

Сочелев А. Ф.

A. F. Sochelev

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ РЕГУЛЯТОРА ПЕРЕМЕННОГО НАПРЯЖЕНИЯ С ВОЛЬТОДОБАВОЧНЫМ КАНАЛОМ

MATHEMATICAL MODEL OF THE VARIABLE VOLTAGE REGULATOR WITH THE FILLING CHANNEL

Сочелев Анатолий Фёдорович – кандидат технических наук, доцент кафедры электромеханики Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре); 681013, Хабаровский край, г. Комсомольск-на-Амуре, пр. Ленина, 27; тел.: +7 (914) 210-56-77. E-mail: a.sochelev@mail.ru.

Mr. Anatoly F. Sochelev – Cand. tech. Sci., the senior lecturer of faculty electrical engineering Komsomolsk-on-Amur State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur); 681013, Khabarovsk territory, Komsomolsk-on-Amur, 27 Lenin str.; tel.: +7 (914) 210-56-77. E-mail: a.sochelev@mail.ru.

Аннотация. Рассматриваются различные динамические режимы работы регулятора переменного напряжения с вольтодобавочным каналом на основе математической модели. Особое внимание уделяется пусковым режимам, а также режимам регулирования без намагничивания вольтодобавочного трансформатора. Предложена процедура формирования углов регулирования ключевых элементов, позволяющая обеспечить регулирование напряжения нагрузки без намагничивания трансформатора.

Summary. Discusses the various dynamic modes of AC voltage regulator with voltodobavochnym channel based on mathematical models. Special attention is paid to trigger modes as well as regulatory regimes without magnetization voltodobavochnogo transformer. Proposed procedure of forming the corners of key elements of the management to ensure the load voltage regulation without transformer magnetizing.

Ключевые слова: вольтодобавочный канал, математическая модель, процедура формирования угла регулирования без намагничивания, гладкий пусковой режим, способ управления регулятором.

Key words: voltodobavochnyj channel, mathematical model, procedure of formation angle regulation without magnetization, sleek launch mode, way to control regulator.

УДК 621.316.722

Известны регуляторы переменного напряжения с вольтодобавочным каналом [1; 2], а также способы их управления [1; 3].

Построение узкодиапазонных регуляторов переменного напряжения связано с использованием вольтодобавочных трансформаторов (ВТ). В процессе управления такими регуляторами с помощью ключевых элементов (тиристоров или транзисторов) возникают изменения углов регулирования, которые в свою очередь изменяют временные интервалы режимов работы «вольтодобавка» (ВД), «вольтоотбавка» (ВО) и «закоротка» (РЗ). Это приводит к несимметрии магнитного потока или к намагничиванию (одностороннему насыщению) стали ВТ, что является недопустимым, приводящим к аварийным ситуациям.

Работа посвящена решению этих проблем с помощью моделирования динамических режимов на основе дифференциальных уравнений, составленных по уравнениям Кирхгофа, намагничивающих сил и характеристики намагничивания.

Варианты рассматриваемых электрических схем приведены на рис. 1.

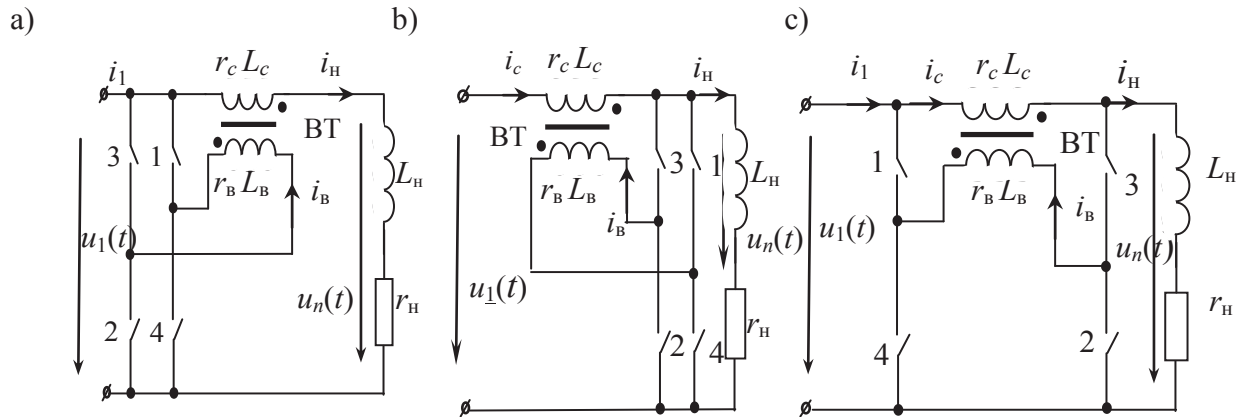


Рис. 1. Варианты электрических схем: а – ключевой коммутатор подключён к сети; б – ключевой коммутатор подключён к нагрузке; с – ключевой коммутатор одной диагональю подключён к сети, а другой – к нагрузке

Система уравнений универсальна для всех исследуемых вариантов и представлена уравнениями, записанными в относительных величинах, как это принято в [4]:

$$\begin{aligned} \bar{u}_1(\bar{t}) &= \bar{L}_c \frac{d\bar{i}_c}{d\bar{t}} + \bar{r}_c \bar{i}_c + \bar{k}_{\text{BT}} \frac{d\bar{\Phi}}{d\bar{t}} + \bar{L}_n \frac{d\bar{i}_n}{d\bar{t}} + \bar{r}_n \bar{i}_n, \\ F\bar{u}_1(\bar{t}) &= F1 \left(\bar{L}_c \frac{d\bar{i}_c}{d\bar{t}} + \bar{r}_c \bar{i}_c + \bar{k}_{\text{BT}} \frac{d\bar{\Phi}}{d\bar{t}} \right) - \bar{L}_B \frac{d\bar{i}_B}{d\bar{t}} - \bar{r}_B \bar{i}_B - \frac{d\bar{\Phi}}{d\bar{t}}, \\ \bar{i}_c &= F2\bar{i}_B + \bar{i}_H, \\ \bar{i}_0 &= \bar{i}_B + \bar{k}_{\text{BT}} \bar{i}_c, \\ \bar{\Phi} &= \bar{\Phi}(\bar{i}_0). \end{aligned} \quad (1)$$

