ورقة بحثية مجلة مفتوحة

نمذجة أنظمة الميكاترونيك باستخدام الـ Bond Graph

د. هبه حليوه* ، د. إياد حاتم**

*(هندسة الميكاترونيك, جامعة تشرين ، البريد الإلكتروني: hhelewa@gmail.com)

**(كلية الهندسة , جامعة المنارة ، البريد الإلكتروني: iyad.hatem@manara.edu.sy)

الملخص

تُعد أنظمة الميكاترونيك من الأنظمة متعددة المجالات التي تتكامل فيها الأنظمة الميكانيكية والكهربائية والالكترونية مع نظرية التحكم والذكاء الصنعي للوصول إلى أجهزة ذكية قادرة على رفع سوية الإنتاج وتحسين جودة الحياة. وتلعب النمذجة دوراً أساسياً في تصميم هذه الأنظمة والتحكم بها نظراً لما توفره من فهم عميق للجوانب الهيكلية للنظام وإيجاد المعادلات الممثلة له، وكلما ازدادت دقة النموذج الموضوع وقربه من الواقع ازدادت كفاءة الأنظمة الميكاترونيكية المصممة، إلا أن تعقيد أنظمة الميكاترونيك وعدم خطيتها في كثير من الأحيان تشكلان تحدياً أمام عملية النمذجة.

يستعرض هذا البحث مقدمة تعريفية عن طريقة الـ Bond Graph التي تعتمد بشكل أساس على حقيقة أن الأنظمة الفيزيائية المختلفة تسلك كلها سلوكاً متشابهاً في توليد وتخزين وتبديد ونقل وتحويل الطاقة بين أجزائها. ويشرح من خلال نمذجة نظام رفع (وهو أحد أنظمة الميكاترونيك المتعدد المجالات) كيفية إيجاد هذا النموذج واستنتاج المعادلات الموصّفة له. وقد استطاعت هذه الطريقة تبسيط نمذجة الأنظمة المعقدة مع الحفاظ على أهم المعلومات اللازمة.

كلمات مفتاحية – نمذجة، النمذجة المعتمدة على الطاقة، الBond Graph، أنظمة الميكاترونيك، الأنظمة متعددة المجالات، .

I. مقدمة

يُستخدم النموذج Model عادة في توصيف الأنظمة الفيزيائية وفهم سلوكها ودراستها والتحكم بها، ويتم إيجاد النموذج من خلال تصنيف العمليات التي تحدث في هذه الأنظمة الفيزيائية بحسب انتمائها إلى الفروع الهندسية المختلفة (ميكانيك، هيدروليك، كهرباء، الكترون وغيرها) ، فإذا كان النظام ينتمي إلى مجال واحد أو مجالات متعددة ذات تفاعل ضعيف فيتم عندها تطبيق المنهجية الخاصة بهذه المجالات بشكل مستقل (بما في ذلك الطرق الحسابية المتخصصة) [1]. لكن هذا نادراً ما يحدث في الهندسة بشكل عام وفي مجال الميكاترونيك بشكل خاص والذي يحتوي عادة على عمليات فيزيائية متعددة المجالات multi-domain physical processes متفاعلة بعضها مع بعض [2]، ولنمذجة هذه الأنظمة لا بد من الإدراك الشامل للعلاقات الفيزيائية وتبادل المعلومات بين أجزاء النظام المتنوعة كما يحدث تماماً في الأنظمة الحقيقية، وبهذا يكون من الصعب إنشاء علاقات رياضية بين المجالات المختلفة لأن الطريقة الوحيدة لذلك تكمن من العثور على متغير مشترك بينهم (وهو الطاقة بمختلف أشكالها). قدم البروفيسور Henry Paynter في عام 1959 فكرة ثورية لتوصيف الأنظمة تبعاً لروابط الطاقة التي تربط عناصر النظام الفيزيائي المختلفة بعضها ببعض وتوصف التبادل الطاقي بين الأجزاء المختلفة له وأطلق عليه اسم Bond Graph [3]. تم تطوير فكرة الـ Bond graph بعدها من قبل مجموعة من العلماء كـ Karnopp و Rosenberg [4] وغيرهم الذين قاموا بتطوير وتوسعة تقنيات النمذجة هذه لتشمل الكهرباء[5] والهيدروليك[6] والميكاترونيك [7] وقد توسعت حديثاً لتشمل الالكترون وبعض الأنظمة غير المعتمدة على الطاقة كالاقتصاد[8] وغيرها.

