

استخدام المنطق الزمني الخطي في توصيف الأنظمة الفيزيائية المحوسبة (نظام نقل الحركة الآلي كمثال)

د. م. محمد ملحم*

(تاريخ الإيداع 19 / 4 / 2021 . قُبِلَ للنشر في 22 / 6 / 2021)

□ ملخّص □

فرضت الأنظمة الفيزيائية المحوسبة (CPS) Cyber-Physical Systems نفسها كجيل جديد من الأنظمة المضمنة على مساحة واسعة من المنتجات الإلكترونية. ومن أهم التحديات التي تواجه هذه التكنولوجيا هي طرق التوصيف والتصميم. ونظراً لخصوصية السلوك الزمني لهذه الأنظمة، فإن أي أداة وصف لهذه الأنظمة ستكون قاصرة من دون تجريد عالي المستوى للسلوك الزمني.

نقدم في هذا البحث، المنطق الزمني الخطي (LTL) Linear Temporal Logic كإطار عمل قانوني لتوصيف أنظمة الـCPS. يُستخدم LTL للدلالة على تدفق الزمن خلال أدوات النمذجة في العديد من التطبيقات، و تُعرّف دلالاته على امتداد خط الزمن الحقيقي \mathbb{R}_0^+ ، ويقدم LTL أيضاً وصف حدسي وطبيعي للزمن من دون تشويه النموذج (التوصيف) بتعقيدات غير ضرورية.

وفي النهاية يطرح البحث نظام نقل الحركة الآلي Automatic Transmission System (ATS) في السيارات كمثال على نظام CPS، ثم تم توصيفه باستخدام دلالات المنطق LTL، وأخيراً تنفيذه واختباره باستخدام بيئة النمذجة (Ptolemy II, Version 10.0.1_2014121).

الكلمات المفتاحية: CPS, LTL, Hybrid system, Giotto, PTIDES, ATS, Ptolemy II.

*مدرس في قسم هندسة النظم الحاسوبية والالكترونيات- كلية تكنولوجيا المعلومات والاتصالات- جامعة طرطوس- سوريا.

Using of Linear Temporal Logic in Cyber Physical Systems Specification (e.g. Automatic Transmission System)

Dr. Eng. Mohammed Molhem*

(Received 19 / 4 / 2021 . Accepted 22 / 6 / 2021)

□ ABSTRACT □

Cyber-Physical Systems (CPS) has established itself as a new generation of embedded systems over a several electronic products. Designing and specification are the most challenges in front of this technology. According to the special temporal behavior of these systems, without a high-level abstraction of temporal behavior, any description tool to these systems would be shortcoming.

We introduce in this paper, a Linear Temporal Logic (LTL) as a legal framework for characterizing CPS systems. It is used to denote the flow of time through modeling tools in many applications, It is used to denote the flowing of time through modeling tools in many applications, and its semantics are defined over the real time line \mathbb{R}_0^+ . The LTL also provides an intuitive and natural description of time, without distorting the model with useless complications.

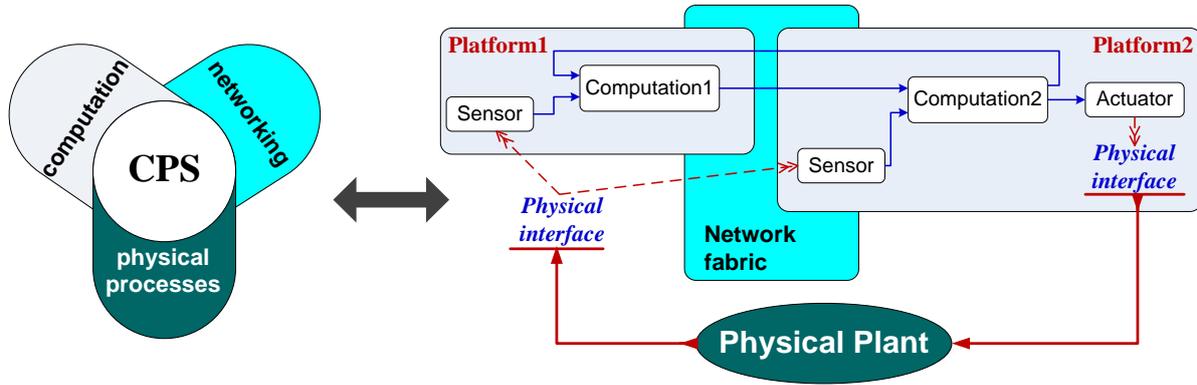
Finally, we presents in this paper, the Automatic Transmission System (ATS) in vehicles as an example of a CPS system, then we describe it using LTL's semantics, and implemented and tested using the modeling environment (Ptolemy II, Version 10.0.1_2014121).

Key Words: CPS, LTL, Hybrid system, Giotto, PTIDES, ATS, Ptolemy

*Assistant Professor, Department of Computer and Electronic Systems Engineering, Faculty of Information Technology and Communications, Tartous University, Syria.

1- مقدمة

تُعرّف النظم الفيزيائية المحوسبة CPS، على أنها تكامل الحوسبة computation والشبكات networking والعمليات الفيزيائية physical processes. تعمل الحوسبة المضمنة وشبكات الاتصال على إدارة العمليات الفيزيائية، في حين ترتبط العملية الفيزيائية مع نظام الحوسبة عن طريق حلقات تغذية عكسية feedback الشكل (1) [1].



الشكل (1): مخطط صندوقي يبين مكونات النظام الفيزيائي المحوسب

إن الإمكانيات الإقتصادية والإجتماعية لنظم CPS أكبر بكثير مما تم تحقيقه حتى الآن، وتُبدل جهود كبيرة في جميع أنحاء العالم لتطوير هذه التكنولوجيا. تستند هذه التكنولوجيا إلى نظم مشتقة من النظم المضمنة، وتتعدد تطبيقاتها بشكل واسع، فهي موجودة في وسائل النقل، والصناعة، والأجهزة الطبية، والاتصالات، والصناعات العسكرية، والطاقة، والروبوتيك... إلخ، ولا تزال فتية [2].

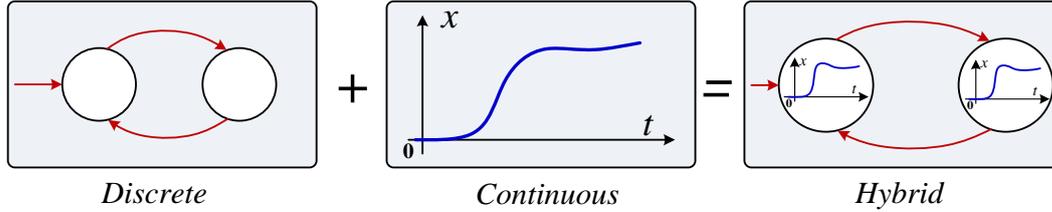
يوفر دمج العمليات الفيزيائية مع الحوسبة تجريدات وتقنيات نمذجة وتصميم وتحليل للنظام ككل متكامل. فالنظم الفيزيائية المحوسبة CPS تجمع التكنولوجيا مع الأسس القوية في التجريدات الرياضية mathematical abstractions، ويتمثل التحدي التقني الرئيسي في ضم هذه التجريدات الرياضية (معادلات تفاضلية، وعمليات عشوائية... إلخ) التي تطورت على مدى قرون مع التجريدات الحاسوبية التي تطورت على مدى عقود (الأحداث المنقطعة والخوارزميات والبرامج التي توفر "نظرية المعرفة الإجرائية")، بهدف نمذجة العمليات الفيزيائية.

تُركز التجريدات السابقة على تطور حالة النظام بمرور الزمن، في حين تركز حالة النظام على عمليات تحويل البيانات. إن علم الحوسبة كفكرة مُتجذرة، هي قابلية الحساب بعيداً عن الخصائص الفيزيائية الأساسية، ولكن مع مرور الوقت أصبحت تشتمل على ديناميكيات العالم الفيزيائي.

تستمر نظم CPS بالنمو والإنتشار والتعقيد، ويواجه مصمموا هذه النظم الكثير من التحديات نتيجة تنوع التجريدات والمعارف التي تشتمل عليها، ومن أهم هذه التحديات هو توصيف هذه النظم.

تسلك النظم الفيزيائية سلوكين مختلفين في آنٍ معاً، سلوك مستمر وسلوك منقطع، أو بكلمات أخرى نوعين من الديناميكيات، الديناميكيات المستمرة continuous dynamics والديناميكيات المنقطعة discrete dynamics. يُعبر عن السلوك المستمر باستخدام المعادلات التفاضلية differential equations، أما السلوك المنقطع فيُعبر عنه رياضياً بمعادلات الفرق Difference Equations. أما النظم الحاسوبية فقد

فرضت وجود طرق أخرى في توصيف هذه النظم مثل الأحداث المنقطعة Discrete Events. تُعد الأحداث المنقطعة شكل متقدم من المحاكاة غير المرتبط بالإتجاه التقليدي السائد، وهو أسير لغات المحاكاة والخوارزميات. تنتقل الأحداث النظام من حالة مستمرة إلى حالة مستمرة أخرى، أو تبقى بنفس الحالة بحسب طبيعة الحدث والنظام. إن تفاعل هذين السلوكين (المستمر والمنقطع) يجعل النظام ذو طبيعة هجينة Hybrid system الشكل (2). ويظهر هذا في العديد من الأنظمة التكنولوجية، حيث تتفاعل القرارات المنطقية والأوامر التحكمية المضمنة مع العمليات الفيزيائية المستمرة [1] [3].



