УДК 62-97-98

Методы оценки технической совместимости разнородных элементов в рамках технической системы

С.А.ВАСИН¹, А.С.ВАСИЛЬЕВ², Е.В.ПЛАХОТНИКОВА¹✉

¹ Тульский государственный университет, Тула, Россия

² Московский государственный технический университет имени Н.Э.Баумана
(национальный исследовательский университет), Москва, Россия

В статье приводятся методы оценки совместимости элементов при проектировании сложных технических систем. Совместимость элементов рассматривается как основной показатель, определяющий качество систем, включающих разнородные элементы. Представленные методы позволяют на стадии проектирования выбрать техническое решение, в наибольшей степени соответствующее целям проекта с учетом условий эксплуатации системы. Методы позволяют произвести оценку совместимости по единичному и комплексному показателю. Выбор показателя зависит от цели оценки. Рассмотрен пример реализации методов при проектировании систем, включающих электропривод и трубопроводную запорную арматуру. Экспериментально доказано, что в системах с низкими значениями уровня совместимости фактические силовые характеристики превышают требуемые значения, что ведет к дополнительным напряжениям в элементах системы и их поломкам. Результаты оценки типовых систем позволили выявить недостатки существующих конструкций и предложить альтернативные варианты решения проблем. Совместимость элементов в рамках технической системы позволяет повысить функциональную эффективность систем при минимальных массогабаритных и мощностных характеристиках, оптимизировать соотношение цены и качества, повысить конкурентоспособность конечного продукта.

Ключевые слова: техническая система; совместимость; электропривод; запорная арматура; техническая эффективность; качество; конкурентоспособность

Как цитировать эту статью: Васин С.А. Методы оценки технической совместимости разнородных элементов в рамках технической системы / С.А.Васин, А.С.Васильев, Е.В.Плахотникова // Записки Горного института. 2020. Т. 243. С. 329-336. DOI: 10.31897/PMI.2020.3.329

Введение. Современная промышленность характеризуется многообразием технологических процессов, для осуществления которых созданы тысячи разных машин и механизмов. Одним из наиболее распространенных механизмов является электропривод (ЭП) – управляемая электромеханическая система, преобразующая электрическую энергию в механическую. Основными техническими требованиями, предъявляемыми к этому типу систем, являются надежность, точность, быстродействие и совместимость [4, 8]. По мнению авторов, именно совместимость – определяющий показатель качества данного вида продукции.

Понятие совместимости для ЭП имеет сложную иерархическую структуру. Требования к совместимости должны быть выполнены как в отношении простейших элементов ЭП (электродвигателя, устройства преобразования, управления и передачи), что в результате обеспечит согласование моментов и скорости двигателя с усилиями и скоростью исполнительного органа технологической машины, так и в отношении сложных технических систем (ТС), включающих в свою структуру подсистему ЭП для обеспечения совокупности свойств, определяющих их функциональное назначение [9, 10].

Обеспечение требований к совместимости на стадиях проектирования и при производстве позволяет повысить качество и конкурентоспособность рассматриваемого типа продукции за счет снижения массо-габаритных параметров, повышения надежности, эффективности и долговечности ЭП [13].

При исследовании вопросов обеспечения и оценки совместимости на примере ЭП для трубопроводной запорной арматуры (ЗА) получены следующие результаты:

- разработан метод оценки показателя совместимости для определения соответствия ЭП функциональному назначению;
- предложен метод оценки совместимости ЭП с разнородными элементами с учетом реальных условий эксплуатации, как инструмент анализа технического совершенства сложных ТС и исключения образования эмерджентных свойств.

Метод оценки показателя совместимости на стадии проектирования ЭП. Оценка на соответствие ЭП функциональному назначению является первым шагом при разработке новой кон-

Рис.1. График изменения крутящего момента на шпинделе ЗА в зависимости от хода запорного органа

струкции. Цель создания ЭП – обеспечение закона движения и требуемых силовых характеристик (усилий, крутящих моментов) исполнительного механизма [6]. Исходя из указанной цели, оценка показателя совместимости на стадии проектирования должна сводиться к сравнению полученных характеристик с заданными значениями.