Решим систему уравнений (1) относительно первых производных. Для этого слагаемые с производными разместим в левых частях уравнений, а остальные – в правых. Третье и четвертое уравнения системы (1) запишем для производных. Характеристику намагничивания представим в виде $\bar{i}_0 = \alpha sh(\beta \bar{\Phi})$, тогда система уравнений (1) примет вид

$$\begin{aligned} 0 + \bar{L}_c \frac{d\bar{i}_c}{d\bar{t}} + \bar{L}_n \frac{d\bar{i}_n}{d\bar{t}} + \bar{k}_{\text{BT}} \frac{d\bar{\Phi}}{d\bar{t}} &= \bar{u}_1(\bar{t}) - (\bar{r}_n \bar{i}_n + \bar{r}_c \bar{i}_c), \\ -\bar{L}_B \frac{d\bar{i}_B}{d\bar{t}} + F1\bar{L}_c \frac{d\bar{i}_c}{d\bar{t}} + 0 + (\bar{k}_{\text{BT}} F1 - 1) \frac{d\bar{\Phi}}{d\bar{t}} &= F\bar{u}_1(\bar{t}) + \bar{r}_B \bar{i}_B - F1\bar{r}_c \bar{i}_c, \\ F2 \frac{d\bar{i}_B}{d\bar{t}} - \frac{d\bar{i}_c}{d\bar{t}} + \frac{d\bar{i}_n}{d\bar{t}} + 0 &= 0, \\ \frac{d\bar{i}_B}{d\bar{t}} + \bar{k}_{\text{BT}} \frac{d\bar{i}_c}{d\bar{t}} + 0 - \alpha\beta ch(\beta \bar{\Phi}) \frac{d\bar{\Phi}}{d\bar{t}} &= 0. \end{aligned} \quad (2)$$

Систему уравнений (2) решим методом Крамера. Главный определитель примет вид

$$\Delta = \begin{vmatrix} 0 & \bar{L}_c & \bar{L}_n & \bar{k}_{\text{BT}} \\ -\bar{L}_B F1 \bar{L}_c & 0 & ((-1 + \bar{k}_{\text{BT}}) F1) & \\ F2 & -1 & 1 & 0 \\ 1 & \bar{k}_{\text{BT}} & 0 & -\alpha \beta ch(\beta \bar{\Phi}) \end{vmatrix},$$

тогда алгебраические дополнения можно записать в виде

$$\Delta \bar{i}_B = \begin{vmatrix} \bar{u}_1(\bar{t}) - (\bar{r}_n \bar{i}_n + \bar{r}_c \bar{i}_c) & \bar{L}_c & \bar{L}_n & \bar{k}_{\text{BT}} \\ F \bar{u}_1(\bar{t}) + \bar{r}_B \bar{i}_B - F1 \bar{r}_c \bar{i}_c & F1 \bar{L}_c & 0 & ((-1 + \bar{k}_{\text{BT}}) F1) \\ 0 & -1 & 1 & 0 \\ 0 & \bar{k}_{\text{BT}} & 0 & -\alpha \beta ch(\beta \bar{\Phi}) \end{vmatrix};$$

$$\Delta \bar{i}_c = \begin{vmatrix} 0 & \bar{u}_1(\bar{t}) - (\bar{r}_n \bar{i}_n + \bar{r}_c \bar{i}_c) & \bar{L}_n & \bar{k}_{\text{BT}} \\ -\bar{L}_B F \bar{u}_1(\bar{t}) + \bar{r}_B \bar{i}_B - F1 \bar{r}_c \bar{i}_c & 0 & (-1 + \bar{k}_{\text{BT}}) F1 & \\ F2 & 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & -\alpha \beta ch(\beta \bar{\Phi}) \end{vmatrix};$$

$$\Delta \bar{i}_n = \begin{vmatrix} 0 & \bar{L}_c & \bar{u}_1(\bar{t}) - (\bar{r}_n \bar{i}_n + \bar{r}_c \bar{i}_c) & \bar{k}_{\text{BT}} \\ -\bar{L}_B F1 \bar{L}_c & F \bar{u}_1(\bar{t}) + \bar{r}_B \bar{i}_B - F1 \bar{r}_c \bar{i}_c & ((-1 + \bar{k}_{\text{BT}}) F1) & \\ F2 & -1 & 0 & 0 \\ 1 & \bar{k}_{\text{BT}} & 0 & -\alpha \beta ch(\beta \bar{\Phi}) \end{vmatrix};$$

$$\Delta \bar{\Phi} = \begin{vmatrix} 0 & \bar{L}_c & \bar{L}_n & \bar{u}_1(\bar{t}) - (\bar{r}_n \bar{i}_n + \bar{r}_c \bar{i}_c) \\ -\bar{L}_B F1 \bar{L}_c & 0 & F \bar{u}_1(\bar{t}) + \bar{r}_B \bar{i}_B - F1 \bar{r}_c \bar{i}_c & \\ F2 & -1 & 1 & 0 \\ 1 & \bar{k}_{\text{BT}} & 0 & 0 \end{vmatrix}.$$

Решения для производных получим в форме Коши:

$$\frac{d\bar{i}_B}{dt} = \frac{\Delta \bar{i}_B}{\Delta}; \quad \frac{d\bar{i}_c}{dt} = \frac{\Delta \bar{i}_c}{\Delta}; \quad \frac{d\bar{i}_n}{dt} = \frac{\Delta \bar{i}_n}{\Delta}; \quad \frac{d\bar{\Phi}}{dt} = \frac{\Delta \bar{\Phi}}{\Delta}.$$

Выходное напряжение примет вид

$$\bar{u}_n(\bar{t}) = \bar{L}_n \frac{d\bar{i}_n}{dt} + \bar{r}_n \bar{i}_n.$$

Если $F = 1, F1 = 0, F2 = 0$, реализуется режим ВД, замкнуты ключи 1 и 2 (см. рис. 1, *a* и *c*).

Если $F = 1, F1 = 1, F2 = -1$, реализуется режим ВД, замкнуты ключи 1 и 2 (см. рис. 1, *b*).

Если $F = -1, F1 = -1, F2 = 1$, создаётся режим ВО, замкнуты ключи 3 и 4 (см. рис. 1, *b* и *c*).

Если $F = -1, F1 = 0, F2 = 0$, создаётся режим ВО, замкнуты ключи 3 и 4 (см. рис. 1, *a*).

Если $F = 0, F1 = 0, F2 = 0$ – РЗ, замкнуты ключи 2 и 4. (см. рис. 1, *a, b* и *c*).

Если $F = 0, F1 = -1, F2 = 1 - P3$, замкнуты ключи 1 и 3 (см. рис. 1, *c*).

Если $F = 0, F1 = 0, F2 = 0 - P3$, замкнуты ключи 1 и 3 (см. рис. 1, *a* и *b*).

Исследования проведём в программе Mathcad. Сначала рассмотрим подключение регулятора к сети. Представляет интерес процесс включения к сети в момент перехода напряжения $\bar{u}_1(\bar{t})$ через нуль, когда регулятор находится в режимах ВД (см. рис. 2) и ВО (см. рис. 3) ($\alpha = 0,03$ и $\beta = 4,5$).

