoid võrreldes millegagi
- TÕHUSUS – kui sääst mõjutab mugavust kõige vähem

Kasutatud kirjandus

1. Rosin, A.; Link, S.; Lehtla, M.; Martins, J.; Drovtnar, I.; Roasto; I. (2017). Performance and feasibility analysis of electricity price based control models for thermal storages in 2 households. Sustainable Cities and Society, 32, 366–374.10.1016/j.scs.2017.04.008.



Süsteemi mudel



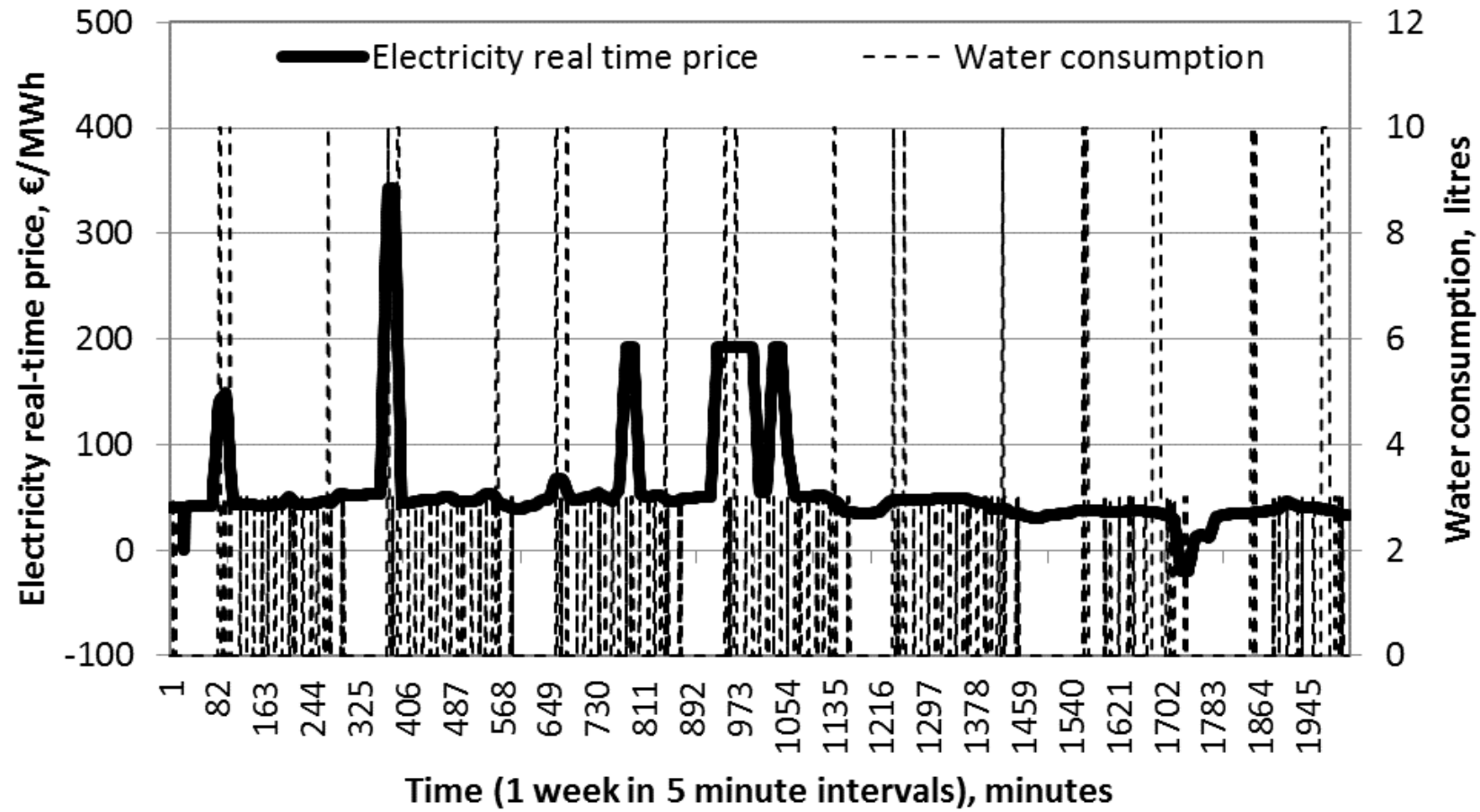


Tehnilised lähteandmed veeboilerite ja sügavkülmikute simulatsiooniks

Simulatsiooniparameetri nimetus	VEEBOILER	Sügavkülmik
Ruumi temperatuur, T^{amb} (°C)	20	20
Külma vee / toidu algtemperatuur, T^{cw}/T^f (°C)	10	-1
Seadme sisemine algtemperatuur, T^{init} (°C)	60	-18
Seadme nimivõimsus, P^{el} (kW)	2.1	0.12
Seadme kasutegur, η_H/η_C , %	90	400
Termiline dispersioon, α (kW/°C)	0.001806	0.000531
Soojusmahtuvus, C (kWh/°C)	0.158841	0.000453
Diskreetimisaeg, Δt (hours)	0.08333	0.08333
Vee / toidu mass, m (kg)	200	170
Termostaadi hüsterees, ΔT^{th} (°C)	5	4
Soojendus ja külmutuselemendi olek y_i^h / y_i^c (boolean)	{0,1}	{0,1}

