

Учет аппаратных ограничений при построении систем управления сервопривода

РАССУДОВ Л.Н.

Траектория движения сервопривода, работающего в режиме высокоточного отслеживания траектории, должна быть сформирована таким образом, чтобы все задаваемые координаты электропривода не превышали ограничения. Это один из важнейших факторов, обеспечивающих требуемую точность и устойчивость системы. С другой стороны, работа электропривода вдали от ограничений приводит к недоиспользованию установленного оборудования, что завышает установленную мощность и габариты установленного оборудования и приводит к чрезмерным капитальным затратам. Поэтому экономически важно обеспечить работу сервопривода вблизи его ограничений. В статье рассматриваются ограничения прямого сервопривода на базе синхронной машины с постоянными магнитами – как линейной, так и вращательной. Представлена концепция учета ограничений, в соответствии с которой ограничения условно разделяются на внутренние (ограничения компонентов сервопривода) и внешние (ограничения технологического процесса и окружающей среды). Представлено специализированное программное обеспечение для анализа ограничений, описаны принципы его построения. Оно позволяет определить допустимые значения координат сервопривода, составленного из заданных компонентов (электрической машины, сервоусилителя, датчика положения и др.) при заданных внешних ограничениях. На основании выбранных из редактируемой библиотеки компонентов сервопривода – синхронной машины, блока управления, датчика положения и параметров технологической установки, задаваемых пользователем, отображается область статических механических характеристик отдельно электрической машины, электрической машины с блоком управления и датчиком положения, а также сервопривода с учетом ограничений пользователя. В результате, во-первых, проверяется совместимость выбранных компонентов и определяется возможность использования выбранного оборудования для обеспечения требуемого закона движения. Во-вторых, выявляются компоненты, ограничивающие технические показатели сервопривода. В-третьих, анализируется возможность повышения эксплуатационных характеристик сервопривода при использовании сложных алгоритмов управления. В частности, показано, что ослабление поля не всегда позволяет расширить скоростной диапазон сервопривода. В результате использования предложенной концепции учета ограничений проектирование и оптимизация прямого сервопривода и его системы управления могут быть существенно ускорены, что позволяет сократить время выхода на рынок.

Ключевые слова: сервопривод, траектория движения, аппаратные ограничения, система управления, программное обеспечение

Для обеспечения технологического процесса важен корректный выбор компонентов системы электропривода (ЭП): электрической машины, датчиков обратной связи, кинематических передач, управляющей электроники, системы управления и т.д. При этом важным требованием к разработчику является выбор оборудования без чрезмерного запаса с тем, чтобы массогабаритные показатели и капитальные затраты были минимальны.

Проводимые в мире исследования по совершенствованию и оптимизации систем управления электропривода являются одним из экономически эффективных способов повышения эксплуатационных характеристик оборудования. Успехи в этом

направлении возможны благодаря бурному развитию информационных технологий: оптимизированных структур управления, сложных алгоритмов обработки данных, продвинутых технологий коммуникации.

При оптимизации систем управления с целью приблизить работу электропривода к пределу возможности аппаратной части необходимо учитывать ограничения, определяющие эти возможности [1]. На основе информации об ограничениях компонентов электропривода [2] проектировщик может определить, может ли данное оборудование обеспечить требуемые показатели и какие методики управления позволят достичь максимально высо-

ких результатов. Например, использование методов управления электрической машиной с ослаблением поля [3–6], в том числе динамического [7–9], может позволить расширить скоростной диапазон работы одной системы, но при этом алгоритмы могут быть бесполезны (т.е. не позволят увеличить скорость) при работе той же машины в составе другой системы, например при недостаточном напряжении питания.

В статье рассматриваются ограничения прямого сервопривода на базе синхронной машины с постоянными магнитами. Ограничения предлагается условно разделить на внутренние и внешние по отношению к электроприводу. Внутренние: электро-механические ограничения электрической машины; электрические ограничения блока управления; ограничения датчика положения на механические координаты. Внешние: ограничения технологического процесса; ограничения окружающей среды.

В литературе подробно рассматриваются ограничения сервопривода [1], методы учета этих ограничений [10], однако комплексный анализ всех ограничений для проектирования и разработки системы управления невозможен без соответствующего программного обеспечения. Многие производители, например NPI [11], предлагают системным интеграторам специализированное программное обеспечение для подбора оборудования, не подразумевают, однако, знания ими особенностей и тонкостей работы компонентов сервопривода. В то же время программное обеспечение такого типа было бы полезно и разработчикам сервоприводов, ведь учет ограничений необходим не только для того, чтобы подобрать готовые компоненты привода, но и при разработке новых, в том числе специализированных изделий, а также при выборе оптимальной структуры управления.

В статье представлена концепция учета ограничений сервопривода, а также программное обеспечение, основанное на этой концепции. Оно является эффективным инструментом, позволяющим быстро оценить возможности сервопривода, оптимизировать выбор его компонентов для решения конкретной технологической задачи. В результате, во-первых, проверяется совместимость выбранных компонентов и определяются возможности обеспечения при использовании выбранного оборудования требуемого закона движения; во-вторых, системы, являющиеся «бутылочным горлышком» и ограничивающие технические показатели сервопривода и компоненты, выбранные с чрезмерным запасом; в-третьих, анализируются возможности повышения эксплуатационных характеристик серво-

привода при использовании сложных алгоритмов управления.

