

# Ειδικά Συστήματα Ελέγχου Πλοίου 2017

## Συστήματα Μείωσης Ρύπων Μέρος Β-Συστήματα Ελέγχου

Γ. Παπαλάμπρου

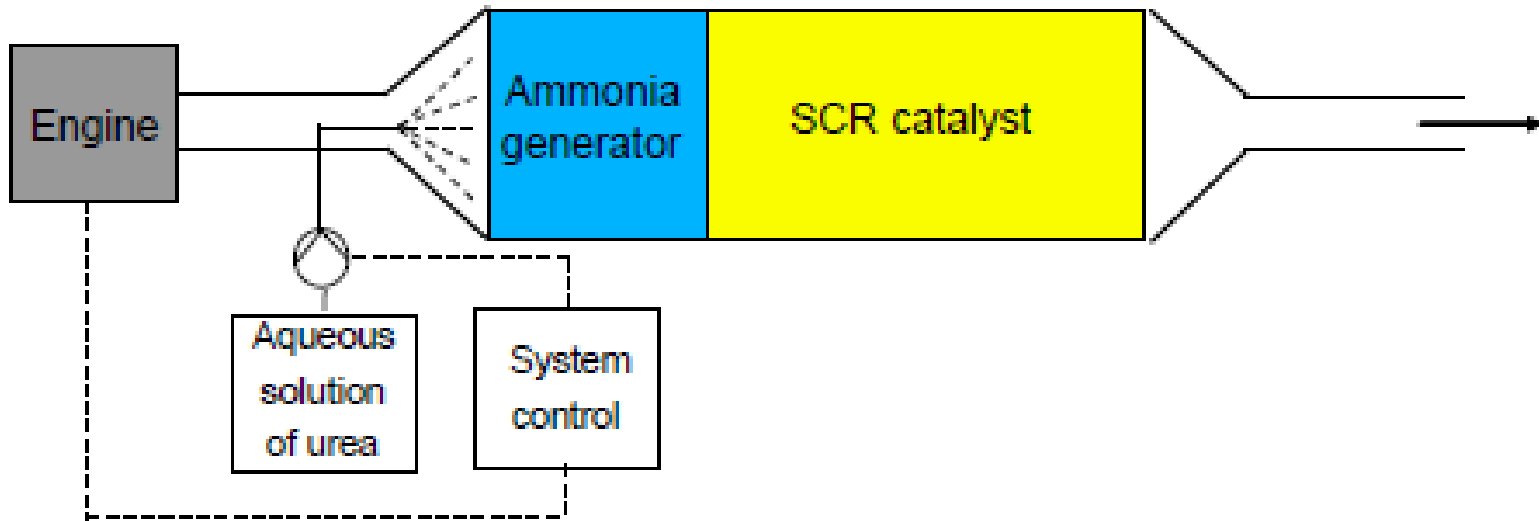
ΣΝΜΜ-ΕΜΠ

9/5/2017

# Μέρος Β

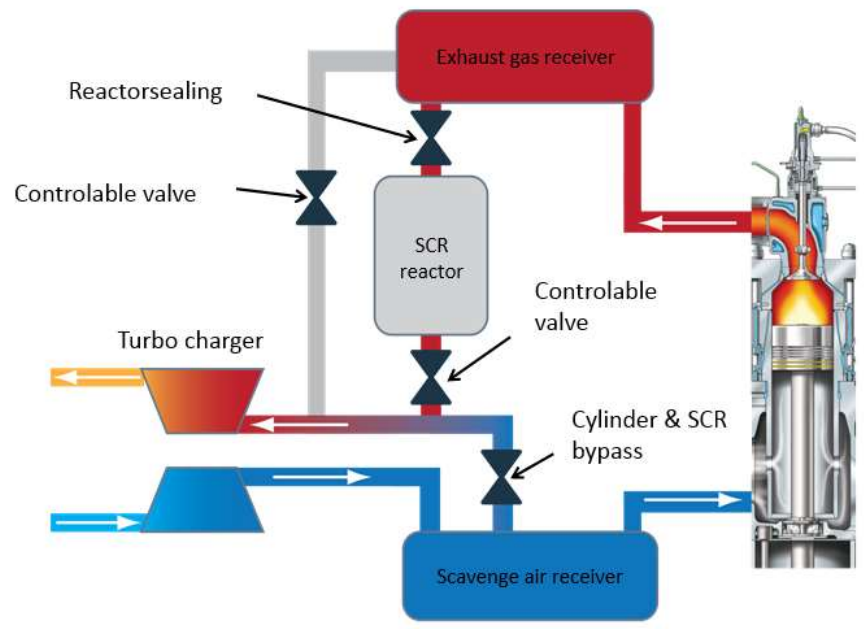
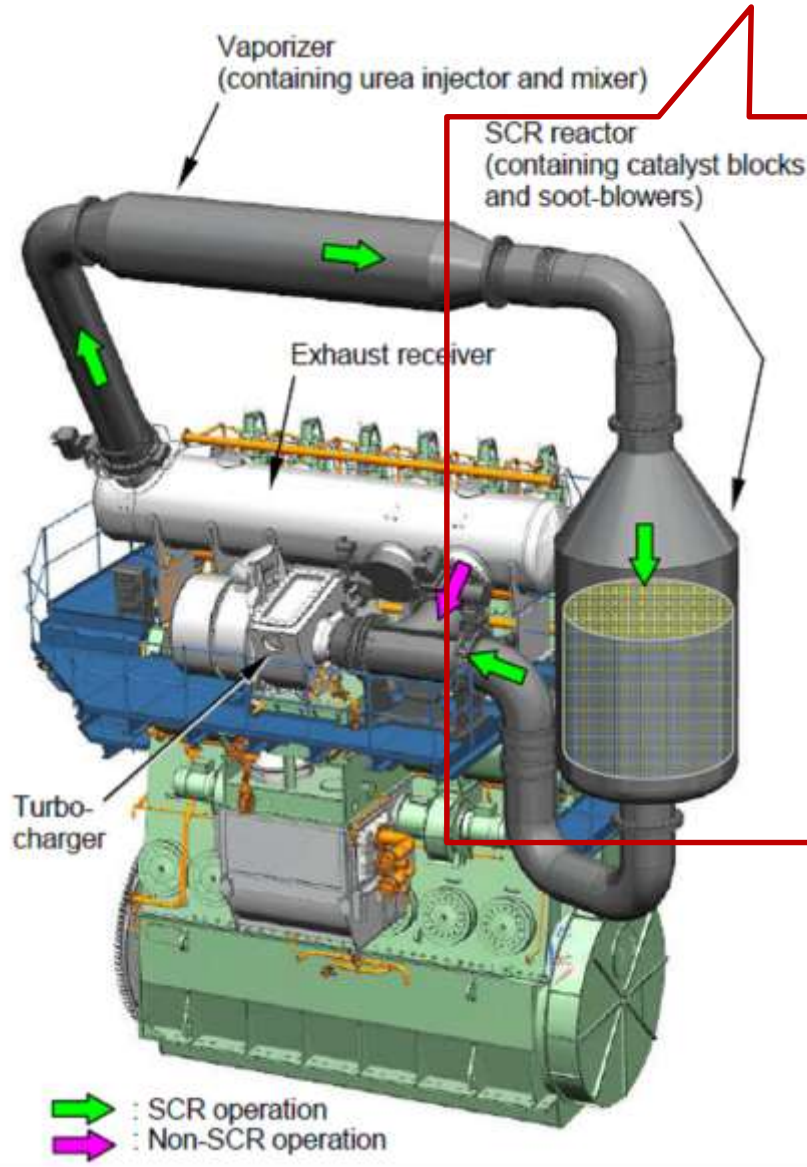
- Διεργασία SCR
- Μαθηματικά μοντέλα
- Σχεδιασμός ελεγκτών
- (Homework HW4)

# Επιλεκτική Καταλυτική Μείωση - SCR



- Στόχος: η μείωση αέριων ρύπων NO<sub>x</sub>
- Ένα σύστημα SCR (SELECTIVE CATALYTIC REDUCTION) αποτελείται από τα εξής υποσυστήματα:
  - Καταλυτικός μετατροπέας
  - Σύστημα ελέγχου
  - Παροχή ουρίας

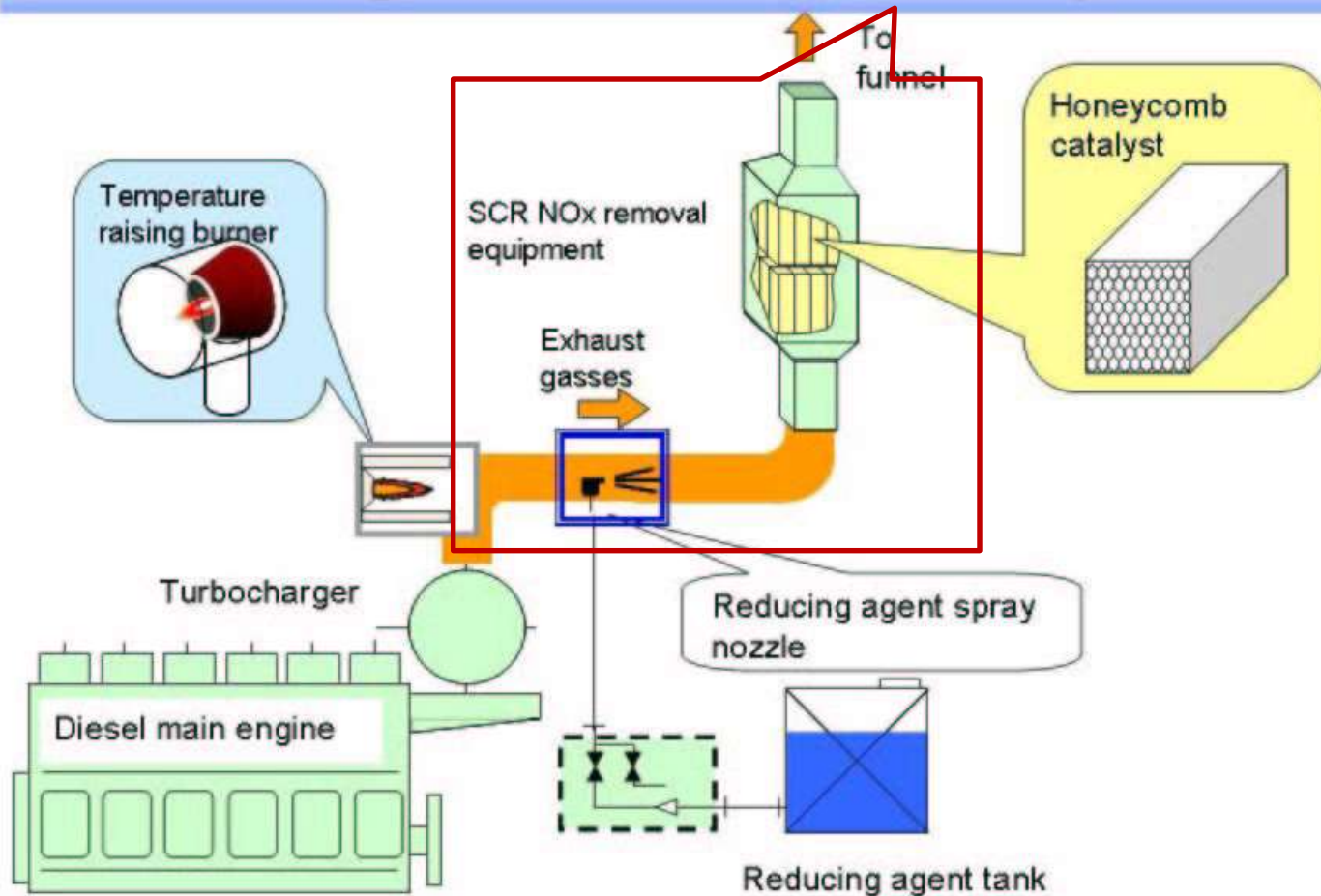
# SCR σε Ναυτικούς Κινητήρες



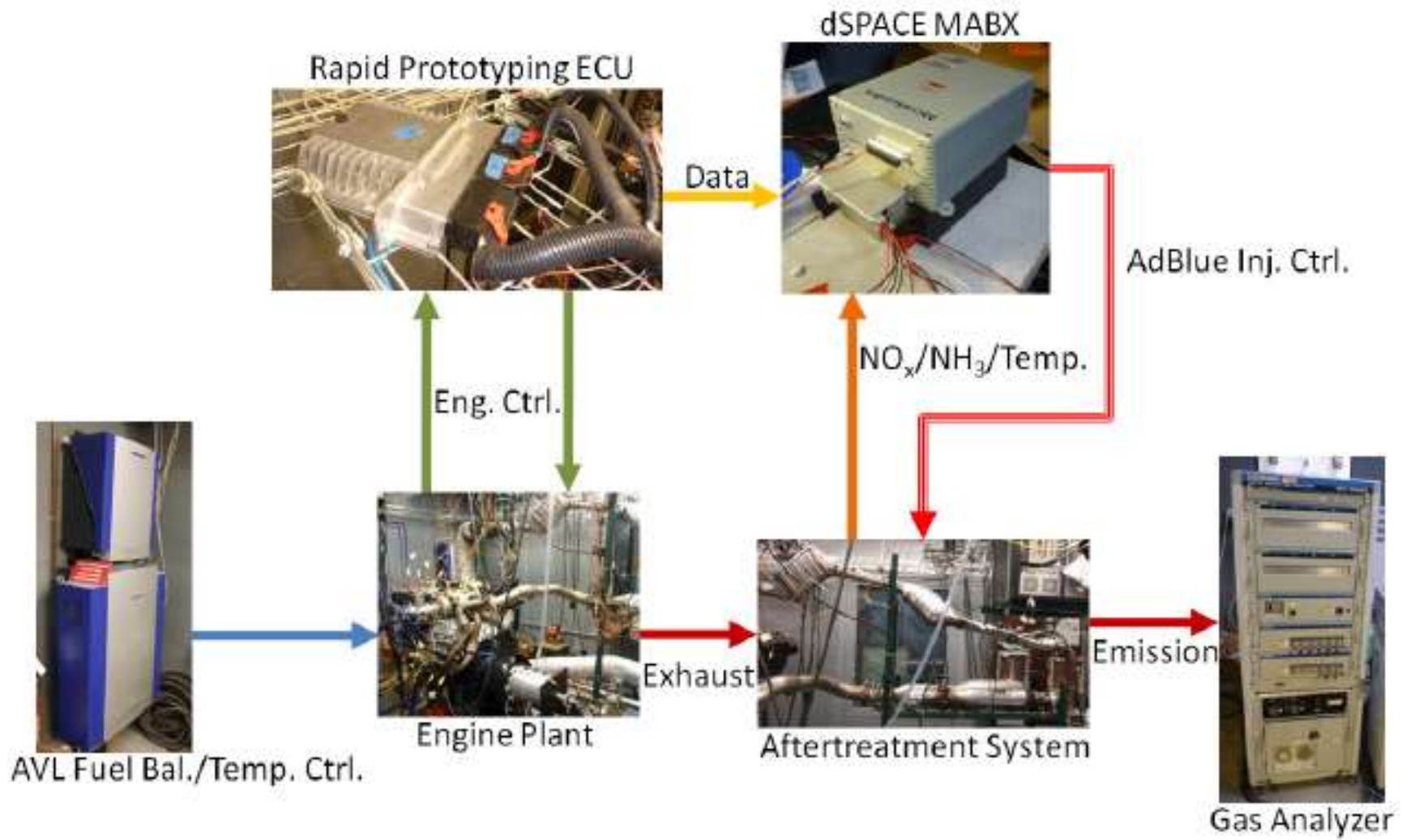
Hitachi Zosen Corporation, 2014, two-stroke marine diesel engines.