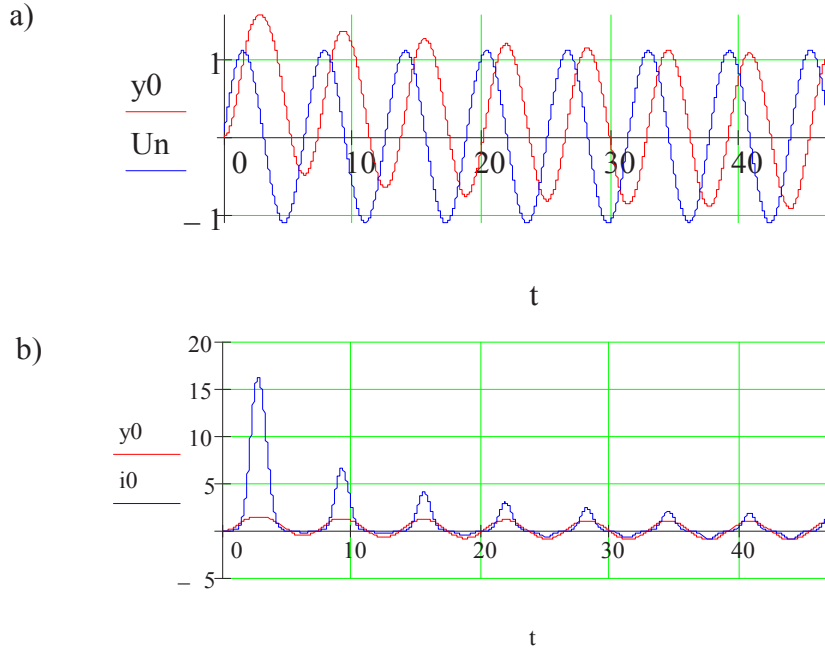


Рис. 2. Подключение регулятора к сети в режиме ВД с углом 0° : а – зависимости напряжения нагрузки (Un – кривая с неизменной амплитудой) и магнитного потока (y_0); б – зависимости магнитного потока (y_0) и тока намагничивания (i_0)

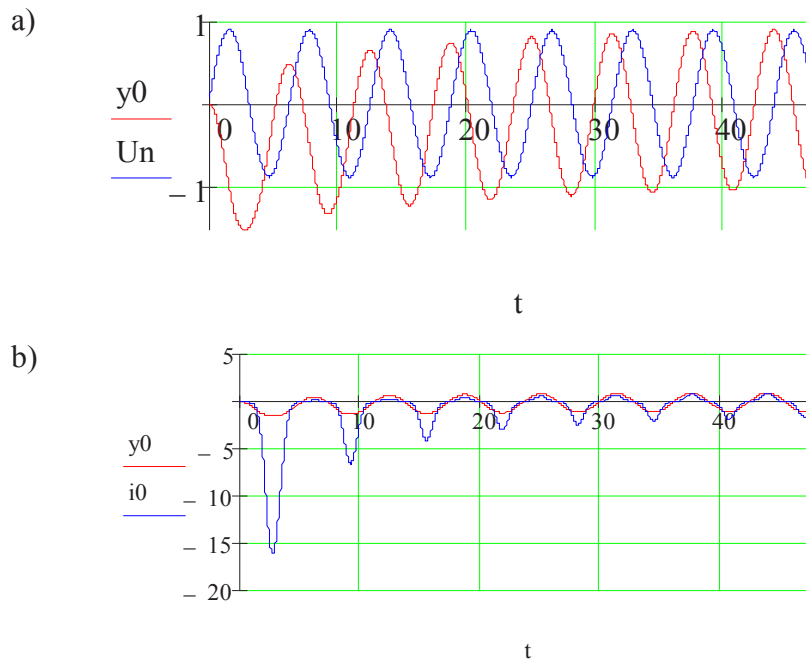


Рис. 3. Подключение регулятора к сети в режиме ВО: а – зависимости напряжения нагрузки (Un) магнитного потока (y_0); б – зависимости магнитного потока (y_0) и тока намагничивания (i_0)

Как видно из рисунков, это самый тяжёлый пусковой режим. В первый период наблюдается увеличение тока намагничивания \bar{i}_0 до 15 относительных единиц, и только с пятого периода этот ток начинает входить в установившийся режим. Для сравнения: на рис. 4 приведены те же процессы, как на рис. 2, но при включении с углом 90° . Здесь уже сразу наблюдается установившийся режим. Это самый лёгкий пусковой режим.

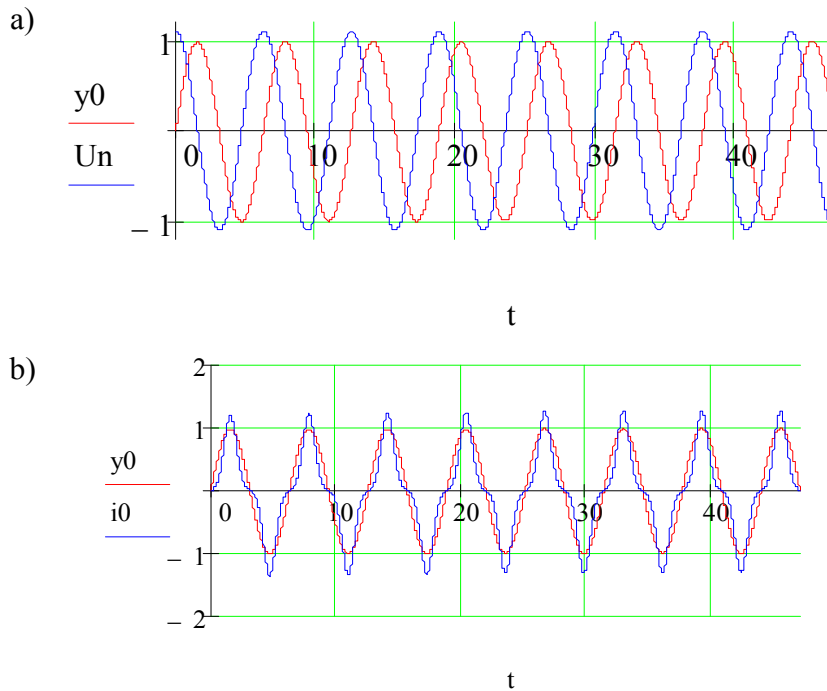


Рис. 4. Подключение регулятора к сети в режиме ВД с углом 90° : а – зависимости напряжения нагрузки (Un) магнитного потока (y_0); б – зависимости магнитного потока (y_0) и тока намагничивания (i_0)

Кривая намагничивания ВТ значительно влияет на процессы регулятора, в частности и на режим включения. Так, если $\alpha = 0,003$ и $\beta = 4,5$, то режим включения в момент перехода напряжения через ноль для потока \bar{y}_0 и намагничивающего тока \bar{i}_0 примет такой вид, который представлен на рис. 5.