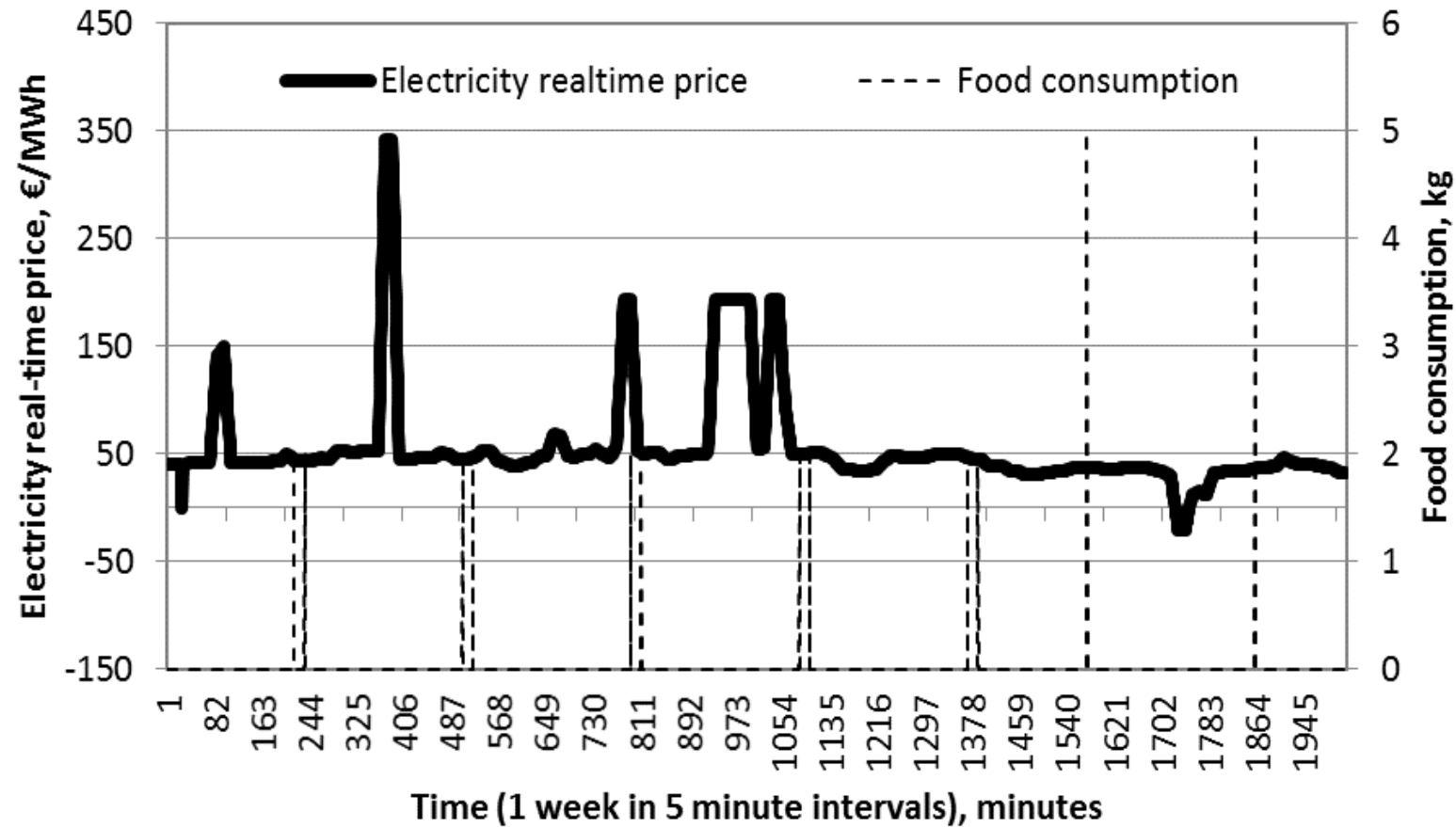


Sooja vee tarbimine koos hinnamuutustega





Toidu tarbimine koos hinnamuutustega





Elektriboileri juhtimine ja dünaamika

$$m \cdot C_p \cdot \frac{dT_i}{dt} = P_i^{el} \cdot \eta_H \cdot y_i^h - \frac{dm_i}{dt} \cdot C_p \cdot (T_i - T_i^{cw}) - \alpha \cdot (T_i - T_i^{amb})$$

Simple two-step control

$$T_i > T_i^{set} + \frac{\Delta T^{th}}{2} \Rightarrow y_i^h = 0 \qquad T_i < T_i^{set} - \frac{\Delta T^{th}}{2} \Rightarrow y_i^h = 1$$

