Степанов Анатолий Владимирович

ОЦЕНКА ПОТЕРЬ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ В ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЯХ СИНУСОИДАЛЬНОГО ТОКА ПРИ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССАХ

В статье рассматривается задача определения потерь электрической энергии в линейных электрических цепях при переходных процессах. Переходные процессы в электрических цепях возникают при воздействии различных возмущений. Наиболее опасными в электрических цепях являются короткие замыкания, которые могут приводить к большим потерям электрической энергии и разрушительным последствиям. На основе теоретических исследований получены оценки потери электрической энергии для различного характера переходных процессов: апериодического и колебательного. С использованием возможностей расширения Simulink пакета MATLAB моделируется короткое замыкание на шинах синхронного генератора, работающего на линию передач 525 кВ. Результаты моделирования подтверждают возможность использования предлагаемой методики для оценки потерь электрической энергии при переходных процессах.

Адрес статьи: www.gramota.net/materials/1/2015/12/35.html

Статья опубликована в авторской редакции и отражает точку зрения автора(ов) по рассматриваемому вопросу.

Источник

Альманах современной науки и образования

Тамбов: Грамота, 2015. № 12 (102). С. 140-144. ISSN 1993-5552.

Адрес журнала: www.gramota.net/editions/1.html

Содержание данного номера журнала: www.gramota.net/materials/1/2015/12/

© Издательство "Грамота"

Информация о возможности публикации статей в журнале размещена на Интернет сайте издательства: www.gramota.net

Вопросы, связанные с публикациями научных материалов, редакция просит направлять на адрес: almanac@gramota.net

УДК 621.3.01
Технические науки

В статье рассматривается задача определения потерь электрической энергии в линейных электрических цепях при переходных процессах. Переходные процессы в электрических цепях возникают при воздействии различных возмущений. Наиболее опасными в электрических цепях являются короткие замыкания, которые могут приводить к большим потерям электрической энергии и разрушительным последствиям. На основе теоретических исследований получены оценки потери электрической энергии для различного характера переходных процессов: апериодического и колебательного. С использованием возможностей расширения Simulink пакета MATLAB моделируется короткое замыкание на шинах синхронного генератора, работающего на линию передач 525 кВ. Результаты моделирования подтверждают возможность использования предлагаемой методики для оценки потерь электрической энергии при переходных процессах.

Ключевые слова и фразы: электрические цепи; переходные процессы; потери электрической энергии; синхронный генератор; короткое замыкание.

Степанов Анатолий Владимирович, д.т.н.
Московский государственный технический университет имени Н. Э. Баумана
stepanov.bmstu@gmail.com

ОЦЕНКА ПОТЕРЬ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ В ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЯХ СИНУСОИДАЛЬНОГО ТОКА ПРИ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССАХ©

Введение

В электротехнике широкое распространение получили линейные электрические цепи синусоидального тока [1; 3; 5]. Трехфазные цепи синусоидального тока используются при генерации, передаче и преобразовании электрической энергии в электроэнергетике. Лучше всего изучены установившиеся режимы в трехфазных электрических цепях [2; 4], в которых разработаны математические модели и методы расчета. В электроэнергетике установившийся режим является режимом синусоидального тока фиксированной частоты, при котором токи и напряжения электрической цепи описываются амплитудой и фазой. Наряду с изучением установившихся режимов, практический интерес представляет исследование переходных процессов под действием различных возмущений [5]. Под переходным процессом обычно понимают электромагнитный процесс перехода от одного установившегося режима к другому [1; 3]. Переходные процессы вызываются управляющими воздействиями оперативного персонала, включениями и отключениями нагрузок и генерирующих мощностей, а также аварийными процессами, вызванными одно-, двух-, трехфазными короткими замыканиями. Длительность переходных процессов может быть различна: обычно составляет десятые, сотые доли секунды, а в случае электромеханических процессов – секунды, реже десятки секунд. Изучение переходных процессов имеет важное значение, поскольку позволяет определить недопустимые увеличения напряжений и токов в цепи, оценить максимальные токи при коротких замыканиях, исследовать устойчивость электроэнергетической системы при различных возмущениях. Наиболее опасными для нормального функционирования электрической цепи синусоидального тока являются короткие замыкания (КЗ) [2], которые могут вызвать аварийный процесс, длительное нарушение работы различных устройств и систем и большие потери мощности. В электроэнергетических системах, в силу их особенностей, происходит непрерывный поток возмущений, подключаются и отключаются нагрузки, переходные процессы в них происходят постоянно. При анализе установившихся режимов исследуются вопросы баланса мощности, запаса статической устойчивости, запаса по напряжению в узле нагрузки, определения предельных по устойчивости режимов и т.д. При анализе переходных процессов в трехфазных электрических цепях основное внимание уделяется исследованию динамической устойчивости системы [Там же]. В то же время потери электрической энергии при переходных процессах для различных возмущений, особенно при КЗ, исследованы недостаточно. Согласно правилам технической эксплуатации, длительность переходных процессов в трехфазных электрических сетях при КЗ не должна превышать 0,08-0,14 с. Несмотря на небольшую длительность переходных процессов, они могут приводить к существенным потерям электрической энергии и разрушительным последствиям. Поэтому изучение потерь электрической энергии при переходных процессах, вызванных различными возмущениями в электрических цепях синусоидального тока, – актуально и представляет практический интерес.

