

# Синергетическое управление распределением энергии в GRID системе с повышающим преобразователем напряжения

С. А. Скляр<sup>1</sup>, Г. Е. Веселов<sup>2</sup>

Южный федеральный университет, г. Таганрог

<sup>1</sup>sasklyarov@sfedu.ru, <sup>2</sup>gev@sfedu.ru

**Аннотация.** В статье рассмотрен один из аппаратных способов поддержки напряжения на GRID сегменте, состоящего из повышающего преобразователя. Синтезирован регулятор стабилизации напряжения повышающего преобразователя синергетическим методом аналитического конструирования агрегированных регуляторов. Проведено сравнение эффективности полученного результата с основными методами регулирования. Натурные исследования синтезированной системы управления подтвердили теоретические результаты о стабильности и асимптотической устойчивости.

**Ключевые слова:** GRID, синергетическая теория управления, инвариантное многообразие, стабилизация, повышающий преобразователь

## I. ВВЕДЕНИЕ

В различных отраслях промышленности, энергетике, радиотехнике, на транспорте и т. д. находят широкое применение широтно-импульсные преобразователи (ШИП), которые являются управляемыми преобразователями энергии между источником питания и соответствующей нагрузкой. Эти преобразователи представляют собой нелинейные динамические объекты, обладающие в зависимости от их структуры и вида обратных связей сложным поведением, включающим в себя неустойчивость, бифуркации, хаос и т. д. [1].

При всей сложности поведения таких систем в большинстве случаев к проблеме управления такими преобразователями применяются стандартные законы управления типа ПИД-регулятора. Такие системы не могут обеспечить устойчивость работы системы во всей области изменения координат и при действии внешних и внутренних неизмеряемых возмущений [2–4].

В связи с этим к проблеме построения систем управления повышающими преобразователями применяются различные методы синтеза [5–9]. Однако как показывают результаты исследований, многие из таких подходов не способны учесть в полной мере особенности функционирования таких преобразователей. В связи с чем, в данной статье предлагается использовать принципы и методы синергетической теории управления (СТУ) [10] к проблеме управления повышающим преобразователем, работающим на активную нагрузку. Ранее к решению данной проблемы уже применялись методы СТУ [11–13], однако в этих работах не учтена работа преобразователей в реальной GRID системе.

Важной особенностью GRID системы является независимое функционирование всех её участков без

возможности осуществления прямого контроля. Подключённое к такой системе оборудование обязано осуществлять контроль и управление питающей линией самостоятельно на основе заданных заранее параметров. Стабильность энерголинии зависит не только от мощности подключенных к ней устройств, но и от их системы управления, повышающей общий КПД и скорость реакции на изменения.

## II. МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ И ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ УПРАВЛЕНИЯ

Рассмотрим повышающий преобразователь, электрическая схема которого представлена на рис. 1. С учетом допущений об идеальности элементов схемы и высокой частоты работы преобразователя можно составить усредненную математическую модель:

$$\begin{aligned} \frac{dU_1}{dt} &= \frac{1}{R_1 C_1} (V_1 - R_1 I_1 - U_1); \\ \frac{dI_1}{dt} &= \frac{1}{L_1} (U_1 - (1-d)U_c - R_2 I_1); \\ \frac{dU_c}{dt} &= \frac{1}{C_2} \left( (1-d)I_1 - \frac{U_c}{R_3} \right), \end{aligned} \quad (1)$$

где  $U_1$  – напряжение на емкости  $C_1$ ,  $I_1$  – ток, протекающий через индуктивность  $L_1$ ,  $U_c$  – напряжение на выходе преобразователя,  $d$  – коэффициент заполнения периода следования импульса,  $0 < d < 1$ ,  $R_1$ ,  $C_1$ ,  $R_2$ ,  $L_1$ ,  $C_2$  – параметры преобразователя,  $R_3$  – сопротивление нагрузки преобразователя,  $V_1$  – напряжение входного источника напряжения.