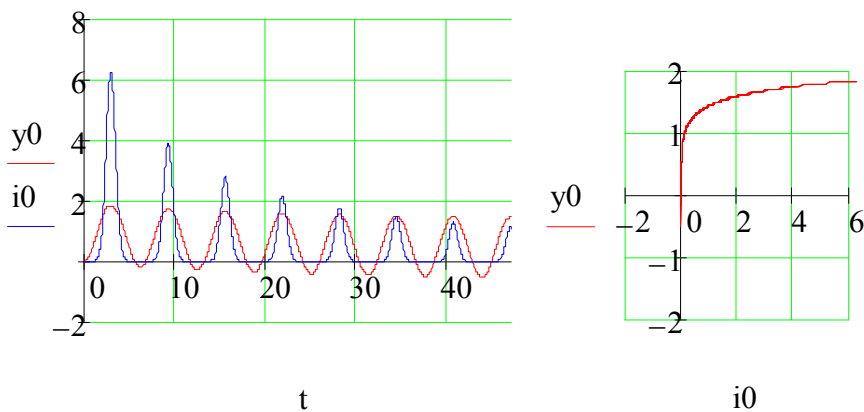


Рис. 5. Подключение регулятора к сети в режиме ВД с углом 0° ($\alpha = 0,003$ и $\beta = 4,5$)

Если $\alpha = 0,03$ и $\beta = 2,5$, то те же величины примут вид, какой показан на рис. 6. В первом случае (см. рис. 5) намагничивающий ток увеличивается до 6 относительных единиц, а во втором (см. рис. 6) – только до 2 единиц, но затухание в первом случае произойдёт быстрее, чем во втором.

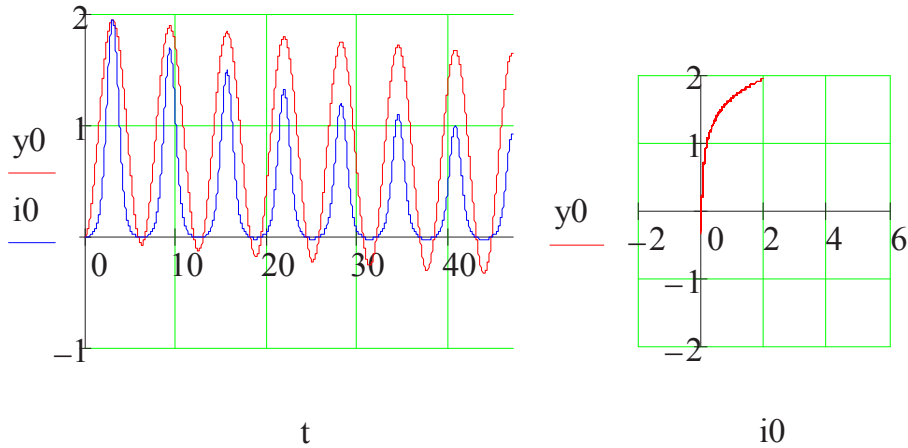


Рис. 6. Подключение регулятора к сети в режиме ВД с углом 0° ($\alpha = 0,03$ и $\beta = 2,5$)

Подключение коммутатора со стороны нагрузки (см. рис. 1, b) имеет свои особенности в работе, в частности, в режиме стабилизации напряжения нагрузки. Величины добавляемого и отбавляемого напряжения становятся одинаковыми. Вариант подключения коммутатора одной диагональю к сети, а другой – к нагрузке (см. рис. 1, c) имеет свои особенности, главным образом в режиме РЗ, когда замкнуты ключи 1 и 3.

Исследование рабочих режимов вольтодобавочного канала, управляемого способом, описанным в авторском свидетельстве [3], показывает, что включение регулятора с режима РЗ позволяет в первый период выйти на установившийся режим с углом регулирования (см. рис. 7, a и 9, a), где показаны напряжение нагрузки (Un) и магнитный поток ($y3$ -кривая без скачков). Рис. 7, b и 9, b иллюстрируют следующий период этого угла регулирования.

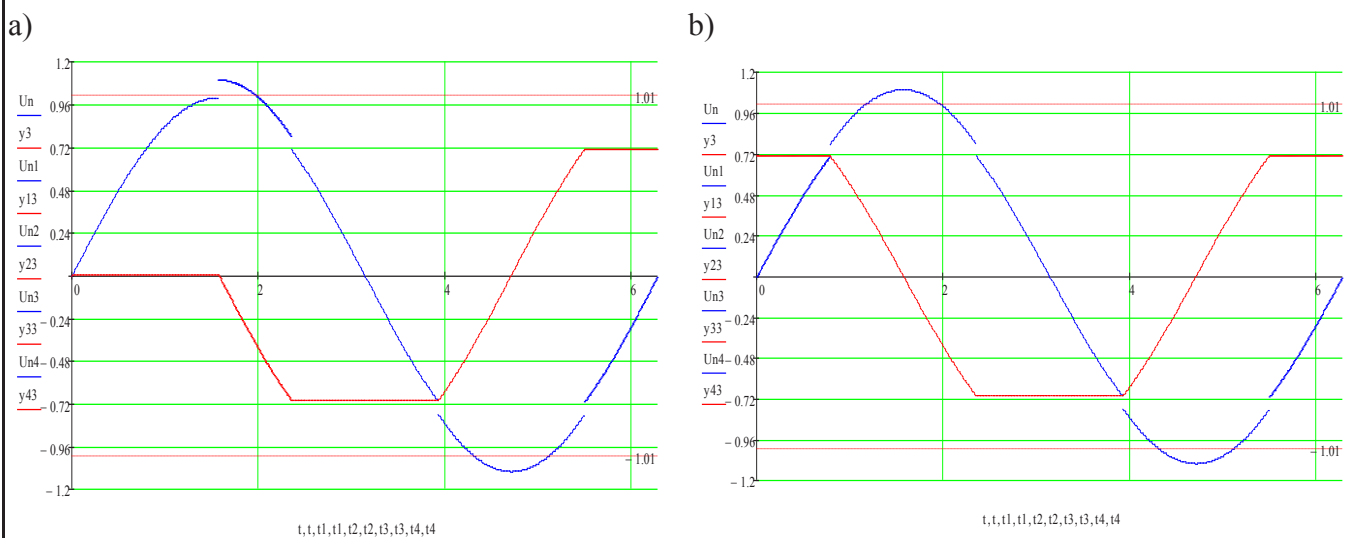


Рис. 7. Рабочие режимы регулятора включения с РЗ в зоне РЗ – ВД:
a – режим начинается с угла 90° ; b – второй период заданного угла коммутации