1. Вычисление электрической энергии в электрических цепях синусоидального тока при переходных процессах

Рассмотрим передачу электрической энергии от источника к приемнику при синусоидальном источнике напряжения. Упрощенная схема передачи электрической энергии от источника в нагрузку включает

© Степанов А. В., 2015

синусоидальный источник напряжения, повышающий и понижающий трансформатор, линию передач, потребителя. Заменяя эти элементы эквивалентными схемами замещения, получаем линейную электрическую цепь, исследование переходных процессов в которой можно проводить известными методами: классическим, операторным, методом интегралов наложения. Переходный процесс в таких цепях может иметь апериодический или колебательный характер. Переходный процесс возникает при включении и отключении генераторов, потребителей, при однофазном или многофазном КЗ. При КЗ производят расчет апериодической и периодической составляющих тока короткого замыкания для эквивалентной схемы, составленной в точке короткого замыкания. В общем случае ток после действия возмущения можно представить в виде вынужденной и свободной составляющих. При синусоидальном источнике $e(t) = E_m\sin(\omega_c t)$ вынужденная составляющая тока определяется амплитудой и фазой и может быть записана в виде $i(t) = I_m\sin(\omega_c t - \varphi)$. Свободная составляющая, если переходный процесс имеет апериодический характер, определяется как сумма апериодических составляющих с соответствующими эквивалентными постоянными времени:

$$i_а(t) = I_{m1}e^{-\frac{t}{\tau_1}} + I_{m2}e^{-\frac{t}{\tau_2}} + \cdots + I_{mn}e^{-\frac{t}{\tau_n}}, \quad (1)$$

где I_{mk} – начальное значение k-ой апериодической составляющей тока; τ_k – постоянная времени затухания k-ой апериодической составляющей тока.

Если исследуется переходный процесс при коротком замыкании, то КЗ может разделить схему на независимые части. Упрощенно постоянные времени для независимых частей схемы, которые представляются эквивалентными схемами замещения, можно вычислить по формуле

$$\tau_k = \frac{\sqrt{Z_k^2 - R_k^2}}{\omega_c R_k}, \text{ при } \mathrm{Im}(\dot{Z}_k) > 0, \ \tau_k = \frac{R_k}{\omega_c\sqrt{Z_k^2 - R_k^2}}, \text{ при } \mathrm{Im}(\dot{Z}_k) < 0,$$

где z_k – полное сопротивление и R_k – активное сопротивление для независимой части схемы.

Тогда мгновенная электрическая мощность при апериодическом переходном процессе с учетом (1) будет равна сумме установившейся и апериодической составляющих

$$p_э(t) = p_s(t) + p_a(t), \quad (2)$$

$$p_s(t) = E_m I_m sin(\omega_c t) sin(\omega_c t - \varphi),$$

$$p_a(t) = \sum_{k=1}^{n} E_m I_{mk} e^{-\frac{t}{\tau_k}} sin(\omega_c t).$$

Время переходного процесса определяется по наибольшей постоянной времени

$$\tau_{max} = \max_k \tau_k$$

и обычно принимается равным $t_{пер} = (3 \div 5)\tau_{max}$.