Следующий раздел статьи посвящен обзору ограничений прямого сервопривода. Далее представлена концепция учета совокупности ограничений. На ее основании разработано программное обеспечение для анализа ограничений, позволяющее предсказать, сможет ли система отработать заданную траекторию в режиме высокоточного отслеживания. На примере показано удобство анализа эксплуатационных характеристик сервопривода, возможности их повышения за счет сложных алгоритмов управления.

Ограничения электропривода. При управлении сервоприводом необходимо учитывать ограничения на его координаты: допустимый диапазон перемещений, скорость, ускорение, рывок, а также ограничения по напряжению, значения длительного и пикового тока. Ограничения электропривода определяются его компонентами. Основные компоненты прямого сервопривода – электрическая машина, блок управления (сервоусилитель), датчик положения. Кроме того, есть ограничения, накладываемые на электропривод со стороны технологического процесса (допустимая скорость, ускорение и др.) и окружающей среды (например, уменьшение длительного тока при падении давления воздуха при конвекционном охлаждении). Совокупность ограничений должна учитываться при разработке электропривода и при оптимизации его системы управления.

В современном сервоприводе широкое применение находят синхронные машины, токовое питание которых осуществляется в функции положения – вентильные двигатели (ВД). В системах управления ВД часто используется каскадная система управления (рис. 1) с контурами тока, скорости и положения [1]. Главное ее преимущество – удобство реализации ограничения координат ЭП [12]. К недостаткам системы можно отнести невысокие динамические показатели внешних контуров регулирования, однако этот недостаток может быть компенсирован за счет формирования прямых программных связей для добавления их к заданию координат внутренних контуров. Для управления координатами ЭП используются цифровые регуляторы компонент вектора тока (I_d , I_q), а также цифровые регуляторы скорости и положения. Вектор задания на движение $(x_*, y, T_*)^T$ формируется генератором траектории (ГТ). При этом в зависимости от требуемой плавности перемещения могут формироваться гладкие путевые траектории 2, 3, 4-го или более высоких порядков, однако наиболее часто используются путевые траектории 3-го порядка

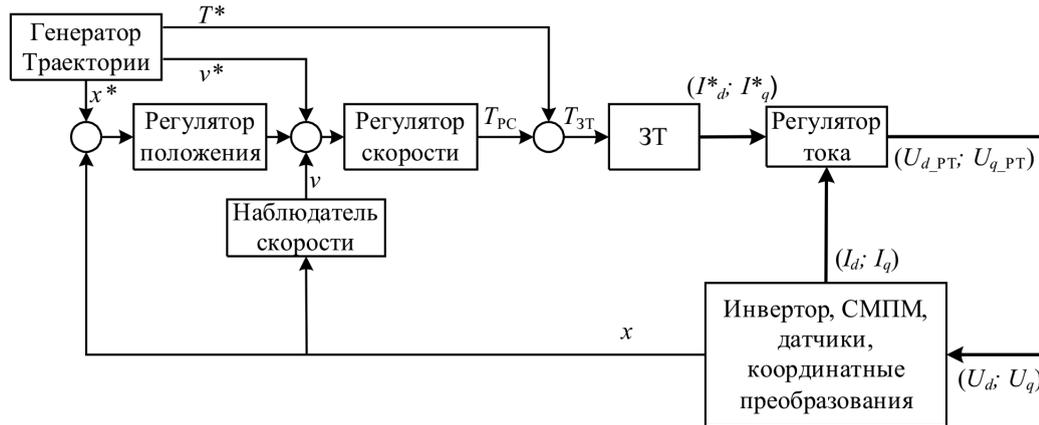


Рис. 1. Типовая структура система управления ВД

[1, 13, 14], так называемые S-образные траектории. Для получения сигнала обратной связи по скорости v используется цифровой наблюдатель скорости (НС) [15]. Задание на силу T^* преобразуется в задание на I_d^* и I_q^* токов ВД с помощью задатчика вектора тока (ЗТ).

Ограничения электрической машины. При управлении ВД требуется учитывать совокупность ограничений на координаты ВД – максимально возможных для ВД скорости, ускорения, рывка и диапазона перемещений, а также ограничений по напряжению и току фаз (пиковый ток I_p), выделяемых тепловых потерь – длительный ток I_c , время пикового тока t_p , стопорная скорость, тепловая постоянная времени. Для определения этих ограничений необходимо получить математическое описание ВД. Примем следующие допущения: насыщение, потери в стали и краевые эффекты на границах зубцовых зон отсутствуют; постоянные магниты – идеальные источники магнитного поля; машина симметричная, материал магнитопровода обладает бесконечно большой магнитной проницаемостью, воздушный зазор равномерен, синусоидальное распределение МДС рабочей гармоники поля.

