

ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ И УПРАВЛЯЮЩИЕ СИСТЕМЫ

INFORMATION-MEASURING AND CONTROL SYSTEMS

УДК 681.5

doi:10.21685/2307-5538-2022-1-1

ПОВЫШЕНИЕ КАЧЕСТВА УПРАВЛЕНИЯ ДИНАМИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ В ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ

А. А. Железняк

Керченский государственный морской технологический университет, Керчь, Россия
zheleznyak13@mail.ru

Аннотация. *Актуальность и цели.* Повышение качества управления динамическими процессами в электро-энергетических системах предполагает широкое внедрение методов оптимального управления, реализуемых с помощью средств вычислительной и микропроцессорной техники. *Материалы и методы.* Эффективность оптимального управления существенным образом зависит от класса математической модели, описывающей процессы в электроэнергетических системах. *Результаты.* Использование моделей энергосистемы высокого класса точности для выбора законов управления не позволяет в реальном масштабе времени осуществлять коррекцию режимов системы в связи с большим объемом вычислений параметров оптимального регулятора и недостаточной схожимостью вычислительных процессов. *Выводы.* Поэтому требуется рациональное упрощение математических моделей в электроэнергетических системах, применяемых для выбора закона управления, которые позволили бы избежать этих трудностей и вместе с тем обеспечить точность решения по выбору оптимальных регуляторов.

Ключевые слова: электроэнергетическая система, повышение качества, оптимальное управление, сингулярные возмущения, моделирование

Для цитирования: Железняк А. А. Повышение качества управления динамическими процессами в электро-энергетических системах // Измерения. Мониторинг. Управление. Контроль. 2022. № 1. С. 5–12. doi:10.21685/2307-5538-2022-1-1

IMPROVING THE QUALITY OF DYNAMIC PROCESS CONTROL IN ELECTRIC POWER SYSTEMS

A.A. Zhelezniak

Kerch State Marine Technological University, Kerch, Russia
zheleznyak13@mail.ru

Abstract. *Background.* Improving the quality of control of dynamic processes in electric power systems involves the widespread introduction of optimal control methods implemented using computer and microprocessor technology. *Materials and methods.* The effectiveness of optimal control significantly depends on the class of mathematical models describing processes in electric power systems. *Results.* The use of high-precision power system models for the selection of control laws does not allow real-time correction of system modes due to the large volume of calculation of the parameters of the optimal controller and insufficient convergence of computational processes. *Conclusions.* Therefore, it is necessary to rationalize mathematical models of electric power systems used to select the control law, which would avoid these difficulties and at the same time ensure the accuracy of the decision on the choice of optimal regulators.

Keywords: electric power system, quality improvement, optimal control, singular perturbations, modeling

For citation: Zhelezniak A.A. Improving the quality of dynamic process control in electric power systems. *Izmereniya. Monitoring. Upravlenie. Kontrol' = Measurements. Monitoring. Management. Control.* 2022;(1):5–12. (In Russ.). doi:10.21685/2307-5538-2022-1-1

Введение

Упрощение математических моделей электроэнергетических систем (ЭЭС) обычно основано на искусственном разделении взаимосвязанных процессов динамики системы, различающимся временным масштабом изменения параметров системы [1, 2].

Более эффективные методы уменьшения размерности математических моделей ЭЭС могут быть получены на основе теории сингулярных возмущений [3]. В данной статье рассмотрена возможность практического применения методов теории сингулярных возмущений для понижения размерности решаемых задач при синтезе оптимальных регуляторов ЭЭС. В соответствии с этой теорией исходная линеаризованная модель ЭЭС

$$\dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t) \quad (1)$$

представляется с помощью дифференциальных уравнений, содержащих малый положительный скалярный параметр ϵ при производных от части переменных:

$$\dot{x}_1(t) = A_{11}x_1(t) + A_{12}x_2(t) + B_1u(t); \quad (2)$$

$$\epsilon \dot{x}_2(t) = A_{21}x_1(t) + A_{22}x_2(t) + B_2u(t),$$

где $x_1(t)$ и $x_2(t)$ – векторы переменных состояния ЭЭС, характеризующих соответственно медленно- и быстропротекающие процессы в реальной системе.