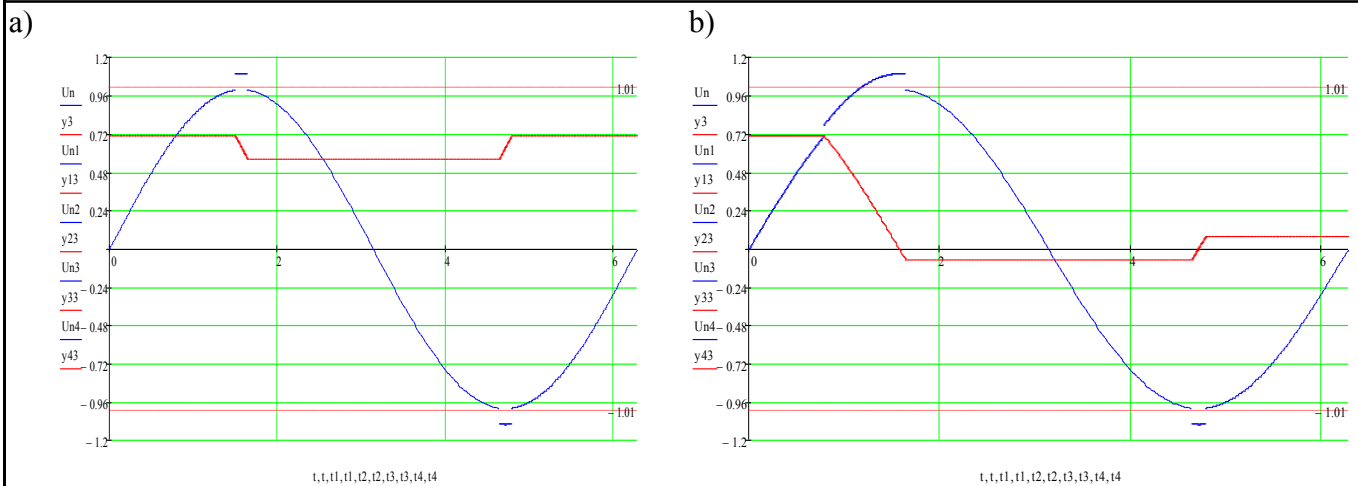


Рис. 8. Рабочие режимы регулятора включения с РЗ в зоне РЗ – ВД: а – изменение угла коммутации; б – изменение угла коммутации с четвертьпериодным запаздыванием

Изменение углов коммутации приводит к одностороннему намагничиванию (см. рис. 8, а и 10, а). Если же при изменении угла регулирования осуществлять четвертьпериодное запаздывание (см. рис. 8, б и 10, б), намагничивания не происходит. Это же явление можно проследить на регуляторе, управляемом способом, описанным в авторском свидетельстве [1] (см. рис. 7, 8, 11 и 12). Таким образом, если при регулировании осуществлять четвертьпериодное запаздывание изменения угла регулирования, то работа регулятора будет осуществляться без намагничивания.

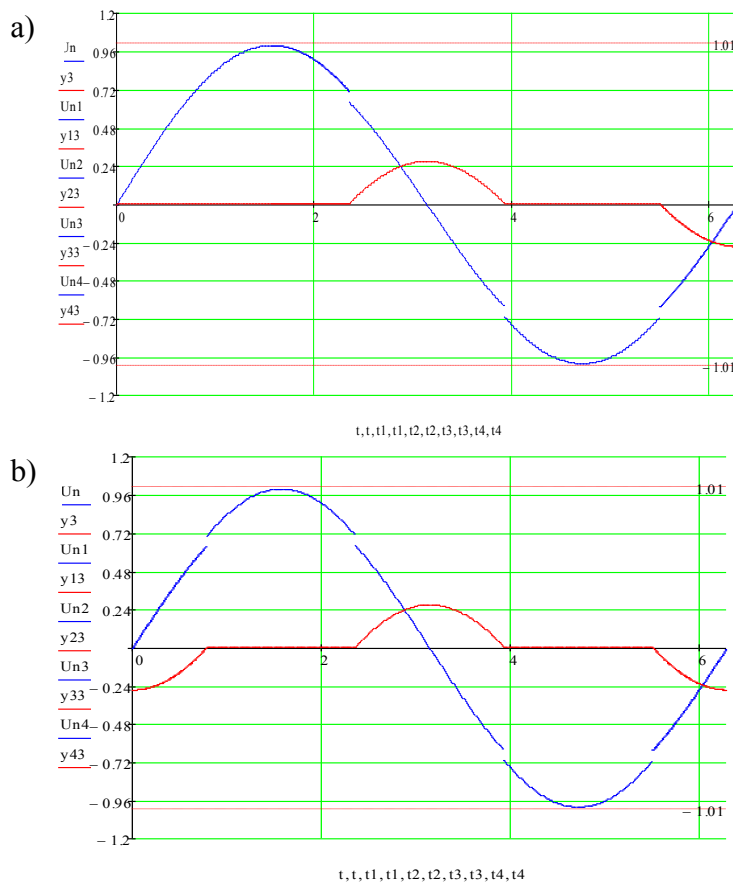


Рис. 9. Рабочие режимы регулятора включения с РЗ в зоне ВО – РЗ: а – режим начинается с угла 90°; б – второй период заданного угла коммутации