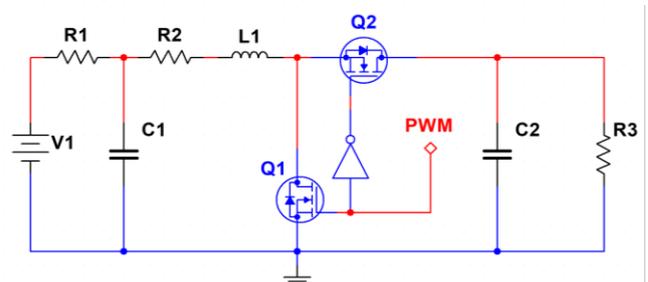


Рис. 1. Электрическая схема повышающего преобразователя

Так как нами разрабатывается преобразователь напряжения, то постановкой задачи управления в данном случае будет стабилизация выходного напряжения преобразователя  $U_c = U_c^0$  при неизвестном, изменяющемся во времени сопротивлении нагрузки  $R_3$ .

### III. ПРОЦЕДУРА СИНТЕЗА РЕГУЛЯТОРА

На первом этапе решения поставленной задачи синтеза выполним процедуру конструирования регулятора повышающим преобразователем (1) в предположении, что сопротивление нагрузки является постоянным и известным. В соответствии с основным методом СТУ – методом аналитического конструирования агрегированных регуляторов (АКАР) [10], введем в рассмотрение макропеременную:

$$\psi_1 = I_l + \beta U_c, \quad (2)$$

где  $\beta$  – параметр проектируемой системы, значение которого будет определено далее. Макропеременная (2) должна удовлетворять решению  $\psi_1 = 0$  основного функционального уравнения

$$T_1 \frac{d\psi_1}{dt} + \psi_1 = 0 \quad (3)$$

где  $T_1$  – постоянная времени. Очевидно, что для обеспечения асимптотической устойчивости решения  $\psi_1 = 0$  уравнения (3), необходимо и достаточно чтобы  $T_1 > 0$ . Из совместного решения (2) и (3), с учетом модели преобразователя (1) получим выражение для управляющего воздействия – коэффициента заполнения последовательности импульсов:

$$d = \frac{R_3((T_1 R_2 - L_1)C_2 - \beta T_1 L_1)I_l + ((T_1 - \beta L_1)C_2 R_3 + \beta T_1 L_1)U_c - T_1 C_2 R_3 U_1}{T_1 R_3 (C_2 U_c - \beta L_1 I_l)}. \quad (4)$$

Исследуем установившийся режим замкнутой системы управления (1), (4). Для этого подставим (4) в (1) и приравняем к нулю правые части уравнений, в результате получим:

$$U_1 = \frac{V_1(1 + \beta^2 R_2 R_3)}{1 + \beta^2 R_3 (R_1 + R_2)}; \quad I_l = \frac{\beta^2 R_3 V_1}{1 + \beta^2 R_3 (R_1 + R_2)}; \quad (5)$$

$$U_c = -\frac{\beta R_3 V_1}{1 + \beta^2 R_3 (R_1 + R_2)}.$$

Приравняв  $U_c = U_c^0$  из третьего выражения в (5), получим требуемое значение коэффициента  $\beta$ , при котором будет выполняться задача стабилизации выходного напряжения преобразователя:

$$\beta = -\frac{R_3 V_1 \pm \sqrt{R_3^2 V_1^2 - 4R_3 (R_1 + R_2)(U_c^0)^2}}{2R_3 (R_1 + R_2)U_c^0}. \quad (6)$$

Подставив рассчитанные значения (6) в (5), можно убедиться, что значение коэффициента  $\beta$  при знаке минус перед корнем соответствует нормальному режиму работы преобразователя. Поэтому в дальнейшем нами будет принято, что

$$\beta = -\frac{R_3 V_1 - \sqrt{R_3^2 V_1^2 - 4R_3 (R_1 + R_2)(U_c^0)^2}}{2R_3 (R_1 + R_2)U_c^0}. \quad (7)$$