Цель исследований

Целью исследований являлось применение теории сингулярных возмущений для возможности получения существенного упрощения модели электроэнергетических систем.

Результаты

Для проверки работоспособности метода проведено моделирование системы с использованием градиентной процедуры в задаче компенсации входного изображения.

Традиционные методы понижения размерности исходных моделей ЭЭС (1) и выбор на их основе оптимального управления предполагают пренебрежение быстропротекающими процессами и выделение медленной подсистемы [1, 3]. Так, при $\epsilon \rightarrow 0$ система (2) преобразуется к виду

$$\dot{x}_{1s} = A_{11}x_{1s} + A_{12}x_{2s} + B_1u_s; \quad (3)$$

$$0 = A_{21}x_{1s} + A_{22}x_{2s} + B_2u_s,$$

а затем к модели пониженной размерности

$$\dot{x}_s = A_s x_s + B_s u_s, \quad (4)$$

где $x_s = x_{1s}$; $A_s = A_{11} - A_{12}A_{22}^{-1}A_{21}$; $B_s = B_1 - A_{12}A_{22}^{-1}B_2$.

Очевидно, что такой подход может привести к существенному упрощению исходной модели и, соответственно, оптимального регулятора. Однако для каждой исследуемой модели требуется проведение специального анализа, доказывающего удовлетворительность такой аппроксимации. Кроме того, установлено, что упрощение модели ЭЭС в соответствии с выражениями (3), (4) в ряде случаев приводит к неустойчивым моделям [4].

Выделение быстрой подсистемы предполагает переход к рассмотрению изменения переменных ЭЭС в другом масштабе времени:

$$\tau = \frac{t - t_0}{\epsilon}, \quad (5)$$

при котором можно принять $x_s(\tau) = \text{const}$.

Соответственно, на этом интервале управляющее воздействие медленной подсистемы также считается неизменным. Изменение быстрых переменных x_2 во времени τ можно представить как отклонение от квазиустановившегося значения x_{2s} , рассчитанного при $\epsilon x_2 = 0$; $x_f = x_2 - x_{2s}$, а вектор управления быстрой подсистемы – как отклонение от $u_f = u - u_s$.

При этом модель быстрой подсистемы будет иметь вид

$$\epsilon \dot{x}_f(t) = A_{22}x_f(t) + B_2u_f(t) = A_f x_f(t) + B_f u_f(t) \quad (6)$$

или в масштабе времени τ :

$$\dot{x}_f(\tau) = A_{22}x_f(\tau) + B_2u_f(\tau). \quad (7)$$

Таким образом, переменные исходной модели x_1 и x_2 могут быть представлены с точностью $0(\epsilon)$:

$$x_1(t) = x_s(t) + 0(\epsilon); \quad (8)$$

$$x_2(t) = -A_{22}^{-1}A_{21}x_s(t) + x_f\left(\frac{t-t_0}{\epsilon}\right) + 0(\epsilon).$$

Выделение из полной модели ЭЭС подсистем, различающихся временными масштабами, и определение для них закона управления требуют также и разделения общесистемного критерия оптимальности J :

$$J = \frac{1}{2} \int_0^{\infty} (x^t Q x + u^t R u) dt; \quad (9)$$

$$Q \geq 0; R > 0,$$

где весовые коэффициенты Q и R вычисляются, исходя из допустимых пределов изменения переменных векторов x и u .

Предполагая, что матрица имеет блочно-диагональную форму $Q = \begin{bmatrix} Q_{11} & 0 \\ 0 & Q_{22} \end{bmatrix}$, критерии оптимальности подсистем будут иметь вид

$$J_s = \frac{1}{2} \int_0^{\infty} (x_s^t Q_s x_s + u_s^t R u_s) dt; \quad (10)$$

$$J_f = \frac{1}{2} \int_0^{\infty} (x_f^t Q_f x_f + u_f^t R u_f) dt, \quad (11)$$

где Q_s и Q_f – весовые коэффициенты соответствующих критериев оптимальности.