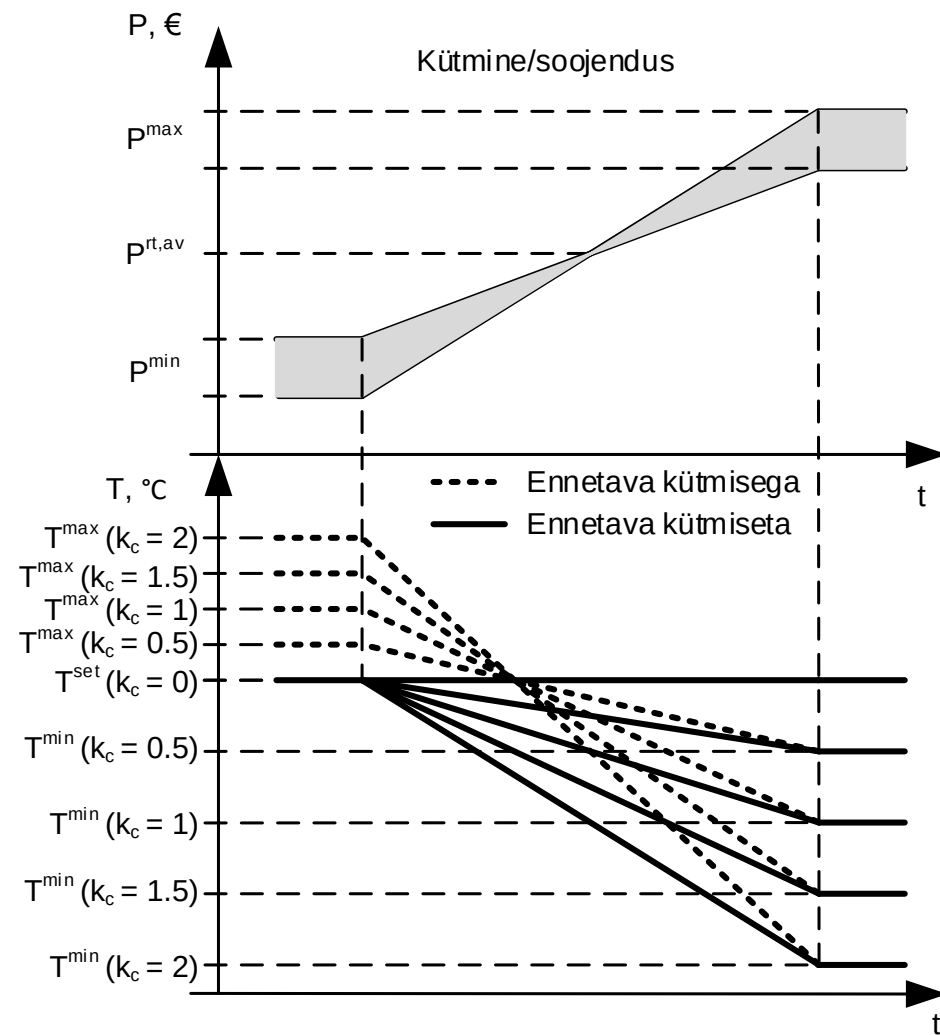