Уравнения идеализированного ВД в подвижной системе координат dq на примере ВД с неявнополюсной линейной синхронной машиной (НЛСМ) имеют вид [9]:

$$\begin{aligned} U_d &= RI_d + L \frac{dI_d}{dt} - \frac{\pi}{\tau_p} v LI_q; \\ U_q &= RI_q + L \frac{dI_q}{dt} + v \left(\frac{\pi}{\tau_p} LI_d + K_{Tph} \right); \\ T &= \frac{3}{2} K_{Tph} I_q; \end{aligned} \tag{1}$$

$$T - T_{\text{сog}}(x) - T_{cf} - T_{vf}(v) - T_L = m_{\Sigma} a;$$

$$j = \frac{da}{dt} = \frac{d^2 v}{dt^2};$$

$$I_d^2 + I_q^2 \leq I_p^2;$$

$$U_d^2 + U_q^2 \leq U_m^2,$$

где R, L – сопротивление и индуктивность фаз d и q ; K_{Tph} – коэффициент силы; τ_p – полюсное деление электрической машины; $T, T_{\text{сog}}, T_L, T_{cf}, T_{vf}$ – электромагнитная сила, зубцовая, внешняя активная сила, силы сухого и вязкого трения; m_{Σ} – суммарная масса подвижной части; j, a, v, x – механические рывок, ускорение, скорость и положение; I_d, I_q, U_d, U_q – продольные и поперечные составляющие векторов тока и напряжения; U_m – максимальная амплитуда вектора напряжения; I_p – пиковый ток.

Рывок j определяется скоростью изменения I_q (при скорости изменения T , много большей скорости изменения возмущений $T_{\text{сog}}, T_L, T_{cf}, T_{vf}$):

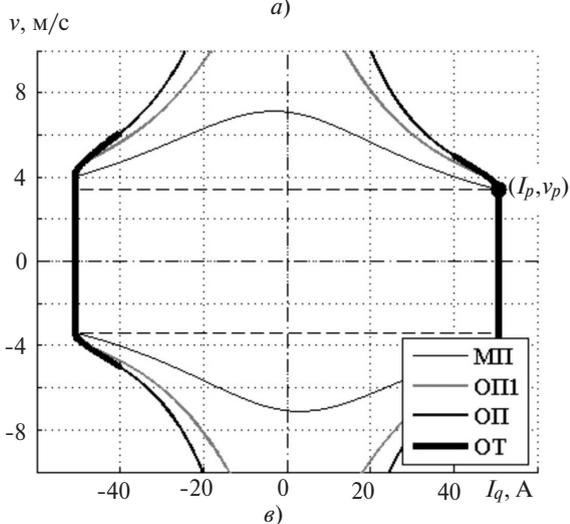
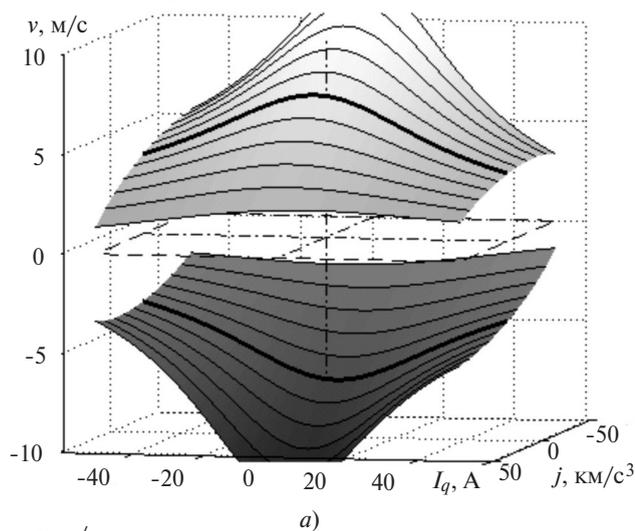
$$j = \frac{3K_{Tph}}{2m_{\Sigma}} \frac{dI_q}{dt}. \tag{2}$$

Предельные значения рывка зависят от параметров системы и текущих значений координат ВД: I_d, I_q, v . Из (1) получаются уравнения граничной области динамических электромеханических характеристик ВД с НЛСМ:

$$\begin{aligned} j_{\text{гр}}(I_d, I_q, v) &= \left(\pm \sqrt{U_m^2 - \left(RI_d + L \frac{dI_d}{dt} - \frac{\pi}{\tau_p} v LI_q \right)^2} - \right. \\ &\quad \left. - I_q R - v \left(\frac{\pi}{\tau_p} LI_d + K_{Tph} \right) \right). \end{aligned} \tag{3}$$

На рис 2,а показана область динамических электромеханических характеристик на примере ВД с НЛСМ, получаемая из (3) при $I_d=0$. На основе (3) строятся и статические электромеханические характеристики – как сечение области при нулевом рывке. На рис. 2,б представлено семейство статических граничных электромеханических характеристик ВД при уменьшении максимальной амплитуды вектора напряжения с шагом $0,1U_m$, значением $I_d=0$ и с учетом ограничения амплитуды вектора тока (ОТ) значением I_p .