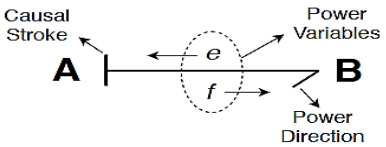
II. BOND GRAPH:

تعتمد الـ Bond Graph على أن الطاقة المرسلة ضمن النظام الفيزيائي هي ناتج ضرب الجهد effort والتدفق flow وهذه حقيقة ثابتة في كل الأنظمة على اختلاف أنواعها [9] (والتي يبين الجدول I بعضاً منها) . وبهذا لا يختلف التعامل هنا مع الأنظمة الفيزيائية سواء كانت تنتمي إلى مجال واحد أو مجالات متعددة.

جدول I الجهد والتدفق في الأنظمة الفيزيائية المختلفة

النظام	الجهد (e)	التدفق (f)	الطاقة (P)
الميكانيكي	قوة (F)	سرعة (v)	$P = VF$
	عزم (T)	سرعة زاوية (ω)	$P = T\omega$
كهربائي	الجهد (v)	التيار (I)	$P = VI$
هيدروليكي	الضغط (P)	معدل التدفق (f)	$P = pf$
حراري	الحرارة (T)	معدل تغير الانتروبي	$P = TS$

هناك أربع إشارات في الـ Bond Graph وهي الجهد (e) والتدفق (f) وتكامل الجهد (p) وتكامل التدفق (q). تختزل هذه الإشارات كل المعلومات اللازمة لتوصيف الأنظمة الفيزيائية المختلفة. وبما أن الطاقة في جداء إشارتي الجهد والتدفق فإن رابط الطاقة power bond تتكون من إشارتي الجهد والتدفق كما يظهر في الشكل 1.



الشكل 1 . رابطة الطاقة في الـ Bond Graph [10].

تعتمد الـ Bond Graph على ترتيب حساب متغيرات الجهد والتدفق، ويتم تمثيل هذا الترتيب بواسطة شريط عمودي يضاف إلى نهاية الرابطة Bond (سواء كانت رأس أو ذيل السهم) وتسمى بالحد السببي causal stroke والذي يشير إلى المتغيرات التي تعمل كدخل (سبب) وتلك التي تتصرف كخرج (تأثير) على التوالي. ففي الشكل السابق يكون الجهد هو دخل A والتدفق هو الناتج من A وبالمثل يكون التدفق هو دخل B والجهد هو خرجها.

تحتوي الـ Bond Graph على تسعة عناصر أساسية مرتبة في أربع مجموعات تبعاً لخصائصها وهي العناصر الأساسية أحادية المنفذ الفعالة Sources والخاملة passive و العناصر ثنائية المنفذ transducers والوصلات junctions.

أ. العناصر الأساسية أحادية المنفذ Port elements – 1:

تتبع هذه العناصر إلى منفذ طاقة وحيد (يمتلك زوج وحيد من الجهد والتدفق). ويتم تصنيف هذه العناصر (كما يظهر في الجدول II) إلى عناصر نشطة وهي التي تمثل منابع الجهد S_e ومنابع التدفق S_f وعناصر خاملة وهي التي تمثل التغيرات الحاصلة في الطاقة من تخزينها (القصور الذاتي (I) *Inertia* والمكثف (C)) أو تبديدها (المقاومة (R)).

جدول II العناصر الأساسية أحادية المنفذ في الـ BOND GRAPH

الاسم	الرمز	المعادلة
منبع الجهد	Se $\xrightarrow[f]{e}$	$e(t)$ معلوم
منبع التدفق	Sf $\xrightarrow[f]{e}$	$f(t)$ معلوم
المقاومة Resistor	$\xrightarrow[f]{e}$ R	$e(t) = R.f(t)$
	$\xrightarrow[f]{e}$ R	$f(t) = e(t)/R$
التحريضية Inductor	$\xrightarrow[f]{e}$ I	$f(t) = \frac{1}{I}\int e(t)dt$
	$\xrightarrow[f]{e}$ I	$e(t) = I.\dot{f}(t)$
المكثف Capacitor	$\xrightarrow[f]{e}$ C	$e(t) = \frac{1}{C}\int f(t)dt$
	$\xrightarrow[f]{e}$ C	$f(t) = C.\dot{e}(t)$

ب. العناصر الأساسية ثنائية المنفذ 2-Port elements :

يوجد نوعان فقط من العناصر ثنائية المنفذ وهي المحول Transformer (TF) و Gyrator (GY)، وكما تعبر التسمية فإن هذه العناصر تتصل برابطتين.