# SCR σε Ναυτικούς Κινητήρες

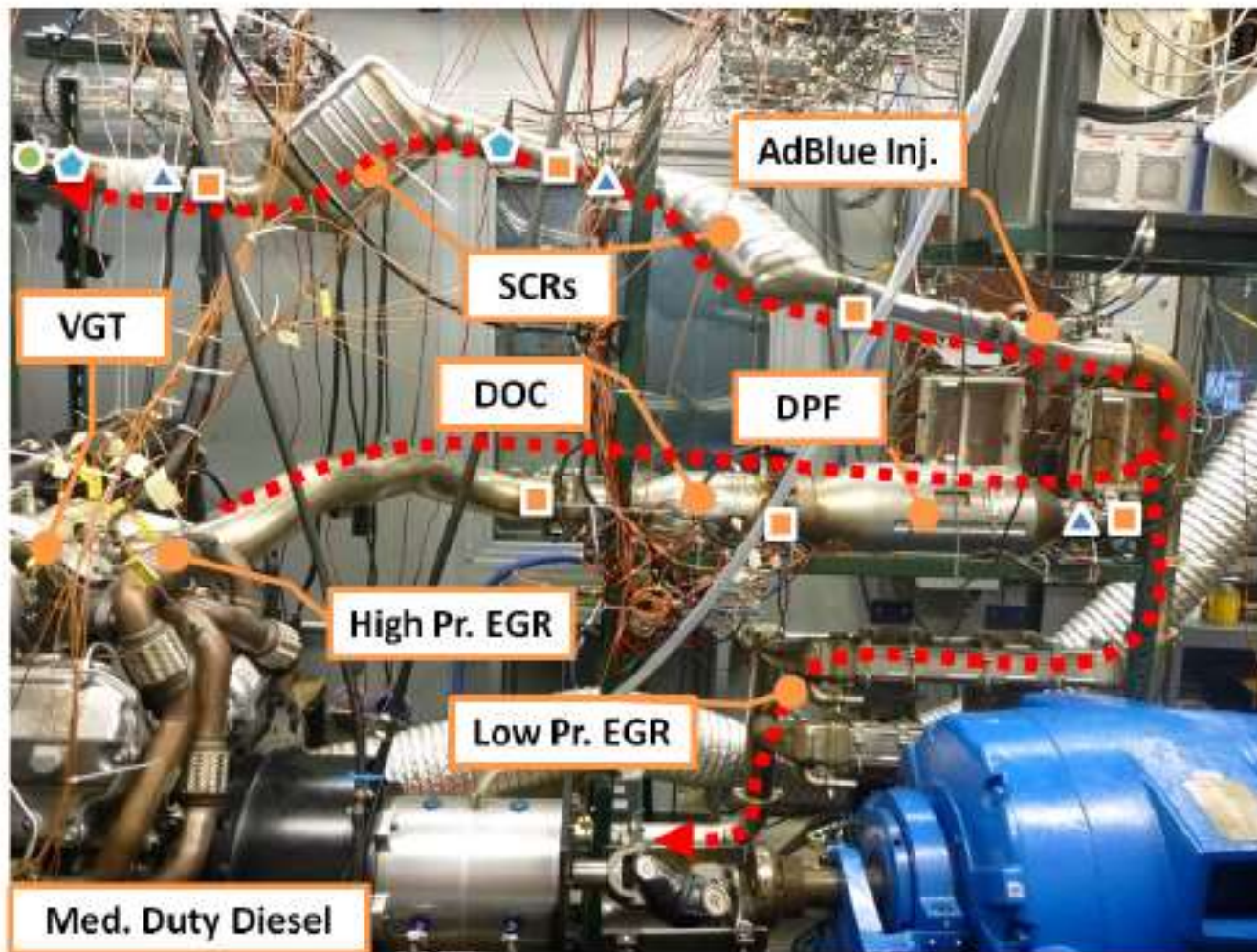
## Image of SCR NOx removal system



# SCR Control: Test beds



# SCR Control: Test beds



- Horiba
- ▲ NO<sub>x</sub> Sen.
- Therm.
- ◆ NH<sub>3</sub> Sen.
- ▲ Exh. Gas

PhD Hsieh, Ohio State, 2010

# Σύστημα Ελέγχου SCR

(12) **United States Patent**  
**van Nieuwstadt et al.**

---

(54) **EXHAUST GAS AFTERTREATMENT  
SYSTEMS**

(75) Inventors: **Michiel J. van Nieuwstadt**, Ann Arbor,  
MI (US); **Devesh Upadhyay**, Dearborn,  
MI (US)

(73) Assignee: **Ford Global Technologies, LLC**,  
Dearborn, MI (US)

(10) **Patent No.: US 7,093,427 B2**

(45) **Date of Patent: Aug. 22, 2006**

Proceedings of IMECE2002  
ASME International Mechanical Engineering Congress & Exposition  
November 17–22, 2002, New Orleans, Louisiana

**IMECE2002-32104**

**MODELING OF A UREA SCR CATALYST WITH AUTOMOTIVE APPLICATIONS**

Devesh Upadhyay/Ford Motor Company

Michiel Van Nieuwstadt/Ford Motor Company



# Σύστημα Ελέγχου SCR

(12) **United States Patent**  
van Nieuwstadt et al.

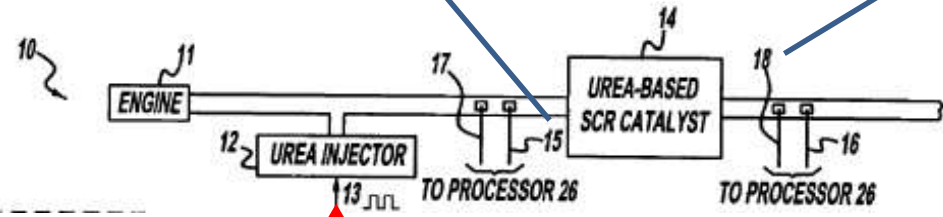
Δύο αισθητήρες NOx ανάντι (15) και κατάντι (16) του καταλύτη SCR, μετρούν τη συγκέντρωση στις αντίστοιχες θέσεις.

Δύο αισθητήρες θερμοκρασίας ανάντι (17) και κατάντι (18) του καταλύτη SCR, μετρούν θερμοκρασίες.

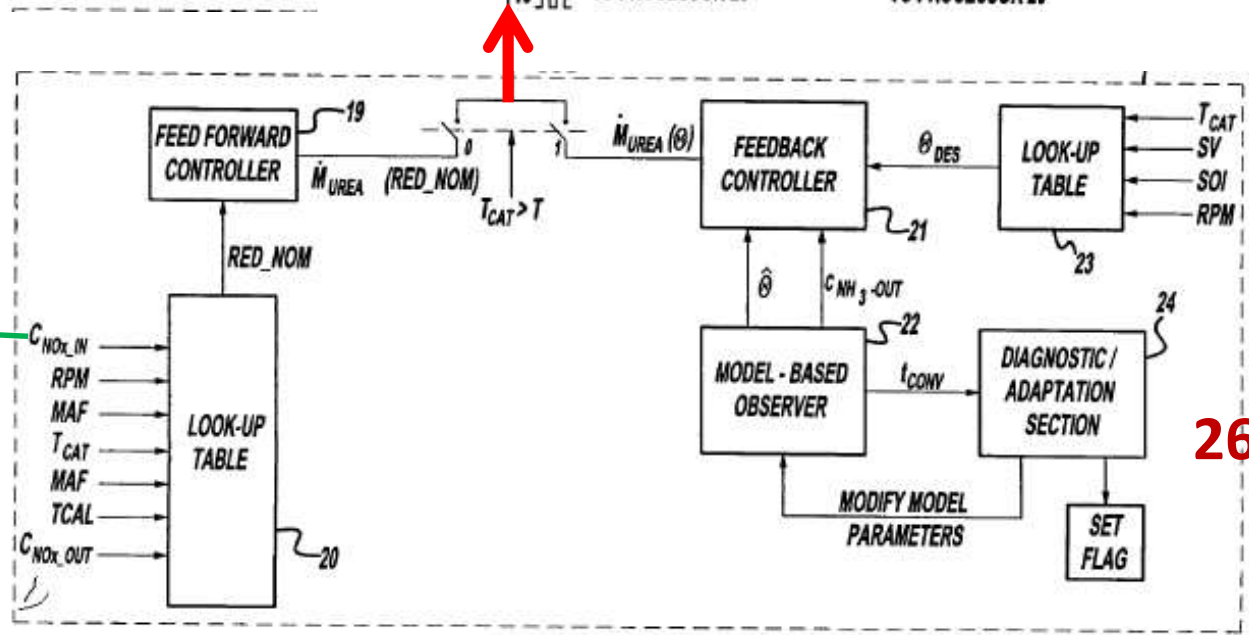
Οι μετρήσεις τους  $C_{NOx,in}$ ,  $C_{NOx,out}$  δίνονται στον Η/Υ ελέγχου 26.

Οι μετρήσεις δίνονται στον Η/Υ ελέγχου 26.

(54) EXHAUST GAS AFTERTREATMENT SYSTEMS  
(75) Inventors: Michiel J. van Nieuwstadt, Ann Arbor, MI (US); Devesh Upadhyay, Dearborn, MI (US)  
(73) Assignee: Ford Global Technologies, LLC, Dearborn, MI (US)  
(10) Patent No.: US 7,093,427 B2  
(45) Date of Patent: Aug. 22, 2006



**10. SCR**



**26. Ελεγκτές**

# Σύστημα Ελέγχου SCR

(12) **United States Patent**  
van Nieuwstadt et al.

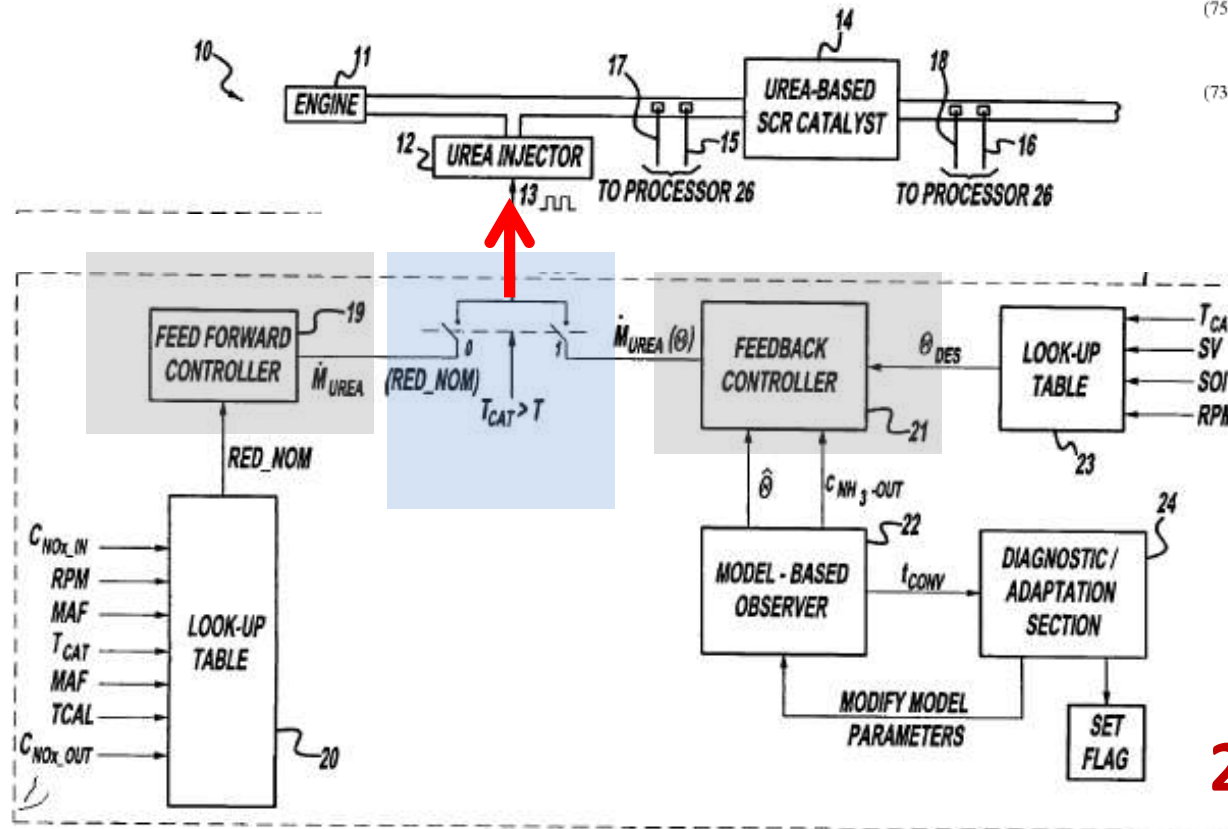
(54) **EXHAUST GAS AFTERTREATMENT SYSTEMS**