Минимизация критериев (10) и (11) позволяет получить закон оптимального управления подсистемами (4) и (6) ЭЭС типа

$$u_s(t) = -K_s x_s(t) = -R^{-1} B_s^t P_s x_s(t); \quad (12)$$

$$u_f(t) = -K_f x_f(t) = -R^{-1} B_f^t P_f x_f(t), \quad (13)$$

где коэффициенты матриц P_s и P_f вычисляются в результате решения матричных уравнений Риккати:

$$P_s A_s - A_s^t P_s - P_s B_s R^{-1} B_s^t P_s + Q_s = 0; \quad (14)$$

$$P_f A_f - A_f^t P_f - P_f B_f R^{-1} B_f^t P_f + Q_f = 0, \quad (15)$$

где P_s, A_s, B_s – устойчивые части блочной матрицы.

При этом закон оптимального управления ЭЭС определяется как

$$u(t) = u_s(t) + u_f(t) = -K_s x_s(t) - K_f x_f(t), \quad (16)$$

где K_s и K_f – регулятор системы, содержащий два параллельных канала регулирования с матрицами коэффициентов. Расчет коэффициентов регуляторов K_s и K_f выполняется отдельно по моделям подсистем (4) и (6), имеющих меньшую размерность по сравнению с исходной математической моделью ЭЭС (1).

Точность данного метода представления модели ЭЭС и определения параметров регуляторов проанализирована на примере ЭЭС, содержащей синхронный генератор, работающий через двухцепную линию электропередач на шины бесконечной мощности. В качестве исходной модели энергосистемы использована модель [5] с вектором переменных $x = [\Delta_\omega \ \Delta_\delta \ \Delta I_f \ \Delta E_f \ \Delta I_d \ \Delta I_q \ \Delta I_D \ \Delta I_Q]^T$, где Δ_δ – изменение угла между ЭДС генератора и вектором напряжения статора, Δ_ω – изменение угловой частоты вращения магнитного поля.

При параметрах синхронного генератора: $P_{ном} = 1,00$; $x_d = 1,83$; $x_D = 1,53$; $R_D = 0,013$; $\cos\varphi = 0,85$; $x_q = 1,77$; $x_Q = 1,49$; $R_Q = 0,044$; $T_J = 11,78$; $x_f = 1,61$; $T_{d0} = 5,10$ и параметрах линии $z_{л} = 0,02 + j 0,43$ матрицы состояния и управления линеаризованной модели (1) ЭЭС имеют вид

$$A = \begin{bmatrix} -0,01 & 0,01 & -0,01 & 0,00 & -0,02 & 0,00 & -0,04 & -0,01 \\ 1,00 & 0,00 & 0,00 & 0,00 & 0,00 & 0,00 & 0,00 & 0,00 \\ 42,27 & -30,28 & -0,25 & 0,28 & 44,04 & 0,62 & 60,30 & 3,84 \\ 0,00 & 0,00 & 0,00 & -0,04 & 0,00 & 0,00 & 0,00 & 0,00 \\ -86,75 & -116,57 & -129,38 & 0,00 & -6,17 & 175,29 & 1,76 & -129,38 \\ -122,23 & 87,57 & 0,02 & -0,03 & -127,35 & -1,80 & -174,36 & 0,71 \\ 88,84 & 11,37 & 132,49 & 0,00 & 4,50 & -179,50 & -1,80 & 132,40 \\ 77,20 & -55,31 & 0,22 & -0,24 & 80,43 & 1,14 & 110,12 & -4,80 \end{bmatrix}$$

Собственные значения матрицы состояния A исходной системы приведены в табл. 1.