Интегрируя мгновенную мощность $p_э(t)$ (2) на интервале $t \in [0, t_{пер}]$, получаем электрическую энергию, потребляемую при апериодическом переходном процессе:

$$W_э = \int_0^{t_{пер}} p_э(t)\,dt = W_s + W_a, \quad (3)$$

$$\text{где } W_s = \frac{E_m I_m}{2}\cos\varphi\left(t_{пер} - \frac{\sin(2\omega_c t_{пер})}{2\omega_c}\right) - \frac{E_m I_m}{2\omega_c}\sin\varphi\left(1 - \cos(2\omega_c t_{пер})\right), \quad (4)$$

$$W_a = \sum_{k=1}^{n} \frac{E_m I_{mk}}{\frac{1}{\tau_k^2} + \omega_c^2}\left(\omega_c - e^{-\frac{t}{\tau_k}}\left(\frac{1}{\tau_k}\sin(\omega_c t_{пер}) + \omega_c\cos(\omega_c t_{пер})\right)\right) \approx$$

$$\approx \sum_{k=1}^{n} \frac{E_m I_{mk}}{\frac{1}{\tau_k^2} + \omega_c^2}\omega_c. \quad (5)$$

Для случая колебательного процесса свободная составляющая тока имеет следующий вид:

$$i_к(t) = \sum_{k=1}^{n}\left(I_{ck}e^{-\frac{t}{\tau_k}}\cos(\omega_k t) + I_{sk}e^{-\frac{t}{\tau_k}}\sin(\omega_k t)\right). \quad (6)$$

Мгновенная мощность для свободной колебательной составляющей тока (6) в этом случае равна

$$p_к(t) = \sum_{k=1}^{n} E_m\left(I_{ck}e^{-\frac{t}{\tau_k}}\cos(\omega_k t) + I_{sk}e^{-\frac{t}{\tau_k}}\sin(\omega_k t)\right). \quad (7)$$

Интегрируя (7), получаем электрическую энергию для свободной составляющей тока:

$$W_к = \int_0^{t_{пер}} p_к(t)\,dt \approx$$

$$\approx \sum_{k=1}^{n}\left\{\frac{E_m I_{ck}}{2}\left[\frac{\tau_k^2(\omega_c - \omega_k)}{1 + \tau_k^2(\omega_c - \omega_л)^2} + \frac{\tau_k^2(\omega_c + \omega_k)}{1 + \tau_k^2(\omega_c + \omega_л)^2}\right] + \right.$$

$$\left. + \frac{E_m I_{sk}}{2}\left[\frac{\tau_k^2(\omega_c - \omega_k)}{1 + \tau_k^2(\omega_c - \omega_л)^2} + \frac{\tau_k^2(\omega_c + \omega_k)}{1 + \tau_k^2(\omega_c + \omega_л)^2}\right]\right\}. \quad (8)$$

Тогда полную электрическую энергию получим, суммируя установившуюся (4) и колебательную (8) составляющие: $W_э = W_s + W_к$.

2. Моделирование переходного процесса и оценка потерь электрической энергии при трехфазном КЗ на шинах синхронного генератора

Рассмотрим работу вертикального синхронного генератора зонтичного типа СВФ 1285/275-42УХЛ4 номинальной мощностью 640 МВт на линию передач 525 кВ. Синхронный генератор подключен к трансформаторной подстанции. Подстанция состоит из группы 3-х трансформаторов ОРНЦ-533000/500. Обмотки низкого напряжения расщеплены на две по 50% мощности каждая. Три обмотки высокого напряжения трансформаторов соединены по схеме «звезда», а три обмотки низкого напряжения – по схеме «треугольник». Параметры синхронного генератора типа СВФ 1285/275-42 УХЛ4 [7]:

- полная номинальная мощность $S_н$ = 711 МВА;
- номинальное междуфазное напряжение $U_н$ =15,75 кВ;
- номинальный коэффициент мощности cosφ = 0,9;
- переходное сопротивление статора по продольной оси (о.е.) $x_d^{'}$ = 0,43;
- активное сопротивление обмотки статора r_s = 0,0034 Ом.

Параметры трансформатора ОРНЦ-533000/500:

- полная номинальная мощность $S_н$ = 711 МВА;
- номинальное напряжение обмотки высокого напряжения $U_{вн}$ = 525/√3 кВ;
- номинальное напряжение обмотки низкого напряжения $U_{нн}$ =15,75 кВ;
- активная мощность короткого замыкания $\Delta P_к$ = 1260 кВт;
- напряжение короткого замыкания $u_к$ = 13,5%;
- активная мощность холостого хода $\Delta P_х$ = 500 кВт;
- ток холостого хода $I_х$ = 0,35%.