Ограничение на скорость определяется ограничением напряжения питания (ОН), это характеристика минимума потерь (МП). Скоростной диапазон ВД в статических режимах расширяется ослаблением поля отрицательным током I_d . На рис. 2,г представлены: характеристика МП, характеристика предельного ослабления поля (ОП), определяемая ограничением на амплитуду вектора тока I_p и ограничением по размагничиванию:



$$I_{d\text{разм}} = \frac{\tau_p K_{Tph}}{\pi L}, \quad (4)$$

а также характеристика при $I_d = I_{d\text{разм}}/2$ (ОП1). Соответствующие годографы вектора тока представлены на рис. 2,г.

Ограничения в области электромеханических характеристик часто учитываются ограничением скоростного диапазона сервопривода значением максимальной скорости v_p , достигаемым при любом значении тока I_q вплоть до максимальной форсировки I_p (рис 2,б). В этом случае диапазон работы ЭП представляет собой лишь прямоугольную область, определяемую выражением $(|I_q| \leq I_p) \& (|v| \leq v_p)$. Задача расширения скоростного диапазона работы ЭП без уменьшения возможностей по форсировке часто решается выбором ЭП с большим значением v_p , что может привести к существенному завышению установленной мощности, массогабаритных показателей, капитальных затрат – в случае мягких предельных характери-

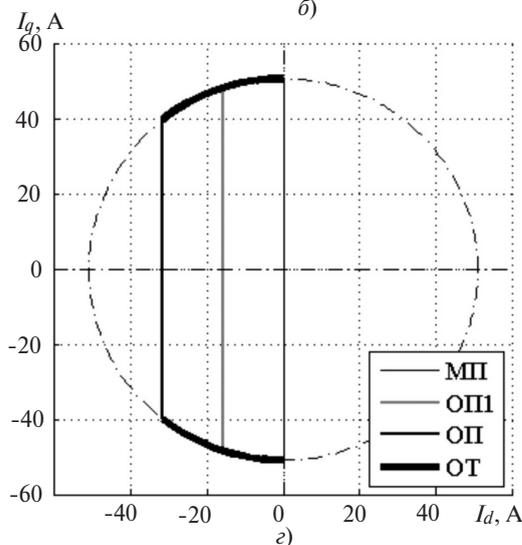
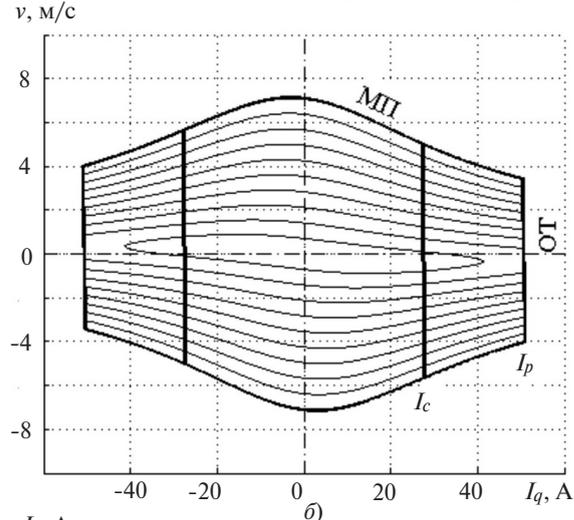


Рис. 2. Электромеханические характеристики ВД на базе НЛСМ МСЛ-2,0-4,6-В [9]: а – область динамических электромеханических характеристик, показаны сечения граничных поверхностей с шагом $\Delta j = 10 \text{ км/с}^3$; б – статические электромеханические характеристики; в – ослабление поля, статические электромеханические характеристики; г – ослабление поля, годограф вектора тока

стик. Перечисленных недостатков можно в некоторых случаях избежать, создав систему управления ВД, позволяющую расширить скоростной диапазон работы ЭП вплоть до граничной характеристики ОП со снятием ограничения скорости значением v_p . В таком случае максимальная скорость будет зависеть от нагрузки. Однако при этом возрастают требования и к точности математического описания ВД и к алгоритмам СУ.

Электрические ограничения блока управления. Ограничения на электропривод, определяемые блоком управления, – максимальные значения напряжений и токов (в том числе длительные значения), которые могут быть поданы в точку подключения электрической машины. При использовании ШИМ-инвертора напряжения максимальное выходное напряжение определяется номинальным значением напряжения звена постоянного тока, частотой ШИМ, значением «мертвого» времени, типом ШИМ-модуляции, падением напряжения на полупроводниковых приборах. Ограничение длительного тока обусловлено тепловым режимом работы, а пикового – условием сохранения работоспособности блока управления.

Ограничения датчика положения на механические координаты. В зависимости от датчика положения и свойств блока управления скорость электропривода может быть ограничена скоростью приема и передачи данных. Например, при использовании датчиков положения с аналоговым энкодером скорость ограничена частотой пропускания системы измерения положения. Для инкрементных энкодеров максимальная скорость ограничена максимальной частотой цифрового сигнала.