(75) Inventors: **Michiel J. van Nieuwstadt**, Ann Arbor, MI (US); **Devesh Upadhyay**, Dearborn, MI (US)

(73) Assignee: **Ford Global Technologies, LLC**, Dearborn, MI (US)

(10) Patent No.: **US 7,093,427 B2**

(45) Date of Patent: **Aug. 22, 2006**



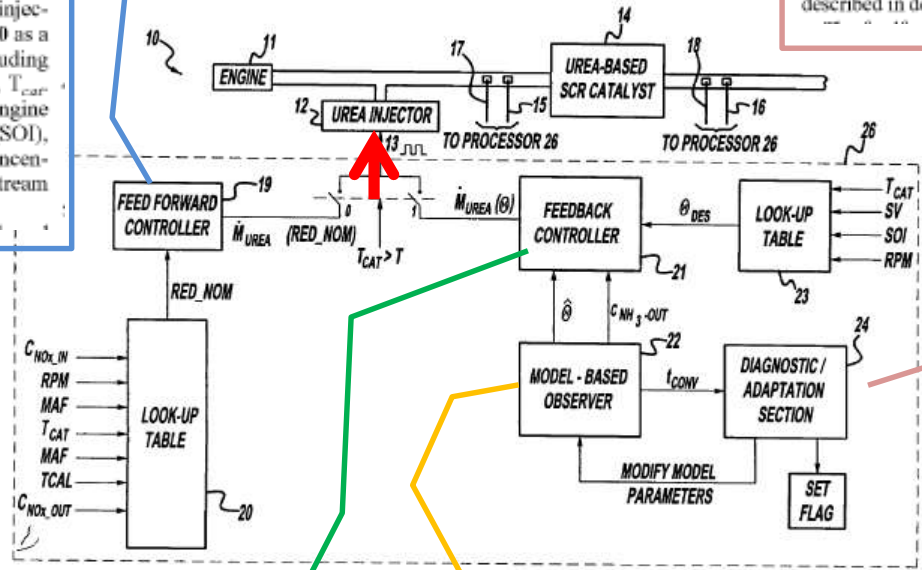
## 26. Ελεγκτές

- Ο Η/Υ ελέγχου 26 διαθέτει έναν ελεγκτή πρόσω-τροφοδότησης (feedforward) 19 και έναν ελεγκτή ανα-τροφοδότησης (feedback) 21
- Η επιλογή ανάμεσα στους δύο ελεγκτές γίνεται με βάση ορισμένες συνθήκες λειτουργίας, όπως θερμοκρασία στον καταλύτη, κλπ.

# Σύστημα Ελέγχου SCR-Ανασκόπηση

The feedforward control is based on map-based nominal reductant injection. The nominal amount of reductant injection, RED\_NOM, is determined from a lookup table 20 as a function of a plurality of operating parameters including engine operating conditions and catalyst temperature,  $T_{cat}$ . More particularly, here RED\_NOM is a function of engine speed, engine load, EGR level, start of fuel injection (SOI), catalyst temperature,  $T_{cat}$ , space velocity (SV), and concentration of NOx upstream ( $C_{NOx\_in}$ ) and downstream ( $C_{NOx\_out}$ ) of the SCR catalyst.

Processor 26 comprises a feedforward controller 19 and a feedback controller 20 and selects between the two based on operating conditions to produce the control signal,  $m_{urea}$  on line 13. The control strategy for reductant injection is described in detail with particular reference to FIG. 2 below.



The feedback control is accomplished via a model-based observer 22. The model of the SCR catalyst is developed from first principles and uses global kinetics of the relevant reactions. The influence parameters of the model are estimated from empirical data for the catalyst of interest. The inputs to the observer are the concentration of injected ammonia and concentration of NOx upstream of the SCR catalyst. The outputs of observer 22 are estimates of the amount of stored ammonia in the SCR catalyst and of the concentration of gas phase ammonia downstream of the SCR catalyst. In this embodiment, the stored ammonia

Feedback controller 21 could be defined as any controller, U, that renders the closed loop system asymptotically stable such as, for example:

$$U = K \cdot e, \text{ or}$$

$$U = K \cdot \text{sign}(e)$$

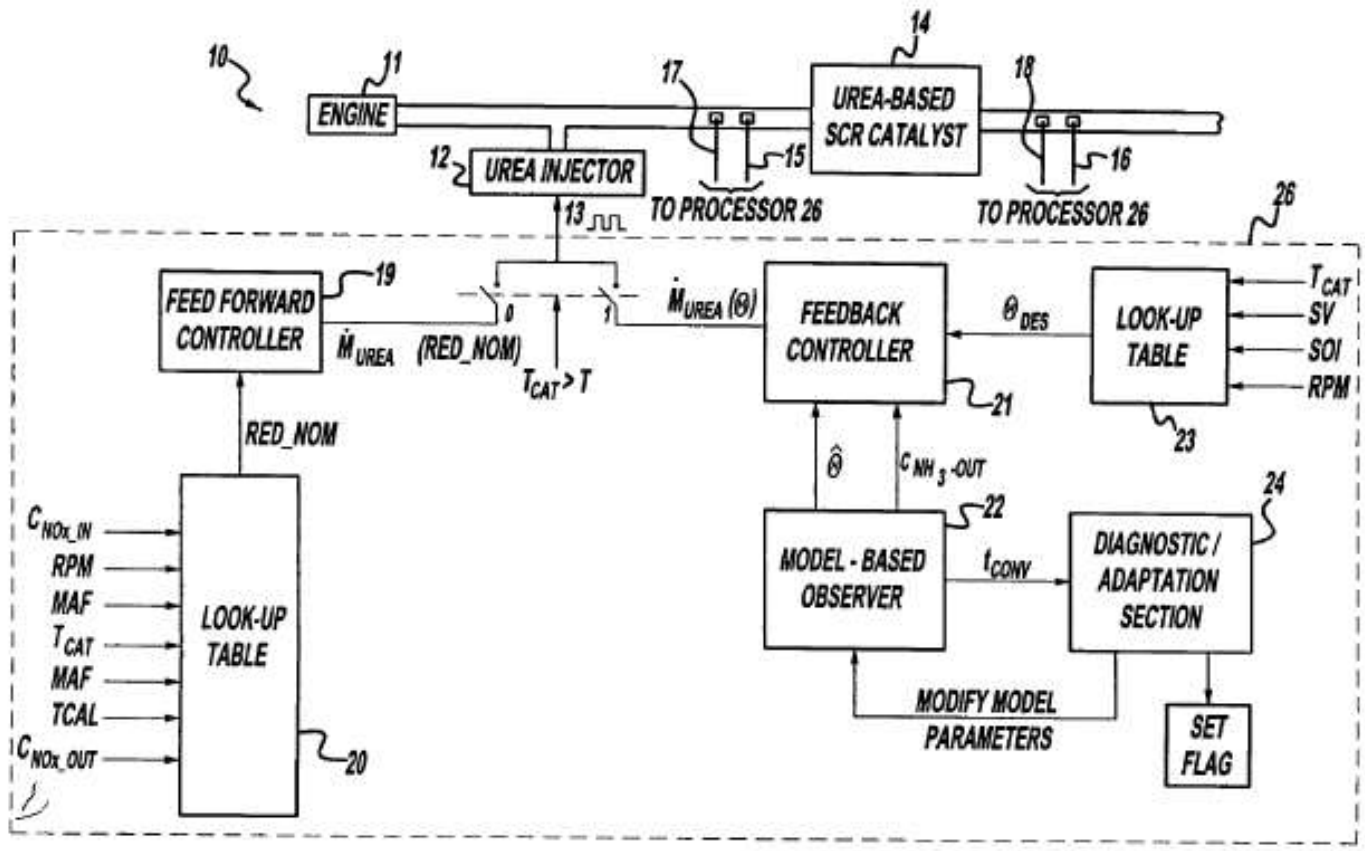
Since the only measurement available in this system is the NOx concentration downstream of the SCR catalyst, the observer for the surface coverage fraction and the ammonia slip concentration takes the form:

$$\frac{d}{dt} \hat{x} = f(\hat{x}, U, d) + L \cdot (\hat{C}_{NOx} - C_{NOx})$$

where  $\hat{x} = [\hat{C}_{NOx}, \hat{\theta}, \hat{C}_{NH3}]$  denotes the observer states,  $f$  denotes the nonlinear system dynamics of the SCR catalyst as shown in Equations 1a and 1b, and L is any function of the error  $e = (\hat{C}_{NOx} - C_{NOx})$  which renders the dynamics of the error system asymptotically stable. The two outputs of the observer 22 (estimated ammonia surface coverage fraction,  $\hat{\theta}$ , and the estimated concentration of gas phase ammonia downstream of the SCR catalyst,  $\hat{C}_{NH3}$ ) are provided to the feedback controller 21. Further, feedback controller 21

# Σύστημα Ελέγχου SCR-Σχεδιασμός

United States Patent  
van Nieuwstadt et al.



54) EXHAUST GAS AFTERTREATMENT SYSTEMS  
 75) Inventors: Michiel J. van Nieuwstadt, Ann Arbor, MI (US); Devesh Upadhyay, Dearborn, MI (US)  
 73) Assignee: Ford Global Technologies, LLC, Dearborn, MI (US)  
 (10) Patent No.: US 7,093,427 B2  
 (45) Date of Patent: Aug. 22, 2006

Αρχιτεκτονική  
ελεγκτών

Fig. 2

	OPERATING CONDITION	CONTROLLER STATE	
		FF	FB
1	$T_{inj} < 175 \text{ degC}$	OFF	OFF
2	$(T_{inj} > 175 \text{ degC}) \text{ AND } (T_{cat} < 200 \text{ degC}) \text{ AND } (\theta \leq \theta_{\text{threshold}})$	ON	OFF
3	$(T_{cat} \geq 200 \text{ degC}) \text{ and } (\text{Convergence} > \epsilon)$	ON	OFF
4	$(T_{cat} \geq 200 \text{ degC}) \text{ and } (\text{Convergence} \leq \epsilon)$	OFF	ON

Σενάριο  
λειτουργίας  
ελεγκτών

# Μη γραμμικό μοντέλο SCR

$$\begin{bmatrix} C_{NO} \\ \theta \\ C_{NH_3} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -C_{NO}(\Theta_{SCR}R_{RED}\theta + \frac{F}{V_{cat}}) + \Theta_{SCR}R_{OX}\theta \\ \theta(R_{ADS}C_{NH_3} + R_{DES} + R_{RED}C_{NO} + R_{OX}) + R_{ADS}C_{NH_3} \\ -C_{NH_3}(\Theta_{SCR}R_{ADS}(1-\theta) + \frac{F}{V_{cat}}) + R_{DES}\Theta_{SCR}\theta \end{bmatrix} (1)$$

$$+ \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \frac{F}{V_{cat}} \end{bmatrix} U + \begin{bmatrix} \frac{F}{V_{cat}} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} d$$

$$Y = [ 1 \ 0 \ 0 ] \begin{bmatrix} C_{NO} \\ \theta \\ C_{NH_3} \end{bmatrix}$$

προσρόφηση - **Adsorption** is the adhesion of [atoms](#), [ions](#), [molecules](#) of gas, liquid, or dissolved solids to a [surface](#).<sup>1</sup>

εκρόφηση - **Desorption** is a [phenomenon](#) whereby a substance is released from or through a surface.

where  $r_x = k_x e^{-\frac{E_x}{RT}}$ ,  $x = ads, des, oxi, red$ , are ammonia adsorption, ammonia desorption, NOx oxidation, and ammonia reduction rates.  $\Theta$  is the SCR ammonia storage capacity,  $\theta_{NH_3}$  is the ammonia surface coverage ratio,  $F$  is the exhaust air flow rate,  $v$  is the catalyst volume,  $C_x$  is the mole concentration of species  $x$ ,  $C_{NH_3,in}$  is the input which is the controlled ammonia concentration, and  $C_{NO,in}$  is the engine exhaust NOx concentration.

# Λειτουργία Ελεγκτή SCR: 4 modes

Fig. 2

	OPERATING CONDITION	CONTROLLER STATE	
		FF	FB
1	$T_{inj} < 175 \text{ degC}$	OFF	OFF
2	$(T_{inj} > 175 \text{ degC}) \text{ AND } (T_{cat} < 200 \text{ degC}) \text{ AND } (\theta \leq \theta_{\text{threshold}})$	ON	OFF
3	$(T_{cat} \geq 200 \text{ degC}) \text{ and } (\text{Convergence} > \epsilon)$	ON	OFF
4	$(T_{cat} \geq 200 \text{ degC}) \text{ and } (\text{Convergence} \leq \epsilon)$	OFF	ON

Condition 3 occurs when  $T_{cat} \geq 200 \text{ deg C}$ . and model-based observer convergence  $> \epsilon$  (i.e., the difference between measured and estimated amounts of NOx in the exhaust gas mixture downstream of the SCR catalyst is greater than a small predetermined value,  $\epsilon$ ) In other words, processor 26 does not switch to the feedback control of reductant injection until acceptable convergence between the measured and estimated NOx concentration downstream of the SCR catalyst is achieved (i.e., the difference between the two is less than or equal to a small predetermined error value,  $\epsilon$ ). The achievement of convergence between the measured and estimated NOx concentration values implies that the predicted value for the surface coverage fraction is accurate and can now be used in feedback control.

Condition 4 occurs when  $T_{cat} \geq 200 \text{ deg C}$ . and model-based observer convergence  $\leq \epsilon$ . Under these conditions processor 26 switches to feedback control of reductant injection using the model-based observer 22.