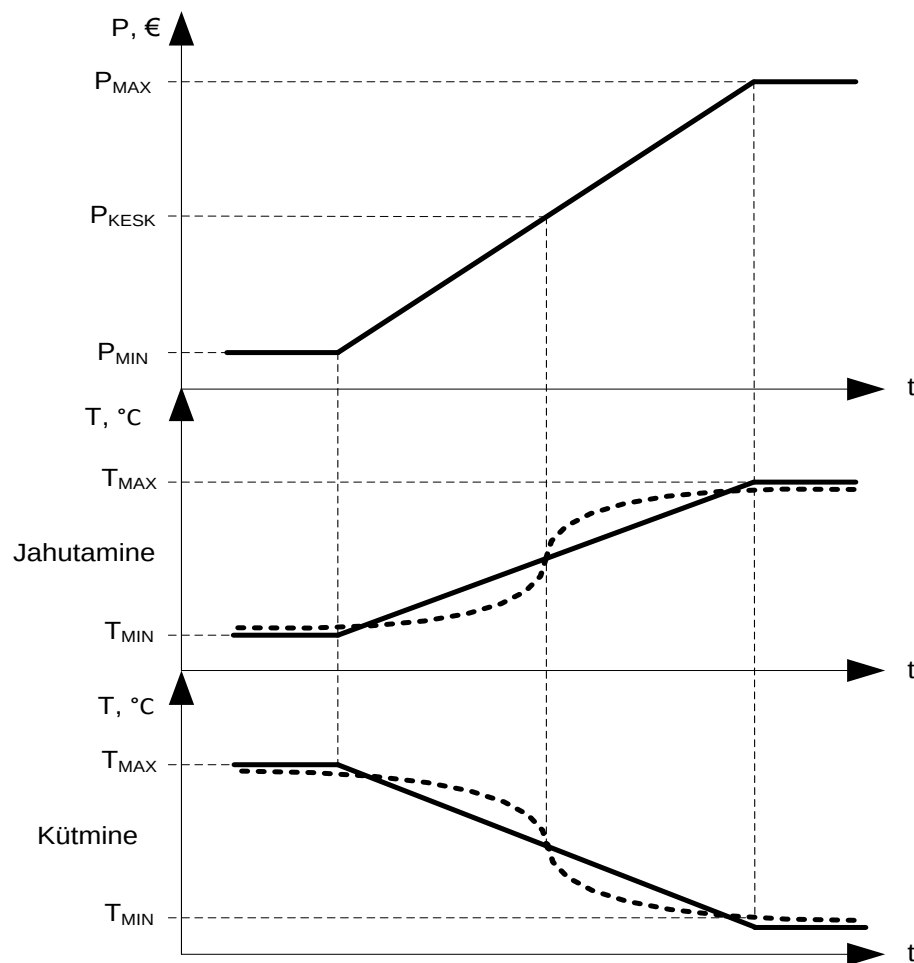
Sügavkülmiku juhtimine ja dünaamika