الشكل (2): وصف شكلي للنظام الهجين

لإستيعاب تطور سلوك هذه الأنظمة، لابد من نماذج رياضية تجمع دينامية الأجزاء المستمرة مع دينامية الأجزاء المنقطعة. تحتوي هذه النماذج بشكل أساسي المعادلات التفاضلية كتوصيف للسلوك المستمر، وماكنة الحالة كتوصيف للأحداث المنقطعة. تُعد تقنيات تحليل وتركيب هذه النماذج مجالاً حيوياً للبحث في نظرية الأنظمة الهجينة، فهي تؤدي دوراً هاماً في التصميم متعدد الاختصاصات (التصميم الإلكتروني مع التصميم الميكانيكي والتصميم البرمجي... إلخ) وفي العديد من الأنظمة. وتلعب هذه الأنظمة دوراً بالغ الأهمية في صناعة التكنولوجيا.

2- مشكلة البحث

عادةً ما تكون الخطوة الأولى في تصميم نظام CPS هو تعريف النموذج الوظيفي للتطبيق الذي يتضمن خوارزمية العمل. وتكون الخطوة التالية هي تنفيذ هذه الخوارزمية على بنية عتادية platform واختبارها وتعديلها حتى يتم الضبط الزمني. لكن هذا يقود إلى تصميم هش وسلوك ظاهري غير محدد عندما يتم تركيب عدة مكونات أو عدة أنظمة مختلفة [4].

من الأفكار الجديرة بالإهتمام، هو طرح نموذج يتضمن السلوك الوظيفي والزمني لنظام CPS، وخاصة في الأماكن التي تربط النظام مع وسطه المحيط، وعادة ما تكون هذه الأماكن موضع اهتمام المصممين. وهي مداخل النظام من البيئة المحيطة (عبر الحساسات sensors)، ومخارج النظام إلى البيئة المحيطة (عبر المشغلات الميكانيكية actuators). يعد كل من زمن القراءة من الحساسات وزمن الكتابة إلى المشغلات الميكانيكية، أزمنة حاسمة بالنسبة للسلوك بشكل عام في الأنظمة CPS، لأن أي تغيير في هذه التوقيتات سيؤدي إلى تغيير سلوك النظام كاملاً.

الأنظمة الفيزيائية المحوسبة CPS هي نظم هجينة بالجوهري، ومن أهم التحديات التي تواجه تصميم هذه الأنظمة إنشاء مفهوم مشترك للزمن بين العالم الفيزيائي المستمر ونظام الحوسبة حيث يزداد الزمن على شكل خطوات منقطعة، والبحث مستمر لتطوير أطر ودلالات على مستوى تجريدي عالي للسلوك الزمني. ازداد في السنوات العشرة الأخيرة الاهتمام في النظم الفيزيائية المحوسبة لأهميتها البالغة في صناعة التكنولوجيا، وفي أنظمة التحكم الهجينة لما تحققه من أمان في تحديد مسار إنتقال الحالة. يعد وصول النظام إلى حالة محددة مسبقاً خلال فترة زمنية محددة من

المتطلبات الأساسية في عمل أي متحكم أو نظام. بالإضافة إلى تحديد شكل المسار الذي سيسلكه النظام باتجاه الهدف أو الحالة المحددة، ويجب أن يعبر هذا المسار إلى الهدف عبر المناطق الآمنة، ويتجنب المناطق غير الآمنة [5] [6].

3- هدف البحث ومبرراته

للتغلب على مشكلة استخدام اللغات العادية في التوصيف، لابد من إطار عمل قائم على الحالة للتحكم الإشرافي للأنظمة الفيزيائية المحوسبة CPS. يأتي المنطق الزمني الخطي LTL كإطار منهجي قادر على استيعاب المواصفات المهمة في النظام، فهو عبارة عن لغة رياضية طبيعية تساعد مهندسي الحوسبة والتحكم في توصيف وتصميم أنظمتهم بأقل الأخطاء. ويوفر المنطق الزمني آلية توصيف منهجية تسمح للمصمم بتعريف السلوك المطلوب كميًا quantitatively للأنظمة عن طريق وصف التفاعل بين الوحدات الفرعية، ويسمح بالتعبير بإيجاز عن أهداف معقدة بسبب تشابهه مع اللغة الطبيعية، إذ يجب أن يكون التوصيف الزمني حدسي وطبيعي من دون تشويه النموذج بتعقيدات غير ضرورية. ويساعد المنطق الزمني الخطي في تصميم وحدات تحكم هجينة تضمن تحقق المواصفات المطلوبة، وبالتالي تقلل الحاجة إلى التحقق المنهجي formal verification الذي يعتبر خطوة أساسية في تصميم نظم CPS [7].

4- الدراسة المرجعية

نركز في الدراسة المرجعية هذه على بعض الأدوات والنماذج المستخدمة في توصيف ومحاكاة الزمن في الأنظمة بشكل عام، والتي تتفاعل مع الوسط الفيزيائي بشكل خاص، ومن الجدير بالذكر أن الأبحاث التي تعني بتطوير هذه الأدوات وطرق تطبيقها مازال مستمر.

Giotto: وهو عبارة عن نموذج يصف الاتصال بين مكونات تتواصل دورياً periodic time، تم تصميمه من أجل التطبيقات الحتمية deterministic وتطبيقات السلامة الحرجة. في Giotto، يتم توصيف النظام كمجموعة من المهام، ولكل مهمة زمن تنفيذ منطقي (LET) logical execution time، وغالباً ما يكون هذا الزمن موصف على أساس زمن التنفيذ الأسوأ WCET. حيث تتم مطابقة الزمن المنطقي في LET مع الزمن الفيزيائي الحقيقي، ويتم خلاله قراءة الدخل في البداية والكتابة إلى الخرج في النهاية بغض النظر عن مقدار الزمن الذي يفصل عمليتي القراءة والكتابة. بالنتيجة الدخل والخرج I/O معرفين بشكل جيد، والزمن الذي يحدد تنفيذ المهمة والتأخير الزمني بين الدخل والخرج يحدد احصائياً بحسب زمن التنفيذ المنطقي للمسار بين الدخل والخرج. بالإضافة إلى توصيف الدخل والخرج للنظام، يحقق Giotto الاتصال بين مهام النظام [8].

PTIDES: وهو نموذج حوسبة Model of Computation (MoC) ويعد امتداد وتوسع لنموذج الأحداث المتقطعة، لكن يأخذ بالحسبان العلاقة بين الزمن الحقيقي (الزمن الفيزيائي) وزمن النمذجة (الزمن المنطقي) المستخدم في ترتيب الأحداث في النظام. يقدم PTIDES (Programming Temporally Integrated Distributed Embedded Systems) إطار عمل لدراسة النظم المضمنة الموزعة. يتم ربط الزمن الفيزيائي والزمن المنطقي عند منافذ النظام (الدخل والخرج I/O)، وبما أن جميع إشارات الدخل عبارة عن

أحداث فإن زمن هذه الأحداث غير مشكّل ضمن النموذج PTIDES، والتأخير الزمني بين الدخل والخرج معرف عن طريق الممرات السببية التي تربط الدخل بالخرج، أي أن النموذج يُعرف ربط سببي وزمني للخرج مع الدخل [9].

STL: يُعرف بالمنطق الزمني للإشارة Signal Temporal Logic (STL) ويُقدم كلغة رسمية لوصف مجموعة واسعة من الخصائص المرتبطة بالإشارة المستمرة، والأحداث المتقطعة والمسافة الزمنية بينها، حيث أن الأحداث عبارة عن تغيير قيمة ما أو تجاوز عتبة في متحولات حقيقية. قراءة الدخل وكتابة الخرج في STL عبارة عن أحداث مرتبطة بصيغ منطقية. يستخدم STL في تحليل البرامج في النظم الفيزيائية المحوسبة CPS، حيث يصف خصائص مثل الأمان safety، وقابلية الحياة liveness والتتالي sequentiality [10].

MTL: يُعرف بالمنطق الزمني المترى Metric temporal logic (MTL) يستخدم لوصف الخصائص الزمنية المكتملة لأنظمة الزمن الحقيقي، ويستخدم أيضاً كلغة وصف وتحكم وواجهة لتخليق synthesis التحكم [11].

CyPhySim: وهو عبارة عن محاكي للأنظمة الفيزيائية المحوسبة، حيث يدعم رونجكوتا Runge-Kutta التقليدي كطريقة لحل المعادلات التفاضلية عددياً، ويدعم الحالات المكتملة للمعادلات التفاضلية والأنظمة الهجينة ونماذج الأحداث المتقطعة. ابتكر فكرة الأعلام الناعمة smooth tokens التي تسمح بحوسبة المزيج العددي والرمزي وقدم ما يسمى التكامل المتقطع (تكامل الأحداث المتقطعة) وخفض حجم الحوسبة لمحاكاة بعض نماذج الأنظمة [12].

في القسم التالي، سيتم التوسع بمفهوم المنطق الزمني الخطي LTL، لنستخدمه كإطار عمل في توصيف نظام نقل الحركة الآلي ATS في السيارة كمثال على نظام CPS.

5- المنطق الزمني الخطي

يشكل المنطق الزمني الخطي LTL الإطار القانوني لصياغة أنظمة الحالة state systems أو الأنظمة الإنتقالية transition systems \mathcal{T} . حيث يولد النظام تتالياً من الحالات، التي تنتقل خلالها النظام مع تقدم الزمن. وتعد لغة المنطق الزمني الخطي LTL امتداداً للمنطق الإفتراضي propositional logic، ولكن مع قيود زمنية تُشير إلى الحالات المستقبلية للنظام. يُبنى LTL على مجموعة منتهية من الفرضيات الأساسية atomic propositions، والعمليات المنطقية الآتية [13] [14]:

○ : Nexttime

□ : always or henceforth

◇

: Sometime or eventuality

(1)

U: Until

W : Weak Until

R : Release

⇔: (if and only if)

⇒: (if... then...)