Таблица 1

Собственные значения матрицы состояния ЭЭС без оптимальных регуляторов

A	A_s	\dot{A}_s
-0,03970	-0,02257	-0,03980
-0,04183	-0,03596 ± j0,17120	-0,05961 ± j0,21955
-0,05966 ± j0,21972	-0,03980	-0,04187
-1,80942 ± j49,93981	–	–
-4,98150	–	–
-6,15914	–	–

В качестве матриц Q и R критерия оптимальности (9) выбраны диагональные матрицы:

$$Q = \text{diag}[1000, 1000, 1000, 1000, 10, 10, 10, 10]; R = 1.$$

Для оценки эффективности рассматриваемых законов управления сначала проверен расчет оптимального регулятора по полной модели ЭЭС (1) с применением уравнения Риккати. В результате проверен закон оптимального управления

$$u(t) = -Kx(t) \quad (17)$$

с матрицей коэффициентов регулятора, приведенного ниже:

$$K = [26, 03812, 75037, 52531, 5910, 15534, 9580, 16734, 794].$$

Введение такого закона приводит к изменению матрицы состояния модели электроэнергетической системы $A^* = A = KB$ (собственное значение матрицы).

Собственные значения матрицы A^* модели ЭЭС с оптимальным регулятором представлены в табл. 2.

Таблица 2

Модели ЭЭС с оптимальным регулятором

A^*	A_s^*	\bar{A}_s^*
$-0,06250 \pm j0,21639$	$-0,03434$	$-6,83901$
$-0,06523$	$-0,03619 \pm j0,17131$	$-0,06087$
$-4,99642$	$-6,89384$	$-0,06161 \pm j0,21855$
$-1,80942 \pm j49,93981$	–	–
$-6,15912$	–	–
$-6,88265$	–	–

Графики переходных процессов при возмущении в системе (отключение одной линии) для переменных Δ_δ , Δ_ω и ΔE_f при оптимальном регуляторе, рассчитанном по полной модели ЭЭС, представлены на рис. 1–3 (кривые 1).

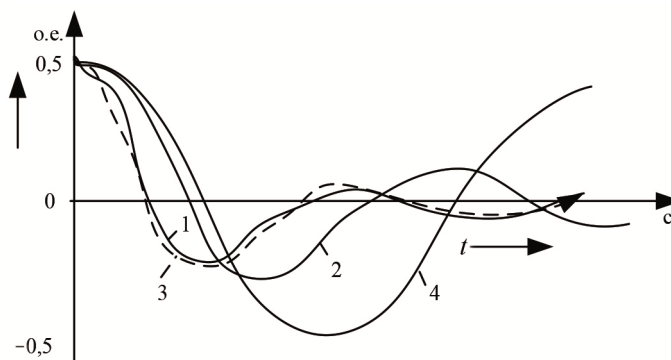


Рис. 1. Изменение приращения угла Δ_δ при возмущении в ЭЭС

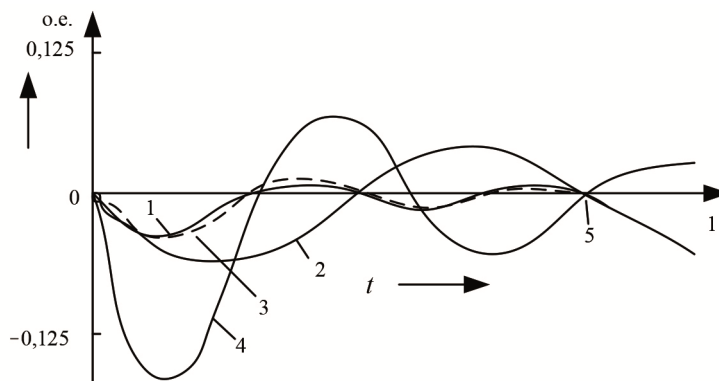


Рис. 2. Изменение приращения угла Δ_ω при возмущении в ЭЭС

Анализ собственных значений матрицы A исследуемой модели [2, 7] позволяет выделить два различающихся по скорости протекания процесса, характеризующих электромеханические и электромагнитные процессы в статорной и демпферной обмотках с векторами переменных:

$$x_1 = [\Delta_\omega \Delta_\delta \Delta I_f \Delta E_f]^t;$$

$$x_2 = [\Delta I_d \Delta I_q \Delta I_D \Delta I_Q]^T.$$

Если в управлении (16) не учитывать воздействие быстрых переменных x_1 , можно получить упрощенный одноканальный регулятор, непосредственно воздействующий на медленно протекающие процессы. Поэтому рассматривается только медленная подсистема ЭЭС и закон ее управления. Матрицы состояния и управления этой подсистемы в соответствии с выражением (4) будут выглядеть так:

$$A_s = \begin{bmatrix} -0,0720 & -0,0306 & -0,0110 & 0,0006 \\ 1,0000 & 0,0000 & 0,0000 & 0,0000 \\ 0,0005 & 0,0002 & -0,0225 & 0,0247 \\ 0,0000 & 0,0000 & 0,0000 & -0,0398 \end{bmatrix};$$

$$B_s = [0, 00000, 00000, 00000, 218]^T.$$

Матрица коэффициентов K_s субоптимального регулятора генератора (12) имеет следующие значения:

$$K_s = [-1, 17131, 884515, 720331, 4969].$$

Собственные значения матрицы состояния системы с субоптимальным регулятором $A_s^* = A_s - K_s B_s$ приведены в табл. 2.

Графики переходных процессов при возмущении в системе с использованием рассмотренного принципа управления представлены на рис. 1–3 кривыми 2.

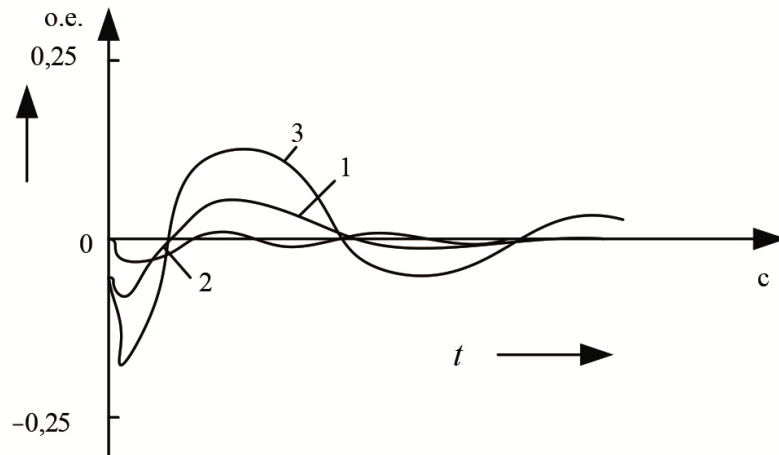


Рис. 3. Изменение приращения угла ΔE_f при возмущении в ЭЭС

Анализ собственных значений матриц состояния моделей ЭЭС без оптимальных регуляторов и при их наличии (см. табл. 1 и 2) показывает, что итерационные методы позволяют проводить разложение модели ЭЭС на независимые подсистемы с достаточно высокой точностью (см. табл. 1).

Закон оптимального управления, синтезированный на основе полученных независимых подсистем ЭЭС, дает возможность обеспечить качество управления в динамических режимах, практически не отличающееся от управления, обеспечиваемого расчетом по полной модели ЭЭС (см. табл. 2). Приведенные на рис. 1–3 графики также показывают эффективность рассмотренного метода декомпозиции модели ЭЭС и выбора закона управления.

Заключение

Таким образом, регуляторы показывают, что применение теории сингулярных возмущений дает возможность получить существенное упрощение моделей ЭЭС, описывающих их

динамические свойства. Соответственно, структура оптимального регулятора исследуемой системы и его расчет значительно упрощаются. При этом точность решения практически не отличается от точности расчета по полной модели синхронного генератора. Однако более точное решение разделения ЭЭС на подсистемы может быть получено в результате применения итерационных методов.