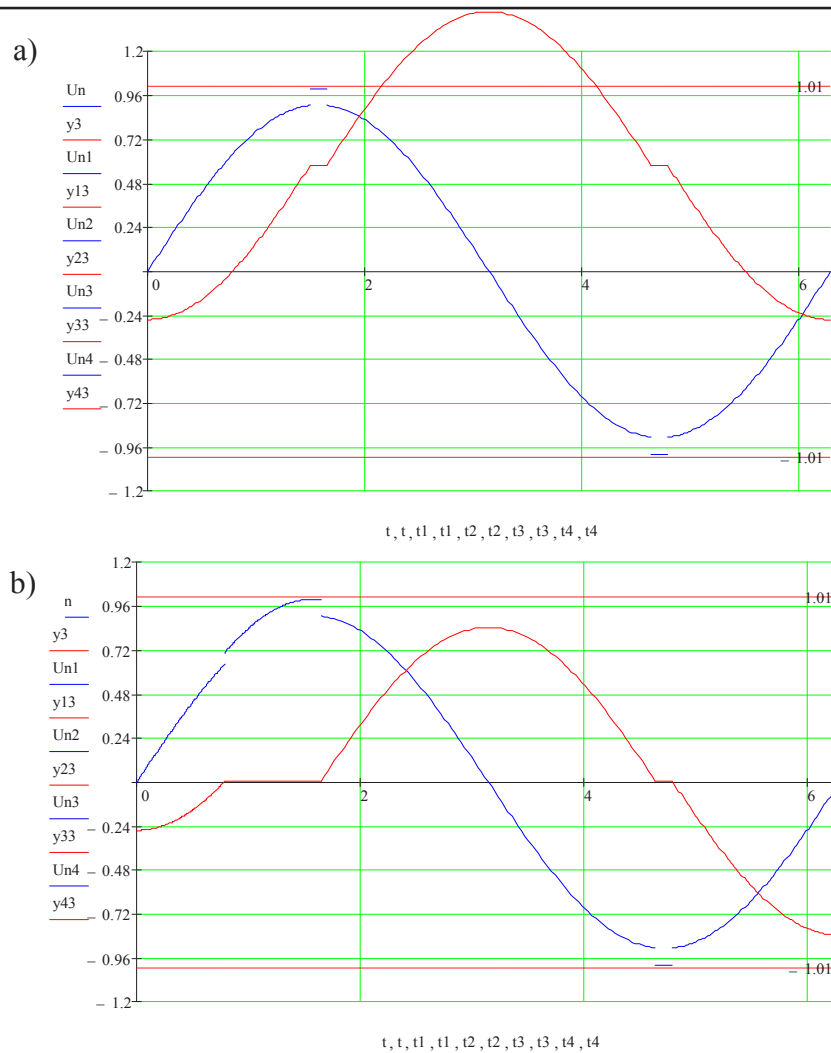


Рис. 10. Рабочие режимы регулятора включения с РЗ в зоне ВО – РЗ: а – изменение угла коммутации; б – изменение угла коммутации с четвертьпериодным запаздыванием

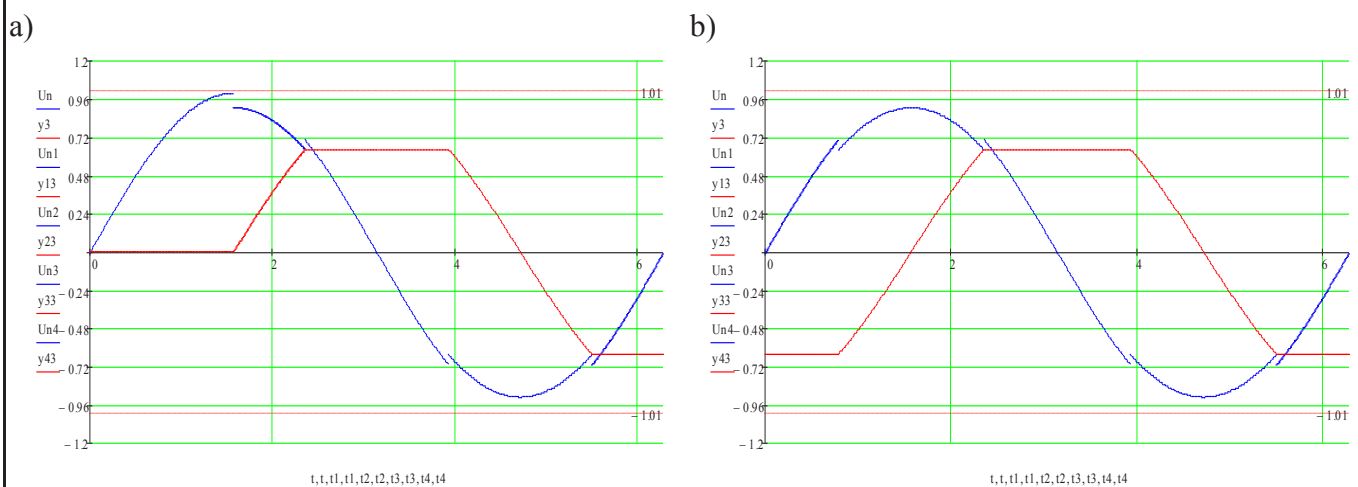


Рис. 11. Рабочие режимы регулятора включения с РЗ в зоне РЗ – ВО: а – режим начинается с угла 90° ; б – второй период заданного угла коммутации

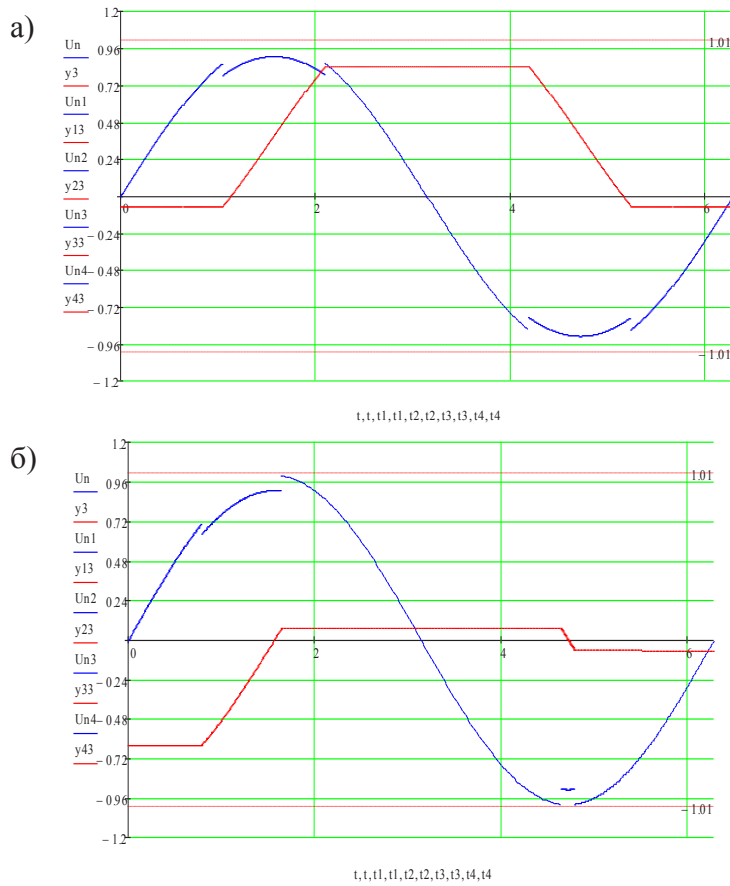


Рис. 12. Рабочие режимы регулятора включения с P3 в зоне P3 – ВО: а – изменение угла коммутации; б – изменение угла коммутации с четвертьпериодным запаздыванием

Этого же эффекта можно добиться, если углы регулирования $\alpha 1$ и $\beta 1$ формировать симметрично магнитному потоку (см. рис. 13), а не входному напряжению, как в рассматриваемых способах управления. Изменяя величину и направление отклонения Δu измеренного напряжения нагрузки по отношению к опорному напряжению от нуля до половины размаха пилообразного напряжения, углы регулирования будут соответственно изменяться для $\alpha 1$ от 90° до 270° , для $\beta 1$ – от 270° до 90° .