• Next time (الزمن التالي): بفرض أن صيغة formula تحدد خاصية الحالة الراهنة، فإن $(\bigcirc \varphi)$

تبين أن الحالة التالية متحققة. تدل الصيغة التالية $\bigcirc halt \rightarrow alert$ إلى أن النظام بالحالة alert والحالة التالية ستكون halt.

الصيغة $\bigcirc^n \varphi \wedge \bigcirc^{n-1} \varphi \wedge \bigcirc^{n-2} \varphi \wedge \dots \wedge \bigcirc^2 \varphi \wedge \bigcirc \varphi \wedge \varphi$ تبين أن φ صحيحة true وتبقى صحيحة لـ n حالة تالية،

حيث

$$\bigcirc^n \varphi := \underbrace{\bigcirc \dots \bigcirc}_{n \text{ times}} \varphi$$

• **Always** (من الآن فصاعداً): تدل الصيغة $\square \varphi$ على أن جميع الحالات المستقبلية بما فيها الحالية تستوفي φ ، أي أن φ صحيحة من الآن فصاعداً.

• **Sometime** (بعض الأحيان): تدل الصيغة $\diamond \varphi$ على أنه في المستقبل، من الممكن الحالة أن تستوفي الصيغة φ من دون تحديد بشكل واضح أي حالة منها. تدل الصيغة التالية $alert \rightarrow \diamond halt$ إلى أن النظام بالحالة $alert$ وسوف يصبح في الحالة $halt$ في نقطة ما منذ الآن.

بشكل مشابه، تدل الصيغة $(alert \rightarrow \diamond \bigcirc halt)$ حينما يكون النظام في المستقبل في الحالة $alert$ ، سيكون في الحالة $halt$ في نقطة ما فيما بعد. تدل الإزدواجية بين \diamond و \square إلى أن φ محققة دائماً يكافئ القول أن $\neg \varphi$ لن تكون محققة أبداً، بالتالي $\square \varphi$ و $\neg \diamond \neg \varphi$ متكافئتين بالمعنى والمنطق.

• **Until** (حتى): عملية ثنائية \mathcal{U} أكثر تعقيداً من العملية \diamond . تدل الصيغة $\varphi \mathcal{U} \psi$ ، أن φ صحيحة حتى تصبح ψ صحيحة، بدقة أكثر، ستكون ψ صحيحة عند حالة ما في المستقبل (أو من الممكن الآن) وستحمل φ من الآن فصاعداً في هذه الأثناء.

على سبيل المثال يمكن إعادة تعريف $(alert \rightarrow \diamond halt)$ $\square (alert \rightarrow \diamond halt)$ إبتداءً من الحالة $alert$ ، سيبقى الإنذار $alarm$ فعالاً حتى التوقف (أي الحالة $halt$) في وقت ما $eventually$ reached.

$$\square (alert \rightarrow (alarm \mathcal{U} halt))$$

• **Weak Until** (حتى الضعيفة): نكتب \mathcal{W} ، وتدل الصيغة $\varphi \mathcal{W} \psi$ على $(\varphi \text{ until } \psi)$ ولكن إمكانية حدوث ψ غير حتمية، وإذا ψ لم تحدث فإن φ ستبقى صحيحة دائماً. بالتالي $\varphi \mathcal{W} \psi$ هي اختصار لـ $\square \varphi \vee (\varphi \mathcal{U} \psi)$.

• **Release** (تحرير): وتشكل إزدواجية مع العملية \mathcal{U} ، $\varphi \mathcal{R} \psi := \neg(\neg \varphi \mathcal{U} \neg \psi)$ ، أي أن تحرير صحة φ يتطلب صحة ψ وتعرف $(\psi \wedge \varphi) \mathcal{R} \psi \vee \square \psi$. أي أن ψ تبقى صحيحة حتى وقت ما في المستقبل، تصبح فيه φ صحيحة وتحرر ψ من التزامها. أي أن $\square \psi$ اختصار لـ $\perp \mathcal{R} \psi$.

لنكن Π مجموعة من الفرضيات الأساسية. و $\mathcal{L}_{LTL}(\Pi)$ أو اختصاراً \mathcal{L}_{LTL} مجموعة من المحارف تمثل اللغة الأساسية للمنطق الزمني الخطي الافتراضي على هذه الفرضيات، تعطى على الشكل الآتي: $\mathcal{L}_{LTL}(\Pi, op)$ ، حيث $op \in \{\square, \bigcirc, \diamond, \mathcal{R}, \mathcal{W}, \mathcal{U}\}$. فيما يلي تعريف لصيغ $\mathcal{L}_{LTL}(\Pi, op)$:

1. كل فرضية أساسية في Π هي صيغة
 2. false صيغة
 3. إذا φ و ψ صيغ بالتالي $(\varphi \rightarrow \psi)$ صيغة
 4. إذا φ صيغة بالتالي $\bigcirc \varphi$ و $\square \varphi$ صيغ أيضاً.
- يمكن تقديم مجموعة أخرى من العمليات على النحو الآتي:

- a. $\neg \varphi \equiv \varphi \rightarrow$
false, *negation*
- b. $\varphi \vee \psi \equiv \neg \varphi \rightarrow$
 ψ , *disjunction*

- c. $\varphi \wedge \psi \equiv \neg(\varphi \rightarrow \neg\psi)$, *conjunction*
d. $\varphi \leftrightarrow \psi \equiv$
 $(\varphi \rightarrow \psi) \wedge (\psi \rightarrow \varphi)$, *equivalence* (2)
e. $\text{true} \equiv \neg \text{false}$.
f. $\diamond\varphi \equiv \neg\Box\neg\varphi$
g. $\diamond\varphi \equiv \text{True} \mathcal{U}\varphi$

دلالات المنطق الزمني الخطي LTL

تعد الصيغة φ من \mathcal{L}_{LTL} صالحة في بنية زمنية إنتقالية \mathcal{T} من أجل مجموعة من الفرضيات الأساسية Π (أي $\mathcal{T} \models \varphi$)، وترمز بـ $\mathcal{F} \models \varphi$ إذا تحقق $\text{tt}(\varphi) = \mathcal{T}_i$ من أجل $i \in \mathbb{N}$ ، أي أن φ محققة عند انتقال معين. وتعد φ نتيجة *consequence* لمجموعة الصيغ \mathcal{F} (ونرمز لها بـ $\mathcal{F} \models \varphi$) إذا $\mathcal{F} \models \varphi$ محققة لكل \mathcal{T} . وتعد φ شاملة الصلاحية *universally valid* ($\models \varphi$) إذا $\emptyset \models \varphi$.

فيما يلي بعض الدلالات LTL

- عندما تكون الصيغتين φ و ψ من \mathcal{L}_{LTL} متكافئتين منطقياً نكتب $\varphi \leftrightarrow \psi$.
- إذا $\mathcal{F} \models \varphi \rightarrow \psi$ و $\mathcal{F} \models \varphi$ بالتالي $\mathcal{F} \models \psi$.
- إذا $\mathcal{F} \models \varphi$ بالتالي $\mathcal{F} \models \Box\varphi$ و $\mathcal{F} \models \circ\varphi$ وبشكل خاص $\varphi \models \Box\varphi$ و $\varphi \models \circ\varphi$.
- إذا $\mathcal{F} \models \varphi \rightarrow \psi$ و $\mathcal{F} \models \varphi \rightarrow \circ\varphi$ بالتالي $\mathcal{F} \models \varphi \rightarrow \Box\psi$.
- لنكن \mathcal{T} بنية زمنية إنتقالية، و $i \in \mathbb{N}$ ، بالتالي $\mathcal{T}_j^i(\varphi) = \mathcal{T}_{i+j}(\varphi)$ مهما كانت $j \in \mathbb{N}$ والصيغة φ .

- $\mathcal{F} \cup \{\varphi\} \models \psi \Leftrightarrow \mathcal{F} \models \Box\varphi \rightarrow \psi$.
- $\mathcal{F} \models \varphi \rightarrow \psi \Rightarrow \mathcal{F} \cup \{\varphi\} \models \psi$.
- إذا $\mathcal{F} \models \varphi$ و $\psi \in \mathcal{F}$ أيأ كانت ψ بالتالي $\mathcal{F} \models \psi$.
- نقول عن صيغة φ أنها مقبولة محلياً إذا وجد تركيب زمني \mathcal{T} و $i \in \mathbb{N}$ حيث $\mathcal{T}_i(\varphi) = \text{tt}$.
- $\mathcal{F} \models \varphi$ إذا وفقط إذا $\neg\varphi$ غير مقبولة

6- الوصف الرياضي لنظام CPS

ليكن Σ نظام ديناميكي من الدرجة n ، حيث يوصف بالمعادلة التفاضلية الآتية:

$$\Sigma: \begin{cases} \dot{x}(t) = f(x(t), u(t)), & x(t) \in X \subseteq \mathbb{R}^n, & u(t) \in U \subseteq \mathbb{R}^n \\ y(t) = g(x(t), u(t)), & y(t) \in \mathbb{R}^n \end{cases} \quad (3)$$

حيث $x(t)$ تصف حالة النظام عند الزمن t و $u(t)$ دخل النظام، و $y(t)$ خرج النظام.