Condition 1 occurs when the exhaust gas temperature at the reductant injection point,  $T_{inj}$  is below a first predetermined threshold,  $T_1$  ( $175^\circ \text{ C}$ ., or  $170^\circ \text{ C}$ . in a preferred embodiment). Since the injected urea does not decompose to ammonia and hydro-cyanic acid until  $T_{inj}$  is above  $T_1$ , any urea injection will result in urea accumulation in the exhaust pipe and/or deposition of urea on the catalyst face. This will lead to inefficient conversion and excess ammonia slip.  $T_{inj}$  can be estimated based on  $T_1$ , or based on operating conditions such as engine speed, load, coolant temperature, etc. Therefore, for Condition 1, controller 26 disables reductant injection.

Condition 2 describes a condition wherein  $T_{inj}$  is above  $T_1$ , but  $T_{cat}$  is below a second predetermined temperature threshold,  $T_2$  ( $200^\circ \text{ C}$ . in a preferred embodiment). Condition 2 applies at engine start up or at stop (idle) conditions. In this temperature range, NOx conversion efficiency of the SCR catalyst is very low and the feedforward controller is used to inject reductant to allow ammonia storage in the catalyst.  $\theta_{\text{threshold}}$  is a threshold amount of ammonia storage that is required for improved NOx conversion once the SCR catalyst is within the optimum NOx conversion temperature range (50% in a preferred embodiment). At start up conditions, the  $\theta$  value will be available from KAM (keep alive memory of the processor 26) of the last operational engine state prior to key off. For idle conditions, since the engine has already been running the predicted value of  $\theta$  will be available for comparison with  $\theta_{\text{threshold}}$ . Once the desired amount of ammonia storage is achieved, reductant injection may be discontinued until Condition 3 is satisfied. This

## (12) United States Patent van Nieuwstadt et al.

### (54) EXHAUST GAS AFTERTREATMENT SYSTEMS

(75) Inventors: Michiel J. van Nieuwstadt, Ann Arbor, MI (US); Devesh Upadhyay, Dearborn, MI (US)

(73) Assignee: Ford Global Technologies, LLC, Dearborn, MI (US)

(10) Patent No.: US 7,093,427 B2  
(45) Date of Patent: Aug. 22, 2006

# SCR Controller Design- Feedforward

(12) **United States Patent**  
van Nieuwstadt et al.

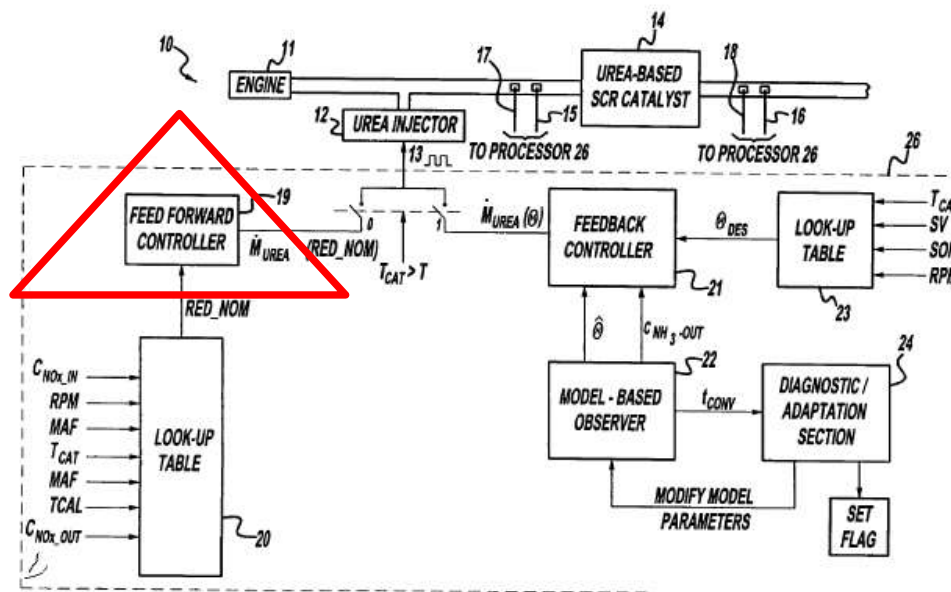
(10) Patent No.: US 7,093,427 B2  
(45) Date of Patent: Aug. 22, 2006

(54) EXHAUST GAS AFTERTREATMENT  
SYSTEMS

(75) Inventors: Michiel J. van Nieuwstadt, Ann Arbor,  
MI (US); Devesh Upadhyay, Dearborn,  
MI (US)

(73) Assignee: Ford Global Technologies, LLC,  
Dearborn, MI (US)

- Ο ελεγκτής πρόσω-τροφοδότησης (feedforward) βασίζεται σε κανονική (nominal) παροχή ουρίας από χάρτη.
- Η ποσότητα RED\_NOM προέρχεται από τον πίνακα 20 και είναι συνάρτηση λειτουργικών παραμέτρων όπως η ταχύτητα του κινητήρα, φορτίο, έναρξη ψεκασμού καυσίμου (Start of Injection-SOI), θερμοκρασία καταλύτη,  $T_{cat}$ , συγκέντρωση NOx ανάντι και κατόντι,  $C_{NOx,in}$ ,  $C_{NOx,out}$  στον καταλύτη.



# SCR Controller Design- Feedback

(12) **United States Patent**  
van Nieuwstadt et al.

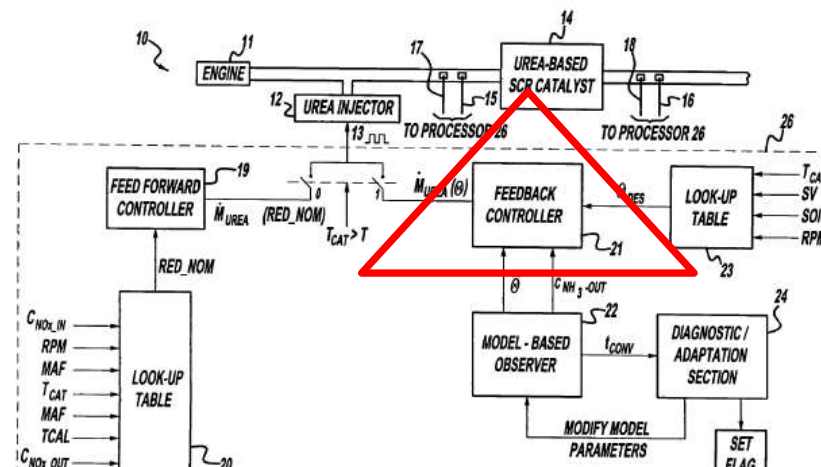
(54) **EXHAUST GAS AFTERTREATMENT  
SYSTEMS**

(75) Inventors: **Michiel J. van Nieuwstadt**, Ann Arbor,  
MI (US); **Devesh Upadhyay**, Dearborn,  
MI (US)

(73) Assignee: **Ford Global Technologies, LLC**,  
Dearborn, MI (US)

(10) Patent No.: **US 7,093,427 B2**  
(45) Date of Patent: **Aug. 22, 2006**

- Ο ελεγκτής ανα-τροφοδότησης (feedback) περιλαμβάνει παρατηρητή με μοντέλο, 22. Το μαθηματικό μοντέλο αναπτύχθηκε με βασικές αρχές και βασίστηκε στη χημική κινητική των αντιδράσεων. Οι σημαντικές παράμετροι του μοντέλου εκτιμώνται από τα εμπειρικά δεδομένα του συγκεκριμένου καταλύτη. Είσοδοι στον παρατηρητή είναι η συγκέντρωση της εγχυόμενης αμμωνίας και η συγκέντρωση NOx ανάντι,  $C_{NOx,in}$ , στον καταλύτη.
- Έξοδοι του παρατηρητή είναι εκτιμήσεις της αποθηκευμένης αμμωνίας στον καταλύτη (stored ammonia)  $\hat{\theta}$ , καθώς και η συγκέντρωση της αμμωνίας σε αέρια φάση κατάντι του καταλύτη (gas phase ammonia)  $C_{NH_3,out}$ .
- Ο ελεγκτής ανα-τροφοδότησης U σχεδιάστηκε ώστε να θέτει το σύστημα κλειστού βρόχου ασυμπωτικά ευσταθές.





# SCR Controller Design-1

(12) **United States Patent**  
van Nieuwstadt et al.

(54) EXHAUST GAS AFTERTREATMENT  
SYSTEMS

(75) Inventors: Michiel J. van Nieuwstadt, Ann Arbor,  
MI (US); Devesh Upadhyay, Dearborn,  
MI (US)

(73) Assignee: Ford Global Technologies, LLC,  
Dearborn, MI (US)

(10) Patent No.: US 7,093,427 B2

(45) Date of Patent: Aug. 22, 2006

Table 1: Καταστάσεις λειτουργίας των ελεγκτών FF και FB

Cond. no	Operating condition	FF	FB
1	$T_{inj} < 175\text{ }^{\circ}\text{C}$	OFF	OFF
2	$T_{inj} > 175\text{ }^{\circ}\text{C}$ AND $T_{cat} < 200\text{ }^{\circ}\text{C}$ AND $\theta \leq \theta_{threshold}$	ON	OFF
3	$T_{cat} > 200\text{ }^{\circ}\text{C}$ AND $convergence > \epsilon$	ON	OFF
4	$T_{cat} > 200\text{ }^{\circ}\text{C}$ AND $convergence < \epsilon$	OFF	ON

- Στην κατάσταση 1, η θερμοκρασία καυσαερίων στο σημείο έγχυσης ( $T_{inj}$ ) είναι χαμηλότερη από το όριο T1 (175 οC).
- Έτσι η ουρία δεν διασπάται σε αμμωνία, με αποτέλεσμα την συσσώρευση της αμμωνίας στον καταλύτη.
- Για τον λόγο αυτό δεν εγχύεται ουρία (FF OFF, FB OFF).

# SCR Controller Design-2

(10) Patent No.: US 7,093,427 B2  
(45) Date of Patent: Aug. 22, 2006

(12) **United States Patent**  
**van Nieuwstadt et al.**

(54) EXHAUST GAS AFTERTREATMENT SYSTEMS

(75) Inventors: Michiel J. van Nieuwstadt, Ann Arbor, MI (US); Devesh Upadhyay, Dearborn, MI (US)

(73) Assignee: Ford Global Technologies, LLC, Dearborn, MI (US)

Table 1: Καταστάσεις λειτουργίας των ελεγκτών FF και FB

Cond. no	Operating condition	FF	FB
1	$T_{inj} < 175 \text{ }^{\circ}\text{C}$	OFF	OFF
2	$T_{inj} > 175 \text{ }^{\circ}\text{C}$ AND $T_{cat} < 200 \text{ }^{\circ}\text{C}$ AND $\theta \leq \theta_{threshold}$	ON	OFF
3	$T_{cat} > 200 \text{ }^{\circ}\text{C}$ AND $convergence > \epsilon$	ON	OFF
4	$T_{cat} > 200 \text{ }^{\circ}\text{C}$ AND $convergence < \epsilon$	OFF	ON

- Στην κατάσταση 2, η θερμοκρασία καυσαερίων στο σημείο έγχυσης ( $T_{inj}$ ) είναι υψηλότερη από το όριο T1 (175 οC) αλλά η θερμοκρασία καταλύτη είναι χαμηλότερη από το όριο T2 (200 οC).
- Ο ελεγκτής FF εγχύει ουρία μέχρι η αποθήκευση ( $\theta_{storage}$ ) να είναι μικροτερη ή ίση από το όριο,  $\theta_{threshold}$  (FF ON, FB OFF).
- Τότε σταματάει η έγχυση μέχρι η συνθήκη της κατάστασης 3 επαληθευτεί.

# SCR Controller Design-3

(10) Patent No.: US 7,093,427 B2  
(45) Date of Patent: Aug. 22, 2006

(12) **United States Patent**  
**van Nieuwstadt et al.**

(54) EXHAUST GAS AFTERTREATMENT SYSTEMS

(75) Inventors: Michiel J. van Nieuwstadt, Ann Arbor, MI (US); Devesh Upadhyay, Dearborn, MI (US)

(73) Assignee: Ford Global Technologies, LLC, Dearborn, MI (US)

Table 1: Καταστάσεις λειτουργίας των ελεγκτών FF και FB

Cond. no	Operating condition	FF	FB
1	$T_{inj} < 175 \text{ }^{\circ}\text{C}$	OFF	OFF
2	$T_{inj} > 175 \text{ }^{\circ}\text{C}$ AND $T_{cat} < 200 \text{ }^{\circ}\text{C}$ AND $\theta \leq \theta_{threshold}$	ON	OFF
3	$T_{cat} > 200 \text{ }^{\circ}\text{C}$ AND $convergence > \epsilon$	ON	OFF
4	$T_{cat} > 200 \text{ }^{\circ}\text{C}$ AND $convergence < \epsilon$	OFF	ON

- Στην κατάσταση 3, η θερμοκρασία καταλύτη είναι υψηλότερη από το όριο T2 (200 οC) και η τιμή σύγκλισης (convergence) στον παρατηρητή είναι >epsilon.
- Ως epsilon ορίζεται η διαφορά μεταξύ μετρημένης και εκτιμούμενης τιμής συγκέντρωσης NOx,  $\epsilon = CNOx - CNOx_{hat}$ .
- Η ελεγκτής FF εγχύει ουρία μέχρι η τιμή σύγκλισης στον παρατηρητή γίνει <epsilon (FF ON, FB OFF).
- Τότε η συνθήκη της κατάστασης 4 επαληθεύεται.