График изменения крутящего момента при выполнении ЗА рабочего цикла «открыто – закрыто» (перемещение запорного органа из точки 0 «открыто» до точки 1 «закрыто») приведен на рис.1.

Участок О-А соответствует срыву запорного органа арматуры из крайнего положения. Данный процесс требует максимального крутящего момента ($M_{\max}$) ЭП. Затем момент резко падает, так как запорный орган уже движется, но еще не вступил в контакт со средой (участок А-В). С увеличением площади контакта со средой крутящий момент постепенно возрастает, что можно представить зависимостью

$$M_{ЗА} = f(PS), \quad (1)$$

где P – давление среды в трубе; S – площадь контакта.

В точке 1 крутящий момент снова достигает максимального значения, так как для устранения протечек необходим «дожим» запорного органа для обеспечения требуемой герметичности с посадочным местом [8].

График на рис.1. представляет выходную характеристику запорного органа и является исходной характеристикой для проектирования ЭП. Если при проектировании удастся обеспечить точное совпадение характеристик (этот случай идеален), то энергия ЭП будет расходоваться рационально и он будет иметь минимальную мощность и массу [14]. Таким образом, основной задачей при проектировании является максимальное сближение этих характеристик.

Для ЭП данная задача может быть реализована двумя путями:

- посредством применения регулируемого электромеханическим образом электродвигателя; данный вариант имеет несколько недостатков: возрастают стоимость электропривода и его масса, а также резко сужается область применения механизма, так как в тяжелых климатических условиях использование указанной конструкции невозможно;

- путем разработки кинематики передаточного органа, сближающего характеристики электропривода и исполнительного механизма при использовании асинхронного электродвигателя.

Стремление обеспечить требуемые выходные характеристики привело к созданию множества конструктивных решений ЭП для ЗА:

- односкоростной электропривод с постоянным передаточным отношением на протяжении всего цикла «открыто – закрыто» (рис.2);

- двухскоростной электропривод со ступенчатым передаточным отношением; изменение передаточного отношения обеспечивается включением и выключением фрикционной муфты (рис.3);

- кулисный привод с плавным изменением передаточного отношения (разработка Тульского государственного университета) (рис.4).

Произведем оценку указанных конструкций по показателю совместимости. Одним из вариантов оценки показателя совместимости ЭП с ЗА может быть сравнение скоростных характеристик ЗА при ее управлении оцениваемыми образцами ЭП с базовой характеристикой.

В данном случае алгоритм проведения оценки будет включать следующие этапы:

- определение основных кинематических зависимостей ЭП и построение графиков изменения скорости ЗА;

- определение базовой характеристики изменения скорости ЗА;

- расчет коэффициента совместимости

$$S_i = \sum \Delta V_i^2, \quad (2)$$

Рис.2. Односкоростной электропривод: *а* – упрощенная кинематическая схема (*М* – электродвигатель; *К* – червяк; *З* – червячное колесо; 1 – задвижка; 2 – трубопровод); *б* – график изменения частоты вращения выходного вала; *в* – график изменения крутящего момента на выходном вале электропривода

Рис.3. Двухскоростной электропривод: *а* – упрощенная кинематическая схема (*М* – двигатель; 1 – корпус; 2 – муфта предельного момента; 3 – пружинный механизм; 4,5 – водило; 6 – задвижка; 7 – трубопровод; *З* – шестерни); *б* – график изменения частоты вращения выходного вала; *в* – график изменения крутящего момента на выходном вале электропривода

где ΔV_i – отклонение скорости, которое определяется зависимостью

$$\Delta V = V_i - V_0, \quad (3)$$

V_i – значение скорости в i -й момент времени при работе ЗА с оцениваемым объектом; V_0 – базовое значение скорости в i -й момент времени.

Рис.4. Кулисный электропривод: а – упрощенная кинематическая схема (1 – кулиса; 2 – камень кулисы; 3 – корпус задвижки; 4 – корпус электропривода; 5 – стержень; 6 – трубопровод; М – двигатель; Z1 – червячное колесо; K1 – червяк); б – график изменения скорости; в – график изменения усилия

Сумма квадратов ΔV_i^2 выбрана для устранения влияния положительных и отрицательных значений ΔV_i . Стремление суммы ΔV_i^2 к нулевому значению будет характеризовать высокую совместимость скоростной характеристики с базовым значением. Таким образом, наилучшей конструкцией по показателю совместимости будет признана конструкция с минимальным значением коэффициента S_i .