عند التخطيط على مستوى عالي، نفترض وجود عدة مناطق (حالات) يهتم بها المصمم ضمن فضاء الحالة X للنظام Σ . لنكن $\Pi = \{\pi_1, \dots, \pi_n\}$ مجموعة منتهية من الرموز تدل إلى هذه المناطق، وهي الفرضيات الأساسية. فتكون الدالة الآتية:

$$[\cdot]: \Pi \rightarrow 2^X \text{ (powerset of } X: \mathcal{P}(X))$$

تعبير عن انتقال النظام من حالة ما إلى حالة واحدة أو أكثر ضمن فضاء الحالة X ، أي من أجل $\pi \in \Pi$ فإن $[\pi] \subseteq X$.

فإذا كان المطلوب الوصول إلى حالة $[\pi_{n+1}]$ وتجنب الحالات $[\pi_i]_{i=1, \dots, n}$ ، فإن الصيغة $\neg(\pi_1 \vee \pi_2 \vee \dots \vee \pi_n) \mathcal{U} \pi_{n+1}$ تعبر عن ذلك وهي كوصف الوصول إلى حالة ما مع تجنب بعض الحالات التي ربما تكون غير آمنة، وإذا كان المطلوب من النظام المرور بالحالات $[\pi_i]_{i=1, \dots, 3}$ فيمكن التعبير عن ذلك بالصيغة $(\pi_1 \wedge \diamond(\pi_2 \wedge \diamond \pi_3))$.

أما الصيغة $\diamond \pi_1 \wedge \pi_2 \diamond \wedge \dots \wedge \diamond \pi_k$ فإن النظام سيصل إلى الحالات $[\pi_1]$ في وقت ما والحالة $[\pi_2]$... والحالة $[\pi_k]$ أيضاً في وقت آخر، أي أنه مطلوب من النظام المرور بالحالات السابقة ولكن من دون ترتيب محدد. وإذا أردنا من النظام أن يكرر حالة المرور السابقة بشكل لانتهائي فيمكن التعبير عن ذلك بالصيغة $\square(\diamond \pi_1 \wedge \pi_2 \diamond \wedge \dots \wedge \diamond \pi_k)$.

لوصف النظام الفيزيائي المحوسب CPS لابد من إطار قانوني يعتمد على LTL يستوعب السلوك المستمر والمتقطع في آن معاً.

نفترض أن الشكل الرياضي لنظام CPS على النحو الآتي:

$$SPC = (X, U, \Pi, F_c, F_s) \quad (4)$$

حيث X هو فضاء الحالة، و U دخل النظام، و $\Pi = \{\pi_1, \dots, \pi_n\}$ الفرضيات الأساسية.

و $F_s: \Pi \times U \rightarrow 2\Pi$ مجموعة من توابع الانتقال switching functions

و $F_c: \mathbb{R}^+ \rightarrow \mathbb{R}^+$ مجموعة من التوابع المستمرة continuous functions

فإذا افترضنا على سبيل المثال أن $\pi_5 = \mathcal{F}_{T_1}$ ، أي أن المسار $\pi_5, \pi_4, \pi_3, \pi_2, \pi_1$ trajectory \mathcal{T}_1

يؤدي إلى الحالة π_5 ، يترافق مع تفعيل التوابع $(f_{s1,2}, f_{s2,3}, f_{s3,4}, f_{s4,5})$.

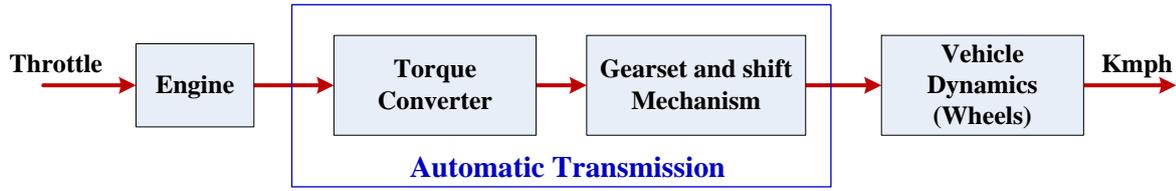
وبحسب المسار السابق لدينا $\pi_2 = \pi_3 \circ$ ، و $\pi_5 \mathcal{U} (\pi_1 \wedge \pi_2 \wedge \pi_3 \wedge \pi_4)$ تعبر عن الوصول إلى

حالة π_5 مع المرور بالحالات $\pi_1, \pi_2, \pi_3, \pi_4$. إذا كانت كل مسارات النظام تؤدي إلى الحالة π_5 فإن $\mathcal{F}_{T_1} \pi_5$.

7- نظام نقل الحركة الآلي (ATS) Automatic Transmission System

يعمل المحرك على تحويل الطاقة الحرارية إلى طاقة ميكانيكية دورانية. حيث، يعمل الضغط الناتج عن الطاقة الحرارية على تحريك مكابس Pistons المحرك بشكل ترددي، وتتحول هذه الحركة الترددية إلى حركة دورانية بواسطة عمود المرافق Crankshaft. أما الطاقة الحرارية بدورها تنتج من احتراق مزيج الوقود والهواء داخل المحرك. إذن المحرك هو نظام ديناميكي يُنتج الحركة من دمج العمليات الفيزيائية والتفاعلات الكيميائية، فيمكن توصيفه باستخدام المعادلات التفاضلية [15][16][17][18][19].

ويعمل المحرك مع نظام نقل الحركة الآلي ATS، على تحريك السيارة وزيادة سرعتها بحسب الظروف المحيطة ونوعية الطريق الذي تستخدمه العربة، والهدف هو الحصول على أفضل أداء. ترتبط هذه الأنظمة مع بعضها البعض وفق المخطط الصندوقي المبين في الشكل(3).



الشكل(3): مخطط صندوقي لمكونات النظام الديناميكي في السيارة

يعمل نظام ATS على ضبط نسبة سرعة المحرك إلى سرعة العجلات، ويحافظ على أمثلية عمل المحرك بغض النظر عن الحمولة أو السرعة. ويحدد نظام ATS أيضاً نسبة تعشيق Gear Ratio بين سرعة المحرك وسرعة العربة، بحيث يعطي المحرك الطاقة المناسبة لقيادة العربة عند أي سرعة. في نظام نقل الحركة اليدوي يقوم السائق باختيار نسبة التعشيق المناسبة للسرعة التي يقود بها العربة عن طريق اختيار أحد المسننات الموجودة في علبة السرعة (أو صندوق التروس) Gear Box. أما في نظام النقل الآلي فيتم الاختيار بشكل آلي بناءً على سرعة العربة وكمية الهواء المقدمة للمحرك. يختلف عدد السرعات التي يقدمها نظام ATS بحسب نوع السيارة، ولكن في السيارات نوع SI 4-Cylinders ينتقل نظام ATS بين أربعة سرعات بحسب سرعة العربة وكمية الهواء المتدفقة عبر فتحة الخانق.

1-7 الوصف الرياضي للنظام

تنتج الطاقة الحرارية في المحرك عن احتراق مزيج الوقود والهواء بنسب محددة داخل الإسطوانات. ويؤثر الحمل load المطبق على المحرك كعامل إضافي للتحكم بسرعة دوران المحرك. حيث تتغير كتلة الهواء m_{ai} المتدفقة عبر صمام دخل الهواء Throttle إلى المحرك وفق المعادلة الآتية [15][16][17]:

$$\dot{m}_{ai} = f(\theta)g(P_m) \quad (5)$$

حيث

$$f(\theta) = 2.821 - 0.0523\theta + 0.10299\theta^2 - 0.00063\theta^3 \quad (6)$$

$$g(P_m) = \begin{cases} 1 & , P_m \leq \frac{P_{amb}}{2} \\ \frac{2}{P_{amb}} \sqrt{P_m P_{amb} - P_m^2} & , \frac{P_{amb}}{2} \leq P_m \leq P_{amb} \\ -\frac{2}{P_m} \sqrt{P_m P_{amb} - P_{amb}^2} & , P_{amb} \leq P_m \leq 2P_{amb} \\ -1 & , P_m \geq 2P_{amb} \end{cases} \quad (7)$$

ويُحدد تغير ضغط مسرب الهواء Intake Manifold باستخدام قانون الغازات العامة Boyle's law وفق

الآتي:

$$\dot{P}_m = \frac{RT}{V_m} (\dot{m}_{ai} - \dot{m}_{ao}) \quad (8)$$

أما كتلة الهواء m_{ao} (Intake Mass Flow Rate) اللازمة لعملية الإحتراق فتعطى بالعلاقة الآتية:

$$\dot{m}_{ao} = -0.366 + 0.08979N_e P_m - 0.0337N_e P_m^2 + 0.0001N_e^2 P_m \quad (9)$$

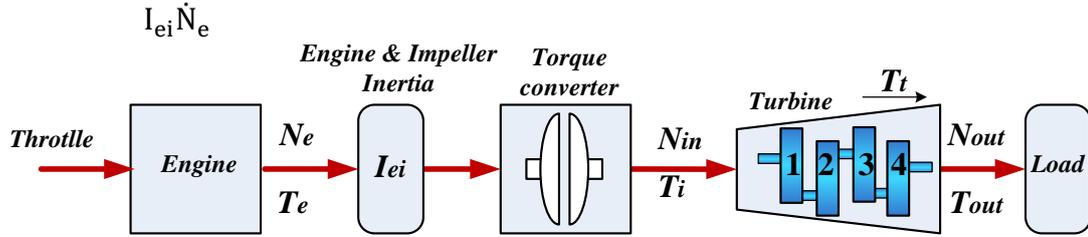
عزم التدوير Torque Generation الناتج من دوران المحرك يعطى بالعلاقة الآتية:

$$T_e = -181.3 + 379.36m_a + 21.91(A/F) - 0.85(A/F)^2 + 0.26\sigma - 0.0028\sigma^2 + 0.027N_e - 0.000107N_e^2 + 0.00048N_e\sigma + 2.55\sigma m_a - 0.05\sigma^2 m_a \quad (10)$$