# SCR Controller Design-4

(10) Patent No.: US 7,093,427 B2  
(45) Date of Patent: Aug. 22, 2006

(12) **United States Patent**  
**van Nieuwstadt et al.**

(54) EXHAUST GAS AFTERTREATMENT SYSTEMS

(75) Inventors: **Michiel J. van Nieuwstadt**, Ann Arbor, MI (US); **Devesh Upadhyay**, Dearborn, MI (US)

(73) Assignee: **Ford Global Technologies, LLC**, Dearborn, MI (US)

Table 1: Καταστάσεις λειτουργίας των ελεγκτών FF και FB

Cond. no	Operating condition	FF	FB
1	$T_{inj} < 175\text{ }^{\circ}\text{C}$	OFF	OFF
2	$T_{inj} > 175\text{ }^{\circ}\text{C AND } T_{cat} < 200\text{ }^{\circ}\text{C AND } \theta \leq \theta_{threshold}$	ON	OFF
3	$T_{cat} > 200\text{ }^{\circ}\text{C AND } convergence > \epsilon$	ON	OFF
4	$T_{cat} > 200\text{ }^{\circ}\text{C AND } convergence < \epsilon$	OFF	ON

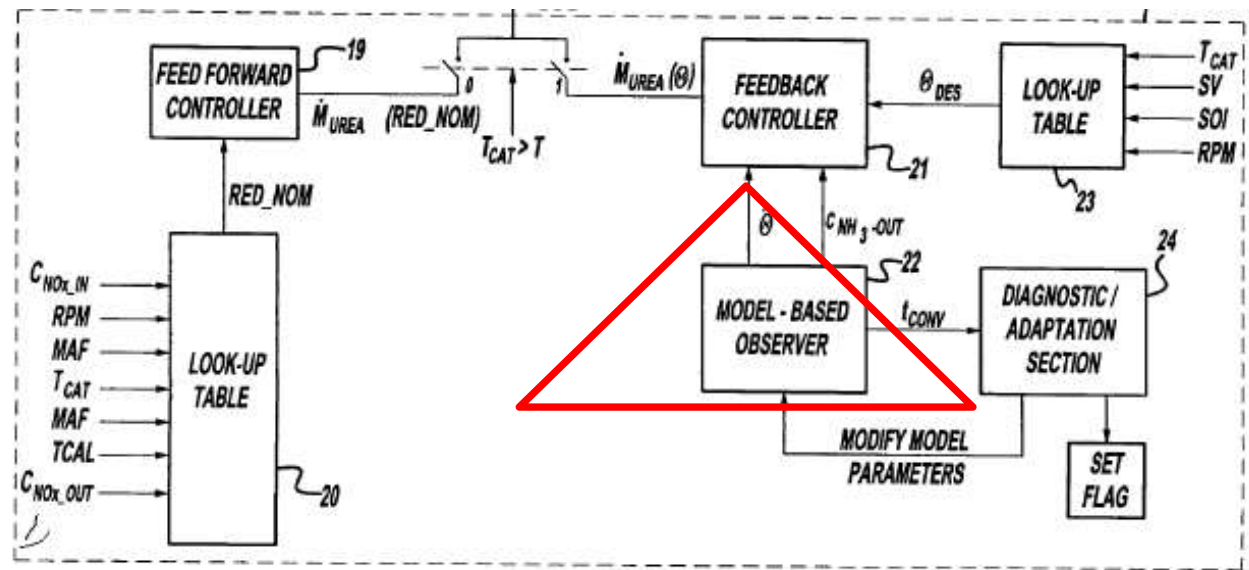
- Στην κατάσταση 4, η θερμοκρασία καταλύτη είναι υψηλότερη από το όριο T2 (200 οC) και η τιμή σύγκλισης στον παρατηρητή είναι <epsilon.
- Ο ελεγκτής FB εγχύει ουρία (FF OFF, FB ON).

# Παρατηρητές (Observers)

Στην περίπτωση που διαθέσιμη μέτρηση είναι μόνο η συγκέντρωση  $NO_x$  κατόπιν του καταλύτη, χρησιμοποιείται παρατηρητής, με τη μορφή της εξίσωσης 8

$$\frac{d}{dt} \hat{x} = f(\hat{x}, U, d) + L(\hat{C}_{NO_x} - C_{NO_x}) \tag{8}$$

όπου  $\hat{x} = [\hat{C}_{NO_x}, \hat{\theta}, \hat{C}_{NO_x}]$ .  $L$  είναι σταθερές, σε συνάρτηση με το σφάλμα  $\epsilon = (\hat{C}_{NO_x} - C_{NO_x})$ , που κάνουν το δυναμικό σύστημα του σφάλματος ασυμπτωτικά ευσταθές. Εδώ θέτουμε  $L = [-10, 20, 0]^T$ , ώστε οι ιδιοτιμές του συστήματος της εξίσωσης 8 να βρίσκονται στο αριστερό ημιεπίπεδο.



# Παρατηρητές (Observers)

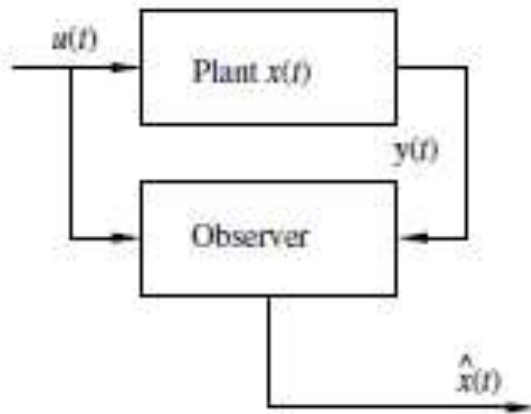


FIGURE 8.1 High-level observer block diagram

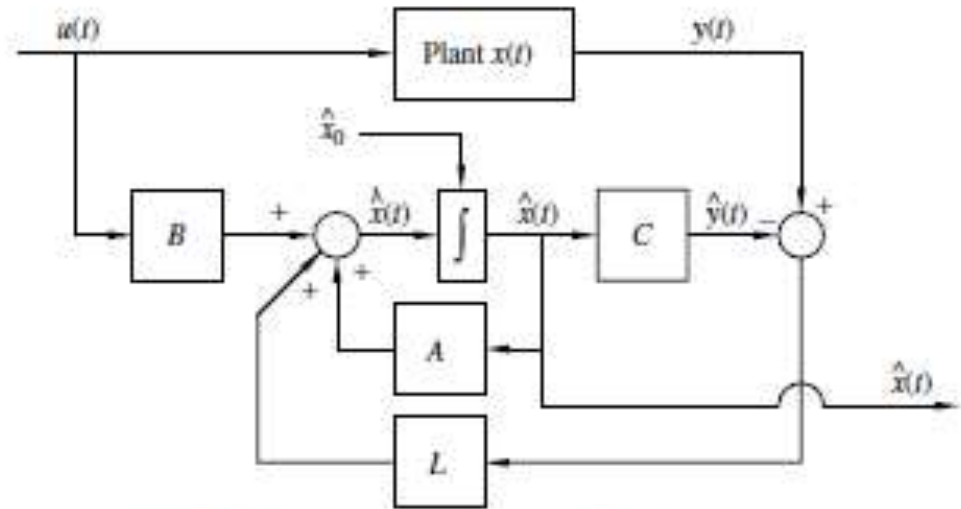


FIGURE 8.2 Detailed observer block diagram.

The observer assumes the form

$$\begin{aligned}\dot{\hat{x}}(t) &= A\hat{x}(t) + Bu(t) + L[y(t) - \hat{y}(t)] & \hat{x}(0) &= \hat{x}_0 \\ \hat{y}(t) &= C\hat{x}(t)\end{aligned}$$

Ref: Robert L. Williams II, Douglas A. Lawrence, LINEAR STATE-SPACE CONTROL SYSTEMS, JOHN WILEY & SONS, INC., 2007.

# Αποτελέσματα μοντελοποίησης SCR

Proceedings of IMECE2002  
ASME International Mechanical Engineering Congress & Exposition  
November 17–22, 2002, New Orleans, Louisiana

IMECE2002-32104

## MODELING OF A UREA SCR CATALYST WITH AUTOMOTIVE APPLICATIONS

Devesh Upadhyay/Ford Motor Company

Michiel Van Nieuwstadt/Ford Motor Company

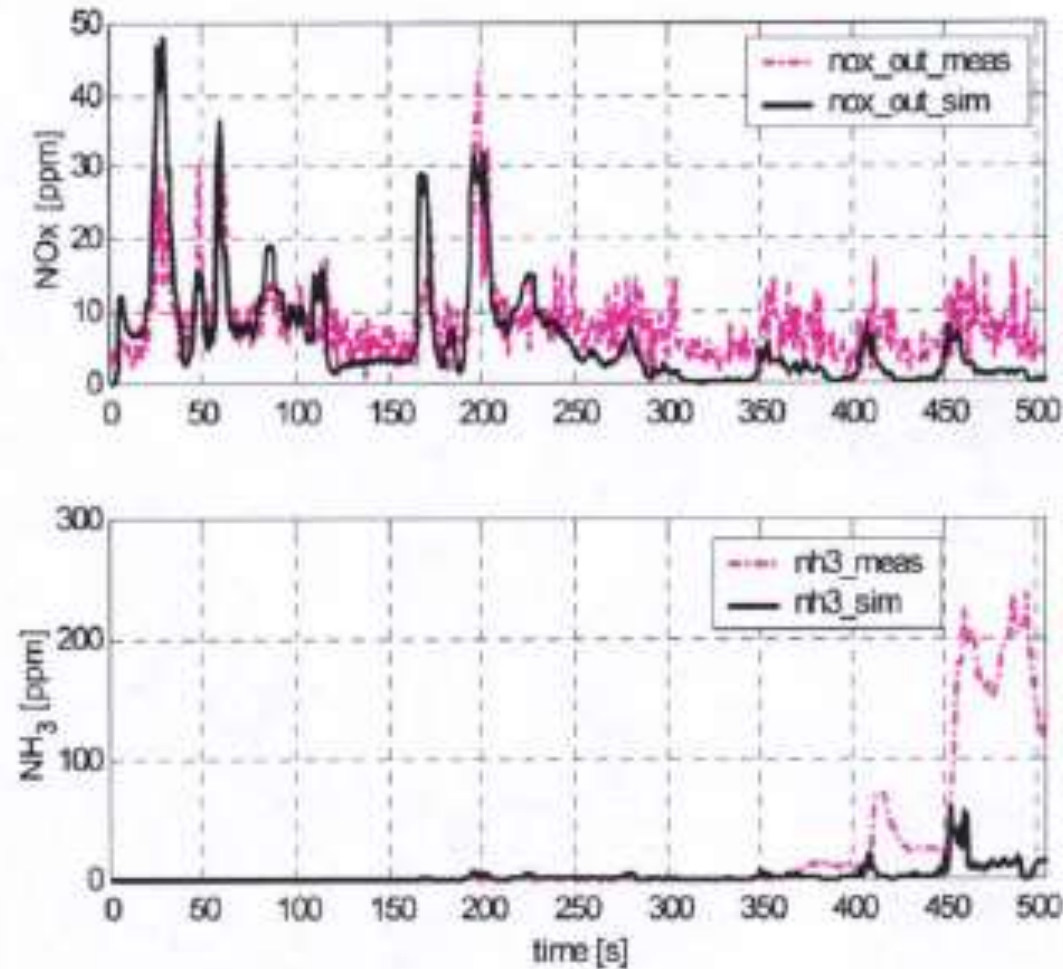
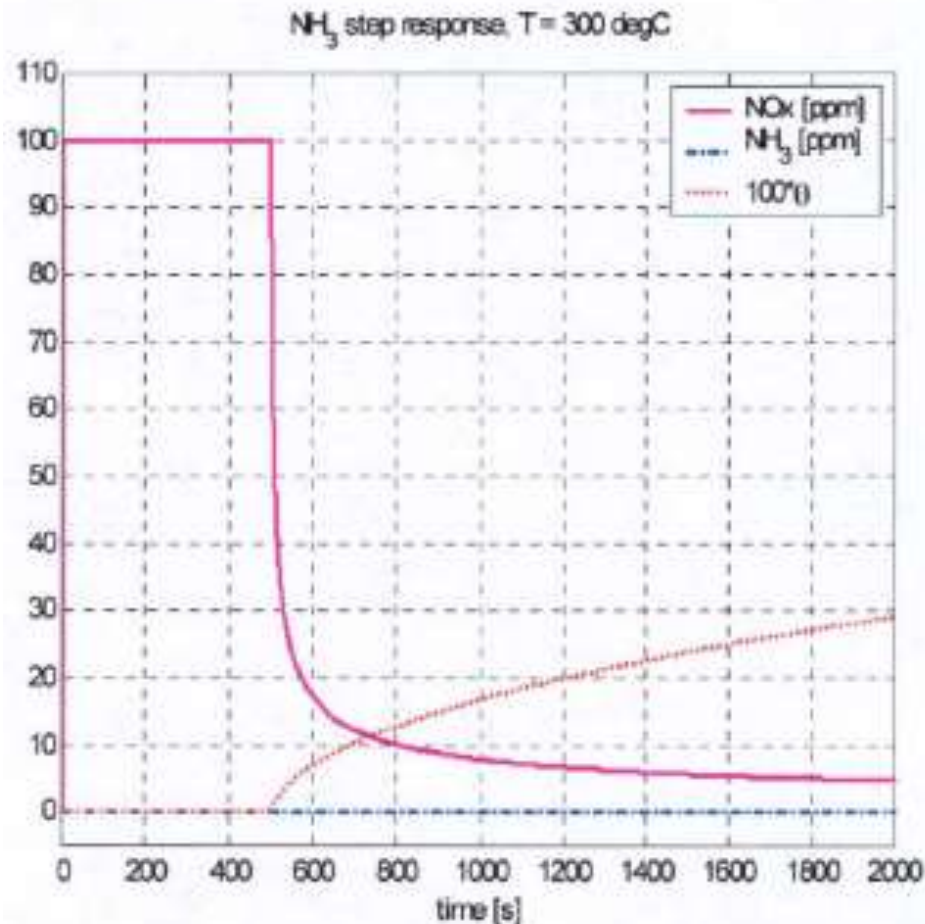


Figure 4: Simulated and measured NOx and NH3 [ppm].

# Αποτελέσματα μοντελοποίησης SCR



Proceedings of IMECE2002  
ASME International Mechanical Engineering Congress & Exposition  
November 17–22, 2002, New Orleans, Louisiana

IMECE2002-32104

MODELING OF A UREA SCR CATALYST WITH AUTOMOTIVE APPLICATIONS

Devesh Upadhyay/Ford Motor Company

Michiel Van Nieuwstadt/Ford Motor Company

Figure 6: Response in surface coverage and ammonia slip resulting from a 0 to 100 ppm step in ammonia input at  $t=500$  secs. Note the slow dynamics of  $\theta$ , and the negligible ammonia slip.