Переходный процесс синхронного генератора мощностью 6400 МВт, работающего на линию передач 525 кВ, исследовался при воздействии возмущений в виде трехфазного КЗ на шинах генератора. Была составлена эквивалентная схема замещения и рассчитаны ее параметры. Параметры схемы замещения однофазного трансформатора ОРНЦ-533000/500, рассчитанные по паспортным данным [6] и приведенные к обмотке высокого напряжения, равны: $r_к$ = 0,4074 Ом; $x_к$ = 23,27 Ом; $r_х$ = 10780 Ом; $x_х$ = 56436 Ом. По этим данным были рассчитаны параметры эквивалентной схемы трехфазного трансформатора в относительной системе единиц (о.е.) [8]. Параметры обмотки высокого напряжения в о.е. равны r_1 = 0,001181; L_1 = 0,06748 (индуктивность рассеивания); $R_х$ = 62,52; $L_х$ = 333,25. Параметры для обмотки низкого напряжения в о.е. равны r_2 = 0,000393; L_2 = 0,0226. Проводилось моделирование переходных процессов при трехфазном КЗ на шинах генератора с использованием подсистемы *Simulink* пакета *MATLAB*. При моделировании использовались блоки расширения *SimPowerSystems*. Эквивалентная структурная схема в системе *MATLAB* приведена на Рис. 1.

При моделировании трехфазного КЗ сопротивление шунта было равным 0,05 Ом. После КЗ генератор не был отключен от системы. При длительных КЗ на шинах генератора происходило нарушение динамической устойчивости генератора и синхронной работы генератора с системой. После КЗ резко возрастал ток статора. При КЗ на шинах генератора напряжение в точке КЗ некоторое время (≈0,4 с) оставалось примерно равным номинальному, после чего напряжение снизилось практически до нуля. Дальнейшее возрастание тока обусловлено неотключенной частью системы, состоящей из трансформатора, подключённого к линии передач 500 кВ. Поэтому оценку выделяемой электрической энергии при переходном процессе будем производить на интервале 0,4 с. На Рис. 2, 3 приведены результаты моделирования: напряжение на фазе С генератора, ток фазы С генератора.

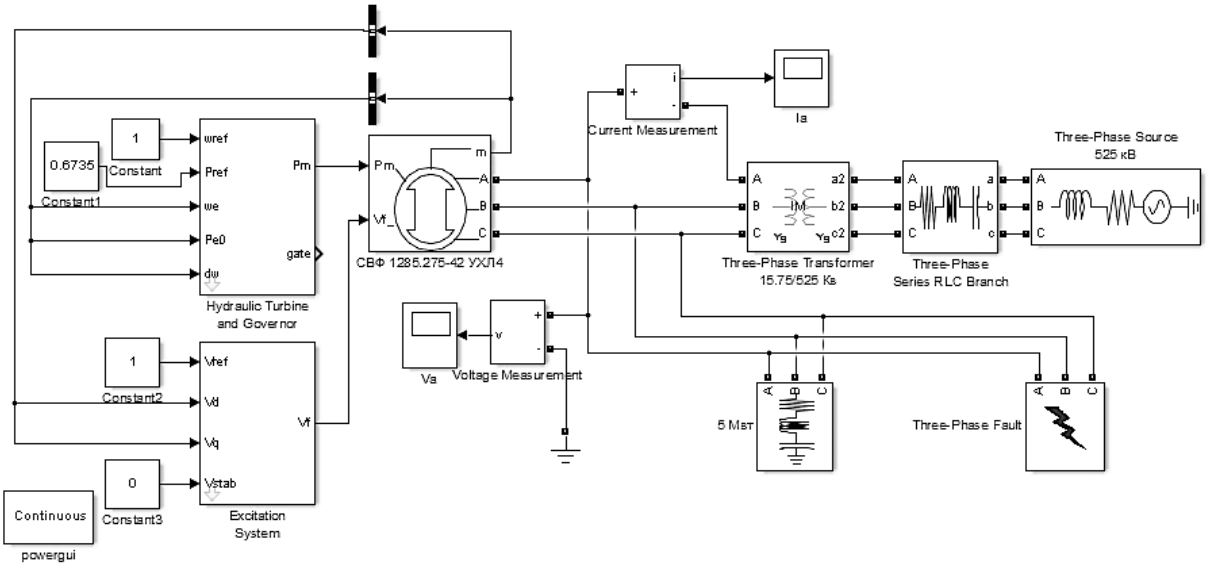

Рис. 1. *Эквивалентная структурная схема генератора, работающего на линию передач 525 кВ*