لا يقوم المحول بتوليد أو تخزين أو تبديد الطاقة كما في العناصر السابقة، ولكنها تحافظ على الطاقة مع نقل عواملها وفق مقياس مناسب مرتبط بمعامل محدد للمحول m كما هو مبين في الجدول III. وبهذا فإن المحول يقوم بربط الجهد بالجهد والتدفق بالتدفق.

يسلك الgyrator سلوكاً معاكساً للمحول حيث إنه يقوم بإنشاء علاقة من جهد إلى تدفق ومن تدفق إلى جهد مع الحفاظ على مصونية الطاقة عند المنافذ. فيمكن على سبيل المثال تمثيل المحرك الكهربائي المثالي كـ gyrator لأن عزم الدوران فيه متناسب مع تيار الدخل والقوة المحركة الكهربائية العكسية back emf تتناسب مع السرعة الزاوية للمحرك. وبشكل عام يستخدم الـ gyrator عندما تنتقل الطاقة من مجال لآخر مثل كهربائي إلى دوراني أو كهربائي إلى مغناطيسي أو هيدروليكي إلى دوراني وغيرها.

جدول III العناصر الأساسية ثنائية المنافذ في الـ BOND GRAPH

الاسم	الرمز	المعادلة
المحول Transformer	$e_1 \xrightarrow[f_1]{} \boxed{\text{TF}:m} \xrightarrow[f_2]{} e_2$	$e_1 = m.e_2\,,\quad f_2 = m.f_1$
	$e_1 \xrightarrow[f_1]{} \boxed{\text{TF}:m} \xrightarrow[f_2]{} e_2$	$e2 = \frac{1}{m}.e1,\quad f1 = \frac{1}{m}.f2$
Gyrator	$e_1 \xrightarrow[f_1]{} \boxed{\text{GY}:r} \xrightarrow[f_2]{} e_2$	$e_1 = r.f_2\,,\quad e_2 = r.f_1$
	$e_1 \xrightarrow[f_1]{} \boxed{\text{GY}:r} \xrightarrow[f_2]{} e_2$	$f_2 = \frac{1}{r}.e_1\,,\quad f_1 = \frac{1}{r}.e_2$

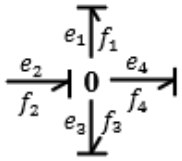
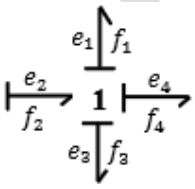
ت. الوصلات Junctions:

تشكل النواة الأساسية لبناء نموذج للنظام. ويمكن أن تربط بين اثنين أو أكثر من الروابط، وهما نوعان الوصلات 0 أو 1. تحافظ الوصلات على مبدأ مصونية الطاقة ويمكن أن تكون عكوسة [11].

ففي الوصلات 1 (المبينة في الجدولIV) تكون التدفقات متساوية ومجموع الجهود مساوٍ للصفر بنفس اتجاه الطاقة كما في التوصيل التسلسلي في الدارات الكهربائية (عندما يمر التيار نفسه في كل العناصر).

تمتلك الوصلات 0 جهوداً متساوية بينما مجموع التدفقات فيها تساوي الصفر (مع الأخذ بعين الاعتبار اتجاهات التدفقات)، أي إنه يمكن تمثيل العقدة الكهربائية ونقطة توزيع الضغط الهيدروليكي بوصلة من النوع 0.