# SCR Control: Test beds

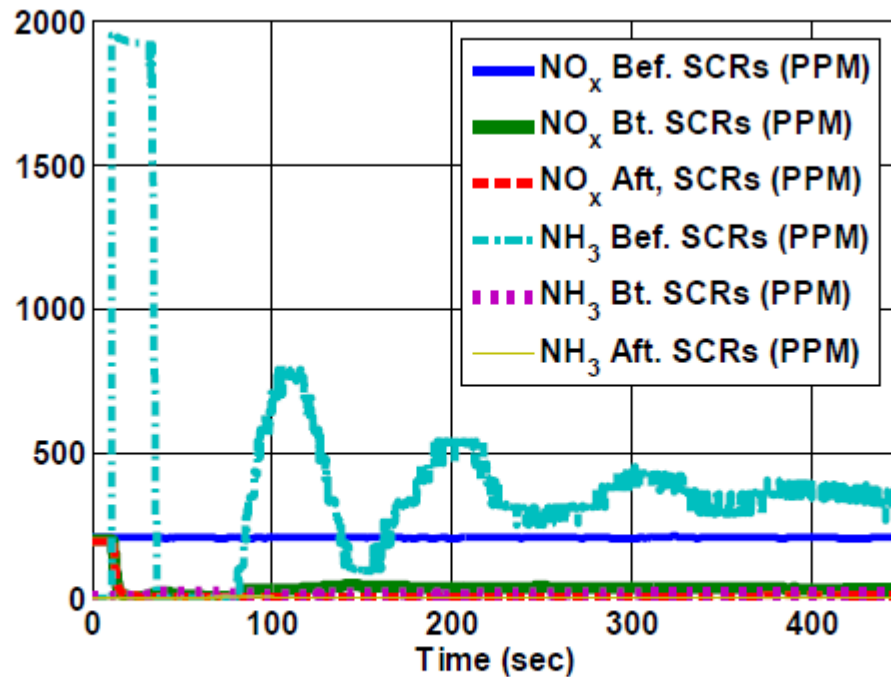


Figure 91. NO<sub>x</sub> and NH<sub>3</sub> concentrations upstream, between, and downstream of the SCR catalysts

# Υλοποίηση SCR ως Σύστημα αντιδραστήρα συνεχούς ανάδευσης

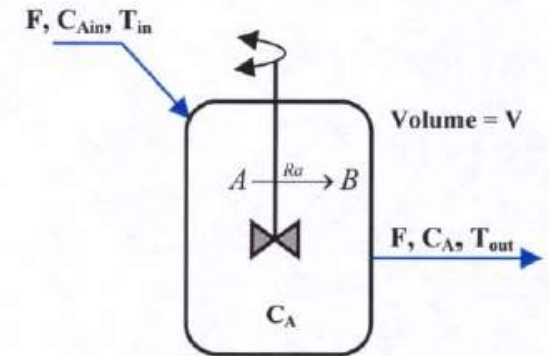
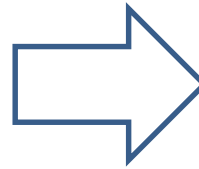
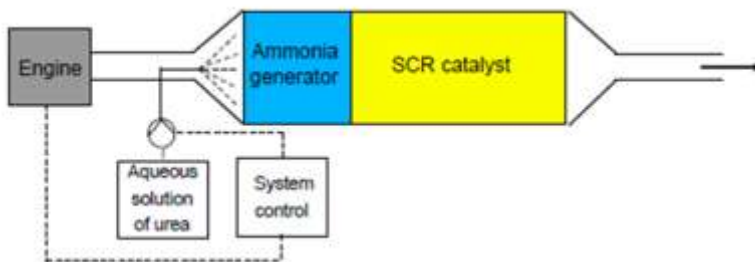


Figure 2: Typical CSTR system for single reactant.

# CSTR - Σύστημα αντιδραστήρα συνεχούς ανάδευσης

- Η χημική κινητική στο σύστημα SCR μοντελοποιείται ως σύστημα **αντιδραστήρα συνεχούς ανάδευσης** (Continuously Stirred Tank Reactor-CSTR )
- Η λειτουργία ενός τυπικού CSTR φαίνεται παρακάτω

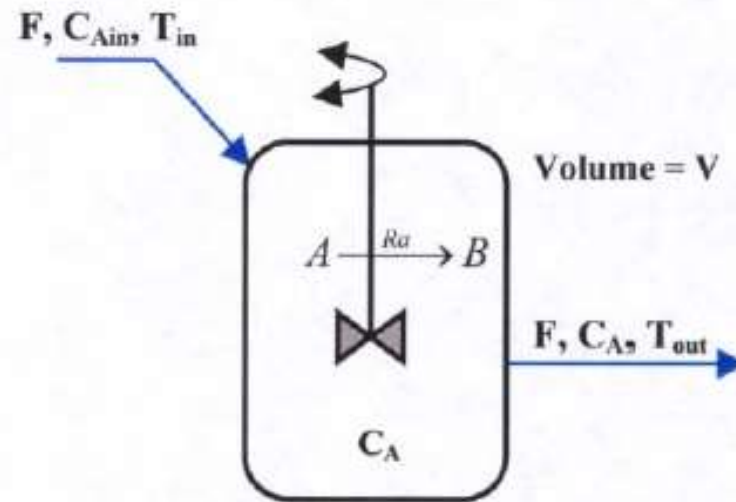
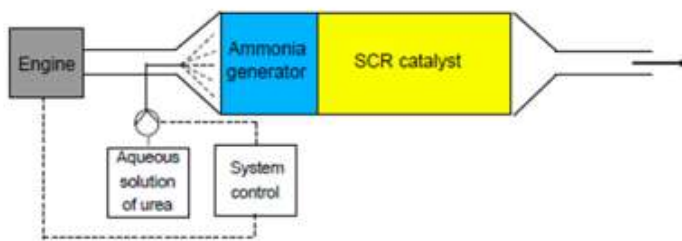
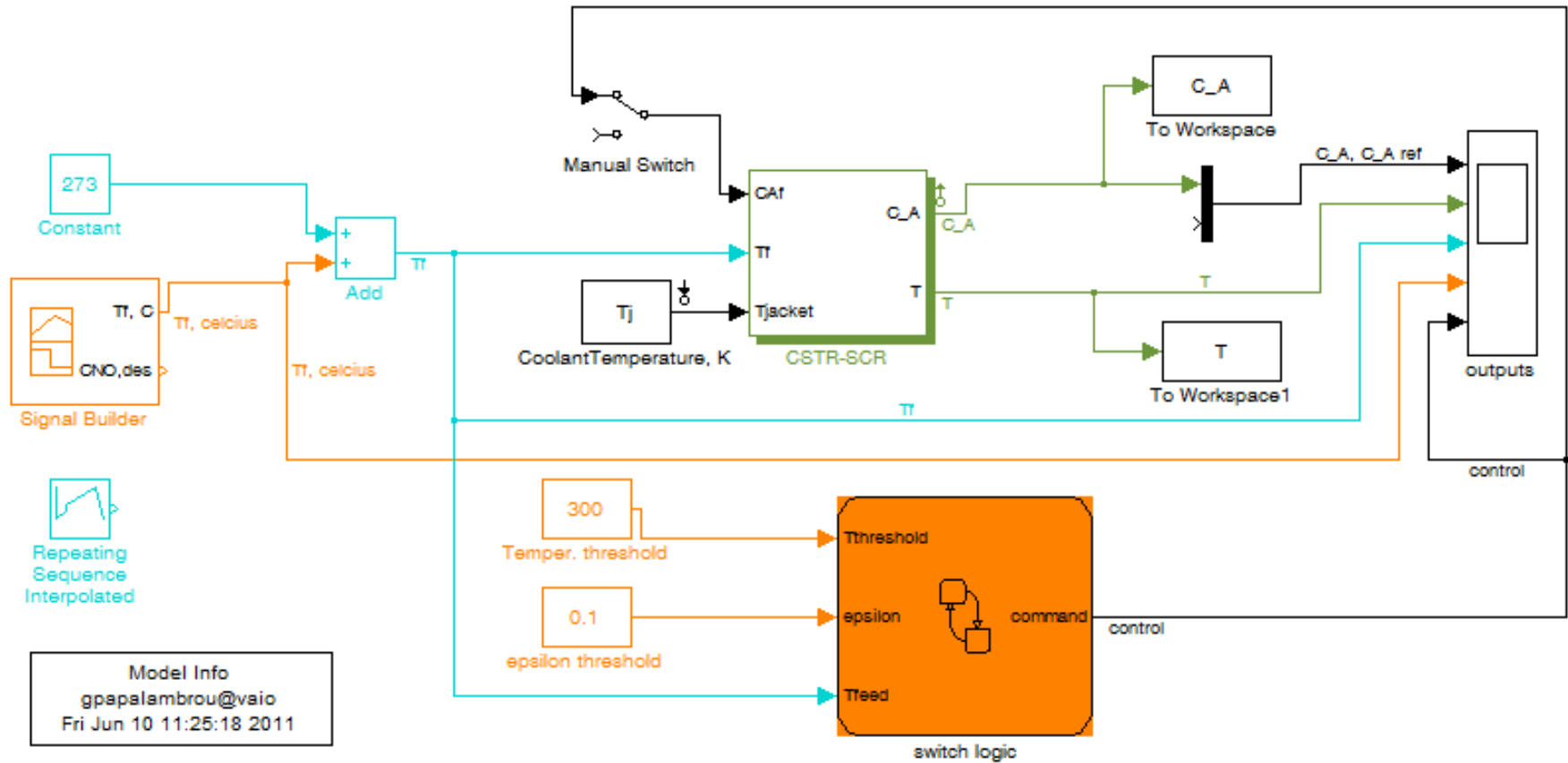


Figure 2: Typical CSTR system for single reactant.

# Simulink τελικού συστήματος



# CSTR - Σύστημα αντιδραστήρα συνεχούς ανάδευσης

- Βασικές εξισώσεις CSTR

$$f_1(C_A, T) = \frac{dC_A}{dt} = \frac{F}{V}(C_{Af} - C_A) - r \quad (1)$$

$$f_2(C_A, T) = \frac{dT}{dt} = \frac{F}{V}(T_f - T) + \frac{-H}{\rho c_p} r - \frac{UA}{V \rho c_p} (T - T_j) \quad (2)$$

$$r = k_0 \exp\left(\frac{-\Delta E}{RT}\right) C_A \quad (3)$$

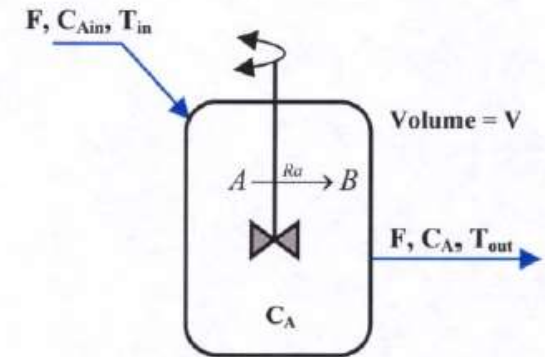


Figure 2: Typical CSTR system for single reactant.

% parameter values, case 2 shown in parentheses:

%

k0 = CSTR\_PAR(1); % frequency factor (9703\*3600)

H\_rxn = CSTR\_PAR(2); % heat of reaction (5960)

E\_act = CSTR\_PAR(3); % activation energy (11843)

rhocp = CSTR\_PAR(4); % density\*heat cap. (500)

UA = CSTR\_PAR(5); % ht trans coeff \* area (150)

R = CSTR\_PAR(6); % gas constant (1.987)

V = CSTR\_PAR(7); % reactor volume (1)

F = CSTR\_PAR(8); % feed flowrate (1)

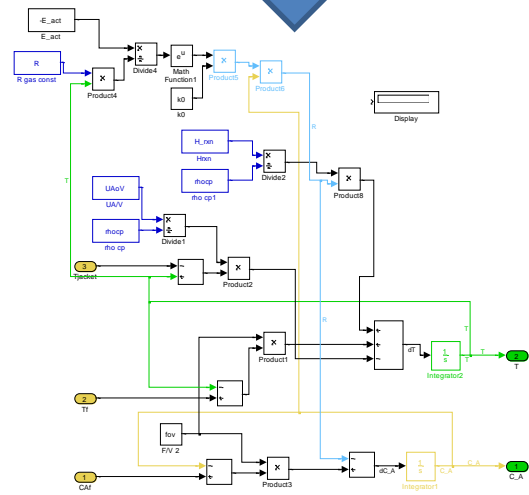
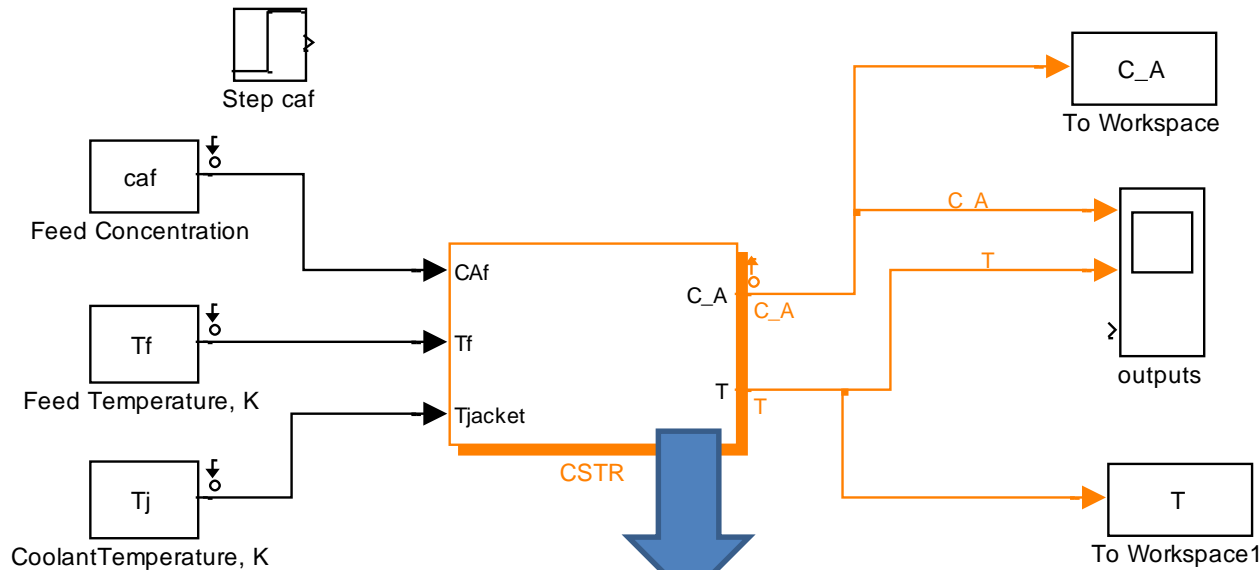
caf = CSTR\_PAR(9); % feed concentration (10)