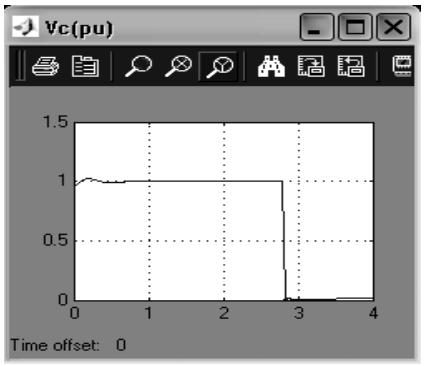

Рис. 2. *Напряжение на обмотке статора фазы С (о.е.)*

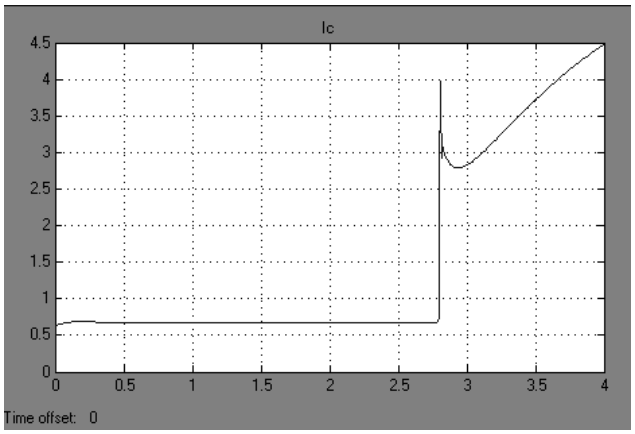

Рис. 3. *Ток обмотки статора фазы С (о.е.)*

По результатам моделирования была определена средняя мощность, выделяемая в шунте, подключенном к шине генератора. Средняя мощность определялась после КЗ на интервале $\Delta t = 0{,}4$ с. Эта средняя мощность приближенно равна $P_{ср} \approx 5{,}5 \cdot 10^8$ Вт. Тогда энергия, выделяемая при КЗ, соответственно, будет равна

$W_ш = 3P_{ср}\Delta t = 3 \cdot 5{,}5 \cdot 10^8 \cdot 0{,}4 = 660$ МДж.

Постоянная времени апериодической составляющей фазного тока статора приближенно равна $\tau \approx 0{,}381$ с. Энергия, вычисленная с учетом переходного процесса по формулам (3)-(5), равна $W_ш = 632$ МДж. Полученные значения энергии отличаются друг от друга не более чем на 5%. Поэтому предлагаемая методика вполне приемлема для оценочных расчетов выделяемой энергии при переходных процессах.

Заключение

Предложена методика оценки энергии, выделяемой в электрической цепи при переходных процессах. Исследования переходного процесса позволили получить приближенные оценки выделяемой электрической энергии при КЗ на шинах синхронного генератора. Выделяемая энергия весьма существенна, что может вызвать нарушение динамической устойчивости электроэнергетической системы, а также крупные аварии с необратимыми последствиями, как это произошло при аварии на Саяно-Шушенской ГЭС. Оценка энергии, выделяемой при переходных процессах при различных возмущениях, позволит более обоснованно производить настройку системы противоаварийной автоматики и повысить надежность функционирования синхронных генераторов в энергосистеме.

Список литературы

1. **Бессонов Л. А.** Теоретические основы электротехники. Электрические цепи: учебник. 11-е изд., перераб. и доп. М.: Гардарики, 2007. 701 с.
2. **Гуревич Ю. Е., Либова Л. В., Окин А. А.** Расчеты устойчивости и противоаварийной автоматики в энергосистемах. М.: Энергоатомиздат, 1990. 390 с.
3. **Демирчян К. С., Нейман Л. Р., Коровкин Н. В., Чечурин В. Л.** Теоретические основы электротехники: учебник для вузов: в 3-х т. СПб.: Питер, 2003. Т. 2. 576 с.
4. **Идельчик В. И.** Расчеты и оптимизация режимов электрических сетей и систем. М.: Энергоатомиздат, 1988. 287 с.
5. **Касаткин А. С., Немцов М. В.** Электротехника: учебник для вузов. 7-е изд., стер. М.: Высш. шк., 2003. 542 с.
6. **Справочник по проектированию электрических сетей** / под ред. Д. Л. Файбисовича. М.: Изд-во НЦ ЭНАС, 2006. 320 с.
7. **Справочник по электрическим машинам**: в 2-х т. / под общ. ред. И. П. Копылова, Б. Н. Клочкова. М.: Энергоатомиздат, 1988. Т. 1. 456 с.
8. **Строев В. А., Шульженко С. В.** Математическое моделирование элементов электрических систем: курс лекций. М.: Издательство МЭИ, 2002. 56 с.