والتسارع Acceleration الناتج فيعطى بالعلاقة الآتية:

$$J\dot{N}_e = T_e - T_{load}(11)$$

المعادلات السابقة هي معادلات وصف عمل المحرك. أما نظام ATS الشكل (4) فينتقل بين أربعة سرعات صعوداً ونزولاً بناءً على سرعة العربة وكمية الهواء المتدفق عبر فتحة الخانق. يستقبل نظام المحرك إشارة فتحة الخانق كدخل، ومن خلال قيمة هذه الفتحة تتحدد سرعة دوران المحرك والعزم الناتج. يرتبط المحرك بالدافعة الميكانيكية Impeller في مبدل عزم التدوير Torque Converter لنظام ATS بعلاقة تعطى على النحو الآتي:



الشكل (4): مخطط صندوقي لنظام ATS

بالمقارنة بين العلاقتين (11) و (12)، نلاحظ أنه نتيجة ربط المحرك مع نظام ATS، تم استبدال عزم عطالة المحرك بعزم العطالة Iei وهو يجمع عزم عطالة المحرك مع الدافعة الميكانيكية. يُشخص دخل وخرج مبدل عزم التدوير كتابع لسرعة المحرك وسرعة العنفة Turbine، ويحدد اتجاه تدفق الطاقة في هذا المثال من الدافعة الميكانيكية إلى العنفة، ويعطى عزم التدوير للدافعة الميكانيكية على النحو الآتي:

$$T_i$$

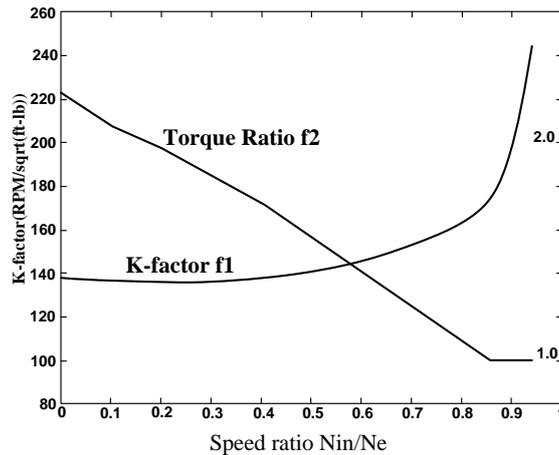
$$K = f_1(N_{in}/N_e) \quad \text{حيث}$$

ويعطى عزم تدوير العنفة بالعلاقة

$$T_t$$

$$R_{TQ} = f_2(N_{in}/N_e) \quad \text{حيث}$$

يُطلق على K بالسعة Capacity أو K-factor وتعطى قيمته بالتابع f_1 ، أما R_{TQ} فهو نسبة عزم التدوير Torque Ratio وتعطى قيمته بالتابع f_2 كما هو مبين في الشكل (5).



الشكل (5): توابع السعة ونسبة عزم التدوير

تعطى نسبة النقل (R_{TR}) الناتجة عن تبديل المسننات في علبة السرعة على النحو الآتي:

$$R_{TR}$$

$$T_{out} = R_{TR}T_{in}$$

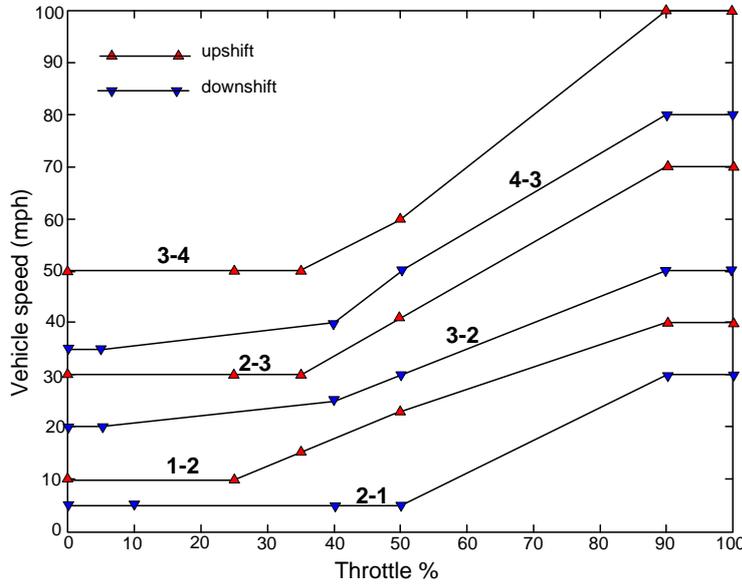
$$N_{out} = N_{in}/R_{TR}$$

تحدد قيمة نسبة النقل R_{TR} وفق التابع f_3 كما هو مبين في الجدول (1).

الجدول (1): التابع f_3

gear	R_{TR}
1	2.393
2	1.450
3	1.000
4	0.677

لدينا كما هو مبين في الجدول (1) أربعة مسننات في علبة السرعة، يعطي التنقل بينها تغيير بنسبة النقل. يتم التنقل بين المسننات الأربعة صعوداً (*Upshift*) ونزولاً (*Downshift*) تبعاً لقيمة سرعة العربة وفتحة خانق الهواء كما هو مبين في الشكل (6).



الشكل (6): مخطط الإزاحة بين مسننات علبة السرعة

الربط النهائي بين الكتلة الديناميكية الممثلة بالعجلات الأمامية ونظام نقل الحركة يتم وفق المعادلة الآتية:

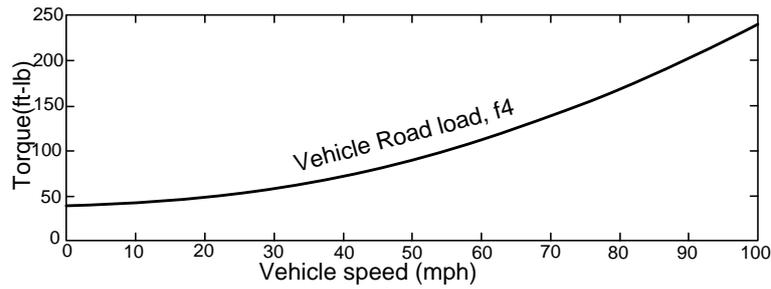
$$I_v \dot{N}_w = R_{fd}(T_{out} - T_{D.Load}) \quad (16)$$

$$T_{D.Load} = f_4(N_w)$$

ويُعطى عزم التحميل $T_{D.Load}$ للكتلة الديناميكية بالتابع f_4 كما هو مبين في الشكل (7)، أو كتابع من الدرجة

الثانية بالنسبة لسرعة العربة على النحو الآتي:

$$T_{D.Load} = \text{sgn}(\text{mph})(R_{load0} + R_{load2} \text{mph}^2 + T_{brake}) \quad (17)$$



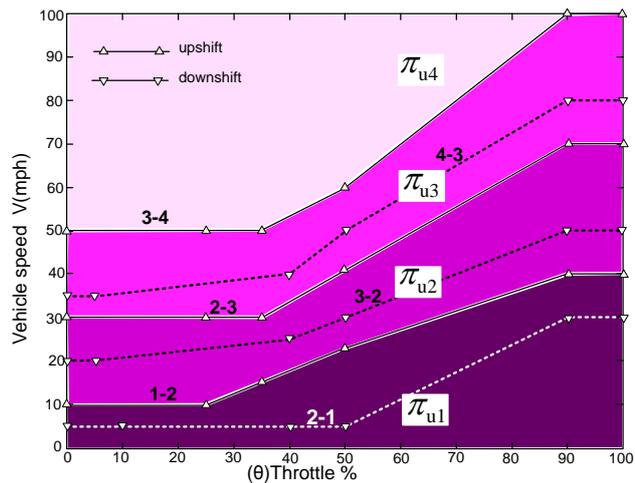
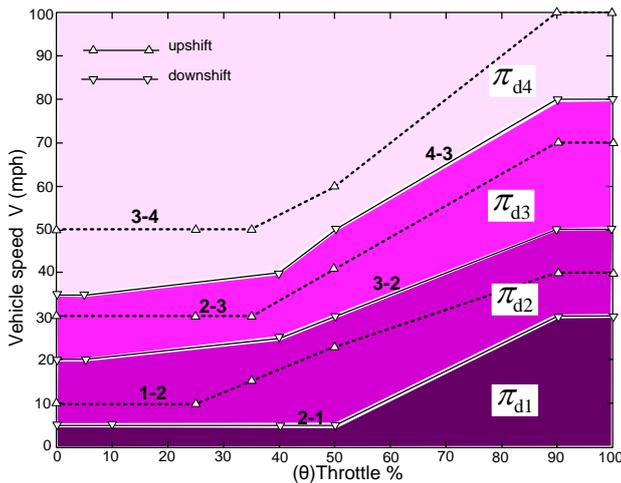
الشكل (7): تغير عزم الحمل في الكتلة الديناميكية بتغير سرعة العربة

8- نظام نقل الحركة الآلي كنظام CPS

يبين لنا الوصف السابق أن نظام نقل الحركة هو نظام فيزيائي محوسب، حيث ينتقل النظام بين حالة مستمرة وأخرى بناءً على تغير في إشارات دخل النظام. فحسب تعريف الشكل الرياضي المقترح للنظام SPC في العلاقة (4)، يطلب من النظام تحقيق سلوك ووصف محدد، سنأتي على ذكره بعد تحديد بارامترات النظام $SPC_{ATS} = (X, U, \Pi, F_C, F_S)$.