Таким образом, нами синтезирован синергетический регулятор (4) для повышающего преобразователя, описываемого математической моделью (1), который при рассчитанном значении параметра  $\beta$  (7), обеспечивает стабилизацию выходного напряжения  $U_c = U_c^0$  при известном значении сопротивления нагрузки  $R_3$ . При этом легко убедиться, что в синтезированной системе управления будет гарантироваться выполнение условий асимптотической устойчивости. Если в уравнениях замкнутой системы (1), (4) учесть, что при попадании ее изображающей точки в окрестность многообразия  $\psi_1 = 0$  в ней будет выполняться, в силу (2), условие  $I_l = -\beta U_c$ , то поведение системы будет описываться следующей линейной системой дифференциальных уравнений:

$$\begin{aligned} \frac{dU_1}{dt} &= \frac{1}{R_1 C_1} (V_1 - R_1 I_l - U_1); \\ \frac{dI_l}{dt} &= \frac{((\beta^2 T_1 R_2 - 2C_2)R_3 + T_1)I_l - \beta^2 T_1 R_3 U_1}{T_1 R_3 (C_2 - \beta^2 L_1)}; \quad (8) \\ \frac{dU_c}{dt} &= -\frac{((T_1 R_2 - 2C_2)\beta^2 R_3 + T_1)U_c - \beta T_1 R_3 U_1}{T_1 R_3 (C_2 - \beta^2 L_1)}, \end{aligned}$$

Соответствующим выбором параметров регулятора можно обеспечить устойчивость системы (8). В рамках статьи данные выкладки не приведены, ввиду их громоздкости и малой информативности.

### IV. СИНТЕЗ НАБЛЮДАТЕЛЯ

Как ранее было отмечено, сопротивление нагрузки  $R_3$  может изменяться во времени. Поэтому целесообразно синтезировать параметрический наблюдатель, с помощью которого будет оцениваться изменение нагрузки. В соответствии с методом синтеза наблюдателей СТУ [10] представим модель системы в следующем виде:

$$\begin{aligned} \frac{dU_1}{dt} &= \frac{1}{R_1 C_1} (V_1 - R_1 I_l - U_1); \\ \frac{dI_l}{dt} &= \frac{1}{L_1} (U_1 - (1-d)U_c - R_2 I_l); \quad (9) \\ \frac{dU_c}{dt} &= \frac{1}{C_2} ((1-d)I_l - U_c g_l); \\ \frac{dg_l}{dt} &= 0, \end{aligned}$$

где  $g_l$  – проводимость нагрузки. В соответствии с процедурой [10] систему дифференциальных уравнений (9) представим в векторном виде:

$$\begin{aligned} \frac{dy}{dt} &= \mathbf{g}(\mathbf{y}, v, d); \\ \frac{dv}{dt} &= \mathbf{h}(\mathbf{y}, v, d), \end{aligned} \quad (10)$$

где  $\mathbf{y} = [U_1 \ I_1 \ U_c]^T$  – вектор наблюдаемых переменных состояния объекта;  $v = g_1$  – ненаблюдаемая переменная состояния объекта;  $\mathbf{g} = [g_1 \ g_2 \ g_3]^T$ ;

$$g_1 = \frac{V_1 - R_1 I_1 - U_1}{R_1 C_1}; \quad g_2 = \frac{U_1 - (1-d)U_c - R_2 I_1}{L_1};$$

$$g_3 = \frac{(1-d)I_1 - U_c g_1}{C_2}; \quad h=0.$$

Представление модели (9) в форме (10) трансформирует задачу определения параметра в задачу наблюдения неизмеряемой переменной  $g_1$ .