ASSESSMENT OF ELECTRIC ENERGY LOSSES IN ELECTRICAL CIRCUITS OF SINUSOIDAL CURRENT IN TRANSIENT PROCESSES

Stepanov Anatolii Vladimirovich, Doctor in Technical Sciences
Bauman Moscow State Technical University
stepanov.bmstu@gmail.com

The article discusses the problem of determining electric energy losses in linear electrical circuits in transient processes. Transient processes in electrical circuits occur under the influence of various disturbances. The most dangerous processes in electrical circuits are short circuits, which can lead to the large losses of electric energy and destructive consequences. On the basis of theoretical studies the author obtains the assessment of electric energy losses in relation to transient processes of various nature: aperiodic and oscillatory ones. Using the possibilities of the extension of *MATLAB* package, *Simulink*, the author simulates short circuit on bars of synchronous generator operating for 525 kV transmission line. The simulation results confirm the possibility of using the proposed methodology for the assessment of electric energy losses in transient processes.

Key words and phrases: electrical circuits; transient processes; electric energy losses; synchronous generator; short circuit.

УДК 342.4
Юридические науки

В статье проанализированы теоретические подходы к определению понятия «конституционализм», продемонстрирована трансформация взглядов на сущностные характеристики данного явления, на основе анализа зарубежного опыта сделан вывод о возрастании значения демократического аспекта конституционализма в конфликтные периоды. Автор акцентирует внимание на имеющихся в Российской Федерации проблемах воплощения теоретических положений концепции «демократического конституционализма».

Ключевые слова и фразы: конституционализм; конституционный кризис; конституционный конфликт; Конституция; конституционная реформа.

Тетерин Александр Викторович
Северный (Арктический) федеральный университет имени М. В. Ломоносова
alexander.teterin@yandex.ru

ОСУЩЕСТВЛЕНИЕ ПРОФИЛАКТИКИ КОНСТИТУЦИОННОГО КРИЗИСА В СВЕТЕ НОВЫХ ТЕОРИЙ КОНСТИТУЦИОНАЛИЗМА©

Понятие «конституционализм» является одним из самых многозначных в российской науке конституционного права.

Наиболее часто авторы обращают внимание на следующие аспекты рассматриваемого понятия.

Конституционализм предполагает факт наличия Конституции, ее верховенство и активное влияние на жизнь страны, конституционную регламентацию государственного устройства, а также конституционное признание прав и свобод личности, правовой характер взаимоотношений гражданина и государства. Конституционализм – это также система правовых ценностей, философия юридического мировоззрения [2, с. 32].

По мнению В. С. Нерсесянца, конституционализм представляет собой идеологию уважения, защиты Конституции, является общегосударственной идеологией правового государства [4, с. 6]. С данной точкой зрения солидарен К. В. Арановский, который указывает, что образование конституционного режима происходит не столько в силу провозглашения Основного Закона, сколько в силу формирования образа жизни, жизненной философии [1, с. 41].

А. Г. Пархоменко рассматривает конституционализм как процесс, движение к правовому государству, в котором Конституция закрепляет основные принципы конституционного строя [8, с. 17].

Конституционализм определяется и как состояние реально действующей Конституции, предполагающее ограничение государственной власти, приверженность населения базовым ценностям, закрепленным Конституцией, и способность граждан полноценно реализовывать конституционные права [3, с. 14].

Обозначенные выше аспекты конституционализма отражают комплексный, разноплановый характер рассматриваемой категории, однако вовсе не исчерпывают ее содержание, поскольку с развитием юридической науки, изменением политических и социальных реалий изменяется и содержательное наполнение теории конституционализма.

© Тетерин А. В., 2015