تمثل X فضاء الحالة وهي مناطق العمل المحددة بفتحة الخانق وسرعة العربة كما هو مبين الشكل (8) وهي تختلف بحسب نوع السيارة، أما دخل النظام فهو زاوية فتحة الخانق θ وتتخذ كنسبة مئوية على كامل مجال التغير، والسرعة الخطية للعربة مقدرة بالميل بالساعة mph . أي أن مجموعة مداخل النظام SPC_{ATS} على النحو الآتي:

$$U = \{mph, \theta\} \quad (18)$$



الشكل (8): الحالات الأساسية (الفرضيات الأساسية) لنظام SPC_{ATS}

نعرف الفرضيات الأساسية للنظام على النحو الآتي:

$$\Pi = \{\pi_{u1}, \pi_{u2}, \pi_{u3}, \pi_{u4}, \pi_{d1}, \pi_{d2}, \pi_{d3}, \pi_{d4}\} \quad (19)$$

وهي مجموعة جزئية من فضاء الحالة، وتتكون من 4 حالات أثناء تسارع السيارة $\{\pi_{u1}, \pi_{u2}, \pi_{u3}, \pi_{u4}\}$ و 4 حالات أثناء تباطؤ السيارة $\{\pi_{d4}, \pi_{d3}, \pi_{d2}, \pi_{d1}\}$ كما في الشكل (8)، حيث π_{u1} هي الحالة البدائية initial state.

بالنسبة لتتابع النظام المستمرة، لدينا السرعة الزاوية لدوران العجلات الأمامية \dot{N}_w هي التي تحدد سرعة السيارة، بالتالي تكون مجموعة التتابع المستمرة على النحو الآتي:

$$F_C = \{f_{c1}, f_{c2}, f_{c3}, f_{c4}\}$$

$$f_{ci_{i=1,\dots,4}} \equiv \dot{N}_w = \frac{R_{fd}}{I_v} (R_{RT_i} \times R_{TQ} \times (N_e/K)^2 - T_{D.Load}) \quad (20)$$

حيث R_{RT_i} هي قيمة مرتبطة بحالات النظام الأساسية وتتتابع النقل التي سيتم تحديدها فيمايلي (شاهد الجدول (1)). يمكن تعريف توابع الانتقال من الشكل (8) على النحو الآتي:

$$f_s: \Pi \times U \rightarrow 2\Pi$$

$$F_S = \{f_{s12}, f_{s23}, f_{s34}, f_{s43}, f_{s32}, f_{s21}\}$$

$$f_{s12} \equiv f(v, \theta): \pi_{u1} \rightarrow \pi_{u2} = \begin{cases} v - 10 & \text{if } 0 < \theta \leq 25 \\ v - 0.48 \times \theta + 2 & \text{if } 25 \leq \theta \leq 50 \\ v - 0.45 \times \theta + 0.5 & \text{if } 50 \leq \theta \leq 90 \\ v - 40 & \text{if } \theta \geq 90 \end{cases}$$

$$f_{s23} \equiv f(v, \theta): \pi_{u2} \rightarrow \pi_{u3} = \begin{cases} v - 30 & \text{if } \theta \leq 35 \\ v - 0.73 \times \theta - 4.55 & \text{if } 35 \leq \theta \leq 90 \\ v - 70 & \text{if } \theta \geq 90 \end{cases}$$

$$f_{s34} \equiv f(v, \theta): \pi_{u3} \rightarrow \pi_{u4} = \begin{cases} v - 50 & \text{if } \theta \leq 35 \\ v - 0.67 \times \theta - 26.67 & \text{if } 35 \leq \theta \leq 50 \\ v - \theta - 10 & \text{if } 50 \leq \theta \leq 90 \\ v - 100 & \text{if } \theta \geq 90 \end{cases} \quad (21)$$

$$f_{s43} \equiv f(v, \theta): \pi_{d4} \rightarrow \pi_{d3} = \begin{cases} v - 35 & \text{if } \theta \leq 5 \\ v - 0.14 \times \theta - 34.29 & \text{if } 5 \leq \theta \leq 40 \\ v - \theta & \text{if } 40 \leq \theta \leq 50 \\ v - 0.75 \times \theta - 12.5 & \text{if } 50 \leq \theta \leq 90 \\ v - 80 & \text{if } \theta \geq 90 \end{cases}$$

$$f_{s32} \equiv f(v, \theta): \pi_{d3} \rightarrow \pi_{d2} = \begin{cases} v - 20 & \text{if } \theta \leq 5 \\ v - 0.14 \times \theta - 19.28 & \text{if } 5 \leq \theta \leq 40 \\ v - 0.5 \times \theta - 5 & \text{if } 40 \leq \theta \leq 90 \\ v - 50 & \text{if } \theta \geq 90 \end{cases}$$

$$f_{s21} \equiv f(v, \theta): \pi_{d2} \rightarrow \pi_{d1} = \begin{cases} v - 5 & \text{if } \theta \leq 50 \\ v - 0.625 \times \theta + 26.25 & \text{if } 50 \leq \theta \leq 90 \\ v - 30 & \text{if } \theta \geq 90 \end{cases}$$

يمكن وصف تسارع السيارة باستخدام المنطق LTL على النحو الآتي:

$$\begin{aligned} & (\pi_{ui} \mathcal{U} \pi_{ui+1})_{i=1,2} \\ & (\pi_{u1} \wedge \pi_{u2} \wedge \pi_{u3}) \mathcal{U} \pi_{u4} \end{aligned} \quad (22)$$

أي أن السيارة أثناء التسارع ستصل إلى الحالة π_{u4} مروراً بالحالات $\pi_{u1}, \pi_{u2}, \pi_{u3}$

أما حالة التباطؤ فتوصف على النحو الآتي:

$$\begin{aligned} & (\pi_{di+1} \mathcal{U} \pi_{di})_{i=1,2} \\ & (\pi_{d4} \wedge \pi_{d3} \wedge \pi_{d2}) \mathcal{U} \pi_{d1} \end{aligned} \quad (23)$$

أي أن السيارة أثناء التباطؤ ستصل إلى الحالة π_{d1} مروراً بالحالات $\pi_{d3}, \pi_{d2}, \pi_{d1}$. تظهر الاحتمالية عند فتحة الخانق $\theta \geq 90$ فظهور الحالة π_{u4} غير حتمي عند حدود معينة للسرعة ($100\text{mph} \geq V$)، أي:

$$\pi_{u3} \mathcal{W} \pi_{u4} \quad (24)$$

بفرض أننا رمزنا بالعملية \oplus إلى تعاقب الإنتقالات، فتدل الصيغة الآتية:

$$\mathcal{F}_6 = f_{s12} \oplus f_{s23} \oplus f_{s34} \oplus f_{s43} \oplus f_{s32} \oplus f_{s21} \models \pi_{d1}$$

أن الحالة π_{d1} هي نتيجة لسلسلة الانتقالات $(f_{s12}, f_{s23}, f_{s34}, f_{s43}, f_{s32}, f_{s21})$ ، وهي تدل إلى أن السيارة تسارعت ثم عادت وتباطأت. يمكن تعميم السابق للحصول على صيغة عامة لعمل نظام SPC_{ATS} على النحو الآتي:

$$\mathcal{F}_k = \bigoplus_{\substack{i=1,\dots,n \\ j=1,\dots,n}} f_{s i, j} \begin{cases} \text{speedup} & j > i \\ \text{speeddown} & j < i \end{cases} \quad (25)$$

حيث k عدد الإنتقالات المتتالية. فعلى سبيل المثال تعطي الصيغة الآتية:

$$\mathcal{F}_3 = f_{s 1,2} \oplus f_{s 2,3} \oplus f_{s 3,4} \models \pi_{u4}$$

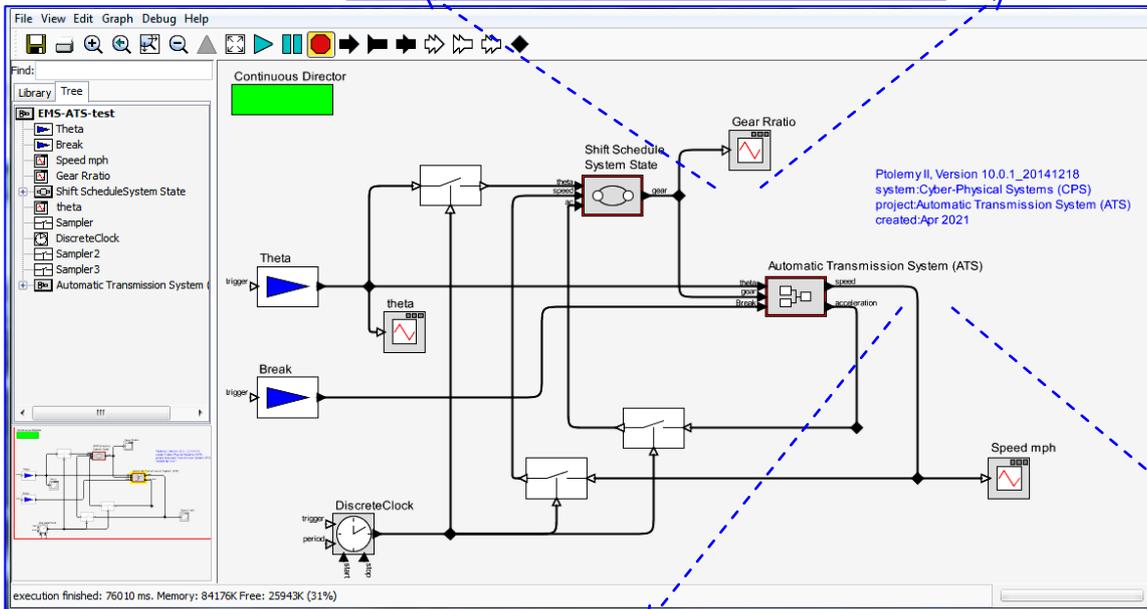
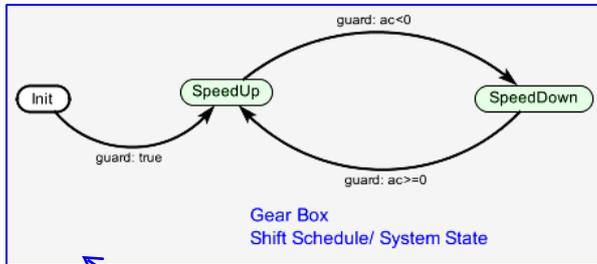
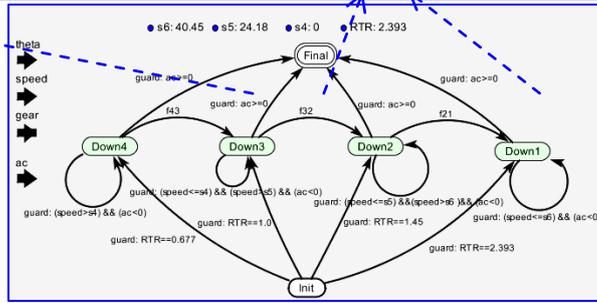
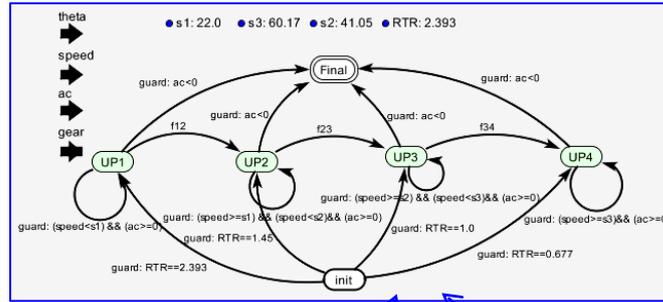
$$\models_{\mathcal{F}_3} \pi_{u4}$$

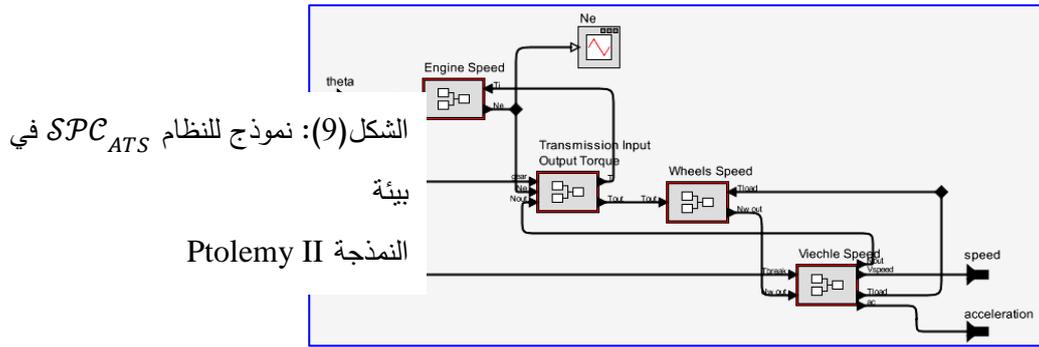
يكون النظام SPC_{ATS} في الحالة π_{u4} وفي حالة تسارع speedup، والتابع المستمر الذي يشغل النظام هو الآتي:

$$\begin{aligned} f_{c4} &= \frac{R_{fd}}{I_v} (R_{RT 4} \times R_{TQ} \times (N_e/K)^2 - T_{D.Load}) \\ &= \frac{R_{fd}}{I_v} (0.677 \times R_{TQ} \times (N_e/K)^2 - T_{D.Load}) \end{aligned}$$

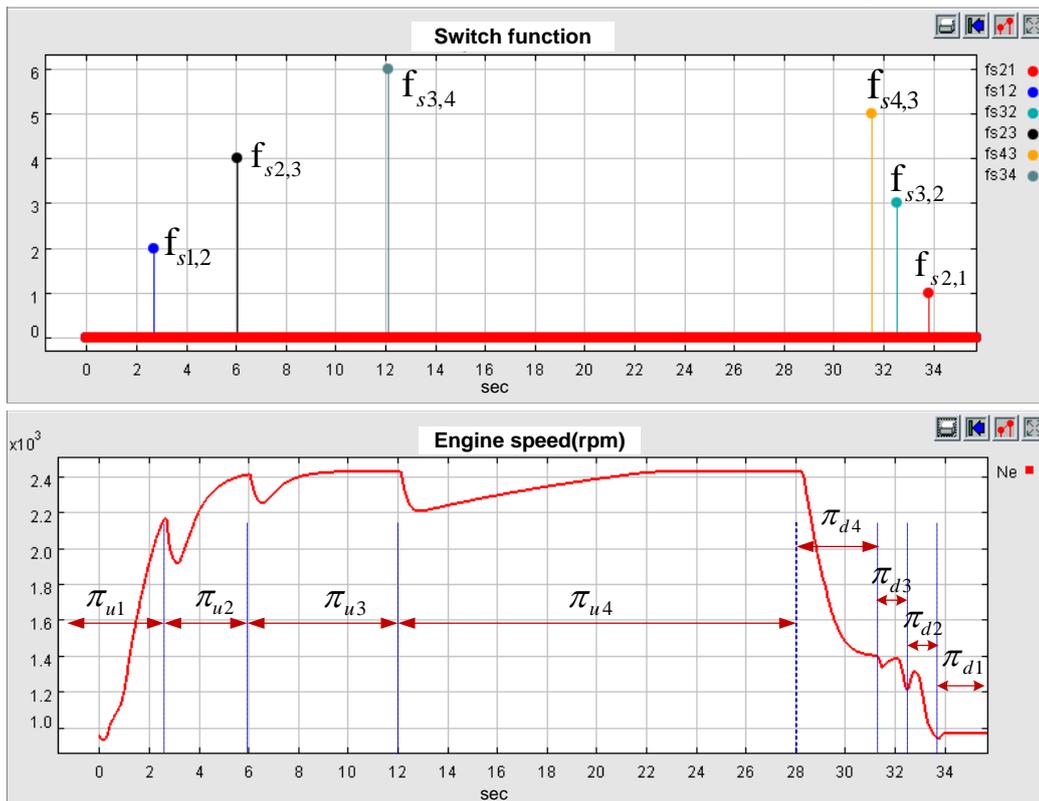
9- تنفيذ واختبار النظام SPC_{ATS}

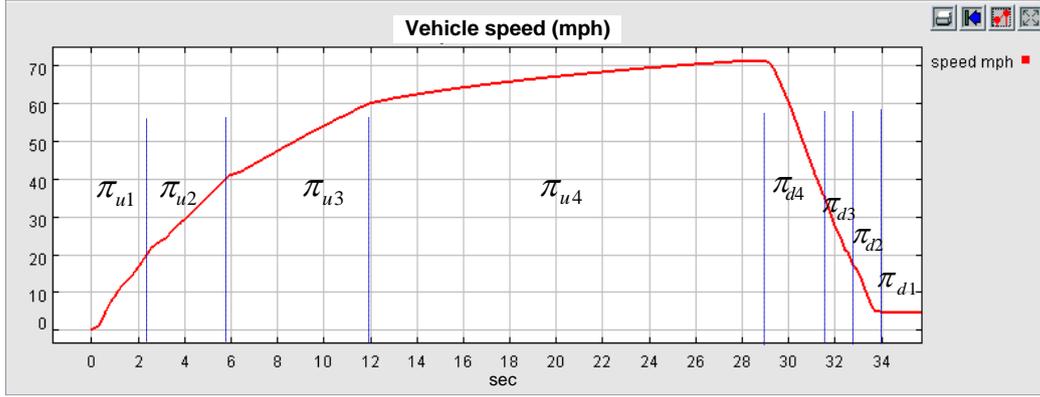
تم تنفيذ واختبار النظام باستخدام بيئة النمذجة (Ptolemy II, Version 10.0.1_20141218) [20] كما هو مبين الشكل (9). حيث تم تنفيذ النظام SPC_{ATS} كنظام هجين يجمع مكونات ديناميكية مستمرة (نظام المحرك + نظام نقل السرعة) تتمثل بالكتلة ATS وهي من نوع CompositeActor وهي تقابل مجموعة التوابع F_C في النظام العلاقة (20). ومكونات منقطعة تتمثل بالكتلة system state وهي من نوع Modal Model وهي نظام إنتقال الحالة وتقابل مجموعة التوابع F_S في النظام العلاقة (21). تم التعبير عن الوسط الفيزيائي كنظام مستمر بالموجه المستمر Continuous Director.