Условия эксплуатации. Кроме ограничений, определяемых компонентами электропривода, существуют дополнительные ограничения, накладываемые условиями эксплуатации. Во-первых, это ограничения технологического процесса. Так, в некоторых установках необходимо накладывать дополнительные ограничения на рывок, ускорение, скорость и перемещения для предотвращения повреждения оборудования или обрабатываемого изделия. С другой стороны, это ограничения, определяемые условиями, в которых работает оборудование: пониженное напряжение питающей сети, уменьшение значения длительного тока (например, уменьшение значения длительного тока оборудования при его установке на повышенной высоте над уровнем моря или в вакууме) [16]. Условия эксплуатации обязательно должны учитываться проектировщиком на самых ранних этапах работы над проектом.

Программное обеспечение для анализа ограничений (рис. 3). На основании концепции учета совокупности ограничений в среде MATLAB разработано программное обеспечение для анализа ограничений. При выбранных из библиотеки составляющих ЭП – синхронной машины, блока управления, ДП и параметров технологической установки, задаваемых пользователем, – отображается область статических механических характеристик с учетом ограничений отдельно электрической машины, электрической машины с блоком управления и датчиком положения, а также ЭП с учетом заданных условий эксплуатации. Условия эксплуатации в программе называются ограничениями пользователя. В зависимости от конкретного применения сервопривода пользователь может установить дополнительные ограничения на скорость, ускорение, длительный и пиковый ток, учесть пониженное напряжение питания, дополнительную индуктивность и сопротивление в фазах электрической машины, дополнительную инерционность полезной нагрузки.

Программное обеспечение было протестировано на корректность построения механических характеристик сервоприводов на базе двух- и трехфазных, линейных и вращательных синхронных машин производства Siemens [16], HIWIN [17], NTI AG [18]. Полученные характеристики соответствуют приведенным в техническом описании (для тех машин, у которых насыщение проявляется незначительно). В программном обеспечении присутствуют и другие функции – редактор компонентов библиотеки, расчет рекуперлируемой энергии, расчет балластного резистора цепи слива энергии торможения, проверка компонентов на совместимость, которые в данной статье не рассматриваются. Интерес представляет анализ возможностей ослабления поля. На рис. 4 представлены характеристики ослабления поля электрической машины ТМУ68 [17] при напряжении звена постоянного тока 540 В (*a, б*) и 63 В (*г, д*), полученные при использовании описанного программного обеспечения.

При высоком напряжении питания ослабление поля приводит к расширению скоростного диапазона работы сервопривода. При низком напряжении, наоборот, – к уменьшению достижимой скорости из-за существенного падения напряжения, необходимого для питания машины продольным током I_d . На рис. 4, *г* и *д* показано, что недостаток напряжения не только не расширяет скоростной диапазон, но и вовсе не позволяет питать машину током I_d при напряжении 63 В, так как при этом рабочая точка будет за пределами ограничения по току и напряжению и не может быть реализована.