جدول IV الوصلات في الـ BOND GRAPH

الاسم	الرمز	المعادلة
الوصلة 0		$e_2 = e_1 = e_3 = e_4$ $f_2 - f_1 - f_3 - f_4 = 0$
الوصلة 1		$f_2 = f_1 = f_3 = f_4$ $e_2 - e_1 - e_3 - e_4 = 0$

III. إيجاد نموذج الـ BOND GRAPH لأنظمة الميكاترونيك:

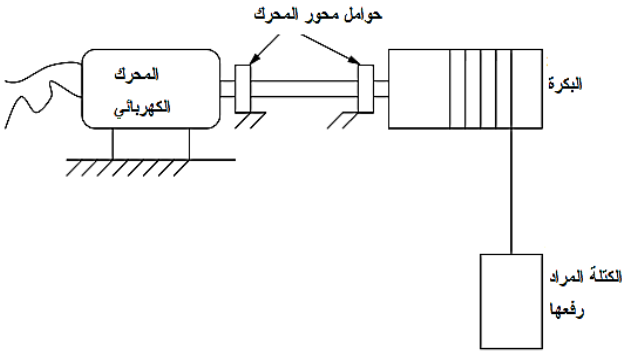
بما أن الـ Bond Graph من طرق النمذجة المعتمدة على الطاقة energy-based approaches فيمكنه الاستفادة من التشابه في سلوك الأنظمة الفيزيائية المختلفة في إيجاد نموذج

متكامل لأنظمة الميكاترونيك المتعددة المجالات multidisciplinary [12].

تعد أنظمة الرفع hoisting device (الشكل 2.) إحدى الأنظمة الميكاترونيكية التي يتكامل فيها الميكانيك والكهرباء لأداء المهمة الموكلة به.

الشكل 2 . نظام رفع.

يتكون هذا النظام من محرك كهربائي مستمر DC motor يقوم بتحويل الطاقة الكهربائية إلى طاقة ميكانيكية دورانية، يتصل محور المحرك ببكرة تقوم بتحويل الطاقة الميكانيكية الدورانية إلى خطية لتقوم برفع الحمل المطلوب. أي إن هذه الأنظمة تتكون من تكامل ثلاثة مجالات مختلفة لضمان أداء المهمة الموكلة إليها كما يظهر في الشكل 3.

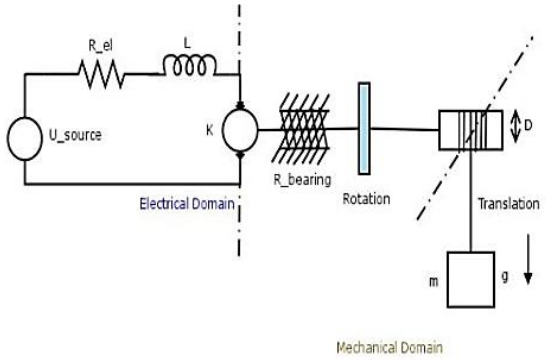


الشكل 3 . الأجزاء الثلاثة الفرعية المكونة لنظام الرفع.

وبالنظر للنظام السابق من منظور الطاقة فإن الطاقة تتولد في المحرك الكهربائي ويتم نقلها عبر محور المحرك لتستخدم في رفع الكتلة. وبنظرة أدق لهذه الأجزاء الثلاثة السابقة يمكن تقسيمها إلى مكونات أبسط، فعلى سبيل المثال يمكن تمثيل المحرك الكهربائي كدارة كهربائية مكونة من منبع طاقة ومقاومة وملف. ويمكن التعامل مع المحور كنابض التوائي torsional spring، أما المحامل bearings فتعمل كتبديد للطاقة أو مقاومة دورانية. ويتم التعامل مع البكرة كعنصر عطالة inertia وكذلك الأمر بالنسبة للكتلة المراد رفعها. وبهذا يتكون النظام بشكل عام من العناصر التالية:

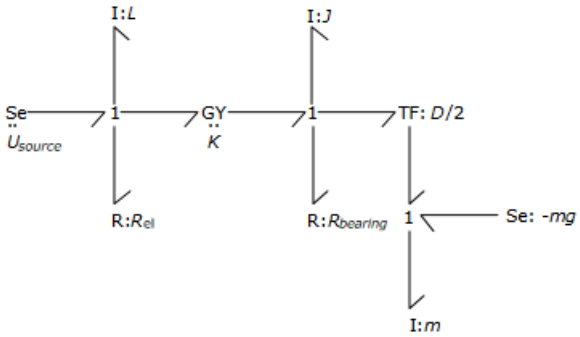
1- مصدر الطاقة (S_e).
2- مقاومة المحرك Armature resistance (R) .
3- تحريضية المحرك Armature inductance (I).
4- نابض دوراني (محور المحرك)(I) .
5- تخميد دوراني (مقاومة الحوامل) (R) .
6- قصور البكرة (TF).
7- الكتلة المراد رفعها (I).
8- وتأثير الجاذبية الأرضية(S_e).