Tf = CSTR\_PAR(10); % feed temperature (298)

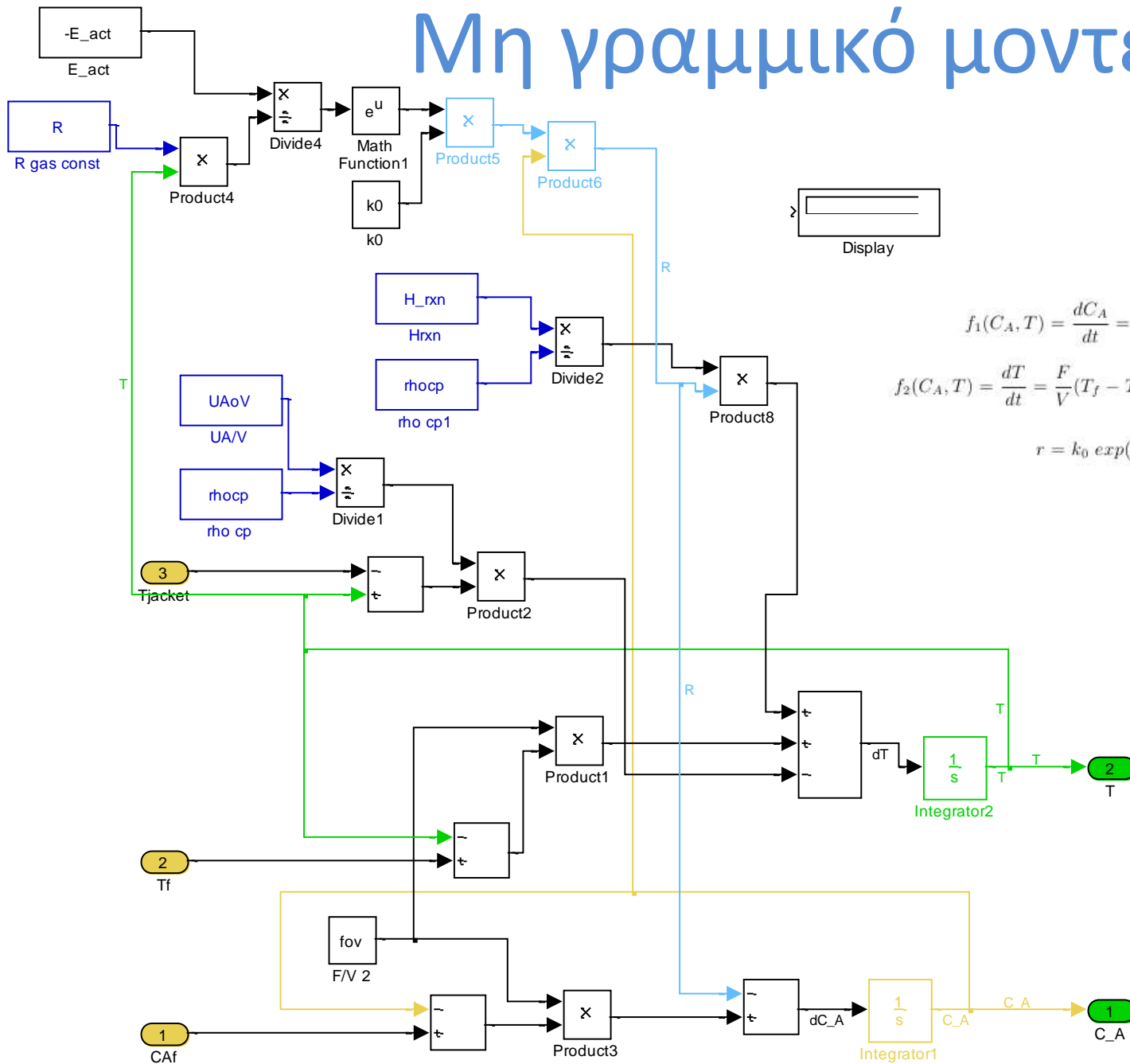
Tj = CSTR\_PAR(11); % jacket temperature (298)

# CSTR - Σύστημα αντιδραστήρα συνεχούς ανάδευσης

dynamic equations W. Bequette "Process dynamics", CSTR, mod. 9



# Μη γραμμικό μοντέλο CSTR



$$f_1(C_A, T) = \frac{dC_A}{dt} = \frac{F}{V}(C_{Af} - C_A) - r \quad (1)$$

$$f_2(C_A, T) = \frac{dT}{dt} = \frac{F}{V}(T_f - T) + \frac{-H}{\rho c_p} r - \frac{UA}{V \rho c_p} (T - T_f) \quad (2)$$

$$r = k_0 \exp\left(\frac{-\Delta E}{RT}\right) C_A \quad (3)$$

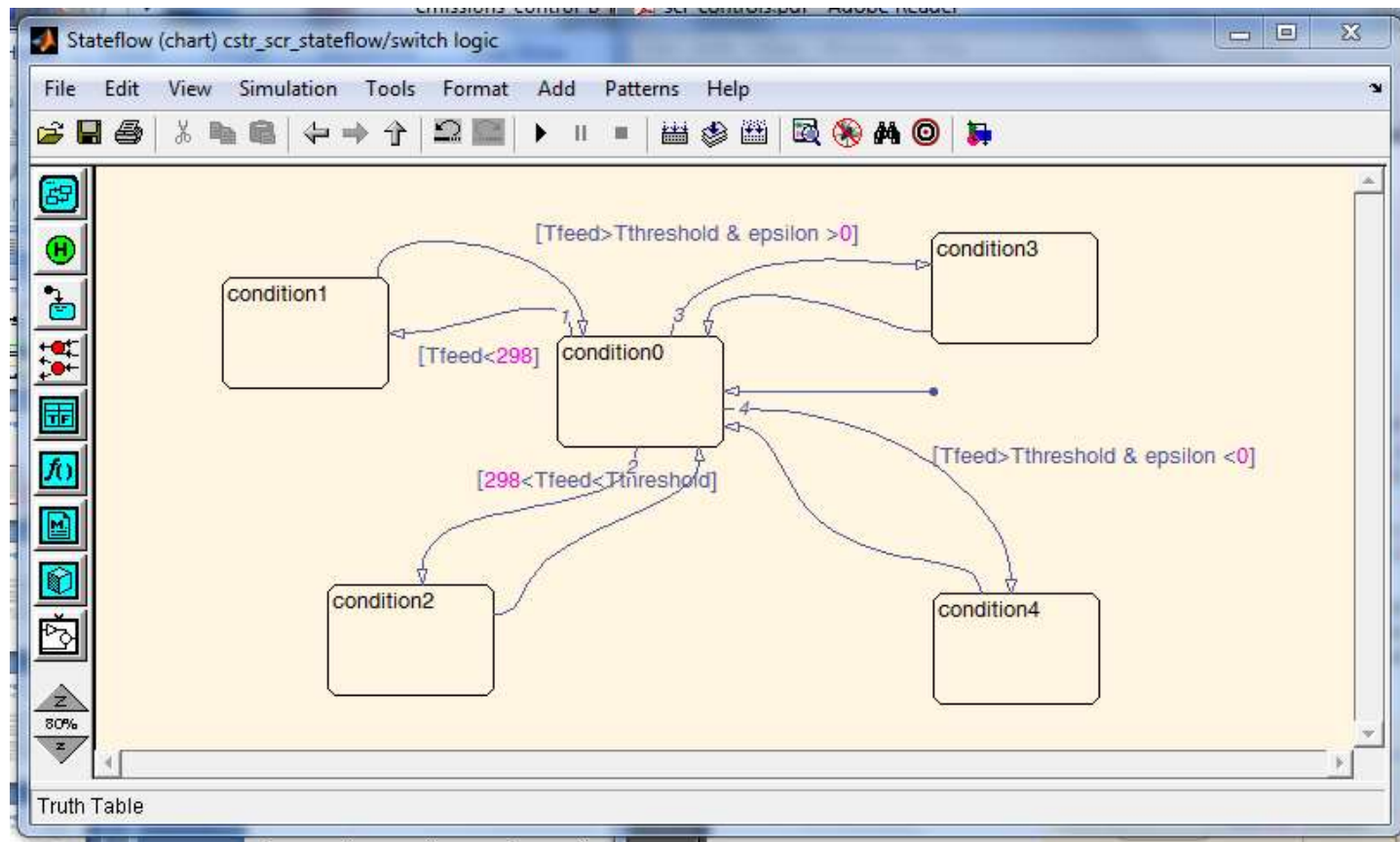
# SCR Controller: Υλοποίηση

- Στα σύγχρονα συστήματα ελέγχου γίνεται εκτενής χρήση του MATLAB/Simulink, με γραφικό προγραμματισμό (block programming) και αυτόματη δημιουργία κώδικα (code generation)
- Επίσης συχνά είναι διαθέσιμες μετρήσεις από δοκιμές (test beds)
- Τότε τα δεδομένα παριστάνονται με μορφή χαρτών (maps, look-up tables)
- Επίσης οι διαφορετικές καταστάσεις (states) των υποσυστημάτων περιγράφονται με το toolbox **Stateflow** (για state machines)



# SCR Controller Designs-Stateflow

- Η παραπάνω λογική υλοποιείται με χρήση μηχανών κατάστασης (state machines) με το Stateflow Toolbox του MATLAB/Simulink.
- Η εικόνα παρουσιάζει την λογική των 4 καταστάσεων.
- Ο εκάστοτε κλάδος ενεργοποιείται ανάλογα με τις συνθήκες αληθείας.



# Toolbox Stateflow (για state machines)

Help

States

Search Documentation

Stateflow Getting Started with Stateflow

## States

**On this page...**

- [What is a State?](#)
- [State Hierarchy](#)
- [State Decomposition](#)
- [State Labels](#)

**What is a State?**

A state describes an operating mode of a reactive system. In a Stateflow<sup>®</sup> chart, states are used for sequential design to create state transition diagrams.

States can be active or inactive. The activity or inactivity of a state can change depending on events and conditions. The occurrence of an event drives the execution of the state transition diagram by making states become active or inactive. At any point during execution, active and inactive states exist.

**State Hierarchy**

To manage multilevel state complexity, use hierarchy in your Stateflow chart. With hierarchy, you can represent multiple levels of subcomponents in a system.

**State Hierarchy Example**

In the following example, three levels of hierarchy appear in the chart. Drawing one state within the boundaries of another state indicates that the inner state is a substate (or child) of the outer state (or superstate). The outer state is the parent of the inner state.

```
graph TD
    Car_done[Car_done]
    Car_made[Car_made]
    Car_shipped[Car_shipped]
    Parts_assembled[Parts_assembled]
    Painted[Painted]

    Car_done -- contains --> Car_made
    Car_made -- contains --> Car_shipped
    Car_made -- contains --> Parts_assembled
    Car_made -- contains --> Painted
```