Суть предлагаемой методики поясняет график (рис.5), где в качестве базовой характеристики для оценки коэффициента совместимости принята параболическая функция, так как именно такая характеристика обеспечивает минимальное ускорение и наибольшую плавность движения.

Для проведения оценки необходимо соблюдение следующих условий:

- количество измерений для каждого оцениваемого образца должно быть одинаковым;
- оцениваемые объекты должны быть поставлены в одинаковые условия, что можно представить зависимостями:

$$t_{\max 6} = t_{\max i}, \quad (4)$$

Рис.5. Графическая интерпретация оценки показателя совместимости

1 – график изменения скорости при совмещении ЗА с оцениваемым образцом ЭП; 2 – базовый график изменения скорости ЗА

$$\int_0^{t_{\max}} V_i(t) dt = \int_0^{t_{\max}} V_{i6}(t) dt, \quad (5)$$

где $t_{\max 6}$, $t_{\max i}$ – время выполнения рабочего цикла; V_i , V_{i6} – скорость перемещения запорного органа при управлении оцениваемым и базовым образцами соответственно в i -й момент времени.

Базовые значения скорости при использовании параболической функции можно определить по формуле

$$V_6 = at^2 + bt + c, \quad (6)$$

где V_6 – базовая скорость движения ЗА; a , b , c – постоянные величины; t – значение времени.

Постоянные величины (a, b, c) можно определить путем решения системы уравнений:

$$0 = a0^2 + b0 + c; \quad (7)$$

$$0 = at_{\max}^2 + bt_{\max} + c; \quad (8)$$

$$t_{\max 0} = t_{\max o} = t_{\max d} = t_{\max k} = t_{\max}; \quad (9)$$

$$\int_0^{t_{\max}} V_0(t)dt = \int_0^{t_{\max}} V_d(t)dt = \int_0^{t_{\max}} V_k(t)dt = \int_0^{t_{\max}} V_6(t)dt, \quad (10)$$

где V_0 – функция изменения скорости односкоростного электропривода; V_d – функция изменения скорости двухскоростного электропривода; V_k – функция изменения скорости кулисного электропривода; V_6 – базовая функция изменения скорости.

Первое уравнение описывает базовую характеристику скорости в начальный момент времени, когда время и скорость принимают нулевые значения $t_0 = 0$ и $V_{60} = 0$. В этом случае уравнение (6) принимает вид (7).

Второе уравнение описывает базовую характеристику скорости в конечный момент времени и соответствует остановке системы, когда время достигает максимального значения, а скорость снова равна нулю: $t = t_{\max}$ и $V_{6n} = 0$. В этот момент уравнение (6) примет вид (8).

Пример реализации метода. Приведем графические результаты оценки показателя совместимости для трех ЭП: односкоростного (рис.6, а), двухскоростного (рис.6, б) и кулисного ЭП (рис.6, в). Исходя из представленных графиков (рис.6), наиболее близкое совпадение скоростных характеристик с базовым можно получить при использовании в качестве управляющего устройства кулисного ЭП. Это обусловлено плавностью изменения характеристик данной конструкции по сравнению с двухскоростным и односкоростным ЭП. Значение показателя совместимости для данной конструкции может быть улучшено посредством сближения графика изменения скорости кулисы с базовым. Такая задача решается моделированием геометрических параметров кулисного редуктора.

Использование приведенной методики оценки совместимости на стадии проектирования ЭП позволяет выбрать наилучшее техническое решение, удовлетворяющее функциональному назначению – управление ЗА, повысить техническую эффективность конечного продукта (системы ЭП-ЗА) и минимизировать мощность электродвигателя.

Далее рассмотрим алгоритм реализации методики оценки совместимости ЭП с разнородными элементами в рамках сложной технической системы с учетом реальных условий эксплуатации.