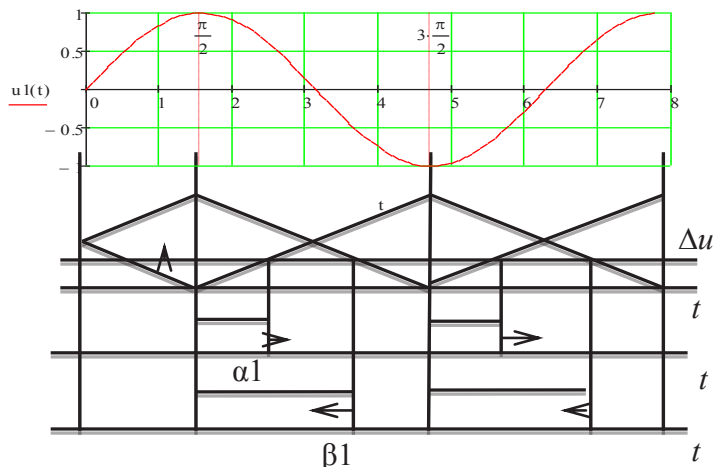


Рис. 13. Формирование углов регулирования симметрично магнитному потоку

На рис. 14 показана работа регулятора в зоне ВО – РЗ для трёх углов способа, упомянутого в авторском свидетельстве [3]; на рис. 15 – в зоне РЗ – ВД и на рис. 16 – в зоне РЗ – ВО способа, описанного в авторском свидетельстве [1].

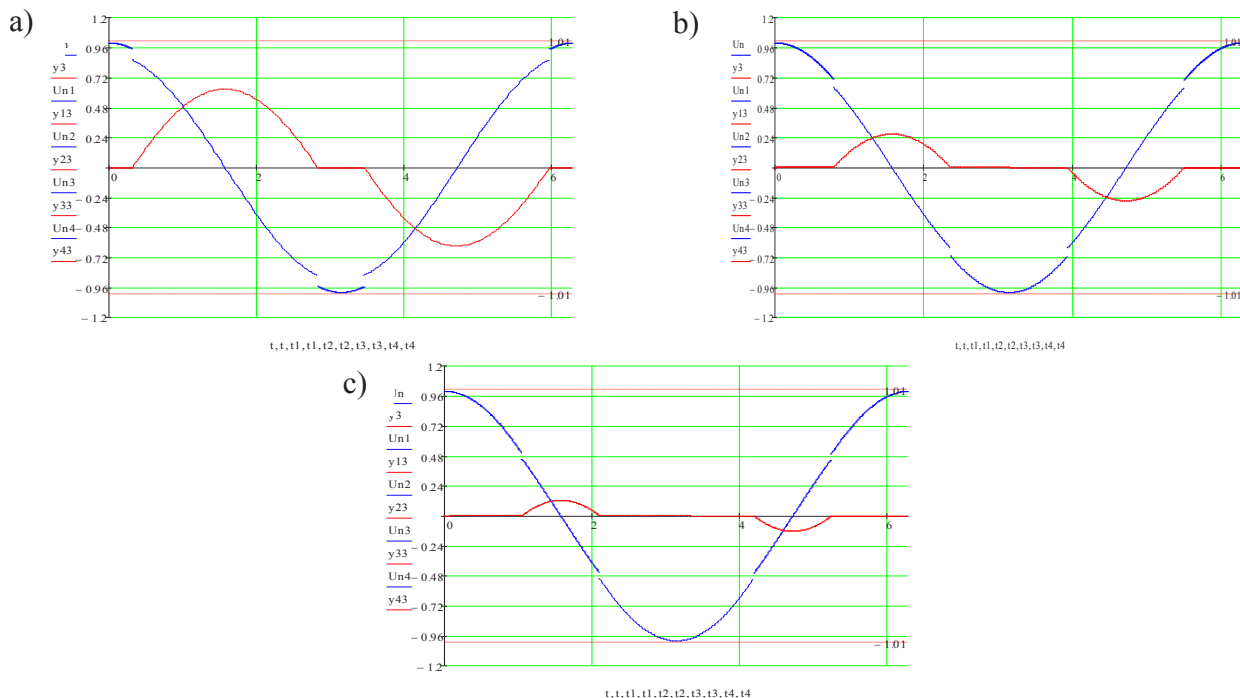


Рис. 14. Иллюстрация работы регулятора в зоне ВО – РЗ с управлением симметрично магнитному потоку: а – работа с начальным углом; б – иллюстрация изменений при уменьшении угла регулирования; с – работа с малым углом регулирования

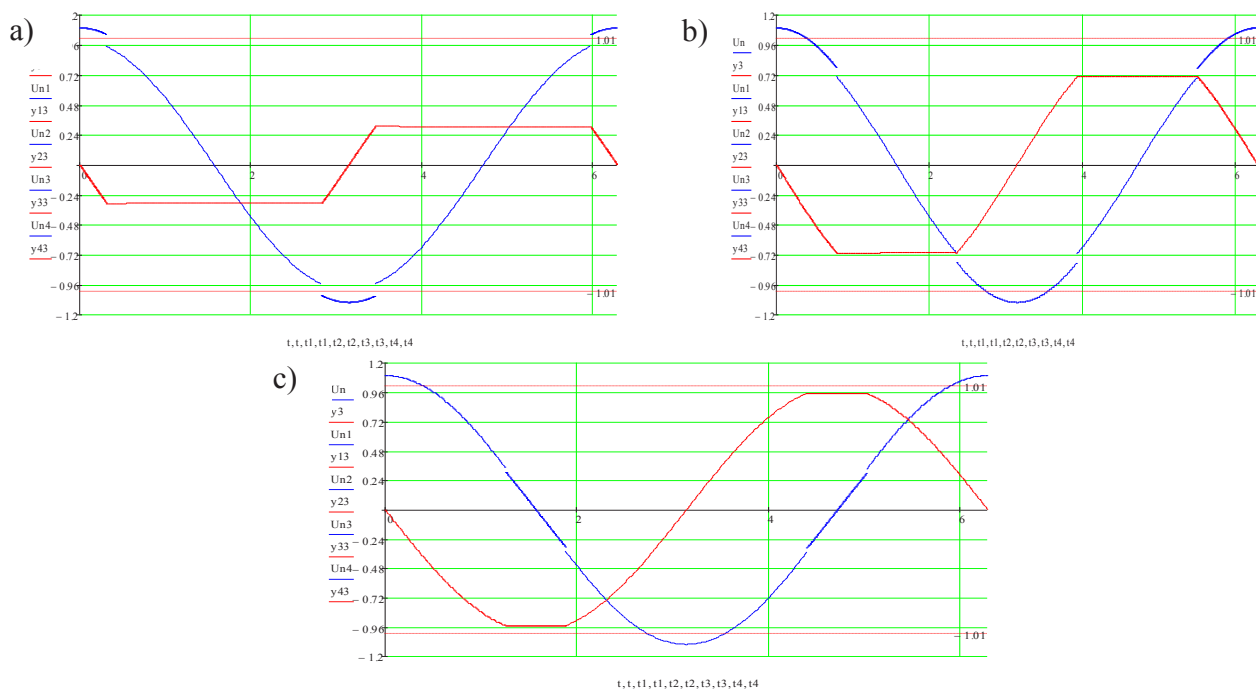


Рис. 15. Иллюстрация работы регулятора в зоне РЗ – ВД с управлением симметрично магнитному потоку: а – работа с начальным углом; б – иллюстрация изменений при уменьшении угла регулирования; с – работа с малым углом регулирования