Список литературы

1. Жиленков А. А., Титов И. Л., Черный С. Г. Моделирование процесса повышения надежности автоматических систем управления в автономных системах объектов морского транспорта // Вестник государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. 2015. № 4. С. 198–207.
2. Zhilenkov A., Chernyi S. Investigation performance of marine equipment with specialized information technology // *Procedia Engineering*. 2015. Vol. 100. P. 1247–1252.
3. Жиленков А. А., Черный С. Г. Повышение эффективности систем автоматического управления автономными буровыми установками за счет разработки методов обеспечения их совместимости и интеграции // Автоматизация, телемеханизация и связь в нефтяной промышленности. 2015. № 4. С. 9–18.
4. Железняк А. А. Подавление низкочастотных помех судовых электроэнергетических систем // Электротехнические и информационные комплексы и системы. 2021. № 1. С. 13–18.
5. Bogomolov A. V., Zinkin V. N., Alekhin M. D. [et al.]. Information-Logical Modeling of Information Collection and Processing at the Evaluation of the Functional Reliability of the Aviation Ergate Control System Operator // *Human Factors in Complex Technical Systems and Environments : proc. of the Third International Conference Ergo-2018 (Saint-Petersburg, July 4–7, 2018)*. 2018. P. 315–323.
6. Zamyshlyayeva A. A., Sviridyuk G. A. The Linearized Benney–Luke Mathematical Model with Additive White Noise // *Semigroups of Operators – Theory and Applications* / ed. by J. Banasiak, A. Bobrowski, M. Lachowicz. Springer Proceedings in Mathemat, 2015. P. 327–337.
7. Isidori A. Robust Feedback Design for Nonlinear Systems: a Survey // *Turkish Journal of Electrical Engineering and Computer Sciences*. 2010. Vol. 18. P. 693–714.

References

1. Zhilenkov A.A., Titov I.L., Chernyy S.G. Modeling of the process of increasing the reliability of automatic control systems in autonomous systems of marine transport facilities. *Vestnik gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova = Bulletin of the Admiral S. O. Makarov State University of Marine and River Fleet*. 2015;(4):198–207. (In Russ.)
2. Zhilenkov A., Chernyi S. Investigation performance of marine equipment with specialized information technology. *Procedia Engineering*. 2015;100:1247–1252.
3. Zhilenkov A.A., Chernyy S.G. Improving the efficiency of automatic control systems for autonomous drilling rigs by developing methods to ensure their compatibility and integration. *Avtomatizatsiya, telemekhanizatsiya i svyaz' v neftyanoy promyshlennosti = Automation, telemechanization and communication in the oil industry*. 2015;(4):9–18. (In Russ.)
4. Zheleznyak A.A. Suppression of low-frequency interference of marine electric power systems. *Elektrotekhnicheskie i informatsionnye komplekсы i sistemy = Electrical and information complexes and systems*. 2021;(1):13–18. (In Russ.)
5. Bogomolov A.V., Zinkin V.N., Alekhin M.D. [et al.]. Information-Logical Modeling of Information Collection and Processing at the Evaluation of the Functional Reliability of the Aviation Ergate Control System Operator. *Human Factors in Complex Technical Systems and Environments: proc. of the Third International Conference Ergo-2018 (Saint-Petersburg, July 4–7, 2018)*. 2018:315–323.
6. Zamyshlyayeva A.A., Sviridyuk G.A. The Linearized Benney–Luke Mathematical Model with Additive White Noise. *Semigroups of Operators – Theory and Applications*. Springer Proceedings in Mathemat, 2015:327–337.
7. Isidori A. Robust Feedback Design for Nonlinear Systems: a Survey. *Turkish Journal of Electrical Engineering and Computer Sciences*. 2010;18:693–714.

Информация об авторах / Information about the authors

Александр Александрович Железняк
кандидат технических наук, доцент,
доцент кафедры электрооборудования судов
и автоматизации производства,
Керченский государственный морской
технологический университет

Aleksandr A. Zhelezniak
Candidate of technical sciences, associate professor,
associate professor of the sub-department
of electrical equipment of ships
and industrial automation,
Kerch State Marine Technological University

(Россия, г. Керчь, ул. Орджоникидзе, 82)

(82 Ordzhonikidze street, Kerch, Russia)

E-mail: zheleznyak13@mail.ru

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов /

The authors declare no conflicts of interests.

Поступила в редакцию/Received 17.06.2021

Поступила после рецензирования/Revised 24.06.2021

Принята к публикации/Accepted 29.09.2021