Рис.6. Графическая интерпретация результатов реализации методики оценки совместимости ЭП с ЗА при использовании односкоростного (а), двухскоростного (б) и кулисного электроприводов (в)

Предпосылки к разработке метода оценки совместимости ЭП с разнородными элементами в рамках сложной технической системы. Приведенный метод позволяет произвести оценку технической системы, состоящей из двух взаимодействующих элементов – ЭП и ЗА. При этом принимается условие, что дополнительные факторы, влияющие на вариабельность выходных характеристик, отсутствуют. Очевидно, что в данном случае мы создаем идеальные условия эксплуатации, которые могут не соответствовать реальности.

При введении в эксплуатацию систем «ЭП-ЗА» необходимо учитывать, что управление электродвигателем привода осуществляется стационарной системой управления (СУ). Таким образом в реальных условиях потребитель эксплуатирует техническую систему (ТС), состоящую из трех элементов «ЭП-ЗА-СУ», каждый элемент оказывает влияние на вариабельность выходных характеристик, а уровень технической совместимости элементов определяет техническую эффективность конечной системы и, соответственно, ценность ее для потребителя [5].

В данных условиях оценка по одной технической характеристике не дает полного представления об уровне совместимости элементов в рамках ТС [7]. Наиболее информативным методом является оценка совместимости по комплексному показателю [11], например, по показателю, определяющему функциональную эффективность ТС.

Метод оценки совместимости ЭП с разнородными элементами в рамках сложной технической системы. Для оценки уровня технической совместимости элементов в рамках ТС используем формулу

$$\mathcal{E}_\Phi = \frac{A_n}{A_p}, \quad (11)$$

где A_n – полезная работа, необходимая для реализации целевой функции системы; A_p – реальная работа, производимая системой в результате взаимодействия совмещаемых в ней элементов.

Значение полезной работы является известной величиной – исходной характеристикой для проектирования ТС. Нахождение значения реальной работы требует структурного и функционального описания ТС с учетом технических характеристик, интегрируемых в систему элементов, и их взаимовлияния на функционирование системы.

Пример реализации метода для ТС «ЭП-ЗА-СУ». Приведем результаты оценки технической эффективности системы, включающей типовую конструкцию односкоростного электропривода с асинхронным электродвигателем. Полезную работу ТС «ЭП-ЗА-СУ» принимаем равной работе, необходимой для совершения нормированного рабочего цикла, т.е. перемещения рабочего органа арматуры из положения «открыто» в положение «закрыто» при условии обеспечения требуемой герметичности.

Значение полезной работы для системы ТС «ЭП-ЗА-СУ» можно рассчитать по формуле

$$A_n = \int_0^{\varphi_r} M_r d\varphi_r, \quad (12)$$

где M_r – необходимый крутящий момент для обеспечения герметичного перекрытия трубопровода при выполнении рабочего цикла «открыто – закрыто»; φ_r – угол поворота подвижного элемента резьбовой пары арматуры, необходимый для обеспечения герметичности.

Для дальнейших расчетов необходимо внести пояснения, базирующиеся на результатах теоретических и экспериментальных исследований, проведенных авторами [1, 2, 5, 8, 15].

На выходные характеристики ТС «ЭП-ЗА-СУ» оказывают влияние параметры составляющих ее подсистем: ЗА – жесткость арматуры, ЭП – скорость выходного вала, СУ – временная задержка срабатывания подсистемы [4]. В зависимости от сочетания этих параметров нормированное значение крутящего момента для обеспечения герметичного перекрытия трубопровода при выполнении рабочего цикла «открыто – закрыто» может иметь различную величину [12].

Одни ТС «ЭП-ЗА-СУ» будут малочувствительны к приращению $\Delta\varphi_{от}$ (приращение угла поворота подвижного элемента резьбовой пары арматуры за время задержки срабатывания СУ). Это системы с низкой жесткостью ЗА, либо малой частотой вращения ЭП. Для других систем даже незначительная величина $\Delta\varphi_{от}$ будет являться достаточной для многократного увеличения

результатирующего крутящего момента электропривода по отношению к расчетному значению M_r . К таким системам относятся ТС, сочетающие в себе быстродействующие ЭП и ЗА с высокой жесткостью. Большинство подобных систем в настоящее время эксплуатируется на особо ответственных объектах, в том числе на АЭС.

По мнению авторов, такая чувствительность к приращению $\Delta\varphi_{от}$ является признаком несоблюдения требований к совместимости элементов при проектировании.