$$m \cdot C_p \cdot \frac{dT_i}{dt} = -P_i^{el} \cdot \eta_c \cdot y_i^c - \frac{dm_i}{dt} \cdot C_p \cdot (T_i - T_i^f) - \alpha \cdot (T_i - T_i^{amb})$$

Simple two-step control

$$T_i > T_i^{set} + \frac{\Delta T^{th}}{2} \Rightarrow y_i^h = 1 \qquad T_i < T_i^{set} - \frac{\Delta T^{th}}{2} \Rightarrow y_i^h = 0$$

Juhtimine graafilises vaates





Veeboileri temperatuuri seadeväärtuse juhtimine

JUHTIMISMUDEL	VEEBOILER TEMPERATUURI SEADEVÄÄRTUS
A	$T_{i,\text{set}} = T^{\text{max}} - k_i^c (p_i - p_i^{\text{min}}) (T^{\text{max}} - T^{\text{min}}) / (p_i^{\text{max}} - p_i^{\text{min}})$
B	$T_{i,\text{set}} = T^{\text{set}} - k_i^c (p_i - p_i^{\text{rt,av}}) T^{\text{min}} - T^{\text{set}} / p_i^{\text{rt,dev}}$
G	$T_{i,\text{set}} = T^{\text{set}} - k_i^c \Delta T^{\text{th}} \arctan(p_i - p_i^{\text{rt,av}})$
H	$p_i \geq p_i^{\text{rt,av}} \rightarrow T_{i,\text{set}} = T^{\text{min}} \quad p_i < p_i^{\text{rt,av}} \rightarrow T_{i,\text{set}} = T^{\text{max}}$

Sügavkülmiku temp. seadeväärtuse juhtimine

JUHTIMISMUDEL	SÜGAVKÜLMIKU TEMPERATUURI SEADEVÄÄRTUS
A	$T_{i,\text{set}} = T^{\text{min}} + k_i^c (p_i - p_i^{\text{min}}) (T^{\text{max}} - T^{\text{min}}) / (p_i^{\text{max}} - p_i^{\text{min}})$
B	$T_{i,\text{set}} = T^{\text{set}} + k_i^c (p_i - p_i^{\text{rt,av}}) T^{\text{max}} - T^{\text{set}} / p_i^{\text{rt,dev}}$
G	$T_{i,\text{set}} = T^{\text{set}} + k_i^c \Delta T^{\text{th}} \arctan(p_i - p_i^{\text{rt,av}})$
H	$p_i \geq p_i^{\text{rt,av}} \rightarrow T_{i,\text{set}} = T^{\text{max}} \quad p_i < p_i^{\text{rt,av}} \rightarrow T_{i,\text{set}} = T^{\text{min}}$



Mugavusseadete järgi temperatuuri piirväärtuste määramine

Temperatuuri piirväärtuste arvutamine toimub mugavusseadet arvestades vastavalt allolevale tabelile

Parameeter	MUGAVUS- (SÄÄSTU) KOEFIITSIENT, K_I^C	Veeboiler		Sügavkülmik	
		Temp. ülemine piir $T_{\max}$ (°C)	Temp. alumine piir $T_{\min}$ (°C)	Temp. ülemine piir $T_{\max}$ (°C)	Temp. alumine piir $T_{\min}$ (°C)
Suurim sääst	2	$T_{\text{set}} + x_{i,\text{ph}} k_i^c \Delta T^{\text{th}} / 2$	$T_{\text{set}} - k_i^c \Delta T^{\text{th}}$	$T_{\text{set}} + k_i^c \Delta T^{\text{th}}$	$T_{\text{set}} - x_{i,\text{pc}} k_i^c \Delta T^{\text{th}} / 2$
Keskmine sääst	1.5				
Tasakaal	1				
Keskmine mugavus	0.5				
Suurim mugavus	0				