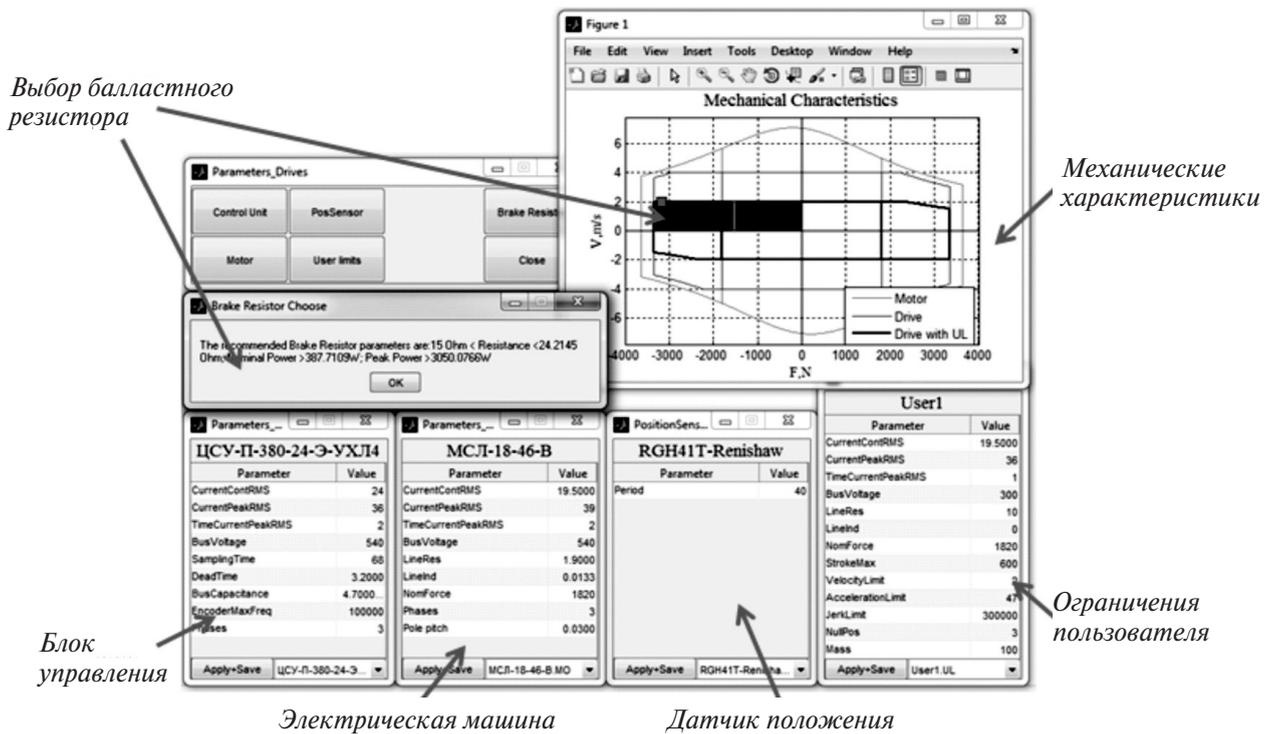


Рис. 3. Программное обеспечение для анализа ограничений сервопривода

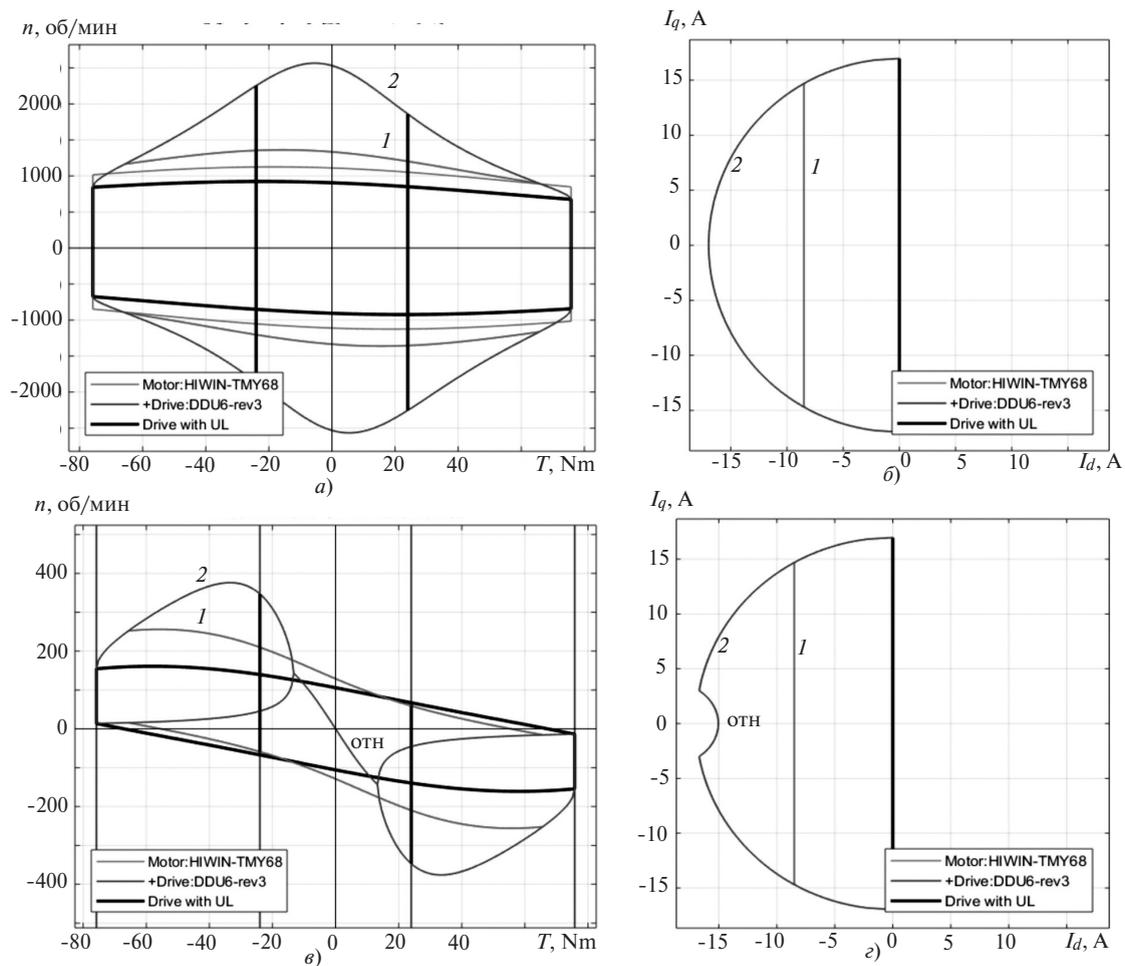


Рис. 4. Ослабление поля, электрическая машина типа ТМУ68. Зависимости получены в программном обеспечении для анализа ограничений. При 540 В: а – механические характеристики; б – годографы тока; при 63 В: в – механические характеристики; г – годографы тока; предельные характеристики ослабления поля $1 - I_{d \min} = 0,5(-I_p)$; $2 - I_{d \min} = (-I_p)$