Учитывая приведенные пояснения, величину реальной работы для ТС «ЭП-ЗА-СУ» можно найти по формуле

$$A_p = A_\Sigma = A_n + A_{от} + A_E, \quad (13)$$

где $A_{от}$ – работа, производимая системой за время запаздывания СУ при отключении электродвигателя; A_E – работа, совершаемая системой под действием сил инерции движущихся элементов после отключения электродвигателя.

Последнее слагаемое в формуле (13) объясняется тем, что после обесточивания электродвигателя движущиеся части системы (ротор, червяк, силовой винт, гайка и т.д.) продолжают двигаться под действием сил инерции, что также приводит к приращению угла поворота подвижного элемента резьбовой пары арматуры, но на величину $\Delta\varphi_E$.

Полученное соотношение работ A_n и A_p позволяют наглядно оценить графики на рис.7.

Из приведенных на рис.7 графиков видно, что работа, реализуемая ТС «ЭП-ЗА-СУ», существенно отличается от полезной работы, необходимой для выполнения целевой функции.

Аналитические расчеты, проведенные для типовых систем с жесткостью ЗА – 10 Н·м/град., частотой вращения ЭП – 32 об/мин и минимальной временной задержкой СУ – 20 мс, показали, что на выполнение полезных работ расходуется не более 45 % аккумулируемой в системах энергии [8]. Уровень технической совместимости элементов в рамках ТС «ЭП-ЗА-СУ», рассчитанный по формуле (11), для анализируемых систем не достигал значения 0,65 при базовом значении 1.

Экспериментально доказано, что в системах с низкими значениями уровня совместимости элементов фактические силовые характеристики превышают требуемые значения от 1,6 до 3,8 раз [4, 13]. В результате значительно увеличиваются усилия запирания ЗА, что ведет к дополнительным напряжениям в ее элементах, поломкам деталей ЗА и изгибу силового винта.

Полученные результаты исследования позволяют сделать следующее предложение, направленное на повышение уровня технической совместимости элементов ТС. Для исключения влияния времени запаздывания СУ при отключении электродвигателя необходимо команду на отключение подавать превентивно, т.е. раньше. В результате величина работы $A_{от}$ будет фактически равна нулю (рис.7). Тогда реальная работа будет отличаться от полезной работы на весьма малую величину A_E (см. формулу (13) и рис.7), а уровень технической совместимости элементов в рамках ТС, рассчитанный по формуле (11), возрастет и приблизится к базовому значению, равному единице. В этой ситуации не будет возникновения эмерджентного свойства и значительного увеличения усилия запирания ЗА, что позволит исключить поломки деталей в ТС.

Оценка уровня совместимости при проектировании ТС «ЭП-ЗА-СУ» позволяет рационально подобрать элементы системы,

Рис.7. Функциональная эффективность систем без обеспечения баланса энергий: а – график полезной работы, необходимой для реализации целевой функции системы; б – график фактической работы, производимой системой в результате взаимодействия совмещаемых в ней элементов ($A_p = A_n + A_{от} + A_E$)

обеспечивая баланс энергий и жесткости и повышение качества систем при снижении их энергопотребления.

Заключение. Одним из основных условий обеспечения качества сложных технических объектов на всех стадиях жизненного цикла является соблюдение принципа совместимости [3, 7]. Принцип заключается в обеспечении взаимодополняемости разнородных структурных элементов в рамках системы. Реализация принципа предполагает установление критериев совместимости элементов и разработку методов их оценки. Представленные в работе методы поясняют различные подходы к оценке совместимости элементов в ТС, включающих ЭП. Различие подходов заключается в показателях, положенных в основу оценки единичного показателя в первом методе и комплексного показателя во втором методе. Схожесть подходов состоит в преследуемой авторами цели – повышение функциональной эффективности ТС при минимальных массогабаритных и мощностных характеристиках, что позволяет оптимизировать соотношение цены и качества, повышая конкурентоспособность конечного продукта.