Mudelite tõhususe hindamine

- Mudelite tõhususe analüüs põhineb maksumuse või energiasäästu ja temperatuuri muutuse suhte arvutamisel. Teisisõnu kui palju raha või elektrit säästetakse ühe kraadi temperatuuri muutuse korral.
- Mudel on suurima tõhususega, kui vähima temperatuuri muutuse korral saavutatakse suurim energia või kulude sääst.
- Konkreetse mugavuskoefitsiendi juures tõhususe arvutamisel lähtutakse sellest kuidas muutus maksumus, energiatarve ja temperatuur võrreldes suurima mugavusega olukorrale.

$$k_{QT}^H = [\sum Q(k_i^c=0) - \sum Q(k_i^c)] / |T(k_i^c=0)^{\min} - T(k_i^c)^{\min}|$$

$$k_{ET}^H = [\sum E(k_i^c=0) - \sum E(k_i^c)] / |T(k_i^c=0)^{\min} - T(k_i^c)^{\min}|$$

$$k_{QT}^C = [\sum Q(k_i^c=0) - \sum Q(k_i^c)] / |T(k_i^c)^{\max} - T(k_i^c=0)^{\max}|$$

$$k_{ET}^C = [\sum E(k_i^c=0) - \sum E(k_i^c)] / |T(k_i^c)^{\max} - T(k_i^c=0)^{\max}|$$



Veeboileri juhtimine ilma ennetava soojenduseta

- 200 liitrise veeboiler, tarbimine 10...12 kWh päevas
- elektrihinna 10 senti/kWh puhul aastas kulu 365...438€
- rahaline sääst 131...158€ aastas ehk 11...14€ kuus

Var.	Mod.	MUGAVUSE (SÄÄSTU) KOEFITSIENT, K_T^C				
		0	0.5	1	1.5	2
$k_E^{\%}$ (%)	A	-	1	5	9	13
	B	-	1	3	5	7
	C	-	0	2	3	5
	D	-	3	9	13	18
	E	-	0	1	2	4
	F	-	1	5	9	13
	G	-	3	5	7	9
	H	-	3	6	7	9
$k_Q^{\%}$ (%)	A	-	4	13	29	36
	B	-	9	15	23	32
	C	-	10	16	25	33
	D	-	9	14	18	26
	E	-	3	13	20	30
	F	-	4	13	29	36
	G	-	11	17	25	34
	H	-	7	17	25	34

Var.	Mod.	MUGAVUSE (SÄÄSTU) KOEFITSIENT, K_T^C				
		0	0.5	1	1.5	2
k_{ET}^H (kWh/°C)	A	-	2.08	1.27	1.54	1.69
	B	-	52.5	0.98	0.86	0.91
	C	-	3.50	0.84	1.16	1.23
	D	-	1.17	1.70	2.16	2.21
	E	-	0.00	0.79	0.87	1.12
	F	-	2.08	1.27	1.54	1.69
	G	-	1.16	1.25	1.19	1.21
	H	-	1.26	1.31	1.19	1.21
k_{QT}^H (€/°C)	A	-	0.43	0.22	0.34	0.33
	B	-	46.6	0.30	0.30	0.30
	C	-	10.37	0.47	0.58	0.57
	D	-	0.26	0.18	0.21	0.22
	E	-	1.99	0.57	0.54	0.59
	F	-	0.43	0.22	0.34	0.33
	G	-	0.28	0.27	0.30	0.30
	H	-	0.19	0.27	0.30	0.30



Sügavkülmiku juhtimine ilma ennetava jahutamiseta

- 284 liitrise sügavkülmkirst A+, tarbimine aastas 265 kWh
- elektrihinna 10 senti/kWh puhul aastas kulu 26,5€
- rahaline sääst 7,5€ aastas ehk 0,65€ kuus