وكما ذكرنا سابقاً فهناك موقعان تنتقل فيهما الطاقة من مجال إلى آخر، ففي المحرك تنتقل الطاقة من المجال الكهربائي إلى الدوراني (عبر المجال المغناطيسي) وفي البكرة يتم تحويل الطاقة الدورانية إلى إزاحة خطية الشكل 4.



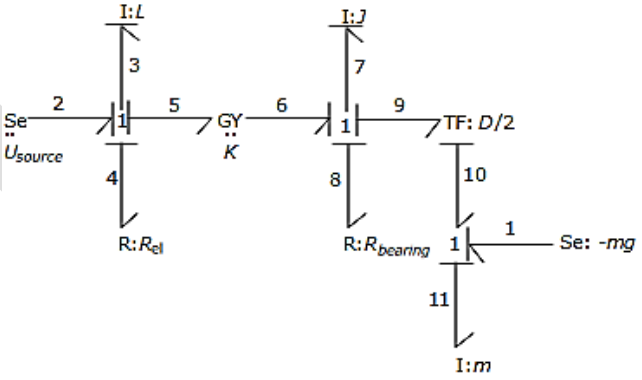
الشكل 4 . المكونات البسيطة لنظام الرفع وكيفية انتقال الطاقة فيه.

وبما أن التدفق (التيار) هو الثابت في دارة المحرك فهي تُمثّل بوصلة 1، وعادة ما يتم تمثيل الأنظمة الميكانيكية أيضاً بوصلة 1 [13] وعندها يمكن تبسيط النموذج السابق باستخدام الـ Bond Graph كما في الشكل 5.



الشكل 5 . نموذج لنظام الرفع باستخدام الـ Bond Graph.

بقي تحديد جريان الطاقة في نموذج الـ Bond Graph الناتج وذلك بوضع حدود السببية causal stroke، ونبدأ عادة من أحد مصادر الطاقة الموجودة في النظام ويتم بعدها تحديد كل عنصر وهل يشكل دخلاً للعنصر المرتبط به أم لا فيكون لدينا النموذج النهائي كما في الشكل 6.



الشكل 6 . النموذج السببي لنظام الرفع باستخدام الـ Bond Graph.

IV. الحصول على معادلات النموذج

الغاية الأساسية من النمذجة هي إيجاد المعادلات التفاضلية الممثلة للنظام أو تمثيله في فضاء الحالة، والذي يعتبر الخطوة الأولى في عمليات التحكم والمراقبة وتحسين الأداء.

يحتوي نموذج الـ Bond Graph السببي كل المعلومات اللازمة لاستنتاج مجموعة معادلات الحالة والذي يتم وفق الخطوات التالية:

1- كتابة مجموعة المعادلات الجبرية والتفاضلية التي تربط جميع العناصر مع مراعاة الحدود السببية.

ويؤدي هذا إلى الحصول على 2n معادلة من أجل نموذج يحتوي n رابطة (n معادلة توصف الجهود و n معادلة توصف التدفقات أو مشتقاتهما).

فيحتوي نموذج الـ Bond Graph لنظام الرفع هنا على 11 رابطة، أي يجب الحصول على 22 معادلة جبرية أو تفاضلية ممثلة لهذا النموذج وهي