ЛИТЕРАТУРА

1. Васильев А.С. Направленное формирование эксплуатационных свойств деталей в технологических средах // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Машиностроение. 2017. Т. 17. № 1. С. 33-40.
2. Васильев А.С. Выбор планировок-аналогов при проектировании технологических комплексов изготовления деталей машин / А.С.Васильев, В.В.Галий // Справочник. Инженерный журнал. 2014. № 3 (204). С. 25-28.
3. Васильев А.С. Обеспечение износостойкости поверхностей прецизионных деталей в гетерогенных технологических структурах с использованием лазерной закалки / А.С.Васильев, А.И.Кондаков, И.Н.Шиганов // Сварочное производство. 2013. № 3, С. 30-34.
4. Васин С.А. Методика расчета величины крутящего момента настройки электропривода в системе электроприводной запорной арматуры с прямолинейным перемещением запорного органа / С.А.Васин, Е.В.Плахотникова // Записки Горного института. 2018. Т. 232. С. 407-412. DOI: 10.31897/PMI.2018.4.407
5. Васин С.А. Практический опыт обеспечения качества технических систем при взаимодействии производителей в общем потоке создания ценности конечного продукта / С.А.Васин, Е.В.Плахотникова // Управление качеством в нефтегазовом комплексе. 2017. № 1. С. 37-39.
6. Максarov В.В. Моделирование и управление динамическими свойствами технологических систем / В.В.Максаров, П.В.Леонидов // Записки Горного института. 2014. Т. 209. С. 71-77.
7. Максarov В.В. Теория и практика моделирования и управления в области прогнозирования динамических свойств технологических систем / В.В.Максаров, Ю.Ольт // Металлообработка. 2012. № 2 (68). С. 5-12.
8. Плaxотникова Е.В. Результаты исследования систем «электропривод – запорная арматура» с позиции технической эффективности и энергопотребления // Известия ТулГУ. Технические науки. 2016. Вып. 3. С. 230-237.
9. Antsev V.Y. Improvement in production process for pipelines manufacturing based on quality management method / V.Y.Antsev, N.A.Vitchuk, V.V.Miroshnikov // Procedia Engineering. 2017. Vol. 206. P. 950-957.
10. Dynamic synthesis of technological equipment for the manufacture of precision articles / A.G.Ivakhnenko, V.V.Kuts, A.Yu.Altukhov, E.O.Ivakhnenko // Chemical and Petroleum Engineering. 2015. Vol. 51. № 7. P. 445-451. DOI: 10.1007/s10556-015-0066-4
11. Maksarov V. Determining the load on support rollers the pipe conveyor belt / V.Maksarov, E.Zlotnikov, J.Olt // Proceedings of the 28th DAAAM International Symposium. 2017. P. 0209-0215. DOI: 10.2507/28th.daaam.proceedings.028
12. Maksarov V.V. Dynamic stabilization of technological systems for processing edge cutting through local metstability / V.V.Maksarov, J.Olt, M.Madissoo // IEEE International Symposium on Assembly and Manufacturing, Tampere Hall Tampere, Finland, 2011. № 12096241. DOI: 10.1109/ISAM.2011.5942348
13. Plakhotnikova E.V. Quality and Competitiveness Improvement of NPP Safety Systems // IEEE Conference on quality management, transport and information security, information technologies. Nalchik, 2016. P. 41-42. DOI: 10.1109/ITMQIS.2016.7751946
14. Rudenko A.A. Increase of stability of functioning of a production system of machine-building enterprise / A.A.Rudenko, D.V.Antipov, M.O.Iskoskov // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2015. Vol. 91. № 012071. DOI:10.1088/1757-899X/91/1/012071
15. Vasiliev A.S. Controlled forming of machine components operating characteristics // Procedia Engineering. 2016. Vol. 150. P. 975-979. DOI: 10.1016/j.proeng.2016.07.073

Авторы: С.А.Васин, д-р техн. наук, профессор, vasin_sa53@mail.ru (Тульский государственный университет, Тула, Россия), А.С.Васильев, д-р техн. наук, заведующий кафедрой, vas@bmstu.ru (Московский государственный технический университет имени Н.Э.Баумана (национальный исследовательский университет), Москва, Россия), Е.В.Плахотникова, д-р техн. наук, профессор, plahotnikova@mail.ru (Тульский государственный университет, Тула, Россия).

Статья поступила в редакцию 13.01.2019.

Статья принята к публикации 15.01.2020.