Тогда задача синтеза наблюдателя будет заключаться в построении асимптотической оценки переменной  $v = g_1$  по наблюдаемым значениям вектора  $\mathbf{y}$  и известному закону управления  $d$  (4). Введем в рассмотрение макропеременную

$$\psi_2 = \varphi(\mathbf{y}, v) - \hat{\varphi}, \quad (11)$$

где функции  $\varphi(\mathbf{y}, v)$  и  $\hat{\varphi}$  удовлетворяют условиям [10]:

- они непрерывны и дифференцируемы по своим аргументам;
- решение уравнения  $\varphi(\mathbf{y}, v) - \hat{\varphi} = 0$  относительно  $v$  существует и является единственным для всех  $\mathbf{y} \in \square^n$ .

В соответствии с процедурой синтеза наблюдателя [10] макропеременная (11) должна удовлетворять функциональному дифференциальному уравнению

$$\frac{d\psi_2}{dt} = \lambda(\mathbf{y})\psi_2, \quad (12)$$

где множитель  $\lambda(\mathbf{y})$  таков, что решение  $\psi_2 = 0$  уравнения (12) асимптотически устойчиво в целом. Применение процедуры синтеза наблюдателя позволяет получить следующую структуру:

$$\frac{dz}{dt} = \lambda(\mathbf{y})z - \frac{C_2}{2} \lambda^2(\mathbf{y}) + \frac{\lambda(\mathbf{y})}{U_c} (1-d)I_1;$$

$$\hat{g}_1 = \frac{C_2}{2} \lambda(\mathbf{y}) - z,$$

где  $\lambda(\mathbf{y}) = -\lambda_0 U_c^2$ ,  $\lambda_0 > 0$ ,  $\hat{g}_1$  – оценка проводимости нагрузки повышающего преобразователя.

Параметрический наблюдатель (13) позволяет оценить значение проводимости  $\hat{g}_1$  и, следовательно, определить реальную величину сопротивления нагрузки  $R_3$ . Процесс оценивания  $\hat{g}_1$  протекает в реальном масштабе времени, а наблюдатель (13) вводит найденное значение  $R_3 = \frac{1}{\hat{g}_1}$  в синтезированный регулятор (4) и рассчитываемое значение параметра  $\beta$  (7).

## V. РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ

Для подтверждения полученных теоретических результатов было проведено моделирование синтезированной системы управления повышающим преобразователем (4) с параметрическим наблюдателем (13). При моделировании использовались параметры преобразователя, представленные в таблице I.

ТАБЛИЦА I. ПАРАМЕТРЫ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ

Параметр	Значение	Ед. изм.	Параметр	Значение	Ед. изм.
$R_1$	0,01	Ом	$R_2$	0,01	Ом
$C_1$	0,004	Ф	$C_2$	0,004	Ф
$L_1$	$33 \cdot 10^{-6}$	Гн	$V_1$	5	В

Параметры синтезированного регулятора и наблюдателя при моделировании были выбраны следующие:  $T_1 = 0,035$ ,  $\lambda_0 = 1$ .

Результаты моделирования представлены на рис. 2, 3. Моделирование проводилось в условиях воздействия кусочно-постоянного неизмеряемого изменения сопротивления нагрузки. Задачей управления являлось стабилизация на выходе преобразователя напряжения  $U_c^0 = 12$  В. При моделировании учитывались ограничения, накладываемые на формируемое управляющее воздействие:

$$d = \begin{cases} 0,8, & \text{при } d \geq 0,8 \\ d, & \text{при } 0 < d < 0,8 \\ 0, & \text{при } d \leq 0 \end{cases}$$