$$e_2 = u_{source} \qquad e_8 = R_{bearing} f_8$$

$$\frac{df_3}{dt} = \frac{1}{L} e_3 \qquad f_6 = f_7$$

$$e_4 = R_{el} f_4 \qquad f_8 = f_7$$

$$f_2 = f_3 \qquad f_9 = f_7$$

$$f_4 = f_3 \qquad e_7 = e_6 - e_8 - e_9$$

$$f_5 = f_3 \qquad e_9 = -\frac{D}{2} e_{10}$$

$$e_3 = e_2 - e_4 - e_5 \qquad f_{10} = -\frac{D}{2} f_9$$

$$e_5 = K f_6 \qquad f_1 = f_{10}$$

$$e_6 = K f_5 \qquad f_{11} = f_{10}$$

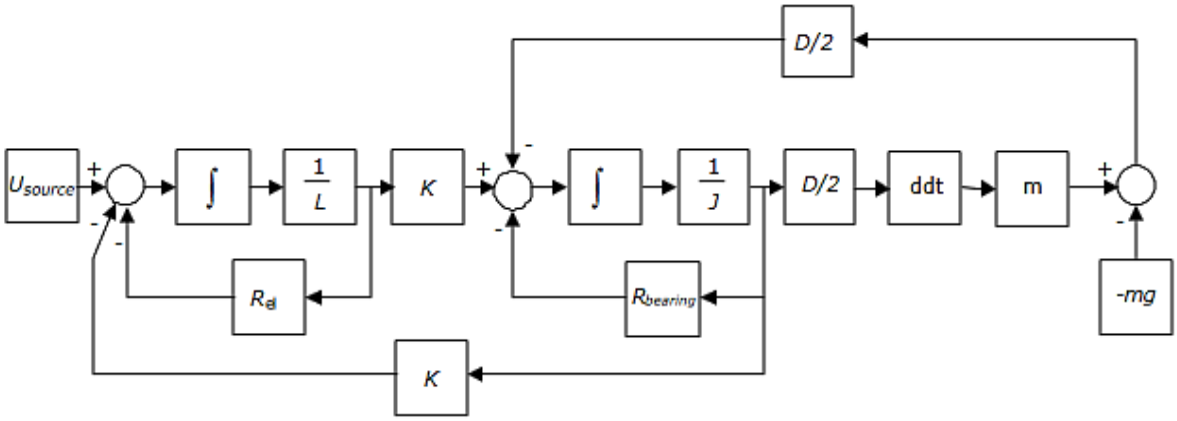
$$\frac{df_7}{dt} = \frac{1}{J} e_7 \qquad e_1 = -mg$$

$$e_{10} = e11 - e1 \qquad e_{11} = m\frac{df_{11}}{dt}$$

وبما أن عدد المعادلات كبير فلا بد من اختصاره، ويتم ذلك بجمع المعادلات التي يمكن جمعها والاكتفاء بتلك التي تحتوي متغيرات الوصلات ومتغيرات الدخل بالإضافة لمتغيرات الحالة (والتي هي متغيرات عناصر التخزين لاحتوائها على مشتق إما للجهد وإما للتدفق وهي هنا f_3, f_7, f_{11}) فتصبح وفق ما يأتي:

$$\frac{df_3}{dt} = \frac{1}{L} e_3 \qquad e_{10} = m\frac{df_{11}}{dt} + mg$$

$$e_3 = u_{source} - R_{el} f_3 - K f_7 \qquad f_{11} = -\frac{D}{2} f_7$$



الشكل 7. المخطط الصندوقي التقليدي لنموذج آلة الرفع.

V. الاستنتاجات

قدم هذا البحث نبذة تعريفية عن طريقة الـ Bond Graph في نمذجة الأنظمة الفيزيائية والتي تعتمد على سريان الطاقة ضمن النظام في تحديد سلوكه وإيجاد النموذج الخاص به.

تعتمد هذه الطريقة على حقيقة أن كل الأنظمة الفيزيائية باختلاف أنواعها تتعامل مع الطاقة بستة أشكال أساسية ثابتة وهي تخزين الطاقة وتبديدها وتحويلها من شكل لآخر ونقلها وتوزيعها وإدخالها أو إخراجها.

يتشكل النظام في طريقة الـ Bond Graph بشبكة من الأسهم الموجهة التي تعبر عن سريان الطاقة وترتبط بمتحولين هما التدفق والجهد، ويتحدد اتجاه هذا السريان باتجاه الأسهم والحدود السببية والتي تقوم بتخزين كامل المعلومات الهامة للنظام وتبسط من كيفية استنتاج المعادلات التفاضلية والمخطط الصندوقي الخاص به.