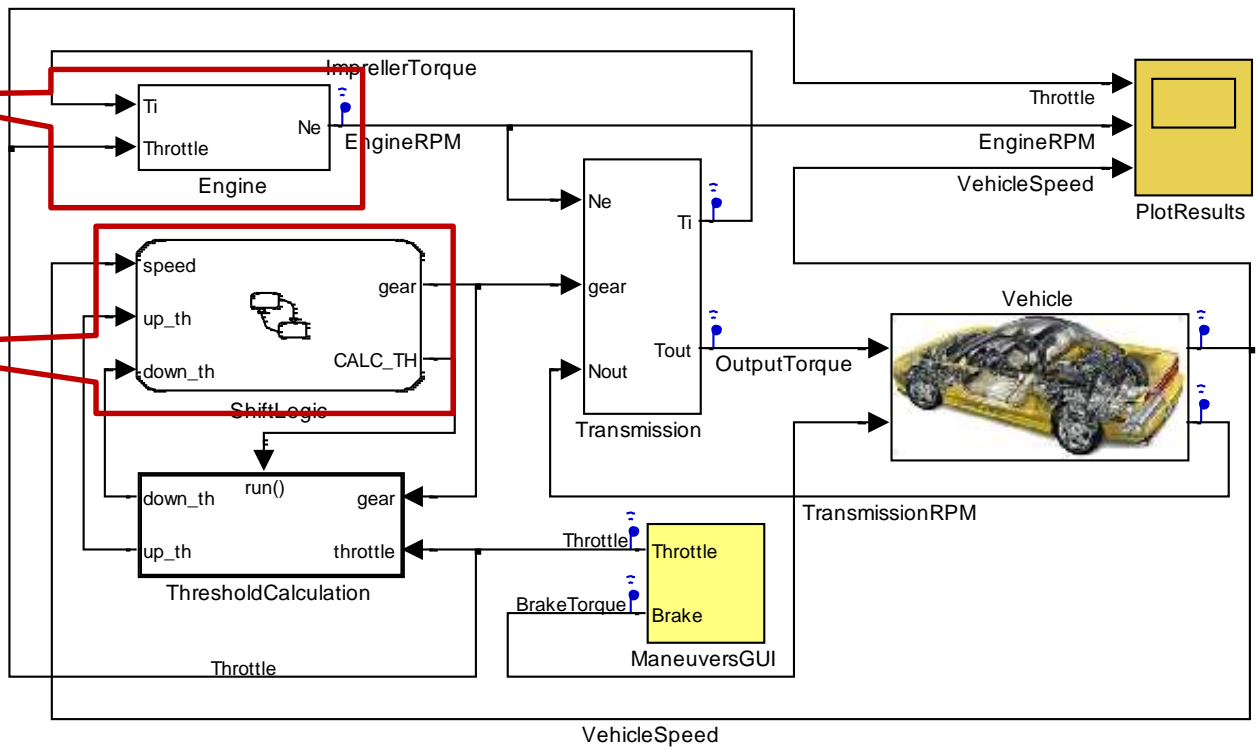
# Παράδειγμα με Stateflow, χάρτες



## Modeling an Automatic Transmission Controller

Lookup tables

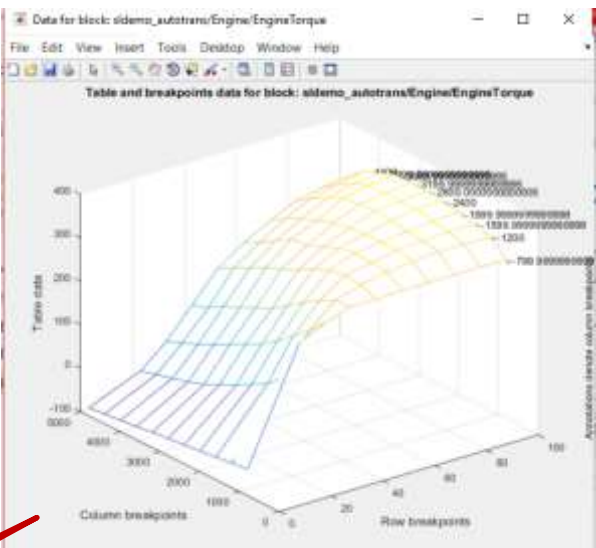
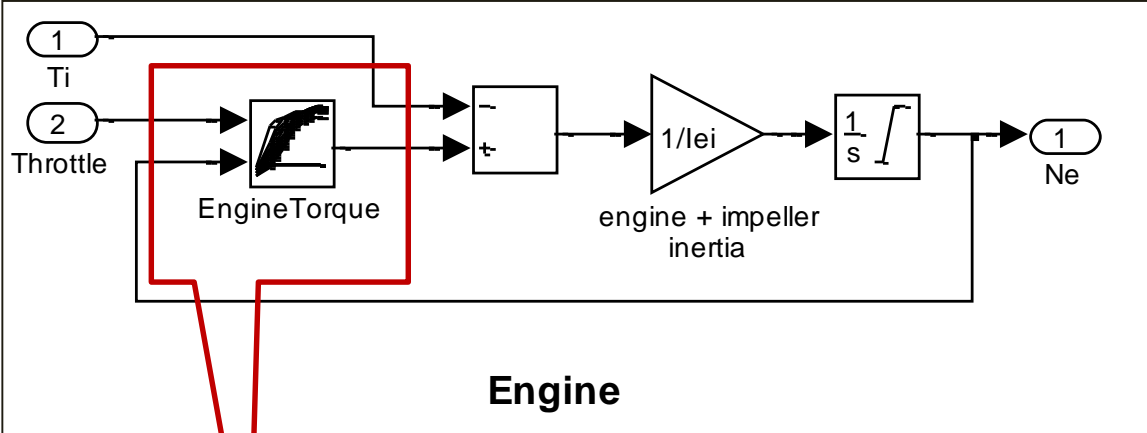
Stateflow



MATLAB Stateflow  
 Toolbox/examples/Automotive  
 Applications/Modeling an Automatic  
 Transmission Controller

Double-click on ManeuvresGUI and select a maneuver

# Lookup tables



Function Block Parameters: EngineTorque

Lookup Table (n-D)

Perform n-dimensional interpolation table lookup including index searches. The table is a sampled representation of a function in N variables. Breakpoint sets relate the input values to positions in the table. The first dimension corresponds to the top (or left) input port.

Table and Breakpoints    Algorithm    Data Types

Number of table dimensions: 2

Table data: EMAP

Breakpoints 1: TH\_VEC

Breakpoints 2: NE\_VEC

**Edit table and breakpoints...**

Lookup Table Editor: sidemo\_autotrans/Engine/EngineTorque

Viewing "2-D Lookup Table" block data (Ti,0):

Row	Column	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)
(1)	0	799.999...	1200	1599.999...	1999.999...	2400	2800.000...	3199.999...
(2)	20	-40	-44	-49	-53	-57	-61	-65
(3)	30	245	208	178	148	122	104	88
(4)	40	264	298	241	219	193	167	141
(5)	50	264	275	282	275	268	238	208
(6)	60	267	298	283	297	298	275	245
(7)	70	267	297	305	305	303	301	271
(8)	80	267	301	308	312	319	323	293
(9)	90	267	301	311	316	311	311	281

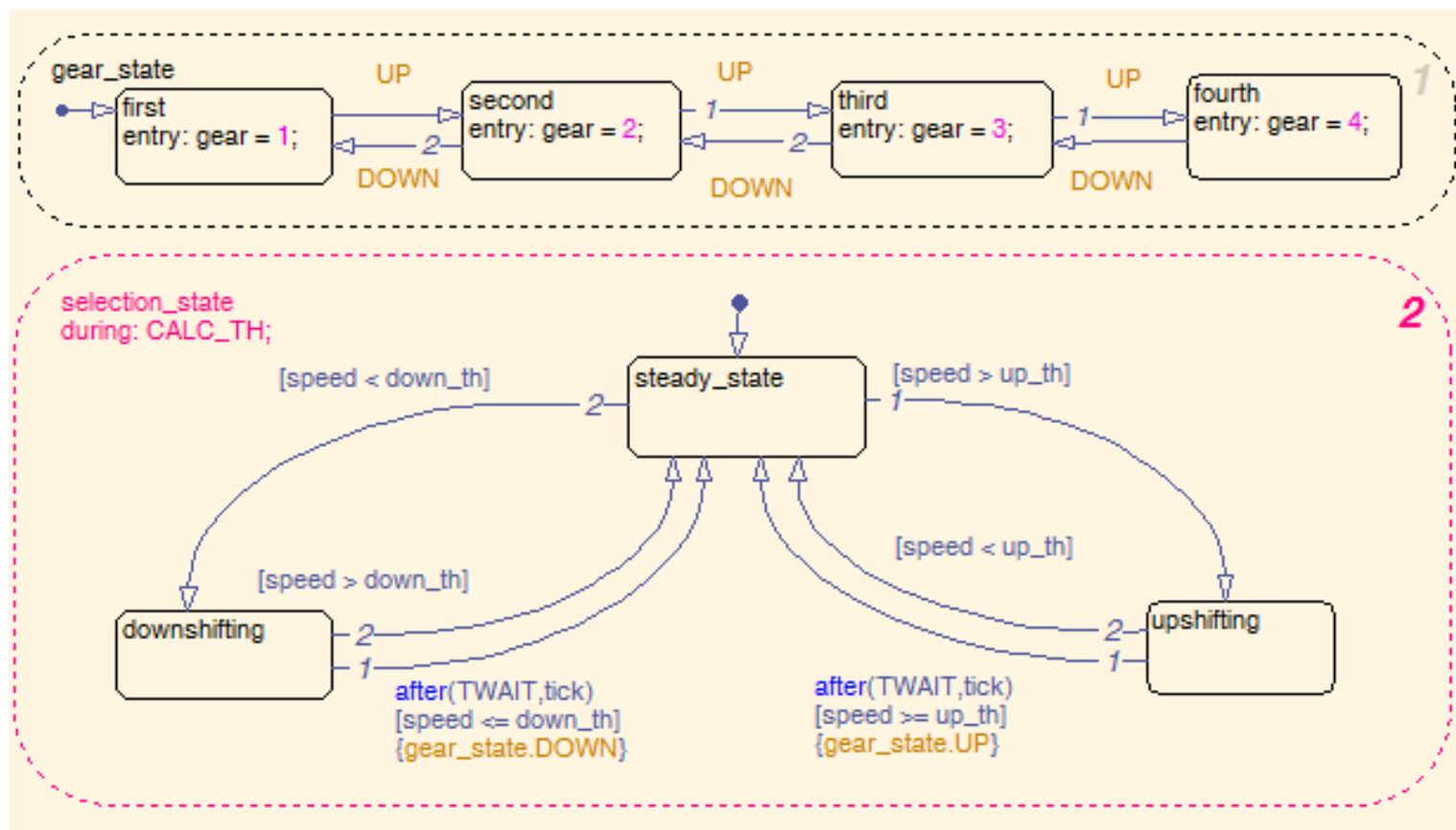
Data Type: Row: double    Column: double    Table: double

Dimension Selector

Dimension size	10	11
Select 2-D slice	All	All

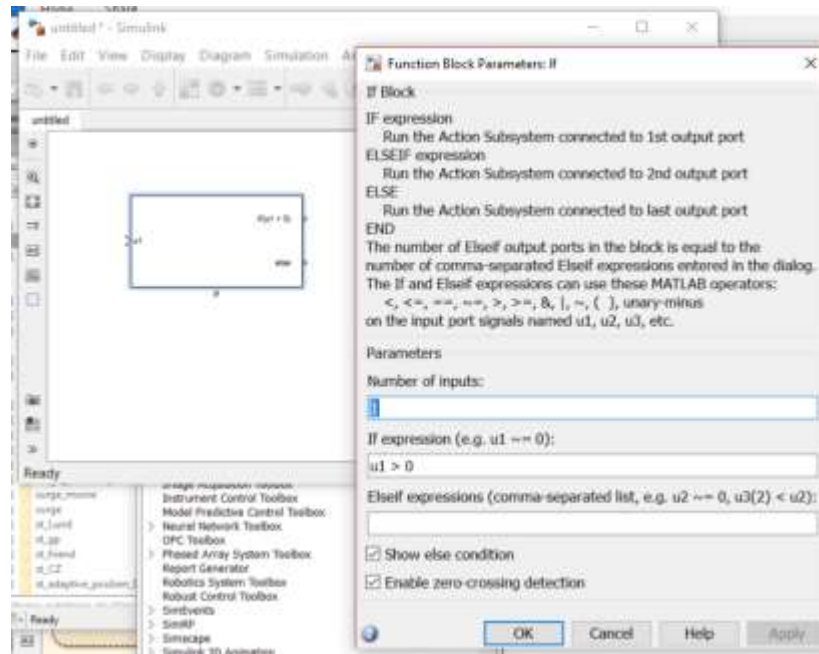
Transpose display

# Stateflow

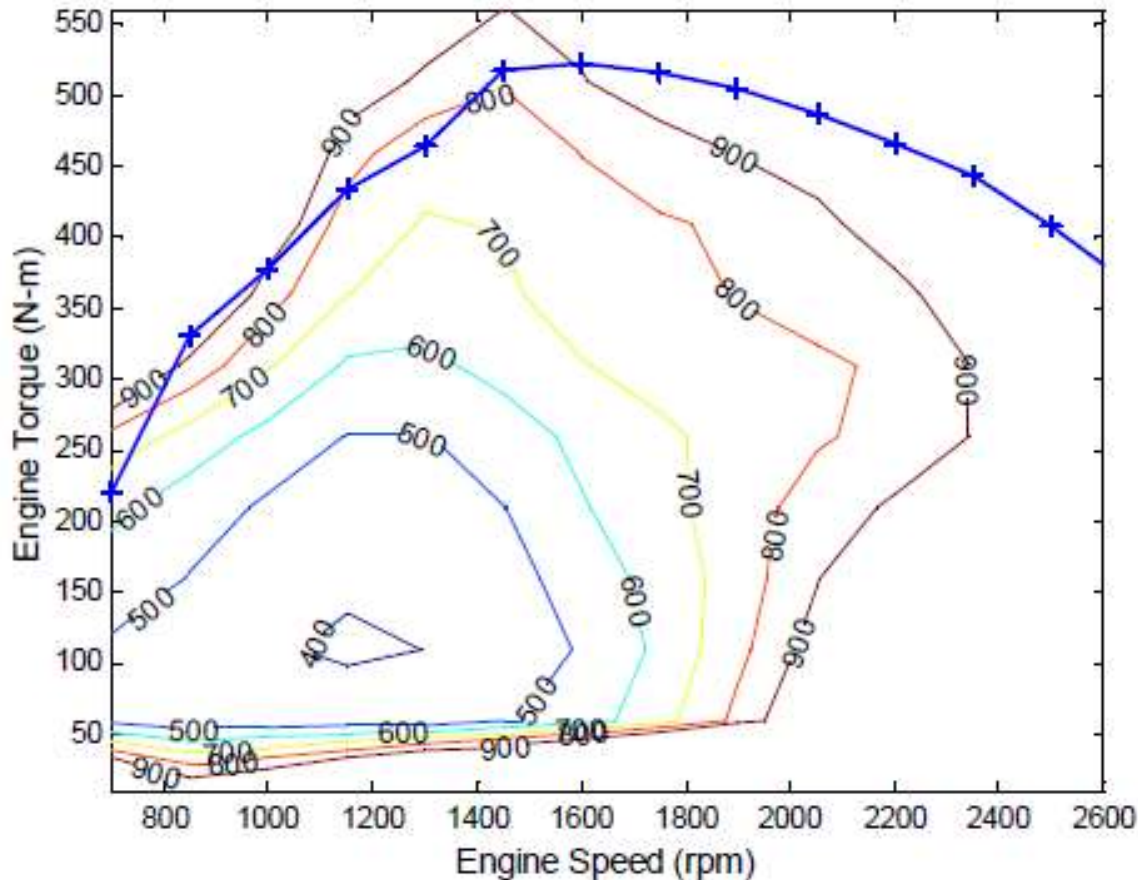


# Λογική if-then-else στο Simulink

- Εναλλακτικά ο χειρισμός με τις διαφορετικές καταστάσεις (states) των υποσυστημάτων μπορεί να γίνει εκτός από το toolbox **Stateflow** με blocks **if-then-else** στο Simulink
- Βιβλιοθήκη Ports & Subsystems, blocks **if** και **if Action Subsystem**



# SCR Control: Δημιουργία χαρτών



Για την εκτύπωση χαρτών (maps) χρησιμοποιείται η εντολή **contour**

Παράδειγμα:

```
[C,h] = contour(peaks(20),10);
```

- CONTOUR(Z,V) draws LENGTH(V) contour lines at the values specified in vector V.