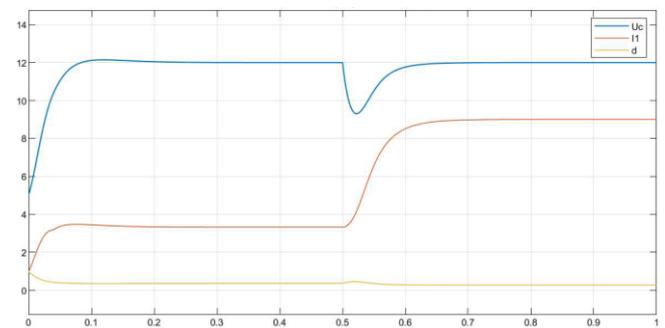


Рис. 2. Переходные процессы координат системы и управления

Из результатов моделирования, представленных на рис. 2, можно сделать вывод, что замкнутая система обеспечивает поддержание напряжения на выходе преобразователя, при этом изменение сопротивления нагрузки оказывает влияние на выходное напряжение, что приводит к незначительным отклонениям от заданного состояния, однако после окончания процесса напряжения стабилизируется в заданном состоянии.

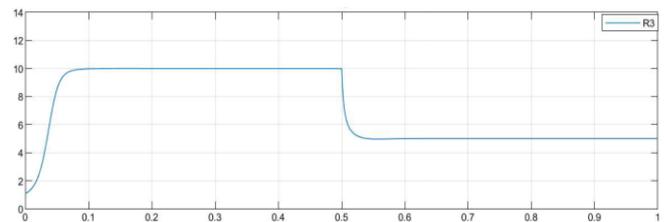


Рис. 3. Оценка изменения сопротивления нагрузки

Из результатов моделирования, представленных на рис. 3 следует, что параметрический наблюдатель с большой точностью отслеживает изменение сопротивления нагрузки, что позволяет гарантированно выполнять поставленную задачу управления в рассматриваемой системе.

Таким образом, результаты компьютерного моделирования подтвердили теоретические выводы о качестве синтезированной системы управления, что позволяет провести натурный эксперимент на реальном объекте. Фотография стенда для проведения натурных испытаний представлена на рис. 4, а его структура на рис. 5.

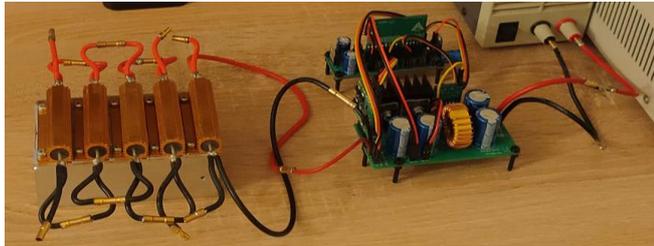


Рис. 4. Фотография стенда

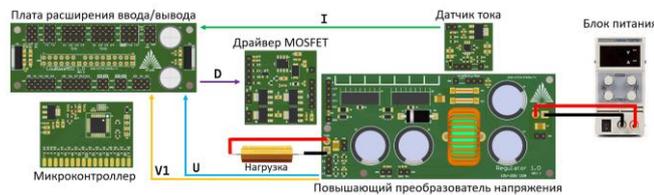


Рис. 5. Структура стенда

На рис. 6 представлены результаты натурных испытаний синтезированной системы управления повышающим преобразователем с параметрическим наблюдателем.

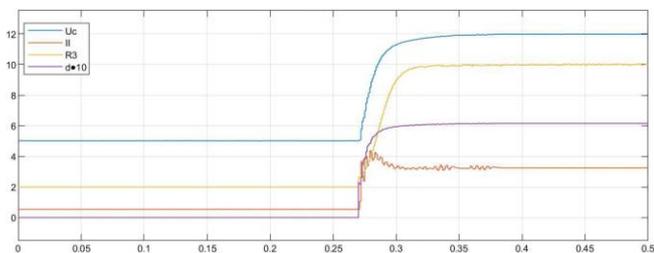


Рис. 6. Переходные процессы координат систем и выхода наблюдателя

Представленные на рис. 6 результаты эксперимента полностью совпадают с результатами проведенного ранее компьютерного моделирования и свидетельствуют о достижении цели синтеза.