Таким образом, введение динамического ослабления поля в первом случае может быть оправдано, а во втором (при использовании тех же компонентов сервопривода) — нет.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Балковой А.П., Цаценкин В.К. Прецизионный электропривод с вентильными двигателями. М.: Издательский дом МЭИ, 2010, 328 с.
2. Rassudov L.N., Balkovoy A.P. Optimisation in servo motion control: Considering hardware constraints 2018 25th International Workshop on Electric Drives: Optimization in Control of Electric Drives (IWED). DOI: 10.1109/IWED.2018.8321398 31 Jan.–2 Feb. 2018.
3. Rassudov L., Balkovoy A. Exact tracking of a PMSM in the extended speed range. 57. Internationales Wissenschaftliches Kolloquium, Ilmenau, 2012.
4. Sukanta H., Srivastava S. P. and Pramod A. Flux Weakening Control Algorithm with MTPA Control of PMSM Drive. — IEEE 6th India Intern. Conf. on Power Electronics (ICPE), 2014, 8–10 Dec., Kurukshehra, India.
5. Wang J., Wu J., Gan C. and Sun Q. Comparative study of flux-weakening control methods for PMSM drive over wide speed range. — 19th Intern. Conf. on Electrical Machines and Systems (ICEMS), 13–16 Nov. 2016. Chiba, Japan.
6. Cao X. and Fan L., A novel flux-weakening control scheme based on the fuzzy logic of PMSM drive. — IEEE Intern. Conf. on Mechatronics and Automation, 2009, Aug. 9–12, Chiba, Japan.
7. Attaianese C., Nardi V., Tomasso G. Improved dynamic control for permanent magnet AC (PMAC) machine in the field weakening region.— European Trans. on Electrical Power, 2005, 15, pp. 285–297.
8. Gniar V., Cafuta P., Kumin L. Exact Tracking by Dynamic Field-Weakened PMAC Servodrives — IEEE Trans. on Energy Conversion, March 2001, vol. 16, No. 1.
9. Рассудов Л.Н. Разработка и исследование методов улучшения точности и динамики прецизионного сервопривода: Дисс.... канд. техн. наук: 05.09.03. Москва, 2016, 132 с.
10. Rassudov L.N. Icepds Improving Point-to-Point Motion Profile for a Direct Servo Drive under Constraints. — X Intern. Conf. on Electrical Power Drive Systems (ICEPDS), 3–6 Oct. 2018, Novocherkassk, Russia.
11. NTI AG. LinMot Designer 1.9.3 Tutorial. [Электрон. ресурс] <https://linmot.com/wp-content/uploads/2019/07/linmot-designer-193-Tutorial.pdf> (дата обращения 03.09.2019).
12. Ключев В.И. Теория электропривода: Учебник для вузов. М.: Энергоатомиздат, 2001, 704 с.
13. Etel Torque Motors Manual Handbook TORQUE 902 / Ver. A/1/10/04.
14. Rassudov L.N., Balkovoy A.P. Dynamic model exact tracking control of a permanent magnet synchronous motor (SIBCON). — Intern. Siberian Conf. on Control and Communications, 21–23 May 2015, Omsk, Russia.
15. Kruk R., Scannell J. Motion Controller Employs DSP Technology. — PCIM, Sept. 1988.
16. Siemens. SINAMICS S120. Peak and continuous load motors in the 1FN3 product family. Configuration Manual.
17. Torque motor (direct drive motor) technical information. — HIWIN Motion Control and System Technology, 2015 [Электрон. ресурс] www.hiwin.com/pdf/torque_motor_rotary_tables.pdf (дата обращения 01.10.2019).
18. LinMot Product Catalogue, Edition 24. NTI AG. [23.10.2019]

А в т о р: Рассудов Лев Николаевич — кандидат техн. наук, доцент кафедры «Автоматизированный электропривод» НИУ «Московский энергетический институт», диссертацию защитил в 2016 г.

Consideration of Hardware Constraints in Designing Servo Drive Control Systems

RASSUDOV Lev N. (NRU «Moscow Power Engineering Institute», Moscow, Russia) — Associate Professor of Electric Drive Dept., Cand. Sci. (Eng.)

In designing a servo drive operating in a high-precision tracking mode, its motion trajectory should be shaped so that none of the specified drive state variables exceeded the preset constraints. This is one of the most important factors essential for securing the required accuracy and stability of system operation. On the other hand, if the drive operation parameters are kept far from the constraints, the drive equipment is underused; it will have excessive capacity and overall dimensions and, hence, excessive capital cost. Therefore, from the economic point of view it is important to set up the drive operation close to the constraints imposed on it. The article considers the constraints imposed on a direct servo drive equipped with a permanent-magnet synchronous machine (either a linear or rotary one). A constraint consideration concept is presented, according to which the constraints are conditionally subdivided into internal (constraints relating to the servo drive components) and external ones (constraints connected with the technological process and environment). Dedicated software for analyzing the constraints is presented, and its underlying principles are described. By using this software, it is possible to determine the permissible coordinates of a servo drive composed of the preset components (electrical machine, servo amplifier, position sensor, etc.) subject to the specified external constraints. Proceeding from the servo drive components (a synchronous machine, control unit, position sensor) selected from an editable library and