باختبار النظام SPC_{ATS} نحصل النتائج المبينة في الشكل (10). نبدأ الإختبار السابق بوضع فتحة الخانق على 50% ومن دون تطبيق أي عزم كبح، فنلاحظ مع ازدياد سرعة السيارة انتقال النظام من الحالة π_{u1} إلى الحالة π_{u2} مع تفعيل تابع الانتقال $f_{s1,2}$ عند $t = 2.66 \text{ sec}$ ، وفي اللحظة $t = 6.05 \text{ sec}$ انتقل النظام من الحالة π_{u2} إلى الحالة π_{u3} ، وفي اللحظة $t = 12.1 \text{ sec}$ انتقل النظام من الحالة π_{u3} إلى الحالة π_{u4} مع زيادة سرعة المحرك إلى 2430 RPM، وزيادة سرعة السيارة إلى 71 mph.



الشكل (10): نتائج اختبار النظام SPC_{ATS}

مع تطبيق عزم كبح وتخفيض فتحة الخانق إلى 0% بدأت سرعة السيارة بالإنخفاض ودخل النظام بالحالة π_{d4} وفي اللحظة $t = 31.5 \text{ sec}$ انتقل النظام من الحالة π_{d4} إلى الحالة π_{d3} ، واستمرت السيارة بالتباطؤ حتى وصل النظام إلى الحالة π_{d1} في اللحظة $t = 33.79 \text{ sec}$. يمكن كتابة السابق وفق المنطق LTL وفق الجدول (2).

الجدول (2): مثال على بعض النتائج وفق المنطق LTL

المسار	زمن المسار	سرعة المحرك	سرعة السيارة
$F_2 = f_{s1,2} \oplus f_{s2,3} \models \pi_{u3}$	$t = 6.05 \text{ sec}$	2400 RPM	60 mph
$F_3 = f_{s1,2} \oplus f_{s2,3} \oplus f_{s3,4} \models \pi_{u4}$	$t = 12.1 \text{ sec}$	2430 RPM	71 mph
$F_4 = f_{s1,2} \oplus f_{s2,3} \oplus f_{s3,4} \oplus f_{s4,3} \models \pi_{d3}$	$t = 31.5 \text{ sec}$	1330RPM	37 mph

10 - الاستنتاجات والتوصيات

من الناحية الشكلية، في ضوء هذه الدراسة والنتائج التي حصلنا عليها، أن استخدام المنطق LTL في توصيف النظم الفيزيائية المحوسبة CPS (كما جاء في الفقرة 8 توصيف لسلوك النظام ككل باستخدام مفردات هذا المنطق، والنتائج في الجدول (2)) ينطوي على نتيجتين مهمتين. النتيجة الأولى، تكمن في عملية التحقق verification التي تعد خطوة أساسية ومتقدمة في تصميم أنظمة CPS. وهي نتيجة مهمة لأن المنطق LTL من أهم الأدوات المستخدمة في التحقق المنهجي للأنظمة المضمنة بشكل عام، والنتيجة الثانية، إمكانية استخدام المنطق LTL في تخليق synthesis أنظمة CPS.

من ناحية بنيوية وسلوكية، تُعد المنصة platform هي البنية العتادية الهدف، وعادة تكون مستقلة عن التوصيف. أن خلق نقاط تلاقي بين التوصيف ومكونات المنصة أهم مرحلة من مراحل التصميم. ونقاط التلاقي عادةً تكون برمجية، وهي الشروط الزمنية التي تفرضها المنصة أثناء توزيع mapping التوصيف على مكونات المنصة. من خلال النتائج السابقة أن الأزمنة التي تأخذها الصيغ أو مسارات \mathcal{F}_k (الجدول (2))، يمكن مطابقتها عبر التوليف مع الشروط الزمنية التي تفرضها المنصة. وهذا الأمر ينطبق على الشروط الزمنية لمداخل ومخارج النظام مع الوسط الفيزيائي، وهو أمر بالغ الأهمية في تصميم أنظمة CPS.

جدول بأسماء الرموز المستخدمة في النماذج الرياضية

$\theta(deg)$	زاوية الخانق	$\dot{P}_m(bar/s)$	معدل تغير الضغط في المجمع
$P_m(bar)$	ضغط المجمع	$N_e(rad/s)$	سرعة المحرك
$P_{amb}(bar)$	الضغط الخارجي	$m_a(g)$	كتلة الهواء في الأسطوانة

$\dot{m}_{ai}(g/s)$	معدل تدفق كتلة الهواء إلى المجمع	$A/F = 14/7$	نسبة الهواء إلى الوقود
$\dot{m}_{ao}(g/s)$	معدل تدفق كتلة الهواء من المجمع	σ	زاوية الفتح- <i>degrees before top-dead-center TDC</i>
$T(k)$	درجة الحرارة	$T_e(Nm)$	العزم الناتج عن المحرك
$V_m(m^3)$	حجم المجمع	$J(kg.m^2)$	عزم العطالة الدوراني للمحرك
R	ثابت الغازات	$T_{load}(Nm)$	عزم الحمل
$V: mph$ (mile Per hour)	السرعة الخطية للعربة	$N_{in}, N_{out} (RPM)$	سرعة دوران خرج ودخل النقل
$I_{ei} (lb.ft^2)$	عزم عطالة المحرك مع الدافعة الميكانيكية	R_{TR}	نسبة النقل
$T_e (lb-ft)$	عزم تدوير المحرك وسرعة المحرك	$I_v (lb.ft^2)$	عزم عطالة العربة
$T_i (lb-ft)$	عزم تدوير الدافعة الميكانيكية	$N_w (RPM)$	سرعة دوران العجلات
$N_{in} (RPM)$	سرعة العنفة (خرج محول العزم) أو سرعة دخل النقل	R_{fd}	نسبة عزم الكتلة الديناميكية إلى عزم الجزء الأخير من نظام النقل
$T_t (lb-ft)$	عزم تدوير العنفة	$T_{D.Load} (lb-ft)$	عزم تحميل الكتلة الديناميكية
R_{TQ}	نسبة عزم تدوير العنفة إلى عزم تدوير الدافعة الميكانيكية	R_{load0}, R_{load2}	معاملات الإحتكاك والإعاقة الديناميكية الهوائية
$T_{in}, T_{out}(lb-ft)$	عزم تدوير خرج ودخل النقل	$T_{brake} (lb-ft)$	عزم الكبح

المراجع

- [1]. E. A. Lee , S. A. Seshia, Introduction to Embedded Systems - A Cyber-Physical Systems Approach, Second Edition, MIT Press, 2017.
- [2]. P. Marwedel, Embedded Systems/ Foundations of Cyber-Physical Systems, and the Internet of Things, Springer, 2018.
- [3]. A.Shrivastava, P. Derler, Y. L. Baboud, K. Stanton, M. Khayatian, H. A. Andrade, M. Weiss, J. Eidson, S. Chandhoke, Time in Cyber-Physical Systems, University of California, Berkeley,2016.
- [4]. M.Lohstroh,I. I. Romeo, A. Goens, P. Derler, J. Castrillon2, E. A. Lee, A. S.Vincentelli, A Deterministic Model forComposable Reactive Systems, Model-Based Design of Cyber Physical Systems, UC Berkeley, Berkeley, CA, USA, 2019.
- [5]. H. Vangheluwe, Multi-Paradigm Modelling of Cyber-Physical Systems. IEEE/ACM, 2018.
- [6]. E. A. Lee ,Models of Timed Systems, UC Berkeley, Berkeley, CA, USA, 2018.
- [7]. M.Sirjani, E.A. Lee, E.Khamespanah, Verification of Cyberphysical Systems, Mathematics, 8(7), 1068 (DOI), 2020.
- [8]. T. A. Henzinger, B. Horowitz, and C. M. Kirsch, “Giotto: A TimeTriggered Language for Embedded Programming,” Proceedings of IEEE, vol. 91, no. 1, pp. 84–99, 2003.

- [9]. P. Derler , T. H. Feng, E. A. Lee, S. Matic, H. .D. Patel, Y. Zhao, J. Zou, “PTIDES: A Programming Model for Distributed RealTime Embedded Systems. University of California at Berkeley, UCB/EECS-2008-72, 2008.
- [10]. O. Maler and D. Nickovic, “Monitoring Temporal Properties of Continuous Signals,” in In: Proceedings of FORMATS-FTRTFT. Volume 3253 of LNCS. Springer, 2004, pp. 152–166.
- [11]. A. Dhananjayan, K. T. Seow, A Metric Temporal Logic Specification Interface for Real-Time Discrete-Event Control, IEEE, 2014.
- [12]. E. A. Lee, M. Niknami, T. S. Noudui, M. Wetter Modeling and Simulating Cyber-Physical Systems using CyPhySim, EECS Department UC Berkeley, 2015.
- [13]. F.Kroger ,S. Merz, Temporal Logic and State Systems, Springer, 2008.
- [14]. S. Demri, V. Goranko, M. Lange, Temporal Logics in Computer Science Finite-State Systems, Cambridge University Press 2016.
- [15]. W. B. Ribbens. Understanding Automotive Electronics, 6th ed. Elsevier Science(USA) 2003.
- [16]. Allan Bonnick. Automotive Science and Mathematics. Elsevier Ltd 2008.
- [17]. Using Simulink and Stateflow; <ftp://ftp.mathworks.com/pub/product-info/examples>; 1998.
- [18]. A. Visioli. Practical PID Control. Springer-Verlag London Limited 2006.
- [19]. Allan. W. M. Bonnick. Automotive Computer Controlled Systems/ Diagnostic tools and techniques. Butterworth-Heinemann 2001.
- [20]. Claudius Ptolemaeus; Editor. System Design, Modeling, and Simulation using PtolemyII. <Http://ptolemy.org/systems>; 2014