## VI. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, в данной статье представлена процедура синтеза регулятора повышающим преобразователем и параметрического наблюдателя сопротивления нагрузки, которые являются основой для построения высокоэффективной системы управления повышающим преобразователем. Такого типа системы могут стать основой для построения GRID систем, так как гарантируют не только выполнение технологических задач управления в условиях неопределенности, но и обеспечивают асимптотическую устойчивость синтезированной замкнутой системы управления.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Kassakian J.G., Schlecht M.F., Verghese G.C. Principles of Power Electronics. Addison-Wesley. Massachusetts. 1991.
- [2] Hwu K., Yau Y. Performance Enhancement Of Boost Converter Based On PID Controller Plus Linear-To-Nonlinear Translator// IEEE Trans. Power Electron. 2009, 25, 1351–1361.
- [3] Евстегнеев А.В. Исследование устойчивости схемы управления повышающим преобразователем с ПИ-регулятором // Труды Кольского научного центра РАН. 2019, №5, С. 82–87.
- [4] Cunha F.B., Pagano D.J., Limitations In The Control Of A DC-DC Boost Converter // 15th Triennial World Congress, Barcelona, Spain, 2002, P. 211-216.
- [5] Xu Q., Jiang W., Blaabjerg F., Zhang C., Zhang X., Fernando T. Backstepping control for large signal stability of high boost ratio interleaved converter interfaced DC microgrids with constant power loads// IEEE Trans. Power Electron. 2019, 35, 5397–5407.
- [6] Muktiadji R.F., Ramli M., Bouchekara H., Milyani A., Rawa M., Seedahmed M., Budiman F.N. Control of Boost Converter Using Observer-Based Backstepping Sliding Mode Control for DC Microgrid// Frontiers in Energy Research. 2022, Vol. 10. doi: 10.3389/fenrg.2022.828978.
- [7] Li C., Wang G., Li H., Li F., Xia Z., Liu Z. Fault-tolerant analysis of two boost inverters for open-end winding induction motordrives // J. Power Electron. 2021, 21, 647–659.
- [8] Zhang X., Martinez-Lopez M., He W., Shang Y., Jiang C., Moreno-Valenzuela J. Sensorless Control for DC–DC Boost Converter via Generalized Parameter Estimation-Based Observer // Appl. Sci. 2021, 11, 7761. <https://doi.org/10.3390/app11167761>
- [9] De Keyser R., Bonilla J., Ionescu C. A Comparative Study of Several Control Techniques Applied to a Boost Converter // IEEE 10th Int Conf on Optimisation of Electrical and Electronic Equipment OPTIM, Brasov Romania, 2006. P. 71-78.
- [10] Колесников А.А. Синергетическая теория управления. М.: Энергоатомиздат, 1994.
- [11] A. Kolesnikov (+), G. Veselov (+), A. Kolesnikov (+), A. Monti (++), F. Ponci (++), E. Santi (++), and R. Dougal Synergetic Synthesis Of Dc-Dc Boost Converter Controllers: Theory And Experimental Analysis// Applied Power Electronics Conference and Exposition, 2002. APEC 2002. Seventeenth Annual IEEE Volume: 1. DOI:10.1109/APEC.2002.989278
- [12] Enrico Santi, Senior Member, IEEE, Antonello Monti, Senior Member, IEEE, Donghong Li, Student Member, IEEE, Karthik Proddatur, Student Member, IEEE, and Roger A. Dougal Synergetic Control for DC–DC Boost Converter: Implementation Options IEEE Transactions on Industry Applications, Volume 39, Issue 6, 2003, pages 1803-1813.
- [13] Колесников А.А., Медведев М.Ю., Файнштейн С.С. Аналитическое конструирование агрегированных регуляторов: управление повышающим конвертором // Всероссийская научная конференция «Управление и информационные технологии». Санкт-Петербург, 3–4 апреля 2003. Сборник докладов в двух томах. Том 1, с. 67–71.