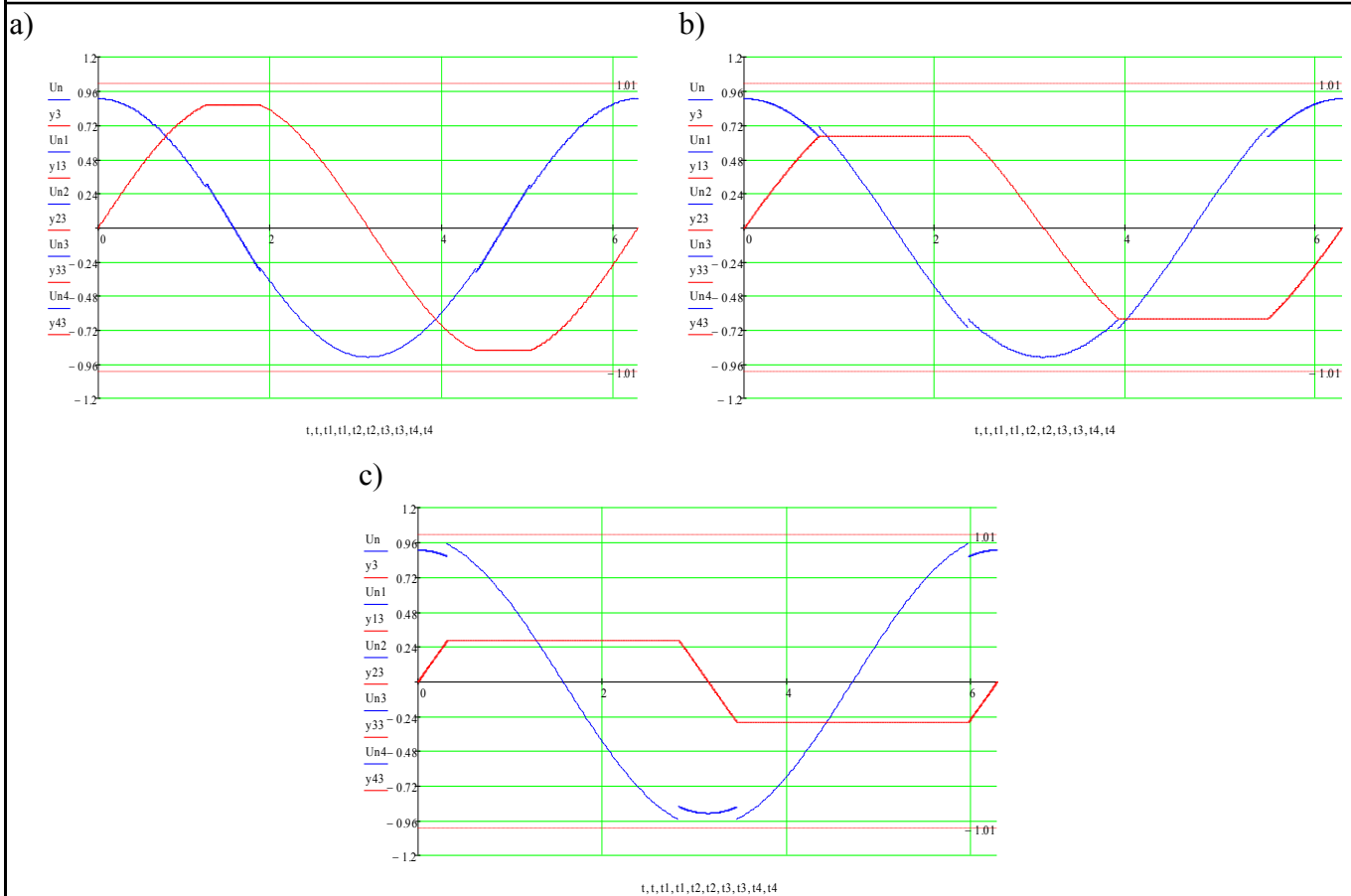


Рис. 16. Иллюстрация работы регулятора в зоне РЗ – ВО с управлением симметрично магнитному потоку: а – работа с малым углом; б – иллюстрация изменений при увеличении угла регулирования; с – работа с большим углом регулирования

На представленных рисунках видно, что при изменении углов регулирования магнитный поток (кривая без скачков) симметричен относительно оси времени и намагничивания не происходит.

Таким образом, математическое моделирование динамических режимов регуляторов переменного напряжения с вольтодобавочным каналом на основе дифференциальных уравнений, решаемых методом Рунге – Кутты, позволило решить проблемы намагничивания ВТ, исключить насыщение стали, включения регуляторов к сети, а также позволило проанализировать влияние характеристики намагничивания, углов включения и характеристики нагрузок на процессы включения и регулирования.

ЛИТЕРАТУРА

1. А. с. 589683 СССР. Способ управления регулятором переменного напряжения с вольтодобавочным каналом / А. В. Кобзев, А. Ф. Сочелев, Г. Я. Михальченко; заявл. 01.04.1976; опубл. 25.01.1978. Бюл. № 3. – 2 с.
2. А. с. 930529 СССР МПК. Регулятор переменного напряжения и способ его управления / А. В. Кобзев, А. Ф. Сочелев, Г. А. Шадрин; заявл. 06.08.1978; опубл. 23.05.1982. Бюл. № 19. – 6 с.
3. А. с. 1121768 СССР МПК Н 02 Р 13/16. Способ управления регулятором переменного напряжения с вольтодобавочным каналом / А. Ф. Сочелев; заявл. 03.11.1982; опубл. 30.10.1984. Бюл. № 40. – 3 с.
4. Сочелев, А. Ф. Разработка и исследование регулирующих органов стабилизаторов напряжения распределительных сетей: автореф. дис. ... канд. техн. наук / Анатолий Фёдорович Сочелев. – Горький, 1981. – 16 с.