يُعد هذا البحث مقدمة تعريفية بأهم وأبسط مزايا الـ Bond Graph، قدّم فيها مثال لنمذجة الأنظمة متعددة المجالات بشكلها البسيط دون الغوص في التفاصيل العميقة والإمكانيات الواسعة لهذه الطريقة وبرامج المحاكاة التي اعتمدت هذه الطريقة من طرق النمذجة المتوفرة في مكتباتها.

$$e_7 = Kf_3 - R_{bearing} f_7 + \frac{D}{2} e_{10} \qquad \frac{df_7}{dt} = \frac{1}{J} e_7$$

لوبهذا تُختصر المعادلات إلى ست فقط من 22، ويمكن الآن الحصول على المعادلات التفاضلية لنظام الرفع بعزل المشتقات في الطرف الأول من المعادلة وتعويض مجموع الوصلات فيها كما يلي:

$$\frac{df_3}{dt} = \frac{1}{L} u_{source} - \frac{R_{el}}{L} f_3 - \frac{K}{L} f_7$$

$$\frac{df_7}{dt} = \frac{K}{J} f_3 - \frac{R_{bearing}}{J} f_7 + \frac{\frac{D}{2} m df_{11}}{dt} + \frac{D}{2} mg$$

$$f_{11} = -\frac{D}{2} f_7$$

وبما أن النظام خطي فيمكن كتابة معادلاته في فضاء الحالة وفق ما يلي

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & -\frac{D}{2} \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f_3 \\ f_7 \\ f_{11} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{R_{el}}{L} & -\frac{K}{L} & 0 \\ \frac{K}{J} & -\frac{R_{bearing}}{J} & 0 \\ 0 & \frac{D}{2} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f_3 \\ f_7 \\ f_{11} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{L} & 0 \\ 0 & \frac{D}{2} \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_{source} \\ mg \end{bmatrix}$$

وبهذا يمكن بسهولة رسم المخطط الصندوقي التقليدي لنموذج النظام *Block Diagram* والموضح بالشكل 7.

المراجع:

[1]. A. Padilla Garcia, G. Gonzalez-Avalos, G. Ayala-Jaimes, N. Barrera Gallegos, J. Mendez-B., and D. Alvarado-Zamora, "Tracking Control of Physical Systems with Application to a System with a DC Motor: A Bond Graph Approach," Symmetry, vol. 14, no. 4, p. 755, Apr. 2022.

[2]. J. Wu, G. Yu, Y. Gao, and L. Wang, "Mechatronics modeling and vibration analysis of a 2-DOF parallel manipulator in a 5-DOF hybrid machine tool," Mechanism and Machine Theory, vol. 121, pp. 430–445, Mar. 2018.

[3]. H. M. Paytner, "Ports, Energy, and Thermodynamic Systems," MIT, p. 8, 1959.

[4]. D. C. Karnopp, D. L. Margolis, and R. C. Rosenberg, "System Dynamics: Modeling, Simulation, and Control of Mechatronic Systems, 1st ed". Wiley, 2012.

[5]. S. Junco and A. Donaire, "Bond Graph Modeling and Simulation of Electrical Machines," in Bond Graph Modelling of Engineering Systems, W. Borutzky, Ed. New York, NY: Springer New York, 2011, pp. 269–321.

[6]. P. Athanasatos and T. Costopoulos, "An Efficient Modelling Of The Dynamic Behaviour Of High Pressure Hydraulic Systems," in 2nd International Conference on Experiments/Process/System Modelling/ Simulation/ Optimization, 2007, p. 13.

[7]. Y. Najih, M. Adar, A. Aboulouard, Z. Khaouch, M. Bengourram, M. Zekraoui, and M. Mabrouki, "Mechatronic Control Model of a Novel Variable Speed Wind Turbine Concept with Power Splitting Drive Train: A Bond Graph Approach," in 2020 IEEE 6th International Conference on Optimization and Applications (ICOA), 2020, pp. 1–5.

[8]. J. A. T. Machado and M. E. Mata, "A fractional perspective to the bond graph modelling of world economies," Nonlinear Dynamics, vol. 80, no. 4, pp. 1839–1852, Jun. 2015.

[9]. G. Korsoveczki and G. Husi, "The model of a permanent magnet DC motor in time domain and frequency domain based on Bond Graph modelling and design of position control using PID controller," Materials Science and Engineering, p. 6, 2021.

[10]. U. Qasim, A. Rashid, and O. Hasan, "Formalization of Bond Graph using Higher-order-logic Theorem Proving." arXiv, Nov-2021.

[11]. S. Arun K., "About Bond graphs - The System Modeling World." HighTech Consultants, 2001.

[12]. S. Das, "Mechatronic Modeling and Simulation Using Bond Graphs,",2009, p. 504.

[13]. J. F. Broenink, "Introduction to Physical Systems Modelling with Bond Graphs," p. 31, 1999.