the process installation parameters specified by the user as the input data, the software produces the domain of static mechanical characteristics individually for the electrical machine, for the machine together with the control unit and position sensor, and for the servo drive with taking into account the constraints specified by the user. As a result, the following positive aspects become available. First, the compatibility of the selected components is checked, and the possibility of using the selected equipment for implementing the required motion law is determined. Second, the components limiting the servo drive performance indicators are revealed. And third, the possibility of improving the servo drive performance characteristics in the case of using sophisticated control algorithms is analyzed. In particular, it has been shown that weakening of the field does not always make it possible to broaden the servo drive speed range. By using the proposed constraint consideration concept, a direct drive and its control systems can be designed and optimized much more rapidly, so that the newly developed drive can become commercially available within a shorter period of time.

Key words: servo drive, motion trajectory, hardware constraints, control system, software

REFERENCES

1. **Balkovoy A.P., Tsatsenkin V.K.** *Pretsiyonnyy elektroprivod s ventil'nymi dvigatelyami* (Precision electric drive with Brushless AC motors). M.: Izdatel'skiy dom MEI, 2010, 328 p.
2. **Rassudov L.N., Balkovoy A.P.** Optimisation in servo motion control: Considering hardware constraints 2018 25th International Workshop on Electric Drives: Optimization in Control of Electric Drives (IWED). DOI: 10.1109/IWED.2018.8321398 31, Jan.–2 Feb., 2018.
3. **Rassudov L., Balkovoy A.** Exact tracking of a PMSM in the extended speed range. 57. Internationales Wissenschaftliches Kolloquium, Ilmenau, 2012.
4. **Sukanta H., Srivastava S. P. and Pramod A.** Flux Weakening Control Algorithm with MTPA Control of PMSM Drive. – IEEE 6th India Intern. Conf. on Power Electronics (IICPE), 2014, 8–10 Dec., Kurukshehra, India.
5. **Wang J., Wu J., Gan C. and Sun Q.** Comparative study of flux-weakening control methods for PMSM drive over wide speed range. – 19th Intern. Conf. on Electrical Machines and Systems (ICEMS), 13–16, Nov. 2016. Chiba, Japan.
6. **Cao X. and Fan L.,** A novel flux-weakening control scheme based on the fuzzy logic of PMSM drive. – IEEE Intern. Conf. on Mechatronics and Automation, 2009, Aug. 9–12, Chiba, Japan.
7. **Attaianese C., Nardi V., Tomasso G.** Improved dynamic control for permanent magnet AC (PMA) machine in the field weakening region. – European Trans. on Electrical Power, 2005, 15 pp. 285–297.
8. **Gruar B., Cafuta P., Kumin L.** Exact Tracking by Dynamic Field-Weakened PMA Servodrive – IEEE Trans. on Energy Conversion, March 2001, vol. 16, No. 1.
9. **Rassudov L.N.** *Razrabotka i issledovaniye metodov uluchsheniya tochnosti i dinamiki pretziyonnogo servoprivoda: Dis... kand. tekhn. nauk: 05.09.03* (Development and research of methods for improving the accuracy and dynamics of precision servo: Dis... Cand. Sci. (Eng.): 09.09.03). Moscow, 2016, 132 p.
10. **Rassudov L.N.** Icepds Improving Point-to-Point Motion Profile for a Direct Servo Drive under Constraints. – X Intern. Conf. on Electrical Power Drive Systems (ICEPDS), 3–6 Oct. 2018, Novocherkassk, Russia.
11. **NTI AG.** LinMot Designer 1.9.3 Tutorial [Electron. resource] <https://linmot.com/wp-content/uploads/2019/07/linmot-designer-193-Tutorial.pdf> (Data of appeal 03.09.2019).
12. **Klyuchev V.I.** *Teoriya elektroprivoda: Uchebnik dlya vuzov* (Theory of electric drive: Textbook for universities). M.: Energoatomizdat, 2001, 704 p.
13. **Etel Torque** Motors Manual Handbook TORQUE 902 / Ver. A/1/10/04.
14. **Rassudov L.N., Balkovoy A.P.** Dynamic model exact tracking control of a permanent magnet synchronous motor (SIBCON). – Intern. Siberian Conf. on Control and Communications, 21–23 May 2015, Omsk, Russia.
15. **Kruk R., Scannell J.** Motion Controller Employs DSP Technology. PCIM, Sept. 1988.
16. **Siemens.** SINAMICS S120. Peak and continuous load motors in the 1FN3 product family. Configuration Manual.
17. **Torque** motor (direct drive motor) technical information. – HIWIN Motion Control and System Technology, 2015 [Electron. resource] www.hiwin.com/pdf/torque_motor_rotary_tables.pdf (Data of appeal) 01.10.2019).
18. **LinMot** Product Catalogue, Edition 24. NTI AG.

[23.10.2019]