Var.	Mod.	MUGAVUSE (SÄÄSTU) KOEFIGITSIENT, K_I^C				
		0	0.5	1	1.5	2
$k_E^{\%}$ (%)	A	-	1	12	12	12
	B	-	2	3	0	8
	C	-	1	1	0	6
	D	-	0	11	12	12
	E	-	1	2	1	3
	F	-	1	12	12	12
	G	-	3	6	16	16
	H	-	3	6	16	16
$k_Q^{\%}$ (%)	A	-	16	23	27	26
	B	-	17	18	9	24
	C	-	14	17	16	20
	D	-	15	24	28	28
	E	-	16	18	16	17
	F	-	16	23	27	26
	G	-	7	18	26	26
	H	-	7	18	26	26

Var.	Mod.	MUGAVUSE (SÄÄSTU) KOEFIGITSIENT, K_I^C				
		0	0.5	1	1.5	2
k_{ET}^C (kWh/°C)	A	-	0.010	0.037	0.042	0.024
	B	-	0.029	0.011	0.000	0.044
	C	-	0.010	0.004	0.000	0.017
	D	-	0.000	0.040	0.024	0.024
	E	-	0.049	0.033	0.006	0.011
	F	-	0.010	0.037	0.042	0.024
	G	-	0.015	0.013	0.030	0.030
	H	-	0.015	0.013	0.030	0.030
k_{QT}^C (€/°C)	A	-	0.0075	0.0036	0.0049	0.0027
	B	-	0.0117	0.0029	0.0011	0.0072
	C	-	0.0068	0.0036	0.0022	0.0032
	D	-	0.0036	0.0046	0.0029	0.0029
	E	-	0.0368	0.0138	0.0048	0.0029
	F	-	0.0075	0.0036	0.0049	0.0027
	G	-	0.0017	0.0022	0.0026	0.0026
	H	-	0.0017	0.0022	0.0026	0.0026

KOKKUVÕTE

Parim mudel sõltuvalt mugavuskoefitsiendist ja säästu liigist

Süsteemi kirjeldus	Säästu liik	PARIM JUHTIMISMUDEL VALITUD MUGAVUSE (SÄÄSTU) KOEFITSIENDI KORRAL, K_T^C			
		0.5	1	1.5	2
Elektiboiler, ennetava kütteta	elekter	D, G, H	D	D	D
	maksumus	G	G,H	A, F	A, F
Elektiboiler, ennetava küttega	elekter	D	D	D	D
	maksumus	C,G	A,F	F	F
Sügavkülmik, ennetava kütteta	elekter	G,H	A,F	G,H	G,H
	maksumus	B	D	D	D
Sügavkülmik, ennetava jahutusega	elekter	B	D,F	D,F	D,F
	maksumus	D,E,F,G,H	D,F	D,F	D,F

Parim mudel sõltuvalt mugavuskoefitsiendist ja tõhususe liigist

Süsteemi kirjeldus	Tõhususe liik	PARIM JUHTIMISMUDEL VALITUD MUGAVUSE (SÄÄSTU) KOEFITSIENDI KORRAL, K_T^C			
		0.5	1	1.5	2
Elektiboiler, ennetava kütteta	kWh/°C	B	D	D	D
	€/°C	B	E	C	E
Elektiboiler, ennetava küttega	kWh/°C	D	D	D	D
	€/°C	A	C	C	C
Sügavkülmik, ennetava kütteta	kWh/°C	E	D	A,F	B
	€/°C	E	E	A,F	B
Sügavkülmik, ennetava jahutusega	kWh/°C	E	D,F	F	F
	€/°C	E	G,H	C	C



TALLINN UNIVERSITY OF
TECHNOLOGY

TALLINN UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

Ehitajate street 5, 19086 Tallinn, Estonia

Phone +372 620 3708 (Mon-Fri 8.30 AM – 5.00 PM)

argo.rosin@ttu.ee

ttu.ee